

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE MINAS GERAIS  
Programa de Pós-Graduação em Informática

Matheus Miranda de Queiroz

**MODELO MULTICAMADAS DE *HANDOVER*  
HORIZONTAL EM REDES LTE**

Belo Horizonte

2015

Matheus Miranda de Queiroz

**MODELO MULTICAMADAS DE *HANDOVER*  
HORIZONTAL EM REDES LTE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Informática da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Informática.

Orientador: Profa. Dra. Fátima  
de Lima Procópio  
Duarte-Figueiredo

Belo Horizonte

2015

## FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Biblioteca da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

Q3m Queiroz, Matheus Miranda de  
Modelo multicamadas de handover horizontal em redes LTE / Matheus  
Miranda de Queiroz. Belo Horizonte, 2015.  
89f. : il.

Orientadora: Fátima de Lima Procópio Duarte-Figueiredo  
Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais.  
Programa de Pós-Graduação em Informática.

1. Protocolo de aplicação sem fio (Protocolo de rede de computador). 2. Sistemas de comunicação móvel. 3. Internet - Aspectos sociais. 4. Serviços de informação. 5. Arquitetura de redes de computador. I. Mini, Raquel Aparecida de Freitas. II. Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em Informática. III. Título.

SIB PUC MINAS

CDU: 681.3.01:621.39

Matheus Miranda de Queiroz

**MODELO MULTICAMADAS DE *HANDOVER*  
HORIZONTAL EM REDES LTE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Informática da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Informática.

---

Profa. Dra. Fátima de Lima Procópio  
Duarte-Figueiredo – PUC Minas  
(Orientador)

---

Profa. Dra. Luciana Bezerra Arantes –  
Université Pierre et Marie Curie (Banca  
Examinadora)

---

Profa. Dra. Raquel Aparecida de Freitas  
Mini – PUC Minas (Banca Examinadora)

Belo Horizonte, 24 de agosto de 2015.

*Dedico este trabalho a meu pai, que  
infelizmente não está conosco para ver  
sua conclusão.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço imensamente a todos que me aconselharam, conversaram comigo e tornaram esse momento possível. Vocês são de uma importância inexpressável em minha vida.

Agradeço à CAPES pela concessão de bolsa integral durante o curso.

*“I was born not knowing and have had only a  
little time to change that here and there.”*

*Richard Feynman*

## RESUMO

Este trabalho apresenta um modelo multicamadas para *handover* horizontal suave em redes LTE. O modelo, baseado em MIP, SIP e MIH, teve como objetivo garantir que usuários presentes em um cenário de redes LTE pudessem se movimentar livremente pelo cenário sem que suas aplicações em andamento tivessem perda de conectividade e qualidade. Para testar o modelo, um cenário de simulação foi desenvolvido e executado no simulador NS-3. No cenário, usuários executavam aplicações de diferentes classes de QoS para testar o funcionamento do modelo em situações diversas de uso. Métricas como tempo de *handover*, atraso médio, largura de banda média e *jitter* médio foram coletadas para avaliar se o modelo conseguiu de fato garantir o *handover*, assegurar que as aplicações em andamento não sofressem perda de conectividade e que estivessem em conformidade com os padrões de qualidade de serviço estipulados pelo 3GPP. Resultados mostraram que o *handover* foi garantido para todos os casos, e que nenhuma das aplicações em execução, no cenário de simulação, teve seu fluxo de dados interrompido ou ficou abaixo dos padrões de qualidade exigidos pelo 3GPP para suas respectivas classes QoS.

Palavras-chave: *Handover* horizontal suave. Redes LTE. QoS. *Handover* multicamada.

## ABSTRACT

This work presented a multilayer soft horizontal handover model for LTE networks. Based on the MIP and SIP protocols and the MIH standard, the model sought to allow users in an LTE network scenario to have free and seamless mobility throughout the environment while allowing existing applications to keep their data flows intact, with no loss of connectivity and quality whatsoever. To test the proposed model, a simulation scenario was conceived and tested using the NS-3 network simulator. In the simulation scenario, users ran applications belonging to different 3GPP QoS classes to submit the model to a diverse set of tests, reflecting various use situations. Metrics such as handover time, average delay, average jitter and average bandwidth were collected to assess whether the model could actually guarantee a seamless soft horizontal handover, to ensure ongoing applications suffered no connectivity losses, and to ensure that minimum quality standards stipulated by the 3GPP were upheld. Results showed that the handover was correctly executed for all tested cases, and none of the user applications in the simulated scenario had data flow interruptions or fell below the minimum quality requirements defined by 3GPP for their respective QoS classes.

Keywords: Soft horizontal handover. LTE networks. QoS. Multilayer handover.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Arquitetura LTE .....	31
FIGURA 2 – Arquitetura E-UTRAN.....	31
FIGURA 3 – Protocolos do plano de usuário .....	33
FIGURA 4 – Protocolos do plano de controle .....	34
FIGURA 5 – Arquitetura MIP .....	36
FIGURA 6 – Arquitetura SIP .....	38
FIGURA 7 – Arquitetura MIH .....	40
FIGURA 8 – Modelo de Santos et al. ....	43
FIGURA 9 – Modelo de Atourassap .....	46
FIGURA 10 – Arquitetura Básica de redes LTE no NS-3 .....	60
FIGURA 11 – Cenário de Simulação .....	60
FIGURA 12 – Tempos médios de <i>handover</i> para cada nó e tempo médio total .....	67
FIGURA 13 – Atraso médio para a aplicação pertencente à classe <i>Conversational</i> ..	70
FIGURA 14 – <i>Jitter</i> médio para a aplicação pertencente à classe <i>Conversational</i> ...	70
FIGURA 15 – Largura de banda média para a aplicação pertencente à classe <i>Conversational</i> .....	71
FIGURA 16 – Atraso médio para a aplicação pertencente à classe <i>Background</i> .....	72
FIGURA 17 – <i>Jitter</i> médio para a aplicação pertencente à classe <i>Background</i> .....	73
FIGURA 18 – Largura de banda média para a aplicação pertencente à classe <i>Background</i> .....	74
FIGURA 19 – Teste de largura de banda na rede LTE da operadora TIM .....	75
FIGURA 20 – Atraso médio para a aplicação pertencente à classe <i>Streaming</i> .....	77
FIGURA 21 – <i>Jitter</i> médio para a aplicação pertencente à classe <i>Streaming</i> .....	77

FIGURA 22 – Largura de banda média para a aplicação pertencente à classe <i>Streaming</i>	78
FIGURA 23 – Atraso médio para a aplicação pertencente à classe <i>Interactive</i> . . . . .	79
FIGURA 24 – <i>Jitter</i> médio para a aplicação pertencente à classe <i>Interactive</i> . . . . .	80
FIGURA 25 – Largura de banda média para a aplicação pertencente à classe <i>Interactive</i>	81
FIGURA 26 – Largura de banda média para todas as classes QoS avaliadas . . . . .	82
FIGURA 27 – Atraso médio para todas as classes QoS avaliadas . . . . .	82
FIGURA 28 – <i>Jitter</i> médio para todas as classes QoS avaliadas . . . . .	83

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Sumário de trabalhos relacionados .....	57
TABELA 2 – Parâmetros de configuração usados nas simulações .....	62

## LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 – Tipos de mensagens SIP e suas funções .....	38
QUADRO 2 – Respostas SIP .....	39
QUADRO 3 – Configurações do computador usado para executar as simulações ...	61
QUADRO 4 – Eventos MIH presentes nas simulações .....	64
QUADRO 5 – Tipos de portadoras EPS presentes nas redes LTE e suas características de desempenho. ....	65
QUADRO 6 – Mapeamento das portadoras EPS para as antigas classes QoS das redes de terceira geração. ....	65
QUADRO 7 – Tipos de portadoras EPS presentes nas redes LTE e suas características de desempenho. ....	69

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

**3GPP** *3rd Generation Partnership Project*

**AD** *Agent Discovery*

**AMPS** *Advanced Mobile Phone System*

**CN** *Correspondent Node*

**CoA** *Care-of Address*

**DL** *Downlink*

**DNS** *Domain Name Service*

**E-UTRAN** *Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network*

**ENB** *Evolved Node B*

**eNodeB** *Evolved Node B*

**EPC** *Evolved Packet Core*

**EPS** *Evolved Packet System*

**ESMLC** *Enhanced Serving Mobile Location Center*

**FA** *Foreign Agent*

**FN** *Foreign Network*

**FSHO** *Fractional Soft Handover*

**FTP** *File Transfer Protocol*

**GB** *Gigabyte*

**GBR** *Guaranteed Bit Rate*

**GGSN** *Gateway GPRS Support Node*

**GMLC** *Gateway Mobile Location Center*

**GPRS** *General Packet Radio Service*

**GTP** *GPRS Tunneling Protocol*

**HA** *Home Agent*

**HN** *Home Network*

**HoA** *Home Address*

**HSPA** *High Speed Packet Access*

**HSS** *Home Subscriber Server*

**HTTP** *Hypertext Transfer Protocol*

**ICMP** *Internet Control Message Protocol*

**IEEE** *Institute of Electrical and Electronic Engineers*

**IMS** *IP Multimedia Subsystem*

**IP** *Internet Protocol*

**IPTV** *Internet Protocol Television*

**ITU** *International Telecommunications Union*

**KB** *Kilobyte*

**KTH** *Kungliga Tekniska Högskolan*

**LENA** *LTE EPC Network Simulator*

**LMA** *Local Mobility Anchor*

**LTE** *Long Term Evolution*

**MAC** *Medium Access Control*

**MB** *Megabyte*

**MCHO** *Multiple Carrier Handover*

**MDHO** *Macro Diversity Handover*

**MDM** *Movement Detection Module*

**MICS** *Media Independent Command Service*

**MIES** *Media Independent Event Service*

**MIH** *Media Independent Handover*

**MIHF** *Media Independent Handover Function*

**MIIS** *Media Independent Information Service*

**MIME** *Multipurpose Internet Mail Extensions*

**MIP** *Mobile Internet Protocol*

**MM** *Mobility Manager*

**MME** *Mobility Management Entity*

**MN** *Mobile Node*

**mSCTP** *Mobile Stream Control Transmission Protocol*

**NGBR** *Non-Guaranteed Bit Rate*

**NGN** *Next Generation Networks*

**NS2** *Network Simulator 2*

**NS3** *Network Simulator 3*

**PCRF** *Policy Control and Changing Rules Function*

**PDCP** *Packet Data Convergence Protocol*

**PGW** *Packet Data Network Gateway*

**PSTN** *Packet Switched Telephone Network*

**QCI** *QoS Class Identifier*

**QoE** *Quality of Experience*

**QoS** *Quality of Service*

**RAM** *Random Access Memory*

**RFC** *Request For Comment*

**RLC** *Radio Link Control*

**RNC** *Radio Network Control*

**RRC** *Radio Resource Control*

**RS** *Redirect Server*

**RTCP** *Real Time Control Protocol*

**RTSP** *Real Time Streaming Protocol*

**RTT** *Round Trip Time*

**SAE** *System Architecture Evolution*

**SCTP** *Stream Control Transmission Protocol*

**SGW** *Serving Gateway*

**SIP** *Session Initiation Protocol*

**SMS** *Short Message Service*

**SSHO** *Semi-Soft Handover*

**TCP** *Transmission Control Protocol*

**TFT** *Traffic Flow Template*

**TIM** *Telecom Italia Mobile*

**UA** *User Agent*

**UDP** *User Datagram Protocol*

**UE** *User Equipment*

**UL** *Uplink*

**UMTS** *Universal Mobile Telecommunication Service*

**URI** *Uniform Resource Identifier*

**URL** *Uniform Resource Locator*

**WIFI** *Wireless Fidelity*

**WIMAX** *Wireless Microwave Access*

**WLAN** *Wireless Local Area Network*

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	21
1.1	Problema .....	23
1.2	Objetivos .....	24
1.3	Justificativa .....	25
1.4	Organização da dissertação .....	25
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	27
2.1	<i>Next Generation Networks</i> .....	27
2.2	<i>Long Term Evolution (LTE)</i> .....	28
2.2.1	<i>Introdução</i> .....	28
2.2.2	<i>Arquitetura LTE</i> .....	30
2.2.3	<i>Protocolos</i> .....	33
2.3	<i>Mobile IP</i> .....	34
2.4	<i>Session Initiation Protocol</i> .....	35
2.4.1	<i>Introdução</i> .....	35
2.4.2	<i>Arquitetura SIP</i> .....	37
2.4.3	<i>Mensagens SIP</i> .....	38
2.5	<i>Media Independent Handover</i> .....	39
2.5.1	<i>Introdução</i> .....	39
3	TRABALHOS RELACIONADOS.....	43
3.1	Modelo de <i>Handover</i> Vertical Suave Entre Redes WiMAX e UMTS	43
3.2	Modelo de NGN Baseado em MIP, IEEE 802.21 e SIP para Computação Ubíqua.....	45
3.3	Trabalhos de Execução e Decisão de <i>Handover</i> .....	46
3.3.1	<i>Trabalhos Envolvendo Redes Homogêneas</i> .....	46
3.3.2	<i>Trabalhos Envolvendo Redes Heterogêneas</i> .....	50
3.3.3	<i>Trabalhos de Decisão de Handover</i> .....	52

4	METODOLOGIA .....	59
4.1	Descrição do Cenário Simulado .....	59
4.2	Configurações das Simulações .....	61
4.3	Funcionalidades MIP, SIP e MIH .....	63
4.4	Classes QoS em redes 3G e 4G .....	64
5	RESULTADOS .....	66
5.1	Tempo de <i>Handover</i> .....	66
5.2	Resultados para as classe QoS Simuladas .....	68
5.2.1	<i>Classe Conversational</i> .....	69
5.2.2	<i>Classe Background</i> .....	71
5.2.3	<i>Classe Streaming</i> .....	75
5.2.4	<i>Classe Interactive</i> .....	78
5.2.5	<i>Comparativo entre as classes</i> .....	81
6	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS .....	85
	REFERÊNCIAS .....	87



## 1 INTRODUÇÃO

As redes de computadores vêm, nos últimos anos, conquistando espaços antes inexplorados. O conceito de rede de computadores transcende a ideia de vários computadores pessoais ou servidores interligados por meio de cabos ou pontos de acesso sem fio. Sensores, dispositivos móveis, microcontroladores, câmeras e outros elementos podem compor uma rede de computadores. A tecnologia de redes de celulares evoluiu de forma a permitir uma mudança na forma como os aparelhos são usados. Quando surgiram os celulares, eles eram usados apenas para fazer ligações telefônicas com mobilidade, que era o que a rede permitia. O avanço tecnológico permitiu, por exemplo, a integração das redes de celulares com a internet e, com isso, passaram a ser ofertados para os dispositivos móveis, chamados agora de *smartphones*, uma vasta gama de novos serviços. Para que esses novos serviços sejam oferecidos com qualidade adequada, operadoras de telefonia sempre buscam melhorar a capacidade das suas redes e cada evolução significativa representa uma nova geração da tecnologia de redes de celulares.

No Brasil, o número de *smartphones* já é maior que o número de computadores pessoais (TELECOMUNICAÇÕES, 2015; INFO, 2015). Mais da metade da população brasileira possui aparelhos telefônicos capazes de se conectar à internet, cujo baixo valor de aquisição, aliado aos baixos valores dos planos de dados móveis, torna o *smartphone* a principal porta de acesso à internet para uma significativa parcela da população, sobretudo nas esferas de renda mais baixa (GOOGLE, 2015). Daí a importância das redes móveis e sua constante evolução em busca de melhorias para seus usuários. No presente momento, o mundo desenvolvido vive a era do 4G, a quarta geração de redes de celular.

A quarta geração de redes de celulares, chamada de *Long Term Evolution* (LTE) (SESIA; TOUFIK; BAKER, 2009), começou a funcionar no Brasil em dezembro de 2012. Ela tem como propósito fornecer alta largura de banda e baixos atrasos no acesso à internet por dispositivos móveis, substituindo as tecnologias UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System*) e HSPA (*High Speed Packet Access*), conhecidas como 3G. A ideia é propiciar, aos usuários, velocidades similares às aquelas alcançadas com as conexões fixas domésticas, para que possam desfrutar de serviços como *streaming* de vídeos e navegação web com alta qualidade.

Para usuários de dispositivos móveis, porém, não basta que exista uma única tecnologia de rede capaz de satisfazer sua necessidade por recursos. A cobertura de uma rede de celular, por exemplo, é limitada e os usuários não querem perda de qualidade nos seus serviços, mesmo quando estejam em movimento. Múltiplas tecnologias de acesso sem fio, como Wi-Fi (*Wireless Fidelity*) (IEEE..., 2012), exemplo de rede local sem fio (WLAN - *Wireless Local Area Network*); WiMAX (*Worldwide Interoperability*

for Microwave Access) (EKLUND et al., 2002), exemplo de rede metropolitana sem fio (WMAN - *Wireless Metropolitan Area Network*); e redes de celulares coexistem em diversos ambientes. Integrar essas redes diferentes é primordial para que um cenário ideal, em que a mobilidade do usuário não implica na perda de conexão, possa ser oferecido aos consumidores. Essa filosofia de integrar diferentes tecnologias de redes e alternar a conexão entre elas de forma transparente é o princípio das *Next Generation Networks*, ou NGN (LEE; KNIGHT, 2005).

O termo NGN se aplica, então, a uma rede de nova geração, que permite a integração de várias tecnologias distintas de rede e a formação de uma camada de abstração para o usuário, que percebe essa multiplicidade de redes integradas como uma só rede. Essa rede de nova geração permite, aos usuários, independentemente de sua mobilidade, estar sempre conectados da melhor forma para atender às necessidades dos serviços que estejam consumindo. Assim, clientes poderiam se conectar a redes diferentes para utilizar serviços diferentes. Deseja-se que todas essas redes e serviços funcionem com base no já amplamente conhecido IP (*Internet Protocol*). Os princípios básicos das NGN são continuidade, convergência de serviços, e transparência.

Para que esse cenário de ampla mobilidade exista, é fundamental que a transição entre redes que usam tecnologias diferentes seja feita de forma suave, sem que o usuário a perceba. O processo de transição para uma nova rede que utiliza tecnologia diferente da rede atual é denominado *handover* vertical. Promover *handover* vertical é, contudo, um grande desafio. Variáveis como mobilidade do usuário, cobertura das redes, recursos que são capazes de fornecer, congestionamento, protocolos e parâmetros de controle distintos, dentre várias outras, dificultam a execução do *handover* de forma imperceptível, sem perda de conexão, processo chamado de *handover* vertical suave.

Diferentemente do *handover* vertical, o *handover* horizontal, também chamado de *handoff*, é um processo através do qual um dispositivo muda de sua rede de origem para outra de mesma tecnologia. É um desafio tecnológico de magnitude inferior ao do *handover* vertical, por não ser necessário lidar com tecnologias conflitantes de rede, porém serve como um começo para que se possa atingir o objetivo maior de se criar um meio totalmente integrado de rede. Se for possível desenvolver um modelo que gerencie o *handoff* de usuários através de múltiplas camadas de rede, o salto para o *handover* se torna um pouco mais curto.

O objetivo deste trabalho é apresentar um modelo multicamadas de *handover* horizontal suave para redes LTE. O modelo, baseado nos protocolos MIP (*Mobile IP*), SIP (*Session Initiation Protocol*) e MIH (*Media Independent Handover*), tem a função de garantir a transição multicamada da conexão do usuário de uma eNB (*Evolved Node B*, as antenas às quais os usuários se conectam para ter acesso à rede LTE) a

outra, em um cenário em que existam dispositivos móveis e diferentes eNBs com área de cobertura distinta, inclusive com a possibilidade de sobreposição entre elas. O modelo deve, ainda, garantir que, durante e após o processo de transição, a conexão do usuário seja mantida e quaisquer serviços ou aplicações que estiverem em execução tenham seus fluxos mantidos. Adicionalmente, é fundamental que o modelo seja construído de forma que a sua implantação em um ambiente heterogêneo não requeira uma total reformulação, ou seja, o modelo deve estar preparado para, no futuro, ser usado para *handover* vertical suave.

## 1.1 Problema

Como mencionado anteriormente, executar o *handover* de forma suave é um problema bastante desafiador. Embora grandes esforços de pesquisa sejam dedicados a atacar e tentar resolver esse problema, ainda não foi possível encontrar uma maneira eficiente de integrar todas as tecnologias de acesso sem fio disponíveis e, conseqüentemente, se aproximar do conceito de NGN. Na realidade, é pouco provável que seja possível encontrar uma única técnica que seja capaz de atender a todos os requisitos de um modelo de NGN com *handover* vertical suave, mas seria interessante que fosse usado o menor número possível de técnicas, a fim de reduzir a complexidade de implantação e funcionamento dessas redes. O *handover horizontal* é parte integrante da arquitetura de redes de celular, entretanto ocorre apenas em nível baixo, de infraestrutura, sem gerenciamento de conexão do usuário nas camadas de rede. Inexiste um modelo que introduza tal gerenciamento concomitantemente nas camadas de rede, transporte e aplicação, cujo tratamento correto é vital para que seja possível transpor a conexão de usuário para outro destino sem que seus fluxos de aplicação em andamento sejam perdidos.

O grupo de pesquisa do qual este trabalho faz parte vem, há alguns anos, desenvolvendo e aprimorando um modelo multicamadas de integração de redes heterogêneas (SANTOS et al., 2011; ATOURASSAP; FIGUEIREDO, 2012). O modelo, em sua forma atual (ATOURASSAP; FIGUEIREDO, 2012), é uma solução multicamadas que usa MIP, SIP e MIH para fazer *handovers* verticais suaves entre redes UMTS e WiMAX. O ambiente no qual o modelo foi implementado e testado, no entanto, sofre de algumas restrições importantes. O simulador escolhido para implementação e teste do modelo foi o NS-2 (*Network Simulator 2*), que embora seja amplamente utilizado no meio acadêmico, é um simulador antigo (foi desenvolvido em 1996), de arquitetura obsoleta e que carece de atualizações, tais como a falta de um módulo para simular redes 4G, o que impossibilita a criação de cenários de simulação que utilizem o modelo nas redes de última geração.

O problema, portanto, consiste em permitir que usuários possam comutar suas conexões em uma rede LTE, mas ter um modelo multicamadas que garanta que sua

conexão em curso com a Internet e aplicações em execução não sejam perdidas. Esse trânsito livre implica na capacidade irrestrita de mobilidade com continuidade de serviço garantida e trocas fluidas e transparentes entre eNBs quando necessário. Um usuário pode, por exemplo, ter livre mobilidade em um ambiente LTE e passar por trocas suaves de antenas, com a garantia de que o modelo fará com que suas aplicações se mantenham em execução normal. O usuário não perceberá ou precisará interferir, e gargalos ou falhas devem ser imperceptíveis ao usuário. Essa continuidade de serviço e transparência na mobilidade devem ser onipresentes no ambiente para que se possa considerá-lo um ambiente NGN.

Existem diversos obstáculos que dificultam a criação de um bom modelo de NGN. Usuários podem se mover em velocidades e padrões distintos, o que faz com que percorram as áreas de cobertura das várias redes de forma diversa; o dispositivo móvel deve, periodicamente, varrer a vizinhança em busca de pontos de conexão disponíveis, o que gera gasto de energia; quando o *handover* for efetivamente executado, é necessário que haja uma política eficiente para selecionar para qual antena o usuário vai migrar; é necessário garantir que os *handovers* não aconteçam muito frequentemente, sob pena de perda de desempenho, gasto desnecessário de energia e perda de fluxo de aplicações; é necessário que se faça uma gerência global dos recursos das várias redes disponíveis, para que não haja super ou subaproveitamento de recursos.

## 1.2 Objetivos

O objetivo deste trabalho é desenvolver um modelo multicamadas para realização de *handovers* horizontais em redes LTE, cuja estrutura permita a integração futura em um ambiente heterogêneo de redes. O modelo deve garantir que a mobilidade e as trocas de eNB dos usuários não gerem perdas nos fluxos de suas aplicações e que todos os tipos de serviços funcionem dentro dos parâmetros mínimos de qualidade estipulados.

Dentre os objetivos específicos do trabalho, pode-se citar:

- a) Incorporar funcionalidades do protocolo MIP ao NS-3;
- b) Incorporar funcionalidades do protocolo SIP ao NS-3;
- c) Incorporar funcionalidades do padrão MIH ao NS-3;
- d) Realizar simulações de redes LTE;
- e) Simular cenários em que usuários possam transitar livremente pelo ambiente, e entre várias redes, sem perda de seus fluxos de aplicação;
- f) Avaliar o modelo multicamadas em relação à continuidade e à garantia de qualidade dos serviços disponíveis, comparando as métricas obtidas nas simulações com parâmetros mínimos de QoS (*Quality of Service*) definidos pelo 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*) (PROJECT, 1999).

### 1.3 Justificativa

O conceito de NGN ainda não conseguiu ser transposto para a prática da mesma forma que é descrito na teoria. O que existem hoje são diversas tecnologias de acesso sem fio, tais como Wi-Fi, WiMAX, Bluetooth, UMTS e LTE. Para realizar a mudança de uma rede UMTS para uma rede Wi-Fi, por exemplo, muitas vezes o usuário do dispositivo móvel tem que ligar ou desligar manualmente uma das interfaces e aguardar que a mudança seja concretizada. Ele também pode deixar as duas interfaces ativas o tempo todo, o que faz com que o gasto de bateria seja grande e, ainda assim, há perdas de conexão na transição de uma para a outra. Caso fosse implantado um sistema NGN, o paradigma de redes móveis em seu estado atual poderia mudar, a começar pela extinção da telefonia comutada por circuito em favor de uma rede totalmente baseada em IP, comutada por pacotes.

A criação de bons modelos de integração multicamadas é o primeiro passo na direção da existência, na prática, de um ambiente verdadeiramente baseado em NGN. Os principais beneficiados serão os usuários de serviços móveis, que poderão desfrutar da integração total de várias tecnologias distintas de redes, que culminará na continuidade irrestrita de serviços, a despeito da mobilidade, com garantia de qualidade, transparência, para o usuário, do processo subjacente de seleção e troca de rede. Um ambiente integrado favorecerá ainda mais a convergência de serviços de múltiplas naturezas para uma multiplicidade de dispositivos móveis que podem ser utilizados pelos clientes das operadoras de redes.

### 1.4 Organização da dissertação

Esta dissertação está organizada da seguinte maneira: O Capítulo 2 contém o referencial teórico. Nele, estão explicados os conceitos teóricos necessários para a compreensão desta dissertação. O Capítulo 3 traz um resumo de trabalhos relacionados encontrados na literatura, bem como a descrição de trabalhos anteriores do grupo de pesquisa do qual esta dissertação faz parte. No Capítulo 4 estão descritos os cenários de simulação, suas configurações, o ambiente de simulação e as métricas que foram coletadas e avaliadas. O Capítulo 5 contém os resultados obtidos com as simulações e sua discussão. Finalmente, o Capítulo 6 encerra esta dissertação, com as conclusões e sugestões de trabalhos futuros.



## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 *Next Generation Networks*

Há tempos, é possível perceber uma migração de usuários da rede de telefonia fixa para as redes móveis de celulares. As redes de telefonia móvel são capazes de oferecer o que as redes fixas ofereciam (serviço de telefonia) e ainda uma série de outros serviços que não são acessíveis a telefones fixos (como mensagens SMS, por exemplo). Tudo isso com o benefício da mobilidade. A solução das operadoras de serviços fixos a essa migração foi começar a oferecer internet de banda larga. Isso satisfaz à demanda dos consumidores por recursos para usar os serviços que a eles interessam, mas não contribui em nada para o desenvolvimento das redes globais de comunicação. O que é necessário, hoje, é um conjunto de redes capazes de fornecer serviços aos seus consumidores onde quer que estejam, e sem a dependência de uma tecnologia subjacente específica. É isso que buscam os consumidores, que estão dispostos a pagar pela oferta de serviços em vez de terem uma solução específica (LEE; KNIGHT, 2005).

A essa integração de várias redes usando um meio que permite que serviços sejam ofertados independentemente de tecnologias subjacentes, se dá o nome de Next Generation Network, ou NGN. O ITU (*International Telecommunication Union*), agência filiada à ONU que cuida das questões mundiais de telecomunicação, possui a sua própria definição de NGN: “NGN é uma rede baseada em pacotes capaz de prover serviços, incluindo serviços de telecomunicação, e capaz de fazer o uso de diversas tecnologias de banda larga com suporte a qualidade de serviço e nas quais as funções relacionadas aos serviços não estão acopladas às tecnologias de transporte. Capaz de fornecer aos usuários acesso irrestrito a diferentes provedores de serviços. Possui suporte à mobilidade generalizada, que permitirá fornecimento consistente e ubíquo de serviços aos usuários”. O ITU define ainda quais características são necessárias para uma NGN (ITU-T, 2004):

- Transferência de dados baseada em pacotes;
- Separação de funções de controle entre capacidades de portadora, sessão e aplicação;
- Desacoplamento do fornecimento de serviço da tecnologia de rede, e fornecimento de interfaces abertas;
- Suporte a uma variada gama de serviços, aplicações e mecanismos baseados em blocos de construção de serviços;
- Suporte a banda larga com transparência e garantia de qualidade de serviço fim-a-fim;

- Retrocompatibilidade, através de interfaces abertas, com redes antigas;
- Mobilidade generalizada;
- Acesso irrestrito por parte dos usuários a diferentes provedores de serviços;
- Esquemas de identificação variados, que podem ser resolvidos em endereços IP, para fins de roteamento em redes baseadas em IP;
- Unificação de características para um mesmo tipo de serviço percebido pelo usuário;
- Convergência entre serviços de redes fixas e móveis;
- Cumprimento de exigências regulatórias, pertinentes a comunicações de emergência e segurança, privacidade, etc.

Para Lee e Knight (2005), ainda, o principal impacto das NGN vai ser no âmbito regulatório. Segundo eles, o que está em vigor hoje é uma regulamentação vertical, ou seja, regulamentações a serviços se aplicam também às tecnologias de fornecimento, por causa do acoplamento existente entre eles. As NGN fariam com que essa regulamentação passasse a ser horizontal, ou seja, pertinente a um mesmo tipo de serviço, mas em diferentes meios de transporte. Outro impacto mencionado por eles é a separação entre acesso e transporte. Isso quer dizer que usuários poderiam, através de pontos de acesso diferentes (DSL, cabo, celular) ter acesso à mesma rede de serviços. Por fim, destacam como importante a convergência entre serviços fixos e móveis, dando aos usuários a liberdade de criar um plano personalizado de uso, que inclui a mescla de funcionalidades dos dois tipos de acordo com as necessidades e preferências de cada um.

## **2.2 *Long Term Evolution (LTE)***

### **2.2.1 *Introdução***

Desde seu surgimento, as redes de celulares vêm passando por constantes mudanças em busca de melhorias de desempenho e menor custo, uma vez que o número de usuários está em constante expansão, seu nível de exigência tende a aumentar com o tempo e à medida que as redes crescem, o custo financeiro para mantê-las também cresce. As redes de celulares deixaram de ser analógicas (como eram na primeira geração, AMPS) para ser digitais, passaram por inúmeras mudanças infraestruturais, mudanças em sua frequência de operação, mudança na maneira de dividir os canais entre vários usuários (multiplexação) e passaram a oferecer serviços que transcendem a simples comunicação por voz, como envio de mensagens de texto e conexão com a internet.

A tecnologia LTE (*Long Term Evolution of UMTS*) pode ser vista como o passo mais recente na caminhada evolutiva das redes de celulares. Ela é o passo que completa a tendência que as redes de celulares vinham apresentando de mudar, de forma a se tornar interfaces aéreas multisserviços, em vez de simplesmente prover chamadas de voz, como eram no começo. A tecnologia LTE foi projetada desde o começo para operar inteiramente sobre pacotes, tornando a comutação por circuito inexoravelmente obsoleta. A evolução do LTE não diz respeito apenas à parte de rádio, mas sim a uma evolução completa da arquitetura, incluindo a parte que não trata das transmissões de rádio em si. Essa evolução de aspectos completos do sistema tem o nome de SAE (*System Architecture Evolution*), e o conjunto LTE + SAE forma o que se chama de EPS (*Evolved Packet System*), um sistema em que toda a rede opera utilizando pacotes (SESIA; TOUFIK; BAKER, 2009). Assim como os demais padrões de redes de celular desenvolvidos sob supervisão do 3GPP (3rd Generation Partnership Project), o padrão LTE possui requisitos que devem ser cumpridos em seu desenvolvimento. Os requisitos para a primeira versão do padrão LTE, definidos em junho de 2005, são (SESIA; TOUFIK; BAKER, 2009):

- Redução de atrasos no estabelecimento de conexões e transmissões;
- Aumento na velocidade de transmissão;
- Aumento nas taxas de transmissão nas bordas das células, para padronização no fornecimento de serviços;
- Custo por bit reduzido, o que implica em maior eficiência no uso do espectro;
- Maior flexibilidade no uso do espectro, tanto em faixas existentes como em novas faixas;
- Simplificação na arquitetura da rede;
- Mobilidade fluida, inclusive entre tecnologias de rede diferentes;
- Consumo de energia razoável nos terminais móveis.

Um outro requisito da tecnologia LTE, que diz respeito à mobilidade dos usuários, apregoa que a rede deve ser funcional a usuários se movendo com velocidades de 350 a 500 km/h, dependendo da frequência de operação. Essas velocidades elevadas se referem especialmente a usuários viajando em trens de alta velocidade. O requisito diz ainda que, para essas velocidades, a mudança de célula deve ocorrer de forma fluida, sem perdas de pacote e com atrasos imperceptíveis.

O requisito de simplicidade arquitetural pode ser subdividido em requisitos arquiteturais específicos, como segue (SESIA; TOUFIK; BAKER, 2009):

- Arquitetura plana, que consiste apenas de um tipo de nó, a estação base, chamada de eNodeB (eNB);
- Protocolos eficientes para habilitar serviços comutados por pacote;
- Interfaces abertas e interoperabilidade com equipamentos de vários fornecedores;
- Mecanismos eficientes para operação e manutenção, inclusive funcionalidades de auto-otimização;
- Fácil capacidade de configuração e instalação, por exemplo as chamadas *home base stations*, ou femto-células.

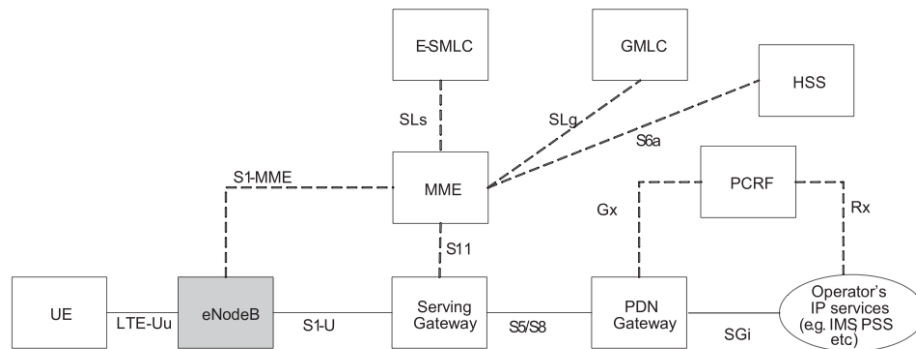
### 2.2.2 *Arquitetura LTE*

A arquitetura LTE pode ser dividida em duas partes principais: E-UTRAN (*Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network*) e EPC (*Evolved Packet Core*). A Figura 1 ilustra os principais elementos infraestruturais presentes na arquitetura LTE, englobando tanto E-UTRAN como EPC. A E-UTRAN é a parte infraestrutural da rede LTE que cuida das transmissões de rádio. Consiste basicamente de um conjunto de eNodeBs, e por conter apenas um tipo de nó, a arquitetura da E-UTRAN é considerada uma arquitetura plana. As eNodeBs são interligadas através de uma interface chamada X2, e conectam-se ao EPC por meio de uma interface chamada S1. A Figura 2 mostra os elementos constituintes da E-UTRAN e as interfaces que os interligam. A E-UTRAN é responsável pelas seguintes funções:

- Gerenciamento de recursos de rádio: funções relacionadas às portadoras de rádio (*bearers*), como controle de admissão, controle de mobilidade, agendamento e alocação de recursos para as UEs (*User Equipment*);
- Compressão de cabeçalho: compressão de cabeçalho IP para reduzir o *overhead*, o que garante maior eficiência no uso da interface de rádio;
- Segurança: criptografia de todos os dados que passam pela interface de rádio;
- Posicionamento: fornece dados e assiste outros elementos da rede na localização de usuários;
- Conectividade com o EPC: consiste na comunicação com os *gateways* que ligam a E-UTRAN ao EPC.

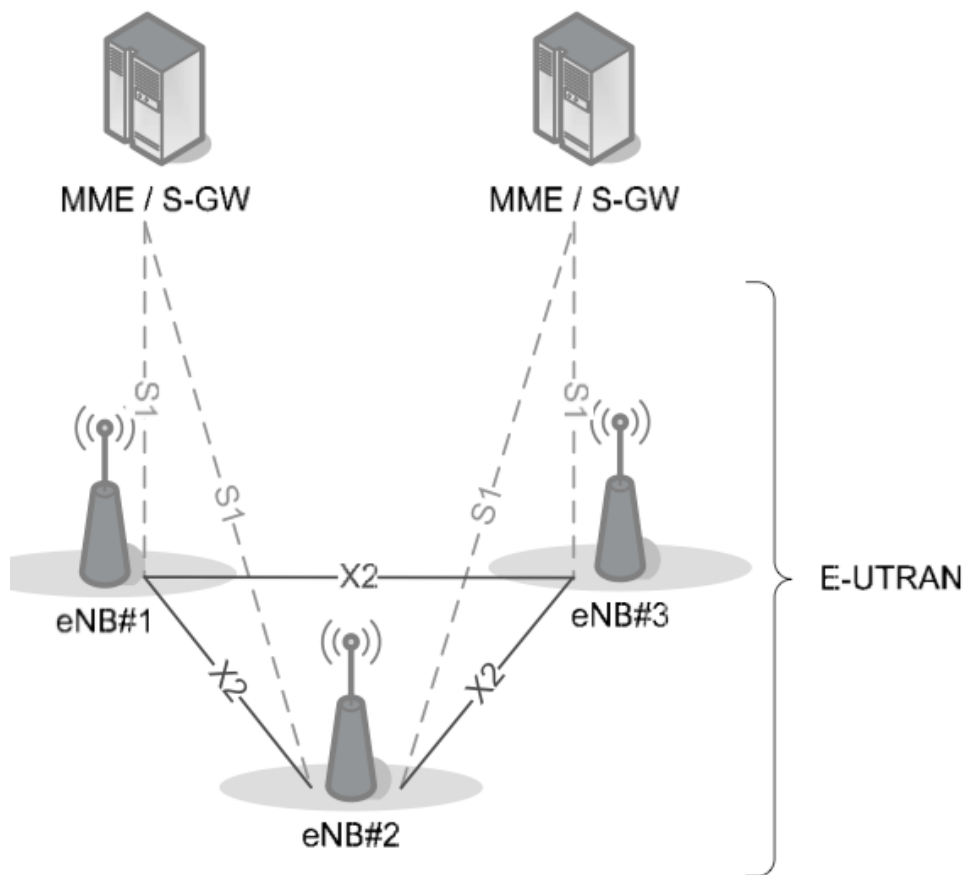
As eNodeBs implementam todas essas funções, e podem gerir mais de uma célula. As funcionalidades de controle de rádio estão todas embarcadas nas eNodeBs, o que

**Figura 1 – Arquitetura LTE**



Fonte: (SESIA; TOUFIK; BAKER, 2009)

**Figura 2 – Arquitetura E-UTRAN**



Fonte: (SESIA; TOUFIK; BAKER, 2009)

dispensa o uso de um elemento infraestrutural dedicado para realizar essas funções. Essa simplificação na arquitetura gera redução de custos e reduz a propensão a falhas pontuais na rede, uma vez que um menor número de elementos infraestruturais implica em uma menor quantidade de equipamentos que podem vir a apresentar defeitos. O

EPC é formado pelos elementos da arquitetura LTE responsáveis pelo controle das UEs e estabelecimento de portadoras, que são fluxos IP com uma certa classe de qualidade de serviço. A seguir, estão listados os principais componentes do EPC e suas respectivas funções (SESIA; TOUFIK; BAKER, 2009):

- MME (*Mobility Management Entity*): Responsável por processar o sinal entre a UE e o EPC. Responsável por estabelecer, manter e desalocar portadoras, estabelecimento de conexões com a UE e a segurança dessas conexões, e comunicação com redes legadas, por exemplo, a transferência para tais redes de chamadas de voz. Quando uma UE se conecta a uma eNodeB, o MME é o responsável por criar um contexto para a UE, com um identificador temporário e informações de assinante. O MME é, ainda, responsável por gerir a localização do usuário quando este estiver em estado ocioso;
- HSS (*Home Subscriber Server*): contém os dados do assinante, como perfil de QoS e restrições de acesso quando em *roaming*. Armazena ainda dados sobre a quais redes o usuário pode se conectar e a qual MME o usuário está associado. Pode conter também funções de autenticação;
- PGW (*Packet Data Network Gateway*): é o nó que faz a ligação da rede LTE com redes externas, como a internet. Responsável por atribuir endereços IP aos usuários, bem como garantia de QoS e cobranças baseadas em fluxo de acordo com políticas definidas pelas operadoras. Para garantia de QoS, o PGW filtra os pacotes de cada fluxo de acordo com TFTs (Traffic Flow Templates), que identificam a que classe QoS os fluxos pertencem. Quando ocorre *internetworking* com redes que não obedecem a padrões 3GPP, o PGW serve como âncora de mobilidade;
- SGW (*Serving Gateway*): todo fluxo de pacotes passa por esse elemento, que serve ainda como âncora de mobilidade quando a UE precisa se conectar a uma outra eNodeB ou outras redes 3GPP. Armazena informações sobre as portadoras de uma UE quando ela está em estado ocioso e faz o armazenamento temporário de pacotes enquanto as portadoras estão sendo restabelecidas;
- PCRF (*Policy Control and Changing Rules Function*): responsável por controlar as políticas definidas pelas operadoras, e pela tomada de decisões baseadas nessas políticas. Provê autorização de QoS aos fluxos e verifica se as classes QoS solicitadas não violam restrições de assinatura dos usuários;
- E-SMLC (*Evolved Serving Mobile Location Center*): coordenação e agendamento de recursos necessários para determinar a localização de uma UE que esteja ligada a uma eNodeB. Calcula a localização final com base nas informações recebidas e estima a velocidade da UE e a precisão dos cálculos de posicionamento realizados;

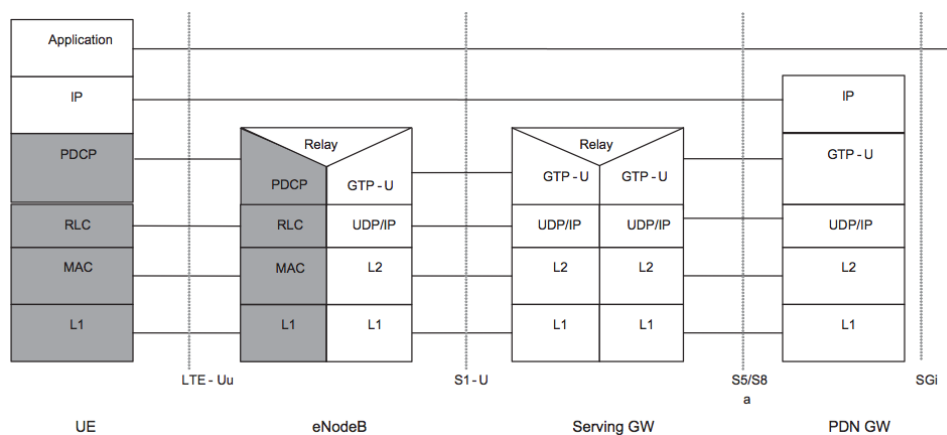
- GMLC (*Gateway Mobile Location Center*): envia pedidos de posicionamento ao MME e recebe as informações sobre a estimativa de localização.

### 2.2.3 Protocolos

Os protocolos usados no LTE podem ser divididos em duas categorias: protocolos do plano de usuário e protocolos do plano de controle. Os protocolos do plano de usuário são aqueles usados na transmissão de pacotes IP de e para as UEs. A pilha de protocolos do plano de usuário pode ser vista na Figura 3. Pacotes transmitidos nesse plano são encapsulados em um protocolo específico e tunelados do PGW à eNodeB para serem encaminhados às UEs. As interfaces que conectam o PGW ao SGW e o SGW à eNodeB usam o protocolo GTP (*GRPS Tunnelling Protocol*) para fazer o tunelamento. As UEs não implementam o protocolo GTP. Entre as UEs e as eNodeBs, os protocolos específicos existentes são o RLC (*Radio Link Control*) e o PDCP (*Packet Data Convergence Protocol*), situados entre a camada MAC e a camada de rede, que implementa o protocolo IP.

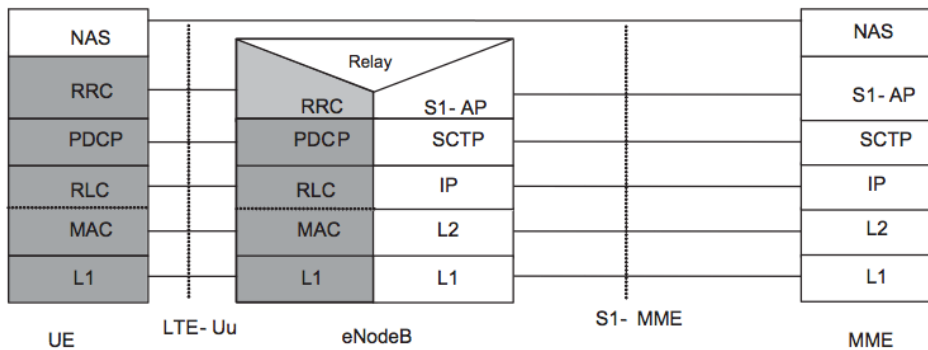
No plano de controle, que consiste no plano em que ocorrem as comunicações entre UE e MME, além dos protocolos supracitados, há o protocolo RRC (*Radio Resource Control*), responsável pelo estabelecimento de portadoras e configuração das camadas inferiores. A comunicação entre eNodeB e MME usa, ainda, os protocolos SCTP (*Stream Control Transmission Protocol*) e S1-AP, relativos à interface S1. As UEs não implementam esses protocolos. A pilha de protocolos do plano de controle pode ser vista na Figura 4.

**Figura 3 – Protocolos do plano de usuário**



Fonte: (SESIA; TOUFIK; BAKER, 2009)

**Figura 4 – Protocolos do plano de controle**



Fonte: (SESIA; TOUFIK; BAKER, 2009)

### 2.3 Mobile IP

O interesse em se manter conectado à internet mesmo quando em movimento vem de longa data. Perkins (1997) já relatava esse desejo em seu artigo, no qual apresenta os fundamentos de um protocolo que foi criado para tentar resolver esse problema, o *Mobile Internet Protocol* (MIP). O artigo menciona que a mobilidade em redes IP é complicada, porque se um dispositivo é identificado por um endereço IP estático e esse mesmo endereço é usado para roteamento, então a mobilidade ficaria impossibilitada. O MIP possui um esquema de atribuição de endereços temporários que tem o objetivo de desfazer essa contradição e permitir a mobilidade.

Com o uso de MIP nas redes, terminais móveis podem se deslocar de sua rede de origem para quaisquer redes fora dessa origem, e receber um endereço temporário que será usado para identificá-lo nessa nova rede e permitir que os terminais móveis recebam corretamente pacotes endereçados a eles. O endereço temporário é comunicado ao representante da rede de origem do nó móvel, para que possa encaminhar os pacotes para o endereço apropriado.

Os elementos que compõem a arquitetura do protocolo MIP são os seguintes:

- *Mobile Node* (MN): é o terminal móvel que se desloca de uma rede ou sub-rede para outra, sem que mude seu endereço IP. É o nó que receberá o endereço temporário e irá informá-lo ao elemento da sua rede de origem, descrito a seguir;
- *Home Agent* (HA): é um roteador que se encontra na rede de origem do terminal móvel, e é responsável por armazenar informações sobre a localização de cada um dos terminais que estejam fora da rede de origem e fazer o encaminhamento de pacotes a eles;
- *Foreign Agent* (FA): um roteador na rede que o terminal móvel visita, ou seja,

naquela que não é a sua rede de origem. Cooperar com o HA para garantir a entrega de pacotes.

Pode-se citar ainda alguns outros itens relevantes que fazem parte do MIP:

- *Home Network* (HN): a rede de origem de um MN;
- *Foreign Network* (FN): rede visitada por um MN fora da sua HN;
- *Agent Advertisement*: MN que estão em uma FN informam sua presença aos FA;
- *Home Address* (HoA): endereço do MN na sua rede de origem;
- *Care-of Address* (CoA): endereço temporário atribuído a um MN em uma FN;
- *Correspondent Node* (CN): interlocutores de um MN que desejam transmitir pacotes a ele, como um servidor web.

O processo de funcionamento do protocolo MIP acontece em três etapas:

- *Agent Discovery* (AD): quando um MN adentra uma nova rede, ou seja, entra no domínio de uma FN, ele notifica ao FA responsável por aquela FN que agora está dentro do alcance da nova FN. O FA atribui a ele um CoA;
- *Registration*: uma vez atribuído o CoA ao MN em sua FN, ele comunica ao seu HA que recebeu um novo endereço temporário, ao qual deverão ser encaminhados todos os pacotes que tiverem como destino o seu HoA;
- *Tunneling*: processo de tunelamento virtual, pelo qual o HA encaminha pacotes com o HoA do MN como destino ao seu novo CoA na FN.

Dessa forma, é possível garantir que os MN recebam sempre os pacotes endereçados a eles, mesmo quando em outras redes que não sua rede de origem. A Figura 5 ilustra a arquitetura MIP e seus elementos constituintes.

## 2.4 *Session Initiation Protocol*

### 2.4.1 *Introdução*

Como o próprio nome indica, o SIP é um protocolo que cuida de sessões. Ele fica na camada de aplicação, e é responsável por mais do que apenas inicializar sessões. São suas responsabilidades inicializar, gerir e encerrar sessões IP entre duas entidades

Figura 5 – Arquitetura MIP



Fonte: (SANTOS et al., 2011)

que estejam presentes na rede. O SIP foi criado com o objetivo de ser um protocolo mais simples do que os que já existiam, como o H.323, usado nos antigos sistemas VoIP, e funcionar muito bem com protocolos comuns em uso nas redes, tais como TCP, UDP, DNS e URL. Ele se encontra na camada de aplicação porque o objetivo do estabelecimento das sessões é manter fluxos de aplicações independentemente do tipo de rede e da localização das entidades comunicantes. O SIP utiliza em suas mensagens cabeçalhos semelhantes aos cabeçalhos MIME usados, por exemplo, em e-mails, e ainda usa códigos similares aos códigos HTTP para sinalizar comandos como aceitações e erros. Isso aumenta sua compatibilidade com protocolos existentes e simplifica a sua implementação (TANENBAUM, 2003).

Vários tipos de sessões podem ser estabelecidos através do protocolo SIP. É possível que uma entidade estabeleça uma sessão diretamente com sua entidade interlocutora, desde que as entidades envolvidas conheçam os endereços ou URIs umas das outras. É possível, ainda, estabelecer sessões *multicast*, em que o destinatário de mensagens ou pacotes não é apenas uma entidade, mas um grupo delas, permitindo, assim, que um transmissor envie uma mesma mensagem a diversos receptores. Pode-se, ainda, estabelecer sessões do tipo conferência, em que qualquer uma das entidades pode atuar como transmissora ou receptora de mensagens, e as mensagens são recebidas por todos os participantes. Também há suporte a conexão com aparelhos que usam a rede de telefonia fixa, ou *Public Switched Telephone Network* (PSTN). O programa de computador Skype, por exemplo, permite que computadores estabeleçam ligações com telefones fixos ou celulares. Nas sessões SIP é possível transmitir voz, vídeo e dados, com protocolos como

RTCP, e as mensagens SIP podem funcionar com os protocolos TCP e UDP (JOHNSTON, 2007).

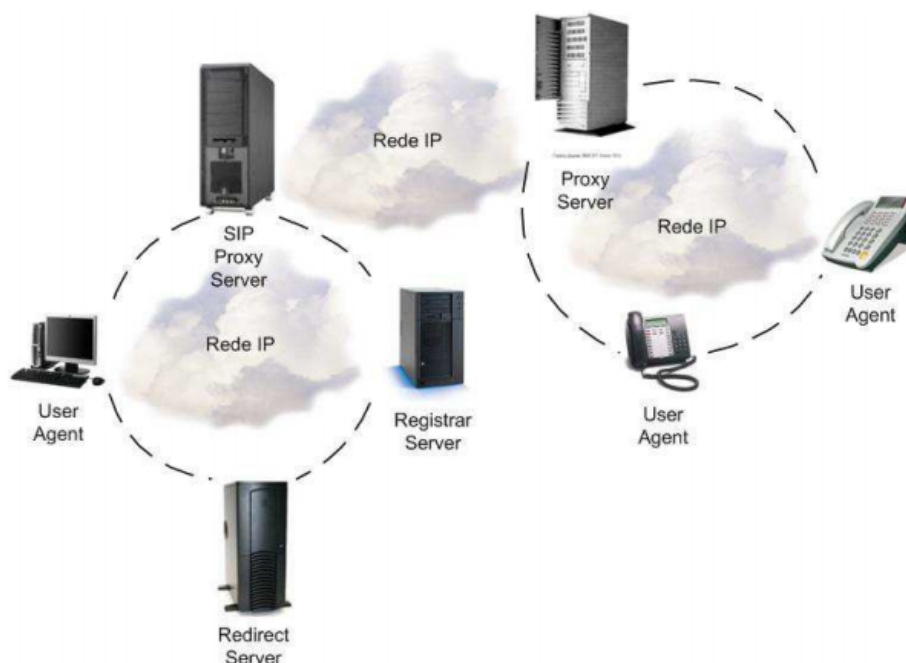
#### 2.4.2 *Arquitetura SIP*

Para que todo esse processo funcione, é necessária a introdução, na rede, de alguns elementos arquiteturais de suporte. Esses elementos podem ser instalados em unidades de infraestrutura já existentes ou podem estar em unidades novas, dedicadas. Os componentes da arquitetura SIP, conforme Johnston (2007), são:

- *User Agent (UA)*: um UA é qualquer entidade com capacidades SIP. Deve ser capaz de estabelecer sessões com outros UA. Pode ser um dispositivo de usuário, como um telefone ou um computador, ou pode ser um protocolo, no caso de um *gateway*. Um UA pode atuar, em uma sessão, alternadamente como cliente e servidor, e não é incomum que isso aconteça. Quando o UA atua como cliente, ele envia requisições, e quando atua como servidor, as processa e responde;
- *SIP Proxy*: elemento que atua como intermediário em algumas sessões. Sua função é, basicamente, encaminhar ou responder solicitações de outros UA. Seu funcionamento pode ser comparado ao de um HA MIP e o encaminhamento de requisições equivale a um tunelamento. *Proxies* SIP tipicamente têm acesso a um banco de dados auxiliar para acessar informações como localização de UA. *Proxies* não enviam solicitações, apenas as encaminham ou respondem. Eles ainda não possuem capacidades multimídia e não precisam processar as requisições para que possam encaminhá-las a outros UA;
- *Redirect Server (RS)*: servidor que informa a localização de entidades SIP àqueles que o enviam solicitações. Ele é capaz de informar a um UA, por exemplo, que o interlocutor com quem está tentando estabelecer uma sessão mudou de localização, e retornar uma lista de possíveis localizações onde o UA possa estar, através de consultas a um banco de dados de localizações. O RS, ao contrário do proxy, não é capaz de encaminhar solicitações, apenas responder a elas;
- *Registrar*: entidade que registra UA e povoa o banco de dados compartilhado com as informações de localização. Só aceita mensagens de um tipo, que são as que fazem o registro da UA no servidor;
- *Gateway*: qualquer entidade SIP que seja responsável por fazer a ligação entre redes com padrões diferentes de sinalização. Por exemplo, para que seja possível fazer ligações de um computador com Skype para um telefone fixo, é necessário que haja *gateways* entre a rede IP e a rede PSTN.

Uma visão geral da arquitetura SIP e seus elementos pode ser observada na Figura 6.

**Figura 6 – Arquitetura SIP**



Fonte: (ATOURASSAP, 2012)

### 2.4.3 Mensagens SIP

**Quadro 1 – Tipos de mensagens SIP e suas funções**

Método	RFC	Funcionalidades
INVITE	3261	Mensagem enviada a um UA para estabelecimento de sessão
REGISTER	3261	Mensagem enviada ao <i>Registrar</i> para registro de UA
BYE	3261	Encerra uma sessão
ACK	3261	Confirma o recebimento de uma mensagem
CANCEL	3261	Encerra INVITES pendentes
OPTION	3261	Inquirir sobre capacidades e disponibilidade de uma entidade
REFER	3115	Solicita que um UA acesse uma URI ou URL externa
SUBSCRIBE	3265	Solicitar que o UA receptor informe sobre eventos NOTIFY
NOTIFY	3265	Notifica aos UA que fizeram SUBSCRIBE sobre eventos
MESSAGE	3428	Usado para transporte de mensagens instantâneas
UPDATE	3311	Atualiza parâmetros de uma sessão em que não houve resposta a INVITE
INFO	2976	Envio de sinalização de chamadas em sessões estabelecidas
PRACK	3262	Confirma a recepção de uma mensagem de resposta TCP

Fonte: (JOHNSTON, 2007)

Entidades SIP que desejam estabelecer sessões, comunicar-se durante as sessões com outras entidades e posteriormente encerrar sessões, precisam fazê-lo por meio de

mensagens SIP específicas. Há uma série de mensagens, com os mais diversos fins, que entidades SIP podem trocar entre si. O Quadro 1 mostra as mensagens SIP e o que cada uma delas faz.

**Quadro 2 – Respostas SIP**

Classe	Descrição	Ação
1xx	Informativo	Indica o estado da chamada antes que ela seja completada
2xx	Sucesso	A solicitação obteve sucesso. Caso tenha sido um INVITE, ACK deve ser enviado como resposta. Senão, parar de retransmitir a solicitação
3xx	Redirecionamento	O <i>redirect server</i> retornou ao UA possíveis localizações de seu interlocutor. UA deve reenviar a solicitação a outro servidor
4xx	Erro no cliente	A solicitação falhou por causa de um erro no cliente. A solicitação pode ser reenviada se reformulada de acordo com a resposta
5xx	Erro no servidor	A solicitação falhou por causa de um erro no servidor. O UA pode tentar novamente em outro servidor
6xx	Erro global	A solicitação falhou e não deve ser reenviada a nenhum outro servidor

Fonte: (JOHNSTON, 2007)

Quando uma entidade recebe uma dessas mensagens e deseja enviar uma resposta ao seu interlocutor, essa resposta geralmente vai acompanhada de um código que indica o tipo de resposta que está sendo enviada. O Quadro 2 lista os tipos de códigos de resposta existentes e seu significado.

## 2.5 *Media Independent Handover*

### 2.5.1 *Introdução*

O processo de *handover* acontece em várias etapas. O dispositivo móvel tem de estar ciente das redes que compõem o seu contexto, então uma das etapas é a descoberta de redes. Além disso, as capacidades das diversas redes devem ser conhecidas, para que possa ocorrer a análise de viabilidade do *handover*. Na fase de execução, devem ser negociados parâmetros de admissão, e as capacidades das redes podem variar com o tempo. Manter sessões ativas quando uma troca de rede é necessária muitas vezes envolve processos específicos de cada rede, o que pode ser um grande complicador da existência de um mecanismo generalizado de *handover* (OLIVA et al., 2008).

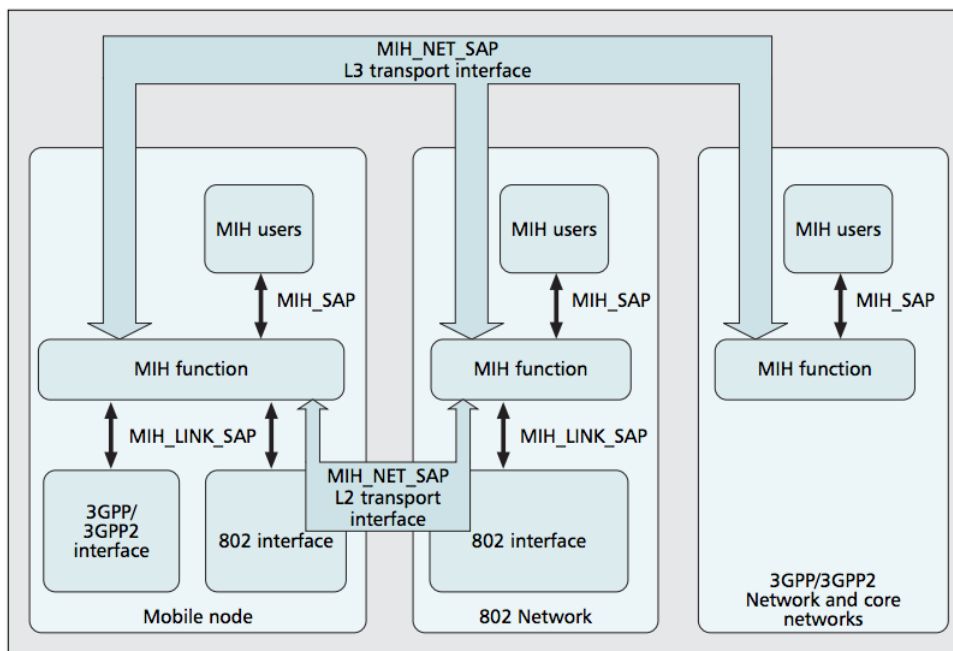
Em um ambiente em que existem várias redes, cada uma delas potencialmente empregando tecnologias distintas, seria complicado manter mecanismos independentes

para cada uma dessas redes que realizassem as funções supracitadas. O ideal seria ter um elemento que agisse como intermediário e facilitador no processo, e que fosse capaz de operar com várias tecnologias de rede comuns. Essa é a motivação por trás do surgimento do padrão IEEE 802.21, também conhecido como *Media Independent Handover* (MIH).

O padrão MIH participa do processo de *handover* nas etapas iniciais, atuando como facilitador e otimizador, mas não participa da execução do processo em si, e nem define políticas de escolha das redes descobertas e analisadas. Ele age como um *middleware* entre as camadas de enlace e de rede, provendo interfaces e pontos de acesso para a comunicação entre essas camadas de comandos, serviços e eventos das diversas redes localizadas no ambiente, criando assim uma camada de abstração que torna transparente a diferença entre tecnologias de enlace e generaliza sua comunicação com a camada de rede.

Oliva et al. (2008) mencionam ainda que, além de atuar como auxiliar no processo de *handover*, o MIH tem ainda objetivos secundários, dentre os quais estão a continuidade de serviços (uma das principais metas dos modelos de integração de redes heterogêneas); fornecer recursos a aplicações cientes de *handover*; manutenção de parâmetros QoS, intimamente relacionada à continuidade de serviços; gerenciamento de energia, através da otimização de ativação ou desativação de interfaces pela coleta de informações relevantes feita pelo padrão MIH.

**Figura 7 – Arquitetura MIH**



Fonte: (OLIVA et al., 2008)

Para prover suas funcionalidades, o padrão MIH define uma entidade chamada de *Media Independent Handover Function* (MIHF), que deve estar presente em todos os

dispositivos envolvidos (terminais móveis e elementos de infraestrutura de rede). Ele é o elemento centralizador da arquitetura MIH, que provê toda a funcionalidade e centraliza toda a comunicação. Todas as interfaces e pontos de acesso de serviço partem dele e se comunicam com ele. A Figura 7 exemplifica uma arquitetura MIH com o elemento MIHF presente entre as camadas de enlace e de rede, e centralizando os vários pontos de acesso e interfaces presentes na arquitetura. É possível notar na figura que o terminal móvel conta com mais de uma interface de rede, mas o elemento MIHF é único.

A entidade MIHF provê três tipos diferentes de serviços: eventos, comandos e informações. A parte de eventos é gerida por um elemento denominado *Media Independent Event Service* (MIES). Os comandos ficam a cargo do *Media Independent Command Service* (MICS) e o *Media Independent Information Service* (MIIS) lida com a parte de informações. O MIES é responsável por relatar eventos da rede, como descoberta de enlaces, queda de enlaces, aumento ou redução na força de sinal recebido, iminência de *handover* e casos em que parâmetros da rede ultrapassam um limiar predefinido. O MICS fornece aos usuários MIH (camada de rede) uma série de comandos que podem ser enviados às camadas inferiores (camada de enlace). Tais comandos servem, por exemplo, para configurar os limites para parâmetros da rede, que quando ultrapassados serão relatados pelo MIES, solicitações de informações sobre capacidades da rede e registro para eventos MIES. Por fim, o MIIS permite que informações sobre as redes dentro de uma área geográfica sejam recuperadas, com o objetivo de montar um mapa de redes que facilitaria a mobilidade entre as várias redes.



### 3 TRABALHOS RELACIONADOS

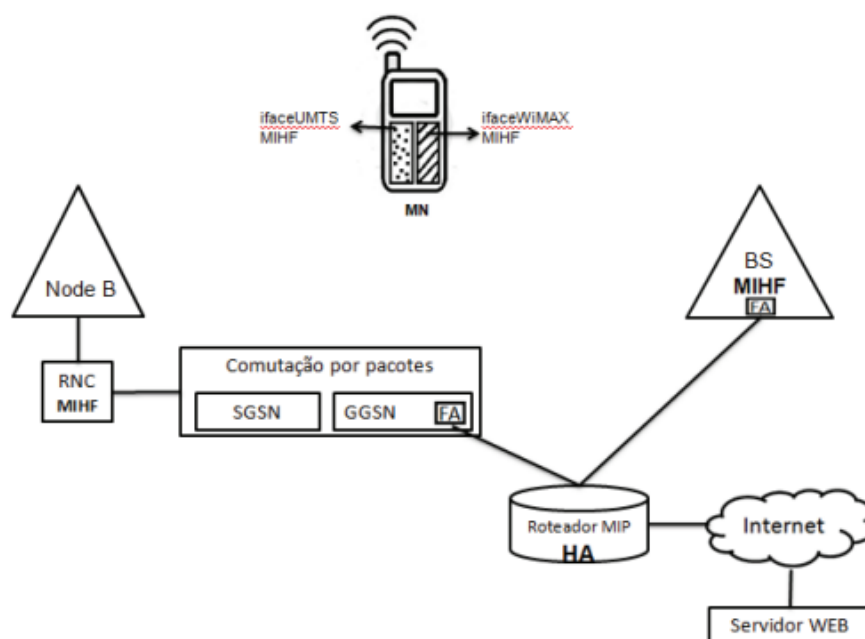
Há algumas diferentes abordagens sobre *handover*, na literatura. O grupo de pesquisa no qual este trabalho está inserido desenvolveu, há alguns anos, uma proposta de integração entre redes WiMax e UMTS (SANTOS et al., 2011; ATOURASSAP; FIGUEIREDO, 2012), cujos trabalhos descritos a seguir.

#### 3.1 Modelo de *Handover* Vertical Suave Entre Redes WiMAX e UMTS

O primeiro modelo de integração de redes heterogêneas, que serviu de inspiração para este trabalho, é o modelo que pode ser encontrado em (SANTOS et al., 2011). Trata-se de um modelo de *handover* vertical suave para mobilidade entre redes WiMAX e UMTS, que usa os protocolos MIP e MIH para conseguir um processo suave de transição entre as duas redes.

O modelo abrange não só a gerência de mobilidade dos terminais móveis, feita através do MIP, mas também a gerência do meio físico, através do MIH, para monitoramento e gerenciamento de eventos ocorridos nas redes e transparência, para a camada de rede, do enlace utilizado. O modelo descrito contém os seguintes elementos: terminal móvel, rede UMTS, rede WiMAX, roteador MIP e servidor web (nó correspondente do terminal móvel). A figura 8 ilustra o modelo elaborado pelos autores.

Figura 8 – Modelo de Santos et al.



Fonte: (SANTOS et al., 2011)

O terminal móvel possui interfaces para se conectar a ambas as redes disponíveis, além da entidade MIHF, que está presente ainda nas estações base WiMAX e no RNC (*Radio Network Control*) da rede UMTS. Em relação às funcionalidades MIP, o servidor *gateway* da rede UMTS (GGSN) e a estação base WiMAX podem assumir o papel de FA quando o terminal móvel visita uma das redes. O papel de HA é desempenhado pelo roteador MIP, responsável por gerir a mobilidade do terminal e encaminhar pacotes corretamente. O servidor *web* assume o papel de CN.

O processo de *handover* é composto pelas etapas de inicialização, preparação e execução. Para que o fluxo de aplicação em curso seja mantido, os pacotes endereçados ao terminal móvel que está em processo de *handover* são armazenados temporariamente até que a mudança de rede seja finalizada, e então são encaminhados ao terminal móvel na nova rede. Foram testados casos de *handover* da rede UMTS para a rede WiMAX e vice-versa. Os passos do procedimento de *handover* são basicamente os mesmos para as duas redes:

- Varredura de canais, iniciada espontânea ou forçadamente (no caso de iminência de perda de enlace);
- Mensuração de informações recebidas da rede;
- Seleção de estações na outra rede que podem receber o terminal móvel;
- A estação à qual o terminal está vinculado seleciona uma estação na nova rede e envia a ela o comando de preparação de *handover*;
- Verificação, por parte da rede-alvo, dos parâmetros de rede necessários para o terminal;
- Descoberta, pela rede de origem, do endereço IP do roteador MIP;
- O roteador MIP inicia procedimento de criação de tabela de mobilidade;
- Rede de origem envia ao terminal móvel um comando com parâmetros para configuração de um novo enlace;
- Nó móvel notifica o desligamento de enlace à rede de origem;
- Nó móvel inicia o procedimento de conexão com a nova rede;
- Nó móvel notifica à nova rede o estabelecimento da conexão;
- Nó móvel envia comando indicando que o *handover* foi completo;
- A nova rede informa o novo endereço (CoA) à rede antiga;

- A rede antiga envia ao roteador MIP uma notificação para registro do CoA;
- Roteador MIP finaliza o procedimento de *handover* e inicia o tunelamento para encaminhamento de pacotes.

Foram feitos testes para validação do modelo e verificação de conformidade às exigências das classes QoS, estipuladas pelo 3GPP para cada uma das 4 classes QoS (*Conversational*, *Streaming*, *Background* e *Interactive*). Nos cenários de teste, o número de usuários utilizado foi variável (1, 30, 70, 100, 500, 700, 1000) e cada cenário foi simulado 33 vezes, para consistência estatística. Os resultados mostraram que, para todos os casos, o *handover* ocorreu de forma suave, sem perda de fluxo de aplicação, e com todas as métricas dentro do mínimo exigido para as quatro classes QoS, com a exceção do parâmetro *jitter* para a classe *Conversational*. Os resultados, portanto, validam o funcionamento e a eficácia do modelo.

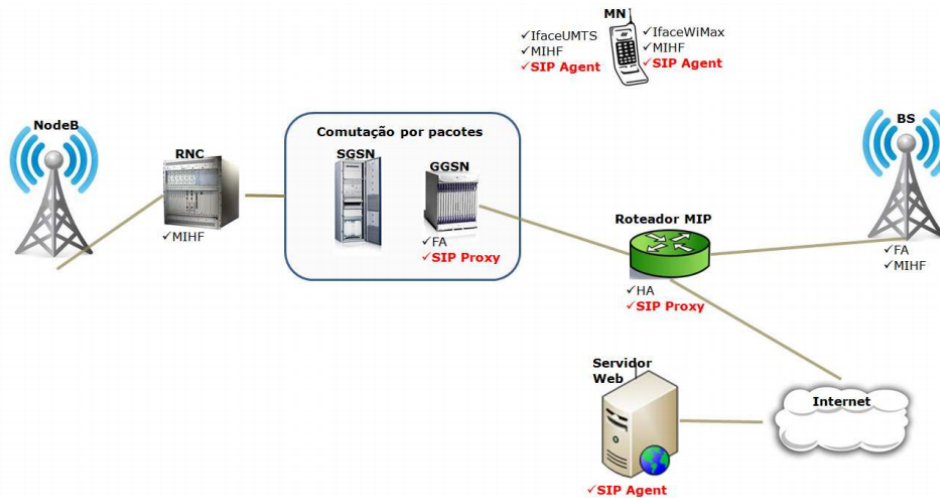
### 3.2 Modelo de NGN Baseado em MIP, IEEE 802.21 e SIP para Computação Ubíqua

O objetivo do trabalho de Atourassap e Figueiredo (2012) era conseguir melhorar o modelo de Santos et al. (2011) e confeccionar um modelo que se aproximasse mais do conceito de NGN. As melhorias foram conseguidas pelo acréscimo do protocolo SIP ao modelo, delegando aos agentes SIP algumas tarefas que eram de responsabilidade dos agentes MIP, chegando a um processo mais ágil de *handover*.

Para chegar ao novo modelo, o modelo anterior foi acrescido dos componentes *SIP Agent* e *SIP Proxy*. A função do agente SIP era estabelecer novas sessões SIP, bem como receber solicitações das entidades envolvidas e enviar respostas a elas. O agente foi adicionado aos terminais móveis (MN) e ao servidor web (CN). O *proxy* possuía capacidades de roteamento e era capaz de realizar funções como autorização, autenticação, controle de acesso, retransmissões de solicitações (como os *proxies* tradicionais da arquitetura SIP) e segurança. Ele foi adicionado ao *gateway* UMTS (GGSN) e ao roteador MIP. Um diagrama do modelo proposto pode ser visto na figura 9.

No modelo anterior, o fluxo de aplicação era mantido através de tunelamento MIP, feito pelo roteador e pelo HA, uma vez que o MN recebia o seu endereço temporário na nova rede. O novo modelo utiliza uma nova abordagem, a de sessões SIP, para conseguir o mesmo objetivo, porém com maior agilidade. O roteador MIP faz também o papel de SIP Registrar, recebendo uma mensagem do tipo REGISTER quando o MN recebe seu CoA, e o CN recebe um convite para o estabelecimento de uma nova sessão, pelo comando REINVITE, de forma que o fluxo de aplicação não seja perdido. Portanto, o tunelamento não é mais necessário, e sua eliminação poupa tempo no processo de *handover*.

Figura 9 – Modelo de Atourassap



Fonte: (ATOURESSAP; FIGUEIREDO, 2012)

Os cenários de teste do novo modelo foram idênticos aos usados por Santos et al. (2011), para que as comparações entre eles pudessem ser consistentes. Nos resultados obtidos por Atourassap e Figueiredo (2012), houve um ganho de cerca de 50% no tempo de *handover* da rede UMTS para a rede WiMAX e de cerca de 35% na troca de rede WiMAX para UMTS. Em relação às classes QoS, todas elas tiveram seus requisitos atendidos com folga, inclusive o jitter da classe Conversational, que havia ficado abaixo do recomendado nos testes do modelo anterior.

### 3.3 Trabalhos de Execução e Decisão de *Handover*

Os trabalhos que dizem respeito à integração de redes heterogêneas e *handover* suave costumam ser de dois tipos: trabalhos que buscam desenvolver modelos de integração entre as redes, cujo foco é como integrá-las de maneira fluida, quais elementos de infraestrutura modificar ou introduzir e através de quais protocolos a integração é feita e de que maneira, e como executar o *handover* de forma transparente ao usuário e ao mesmo tempo fazer com que as aplicações em uso não sofram interrupções; e trabalhos cujo foco é a decisão de *handover*, cujo foco é como eleger a melhor rede em que o usuário deve se conectar, usando critérios de vários tipos. Nesta seção, os trabalhos relacionados foram divididos em trabalhos de integração e trabalhos de decisão de *handover*.

#### 3.3.1 Trabalhos Envolvendo Redes Homogêneas

Obter o menor atraso possível na execução do *handover* é fundamental para que o objetivo de mobilidade fluida seja atingido. Kim e Koh (2008) estudam, em seu artigo, o

uso dos protocolos MIPv6 e mSCTP para execução de *handover* nas camadas de rede e transporte, respectivamente. No trabalho, os autores descrevem dois cenários: um cenário de redes homogêneas e um cenário de redes heterogêneas. O primeiro cenário usa apenas uma tecnologia de rede, ao passo que o segundo cenário emprega múltiplas tecnologias (3G e WiFi). Em seus experimentos, os autores pressupõem que os terminais móveis são capazes de detectar eventos de rede como queda de força de sinal e detectar o sinal de novas redes. Para avaliar o tempo de *handover* nos cenários propostos, os autores primeiramente usaram um modelo analítico, e posteriormente executaram testes em um ambiente Linux com implementações de código aberto tanto de MIPv6 quanto de mSCTP. Para o cenário de redes homogêneas, o tempo de *handover* para o protocolo MIPv6 foi descrito como sendo igual a  $TM + TA + TB$ , onde  $TM$  é o tempo gasto para detectar a entrada na outra subrede,  $TA$  é o tempo de configuração de endereço na nova rede e  $TB$  é o tempo consumido pelo procedimento de registro na nova subrede e comunicação do novo endereço ao correspondente. Para o mesmo cenário, os autores supuseram que os tempos  $TM$  e  $TA$  para o protocolo mSCTP fossem os mesmos tempos gastos pelo MIPv6. Então, descreveram o tempo de *handover* do mSCTP como  $TM + TA + T_{mSCTP}$ , onde  $T_{mSCTP}$  é o tempo gasto pelo procedimento de reconfiguração de endereço do mSCTP, o ASCONF. Comparando as duas fórmulas, os autores concluíram que o protocolo mSCTP gasta menos tempo para executar o *handover*, por conta do procedimento de *binding* do MIPv6 e da comunicação de atualização de endereço ao correspondente. Nos testes práticos, que envolveram apenas um terminal móvel, os autores compararam *handovers* horizontais e verticais usando apenas MIPv6 e apenas mSCTP. O tempo de *handover* aferido nos testes dos autores foi muito inferior para o mSCTP em relação ao MIPv6. No cenário homogêneo, o mSCTP obteve uma média de 1,7 segundo, enquanto o MIPv6 obteve 3,2 segundos. No cenário heterogêneo, os valores encontrados foram 0,067 segundo para o mSCTP e 1,84 segundo para o MIPv6. Os autores explicam essa diferença com base na demora do procedimento de *binding* do MIPv6 frente ao ágil processo de reconfiguração dinâmica de endereços do mSCTP.

Em (KHAN; ANDRESEN, 2009), os autores exploram as funcionalidades do padrão MIH e como elas podem ser adaptadas para melhorar os *handovers* horizontais, uma vez que foram originalmente desenvolvidas para trabalhar em ambientes heterogêneos. A ideia dos autores é usar os serviços implementados no MIH (MIES, MICS e MIIS) para agilizar tarefas necessárias para *handovers* e que são consideradas lentas, tais como detecção de movimento, configuração de novos endereços IP e questões de autenticação e segurança. Para os autores, é possível usar o MIH e seus serviços para executar algumas dessas tarefas antes que o *handover* seja executado de fato, de forma a agilizar o processo como um todo. Os três serviços fornecidos pelo padrão MIH foram analisados individualmente, e os autores identificaram suas potenciais aplicações em *handovers* horizontais para se obter

um melhor desempenho. Em relação ao MIES, os autores afirmam que alguns dos eventos implementados por esse serviço podem ser usados para transmitir informações sobre a entrada ou saída terminais móveis de seus respectivos pontos de acesso, o que por sua vez poderia substituir procedimentos similares que seriam realizados apenas na camada de rede, aumentando a velocidade do processo. Os autores argumentam ainda que a entrega de pacotes em redes homogêneas pode ser otimizada se a transferência de contexto da HA para a FA for feita por meio dos eventos MIES que lidam com a variação na força do sinal. Em relação ao MIIS, serviço que coleta informações sobre as redes presentes no ambiente, seu papel na otimização reside na coleta de informações sobre os pontos de acesso aos quais o usuário pode se conectar caso precise trocar de subrede, da mesma forma que aconteceria em um *handover* vertical. O MIIS é capaz de fornecer informações cruciais a uma boa tomada de decisão acerca de para qual subrede mudar. Os autores apregoam o uso dessas informações amealhadas pelo MIIS, que estão à disposição dos terminais móveis, em detrimento de métodos similares para obter as mesmas informações, tais como o procedimento de *Discovery* do MIP, muito mais lento. Finalmente, no que tange ao MICS, os autores comentam que ele pode ser usado em conjunto com o MIIS para ganhar tempo durante o *handover*. Isso ocorre porque o recebimento de um comando MICS indica necessariamente uma mudança de estado futura na camada de enlace do terminal móvel. Essa informação pode ser usada para melhor preparar os terminais para tomar decisões apropriadas. Comandos MICS podem ainda ser usados pelo terminal móvel para inquirir sobre pontos de acesso disponível, e entre os pontos de acesso para transmitir informações sobre reserva de recursos e CoA atribuídos a terminais que mudaram de subrede.

Uma combinação de MIPv4 e MIH foi usada por Kim et al. (2008) para conseguir desempenho melhor em *handovers* horizontais. Os autores apostaram no uso de informação fornecida pelo MIH acerca de largura de banda disponível e distância para melhorar a tomada de decisão de *handover*. Adicionalmente, propõem uma metodologia mais ágil de *handover* na camada de enlace que reduz o tempo de varredura usando informações sobre os pontos de acesso disponíveis. No método dos autores, quando um terminal móvel detecta que um *handover* pode acontecer (no momento em que o evento *link\_going\_down* é disparado), ele transmite à entidade MIHF do seu ponto de serviço sua localização e informações sobre a qualidade de serviço (QoS) que deseja receber. O ponto de serviço usa o MIIS para coletar informações sobre os pontos de acesso disponíveis no ambiente e retorna uma lista com esses pontos de acesso ao terminal móvel. O terminal móvel, por sua vez, escolhe a qual ponto de acesso irá se conectar com base na qualidade de serviço oferecida pelo ponto de acesso e sua probabilidade de manter a conexão por um período longo de tempo. Além da otimização na camada de rede, que por si só não garante a otimização pretendida, os autores propuseram uma otimização também para a camada de enlace para reduzir os tempos de varredura, autenticação e associação. Nesse

artigo, os autores optaram por focar apenas no tempo de varredura. Para que um terminal móvel encontre pontos de acesso aos quais pode se conectar, ele realiza uma varredura de todos os canais disponíveis, pois não tem nenhuma informação de antemão. Os autores propõem o uso do serviço MIIS para que o terminal móvel possa obter as informações que precisa sobre os pontos de acesso, eliminando a necessidade de realizar uma varredura em todos os canais disponíveis. Para avaliar as otimizações propostas, os autores executaram simulações usando a ferramenta OPNET. A implementação do MIH foi feita pelos próprios autores do experimento. No cenário proposto, um único usuário trafega a uma velocidade de 60 km/h em um ambiente em que há 4 pontos de acesso. Uma aplicação UDP foi usada para simular tráfego na rede. O tempo médio de *handover* foi de 165 ms para o cenário simulado. Os autores concluíram que o uso de MIH é capaz de melhorar significativamente o desempenho do *handover* horizontal, especialmente através do uso do MIIS.

Shayea, Ismail e Nordin (2012) realçam a importância de se desenvolver bons algoritmos para handovers em redes LTE e LTE-*Advanced*, dado o aumento na mobilidade e velocidade dos usuários e a expectativa de que redes de quarta geração dêem suporte a *handovers* mesmo em velocidades acima de 500 Km/h (para acomodar usuários que utilizem trens-bala, por exemplo). Em seu trabalho, conduzem um pequeno survey de técnicas de *handover* em redes LTE-*Advanced*, com ênfase nas técnicas FSHO (*Fractional Soft Handover*), SSHO (*Semi-Soft Handover*) e MCHO (*Multiple Carrier Handover*). No artigo, algumas estratégias para realizar *handovers* suaves em redes LTE são mencionadas, tais como: *Macro Diversity Handover* (MDHO), que consiste na manutenção de uma lista de eNBs da vizinhança tanto pelos terminais móveis como pelas próprias eNBs, e através de consultas a essas listas os terminais móveis podem se comunicar simultaneamente com múltiplas estações-base. Essa técnica, segundo os autores, é eficiente, porém de complexa implementação; *Fast Base Station Switching* (FBSS), que se trata de uma técnica similar à MDHO, na qual a mesma lista de eNBs é mantida pelos nós, porém uma das eNBs é eleita pelo terminal móvel como âncora e serve como única fonte de comunicação tanto para UL (*uplink*) como DL (*downlink*), o que segundo os autores deixa a implementação menos complexa. O trabalho menciona ainda técnicas avançadas de *handover* para redes LTE-*Advanced*, dentre as quais são citadas: FSHO, uma técnica aplicada especificamente a serviços VoIP que faz com que *handovers* suaves parciais sejam executados a fim de manter serviços VoIP sem perdas; SSHO, que apregoa a seleção do melhor sinal entre eNBs pertencentes a um esquema de reuso parcial de frequências e mitigação de interferência inter-células; MCHO, que propõe um esquema pelo qual portadoras distintas instanciadas pelo terminal móvel buscam conexões a eNBs diferentes, e após o *handover* recebem a aplicação que viajava pela portadora original. Os autores propõem um algoritmo híbrido que combina FSHO e SSHO e conduzem simulações (o simulador não foi especificado) de um cenário com 19 eNBs e 40 usuários, e os resultados mostraram que o algoritmo híbrido

proposto pelos autores culminou em menor número de *handovers* em comparação com as outras técnicas.

### 3.3.2 *Trabalhos Envolvendo Redes Heterogêneas*

Em (MA et al., 2004), os autores desenvolveram um modelo de integração de redes UMTS e Wi-Fi que usa uma extensão do protocolo SCTP (*Stream Control Transmission Protocol*) conhecida como mSCTP (*mobile SCTP*) como elemento integrador das duas tecnologias. O modelo tira proveito da capacidade *multihoming* do SCTP, ou seja, da capacidade que o protocolo tem de endereçar pacotes a múltiplos endereços IP, para fazer a integração entre as diferentes redes sem a necessidade de adicionar novos elementos infraestruturais. O modelo de integração proposto é fracamente acoplado, ou seja, as redes são independentes entre si e não implementam funcionalidades e protocolos das outras redes. A justificativa dos autores para a escolha do protocolo SCTP, além da capacidade de endereçar pacotes a IPs alternativos caso o endereço principal não esteja disponível, é o baixo desempenho alcançado por outras soluções de integração, como MIP e SIP. No modelo, os nós móveis recebem um endereço IP na nova rede, comunicam o endereço recebido ao nó correspondente através de mensagens SCTP e re-estabelecem o fluxo de comunicação definindo o novo endereço como endereço primário. Existem dois modos de comunicação: *single-homing* e *dual-homing*. Esse último modo requer que o nó correspondente tenha dois endereços IP, de forma que um fluxo de comunicação ocorra em cada rede. Simulações foram conduzidas no simulador ns-2 e os resultados mostraram que o modelo é capaz de realizar a mudança de rede corretamente, e que o modo *dual-homing* apresenta melhor desempenho, alcançando maior vazão de dados e menor atraso.

Alamri e Adra (2012) propõem, em seu artigo, um modelo de integração de redes UMTS e WiMAX usando os protocolos MIP e SIP. A integração é baseada no *IP Multimedia Subsystem* (IMS) e seu objetivo é prover *handovers* transparentes e com garantia de QoS aos usuários móveis. O modelo apregoa integração fracamente acoplada entre as redes, por não haver necessidade de modificar protocolos, interfaces e serviços. Os elementos que compõem o modelo são redes WiMAX e UMTS, que servem como *foreign networks* MIP, uma rede que contém elementos IMS, que serve como *home agent* para os dispositivos móveis e um núcleo IP ao qual todas as redes se conectam. A decisão de *handover* é baseada na potência do sinal recebido ou, caso uma rede WiMAX e uma rede UMTS tenham potências adequadas de sinal ao mesmo tempo, nos requisitos de qualidade de serviço das aplicações em curso. A descoberta de redes e o gerenciamento da mobilidade são feitas através do MIP, e mensagens SIP são usadas para atualização de parâmetros da sessão em curso e término da sessão na rede anterior. Apenas a proposta de integração é apresentada no artigo, e não foram realizados testes para a avaliação do modelo.

O modelo de integração entre UMTS e WiMAX proposto por Khan, Ismail e Dimiyati (2009) tem como objetivo prover mobilidade fluida tanto na camada de aplicação quanto na camada de rede, culminando em um processo de *handover* vertical suave com garantia de continuidade de serviço. Para tanto, os autores utilizam MIP e IMS. O protocolo MIP é usado para gerenciar a mobilidade na camada de rede, ao passo que o IMS é empregado na mobilidade da camada de aplicação. No modelo em questão, a decisão de *handover* é tomada pelo próprio nó móvel, a partir da medição de potência dos sinais recebidos das estações-base. Sessões em curso são mantidas durante o processo de *handover*, tendo seu fluxo transferido para a nova rede e só então a conexão antiga é encerrada. Por exemplo, se um nó móvel está conectado à rede WiMAX, com um serviço em execução, e executa um *handover* para a rede UMTS, a conexão com a rede WiMAX é mantida e o tráfego de pacotes segue acontecendo, até que o *handover* seja concluído. A partir de então, a rede da qual o nó móvel se desconectou é notificada e o fluxo é interrompido. O modelo foi implementado no simulador OPNet e testes foram feitos simulando uma aplicação FTP e uma aplicação VoIP (*Voice over IP*). Os resultados mostraram que, em áreas de sobreposição de cobertura das duas redes, o atraso médio de *handover* ficou em torno de 129 milissegundos e para áreas em que não havia sobreposição, abaixo de 2 segundos. Os terminais móveis não sofreram interrupções nos fluxos de aplicações que estavam em curso antes da mudança de rede.

A maior parte dos trabalhos que investiga *handovers* e integração de redes usa simulações para testar suas hipóteses, devido às dificuldades enfrentadas por pesquisadores para conseguir realizar testes em ambientes reais. Em (SODERMAN et al., 2013), contudo, os autores propõem um arcabouço para integração fluida de redes 3G e WiFi e realizam testes práticos, usando telefones celulares, para validar seu modelo. O arcabouço descrito é baseado no protocolo mSCTP e composto por dois componentes principais, ambos implementados nos próprios aparelhos: *Movement Detection Module* (MDM) e *Mobility Manager* (MM). O MDM monitora a interface WiFi do dispositivo e comunica quaisquer mudanças e eventos ao MM, que por sua vez é o componente central do arcabouço, recebendo eventos do MDM e monitorando a força do sinal das redes WiFi do ambiente. O MM tem ainda a responsabilidade de tomar a decisão e executar o *handover*. Em seus experimentos, os autores montaram uma rede WiFi no campus da universidade KTH e usaram uma rede 3G comercial local. Dois experimentos foram feitos: o primeiro usando mSCTP puro, que faz *handover* da rede 3G para WiFi sempre que possível, ignorando a força do sinal, e retorna para a rede 3G após o sinal WiFi ser perdido; o segundo usando o arcabouço desenvolvido pelos autores, que se diferencia da abordagem anterior por se conectar à rede 3G antes da perda da conexão WiFi. Dois padrões de movimento foram analisados: um retilíneo, que começava dentro da área de cobertura da rede WiFi e se dirigia para fora dela; e um circular, que tangenciava a área de cobertura da rede WiFi

em um certo momento. A aplicação usada nos testes consistia de um fluxo de dados constante a 3 mbps, valor considerado pelos autores compatível com o *streaming* de vídeo em alta resolução. Para avaliar a qualidade da conexão, os autores usaram uma métrica de QoE (*Quality of Experience*) desenvolvida por (ICKIN et al., 2010). Os resultados mostraram que, para o experimento usando apenas mSCTP, houve grande deterioração de QoE durante o movimento do usuário em ambos os padrões de movimento, atingindo por várias vezes a condição de Ruim segundo a métrica usada. O experimento usando o arcabouço dos autores foi capaz de sempre manter o QoE na condição de Excelente, a maior possível dentro da métrica, garantindo a troca suave entre as redes sem perda da conexão.

Com o objetivo de integrar redes EPC e WLAN, (JOHN; MADLOPHA; VENTURA, 2013) propõem um esquema de integração baseado na extensão do protocolo PMIPv6 (*Proxy Mobile Internet Protocol version 6*). O PMIPv6 foi escolhido pelos autores por permitir *multihoming*, ou seja, a conexão simultânea a mais de uma interface de rede. O objetivo da proposta dos autores é realizar handovers *make-before-break*, que não são permitidos de forma nativa no PMIPv6. A extensão proposta pelos autores foi feita no módulo LMA *Local Mobility Anchor* do PMIPv6, mais especificamente aos processos de acoplamento de terminais móveis, para permitir que uma conexão à interface para a qual o terminal irá fazer *handover* seja ativada antes que a conexão atual seja desfeita. Detalhes das modificações podem ser encontradas na Seção 4 do artigo. Os autores montaram um ambiente de teste baseado no *Open EPC*, um protótipo da implementação do EPC do 3GPP que permite emular sistemas próximos aos sistemas EPC reais, no *Open IMS Core*, uma implementação de código aberto dos elementos centrais ao IMS *IP Multimedia Subsystem*, no *UCT IMS Client*, um cliente IMS no qual os autores rodaram seu programa IPTV de teste e numa implementação própria do PMIPv6. Em seus testes, os autores mensuraram o tempo de *handover* e a taxa de perda de pacotes para comparar a implementação pura do PMIPv6 com as extensões feitas em seu trabalho. Os resultados mostraram que a implementação dos autores resultou em uma melhora de 1424 para 59 ms nos tempos de troca de LTE para WLAN e de 1894 para 147 ms nas trocas de WLAN para LTE. Os resultados de perda de pacotes foram iguais para os dois modelos testados: zero. Os autores atribuem esse resultado ao gerenciamento inteligente de interfaces feito pelo protocolo PMIPv6.

### **3.3.3 Trabalhos de Decisão de Handover**

No artigo de Lassoued, Bonnin e Belghith (2008) é proposta uma arquitetura de gerenciamento de mobilidade e controle de recursos em ambientes heterogêneos de redes. Ele apregoa uma tomada de decisão de *handover* cooperativa entre terminal móvel e rede, mas com decisão final do terminal móvel. As operadoras de rede tentam

contribuir para essa decisão de forma a fazer um melhor gerenciamento global de recursos. Os terminais móveis são acrescidos de um módulo chamado mecanismo de decisão de *handover*, composto por uma unidade que contém algoritmos de decisão, um banco de dados e uma unidade coordenadora. Essa unidade coordenadora povoa o banco de dados com informações sobre as redes, tais como sua disponibilidade de recursos, e aciona o módulo de decisão de *handover* quando apropriado. Existe ainda o acréscimo de uma entidade chamada de controlador, que coleta periodicamente informações sobre as redes e as transmite aos coordenadores dos terminais móveis. Esse controlador tem o objetivo de eliminar problemas de escalabilidade, uma vez que com seu uso a rede não tem de estar ciente do contexto de todos os terminais móveis para que decisões de *handover* possam ser tomadas. Os autores realizaram testes usando cinco algoritmos de decisão diferentes, e avaliaram as quatro classes QoS de serviço de acordo com pesos atribuídos a parâmetros de maior ou menor relevância para cada classe, a fim de analisar se algoritmos diferentes fariam com que os terminais móveis fossem alocados para redes de acordo com a sua necessidade de recursos para o serviço em utilização. Foram feitas simulações com apenas um terminal móvel, e os autores concluíram que, usando seu modelo, as operadoras podem modificar dinamicamente a distribuição de fluxo entre as diversas redes apenas variando os parâmetros que regem as classes QoS de serviços.

O trabalho de Jailton et al. (2013) tem um foco diferente na tomada de decisão de *handover*. Para os autores, o interessante para o usuário não são parâmetros quantitativos sobre recursos da rede, mas sim a qualidade percebida do serviço que está em execução. A essa qualidade percebida pelo usuário, dá-se o nome de *Quality of Experience* (QoE). Eles propõem, então, um esquema de *handover* vertical suave entre redes Wi-Fi e WiMAX que funciona como uma extensão ao protocolo 802.21 (MIH). No trabalho proposto, os autores utilizam aplicações de *streaming* de vídeo como teste. A arquitetura proposta contém um estimador de qualidade de vídeo, uma unidade de mapeamento que busca canais apropriados nas redes para que o fluxo de aplicação seja mantido, e um adaptador QoE que tenta manter a qualidade dos vídeos em situações de congestionamento. Todas as entidades envolvidas (terminais móveis e as estações e pontos de acesso das redes) têm acrescentados à funcionalidade MIH os componentes desenvolvidos pelos autores. O modelo funciona da seguinte forma: quando o terminal móvel detecta uma nova rede, através de eventos MIH, o estimador de qualidade entra em ação para determinar se a qualidade do vídeo na nova rede seria superior à qualidade na rede atual. Caso isso se confirme, o *handover* é efetuado. A unidade de mapeamento procura então encontrar um canal adequado na nova rede para acomodar o fluxo de aplicação, e a unidade de adaptação funciona descartando quadros que julga serem pouco importantes, caso a rede porventura encontre dificuldade na disponibilização de recursos. Os autores realizaram simulações com 50 terminais móveis, testando um modelo sem o acréscimo das funções

QoE (*pure*), um modelo que consegue encontrar um canal apropriado na nova rede para acomodar o fluxo de aplicação (*full*), um modelo que acomoda o fluxo em um canal com menos recursos na nova rede (*part*) e um modelo que faz a adaptação de qualidade descartando certos quadros do vídeo (*drop*). Os resultados mostraram que os modelos *full* e *part* conseguiram manter a qualidade do vídeo em níveis excelentes de acordo com a percepção dos usuários, mesmo com o aumento de congestionamento, enquanto os modelos *pure* e *drop* experimentaram quedas acentuadas de qualidade à medida em que o congestionamento da rede aumentava.

Johnson, Nath e Velmurugan (2013) têm uma visão diferente em relação ao trabalho anterior sobre o que deve ser considerado na realização do *handover*. Para eles, parâmetros como força de sinal, custo e utilização atual das redes são importantes, mas a velocidade em que o terminal móvel se desloca também é bastante relevante. Não faz sentido, por exemplo, migrar para uma rede de curto alcance, como um ponto de acesso Wi-Fi, se o terminal estiver se deslocando em alta velocidade. O modelo que propõem, para ambientes Wi-Fi e WiMAX, é baseado em uma função-objetivo bem definida, que leva em conta força de sinal, carga, custo e velocidade do terminal, parâmetros cujos pesos podem ser ajustados pelos usuários para que as decisões estejam mais de acordo com sua preferência. O cenário avaliado pelos autores consistia em três pontos de acesso Wi-Fi e uma estação base WiMAX. O número de terminais móveis considerados foi de 10. Os testes foram separados em duas categorias: a primeira considerava força de sinal e velocidade como parâmetros da função de decisão e a segunda considerava, além dos parâmetros anteriores, carga e custo. Os resultados obtidos pelos autores mostram que o número de *handovers* solicitados na segunda categoria de testes foi aproximadamente 50% menor do que quando apenas velocidade e força de sinal eram considerados. O número de mudanças de rede diminuiu, também, quando os usuários se deslocam em velocidades maiores.

Singhrova e Prakash (2009) argumentam que pelo fato de os sinais captados por dispositivos móveis não serem muito limpos, a tomada de decisão de *handover* remete a sistemas *fuzzy*. Os autores propõem, então, um mecanismo para tomada de decisão de *handover* baseado em lógica *fuzzy* em um ambiente que integra redes UMTS e Wi-Fi. O modelo proposto pelos autores contém uma função, composta por vários parâmetros de decisão, que é usada no mecanismo *fuzzy* para efetuar a decisão. Os parâmetros da função são: banda disponível, ou seja, a banda não utilizada na rede destino; velocidade do terminal móvel; número de usuários na rede; potência de sinal recebido; nível de carga da bateria do terminal móvel; área de cobertura da rede. Todos os parâmetros recebem o mesmo peso unitário, ou seja, os autores não consideram algum parâmetro mais importante que os demais. Os parâmetros são usados em regras do tipo *se então senão*, responsáveis por determinar se a troca de rede deve ou não ser efetuada. Para testar o mecanismo, os autores utilizaram as funcionalidades de lógica difusa encontradas no

MATLAB. Três parâmetros foram avaliados: efeito pingue-pongue, vazão e complexidade computacional. Efeito pingue-pongue significa alternar repetidamente entre duas redes em um curto espaço de tempo. A complexidade computacional é referente ao número de operações realizadas pelos algoritmos. Os resultados mostram que o uso de sistemas *fuzzy* ameniza a complexidade e a ineficiência de se lidar com um grande número de variáveis de decisão, e garante boas tomadas de decisão e garantia de QoS.

Xiong e Cao (2013) apresentam, em seu trabalho, uma extensão ao padrão IEEE 802.21 (MIH) para permitir que informações de contexto sejam obtidas, a fim de conseguir estabelecer previsões precisas de estabilidade de enlace. Definir a estabilidade de um enlace em um período de tempo  $t$  é importante no contexto de *handovers* porque não é interessante para um usuário conectar-se a uma nova rede que tem grandes chances de apresentar enlaces pouco estáveis devido a fatores como grande número de usuários. O módulo ciente de contexto é adicionado à entidade MIHF e é capaz de coletar e armazenar um histórico de valores de potência de sinal, para realizar previsões de estabilidade. Novas primitivas são adicionadas aos serviços MICS e MIIS, para que essas informações possam ser divulgadas entre camadas, meios de acesso e usuários. Usuários podem solicitar aos pontos de acesso que enviem seu histórico de informações armazenadas, para que possam avaliar se aquele enlace tem estabilidade suficiente para ser considerado um bom candidato a conexão. Um algoritmo de agrupamento *k-means* também é usado para agrupar históricos de potência de sinal percebida pelos usuários de acordo com sua mobilidade, para fornecer informações mais precisas a usuários que solicitam ao MIIS informações de estabilidade de enlaces (enlaces podem ser menos estáveis se o usuário tiver um histórico de grande mobilidade). Testes foram realizados em um cenário modelando um ambiente interno contendo dois usuários, um estático e um móvel, e quatro pontos de acesso, sendo que um deles apresentava danos físicos que comprometiam a estabilidade do enlace, mas ainda permitia que usuários se conectassem a ele. Os resultados mostraram que o algoritmo desenvolvido pelos autores ajudou os usuários a selecionar links que, para seus contextos, eram mais estáveis, e evitar o ponto de acesso danificado, que apresentou baixos índices de estabilidade de enlace.

Recursos limitados como pouca capacidade de bateria fazem com que seja necessário, quando se trata de *smartphones*, procurar ser o mais econômico possível. Com isso em mente, juntamente com a necessidade de aliviar o tráfego nas redes de celular gerado pelo grande aumento no uso da *Internet* por dispositivos como *smartphones* e *tablets*, os autores de (KUHNER; WIETFELD, 2014) desenvolveram uma solução de decisão de *handover* cujas meta principal é a eficiência energética. Outra motivação destacada pelos autores é que muitos algoritmos de decisão de *handover* são complexos demais, e demandam capacidade de processamento demais, para ser usados em *smartphones*. A solução dos autores envolve a instalação, no cliente, de um aplicativo para provisão fluida

de serviços chamado CSH-MU, com melhorias para funcionar em redes LTE, aliada a um algoritmo de decisão, baseado em força de sinal e lógica *fuzzy*, que fazem parte de um mecanismo global de gestão de energia. Os autores lançaram mão de um experimento em laboratório e um experimento prático para testar seu modelo. O experimento de laboratório consistiu em um emulador de redes LTE e UMTS conectado a um roteador 802.11g que por sua vez estava conectado a um laptop com um servidor Iperf para mensuração de energia. O atraso total de *handover* e o consumo de energia foram medidos em um Samsung Galaxy S3, e os resultados mostraram que o tempo de *handover* de LTE para WiFi ficou na casa dos 220 ms, enquanto o *handover* de WiFi para LTE demorou mais que 250 ms (o tempo exato não foi informado). No experimento prático, os autores utilizaram o mesmo aparelho e percorreram a pé um trecho de um edifício na Universidade de Dortmund, enquanto faziam o download de um arquivo do servidor do edifício. Todas as redes utilizadas no experimento prático eram públicas. Os tempos de *handover* encontrados no experimento prático foram inferiores aos tempos do experimento em laboratório, ficando na faixa de 150 ms. Em relação ao consumo de energia, o uso do método *fuzzy* dos autores em comparação com uma solução puramente baseada em força de sinal acarretou em uma economia de bateria de aproximadamente 50%.

É facilmente perceptível que o tema de integração de redes é vastamente estudado na academia, dada a diversidade de trabalhos acerca do assunto encontrados na literatura. Pesquisadores buscam soluções inovadoras e eficazes tanto para o problema de decisão de *handover* quanto para o problema de como fazer a integração das redes heterogêneas e executar o *handover*. Trata-se, portanto, de um objeto de pesquisa valorizado e em voga dentro do campo de Redes Móveis. O Quadro 1 abaixo sumariza os trabalhos estudados para a elaboração deste trabalho.

A grande variedade de tentativas de solucionar o problema da integração mostra que se trata de um problema complexo, para o qual ainda não foi encontrada uma solução definitiva, que resolva todos os problemas de forma eficaz e viável. O modelo de integração proposto neste trabalho visa ser uma solução mais completa do que as atuais soluções de integração, e embora ainda não tenha sido aplicado a um ambiente heterogêneo, possui toda a preparação necessária para que isso possa ser feito de forma simples.

O modelo aqui proposto se diferencia de soluções semelhantes por trabalhar em nível multicamada, abordando as camadas de enlace, rede e sessão, culminando em uma solução ainda sem equivalente na literatura, até onde as pesquisas puderam apontar. A solução proposta neste trabalho se diferencia do modelo proposto em (ATOURESSAP; FIGUEIREDO, 2012) por ser aplicada a redes de quarta geração (LTE), ao passo que o modelo supracitado foi testado em ambiente heterogêneo composto por redes de celulares de terceira geração (UMTS) e redes Wi-MAX, cujo uso se limita a casos de nicho específicos.

**Tabela 1 – Sumário de trabalhos relacionados**

Autor	Tipo de HO	Protocolos	Rede(s)
(KIM; KOH, 2008)	horizontal	MIP, mSCTP	–
(KHAN; ANDRESEN, 2009)	horizontal	MIH	–
(KIM et al., 2008)	horizontal	MIP, MIH	–
(SHAYEA; ISMAIL; NORDIN, 2012)	horizontal	MIP	LTE
(SANTOS et al., 2011)	vertical	MIP, MIH	UMTS, WiMAX
(ATOURASSAP; FIGUEIREDO, 2012)	vertical	MIP, SIP, MIH	UMTS, WiMAX
(MA et al., 2004)	vertical	mSCTP	UMTS, WiFi
(ALAMRI; ADRA, 2012)	vertical	MIP, SIP	UMTS, WiMAX
(KHAN; ISMAIL; DIMYATI, 2009)	vertical	MIP	UMTS, WiMAX
(SODERMAN et al., 2013)	vertical	mSCTP	3G, WiFi
(JOHN; MADLOPHA; VENTURA, 2013)	vertical	MIP	LTE, WiFi
(JAILTON et al., 2013)	vertical	MIH	WiFi, WiMAX
(JOHNSON; NATH; VELMURUGAN, 2013)	vertical	–	WiFi, WiMAX
(SINGHROVA; PRAKASH, 2009)	vertical	–	UMTS, WiFi
(XIONG; CAO, 2013)	vertical	MIH	–
(KUHNERT; WIETFELD, 2014)	vertical	–	LTE, WiFi

Fonte: elaborado pelo autor



## 4 METODOLOGIA

Pesquisadores devem testar e aplicar suas hipóteses, para investigar com total acurácia os efeitos de suas pesquisas nos ambientes para os quais são desenvolvidas. Infelizmente, nem sempre, isso é possível, seja por falta de recursos, impossibilidades técnicas ou outras razões. Quando isso ocorre, é necessário procurar alternativas que permitam testar as hipóteses de maneira fidedigna, mas fora de um ambiente real.

Este trabalho envolve pesquisas em redes LTE. Para que o modelo fosse testado em uma rede real, seria necessário que as operadoras de telefonia cedessem parte de suas redes para testes, o que não acontece, ou que fosse criada uma pequena rede LTE apenas para fins de teste, o que é extremamente proibitivo em termos técnicos e financeiros. A alternativa é usar simuladores que modelem virtualmente as redes da maneira mais precisa possível, de forma que pesquisadores possam implementar suas pesquisas e testá-las de forma cientificamente válida.

O simulador escolhido para este trabalho foi o *Network Simulator 3* (NS-3). O NS-3 é uma evolução do NS-2, simulador de redes largamente utilizado em pesquisas acadêmicas em várias áreas. O código do NS-3 é inteiramente novo e distinto do NS-2, e foi escrito inteiramente em C++ para que tivesse máximo desempenho. Ao contrário do NS-2, o NS-3 não usa *scripts* de configuração para modelar cenários, mas programas em C++ que descrevem e configuram o cenário de acordo com a necessidade do pesquisador.

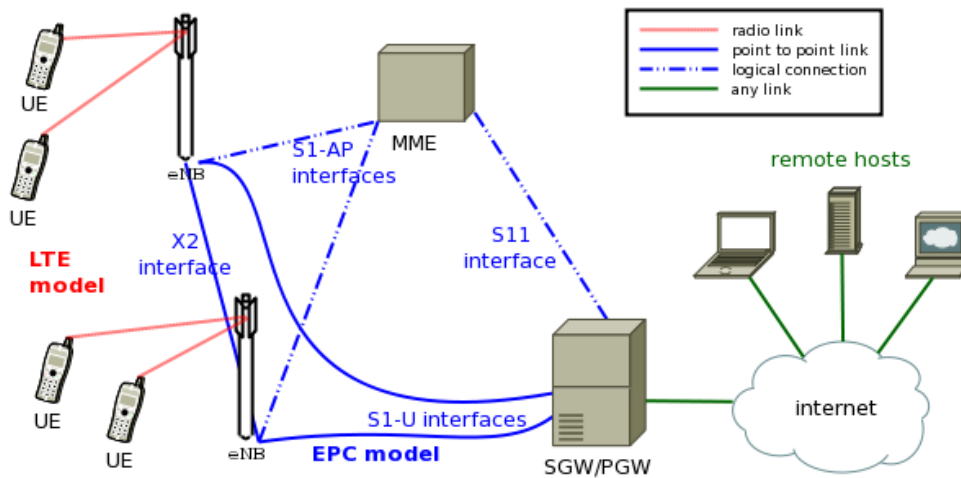
O trabalho de Atourassap e Figueiredo (2012), no qual o modelo aqui descrito é baseado, usou o NS-2 em seus testes. No entanto, seu modelo foi criado para redes UMTS e Wi-MAX, ao passo que o modelo deste trabalho foi desenvolvido para redes LTE, que não são suportadas pelo NS-2, daí a necessidade de usar o NS-3, que possui um módulo consolidado que modela redes LTE de forma bastante precisa, o módulo LENA (BALDO et al., 2011).

O módulo LENA é bastante completo em sua modelagem de redes LTE. Sua arquitetura básica pode ser vista na Figura 10. No LENA, o modelo LTE é separado do modelo EPC. O modelo LTE trata da comunicação bilateral entre eNBs e UEs, enquanto o módulo EPC lida com a comunicação entre eNBs e elementos internos da rede, o que é transparente aos usuários.

### 4.1 Descrição do Cenário Simulado

O cenário de simulação foi pensado de forma que fosse possível verificar se os objetivos do modelo foram cumpridos. Como se trata de um modelo de *handover* horizontal suave, foi preciso criar um cenário em que houvesse movimentação dos usuários

Figura 10 – Arquitetura Básica de redes LTE no NS-3

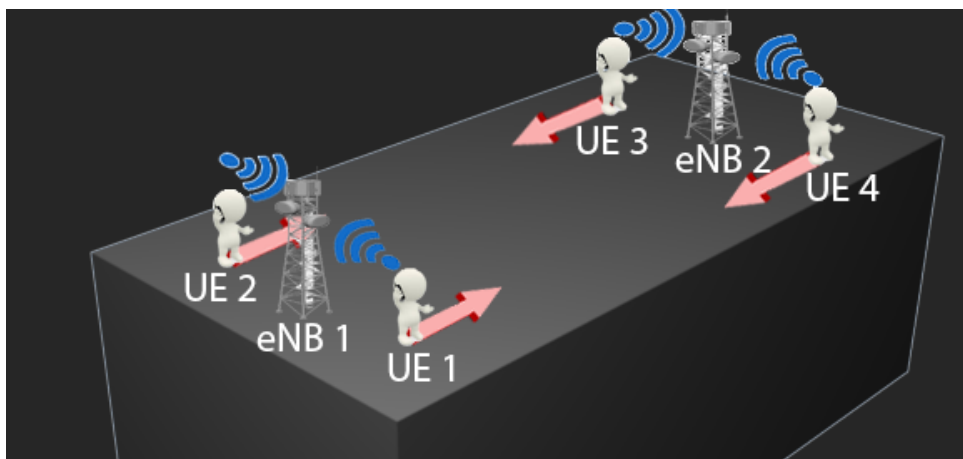


Fonte: (PROJECT, 2014)

de forma a forçar a mudança de eNB e observar se todos os requisitos do modelo com relação à completude do *handover* horizontal suave e desempenho das aplicações foi cumprido.

O cenário de simulação deste trabalho conta com 4 usuários e 2 eNBs. Cada usuário se desloca em direção à eNB à qual não está inicialmente conectado, para que possa ocorrer a troca de eNBs através do modelo multicamadas. Cada um dos 4 usuários conta ainda com aplicações executadas ininterruptamente durante o cenário de simulação, para que seja possível avaliar métricas de desempenho necessárias ao bom funcionamento das aplicações e se o *handover* horizontal causa algum tipo de interrupção em seu fluxo de dados.

Figura 11 – Cenário de Simulação



Fonte: elaborada pelo autor

A Figura 11 ilustra o cenário modelado no NS-3. Como pode ser visto na imagem,

existem duas eNBs e quatro UEs. As UEs 1 e 2 estão, inicialmente, conectadas à eNB 1, e a UEs 3 e 4 estão, inicialmente, conectadas à eNB 2. Durante a simulação, os usuários se movimentam retilineamente em direção à eNB à qual não estão conectados, até que o sinal dela se torne mais forte que o da eNB de origem e ocorre o *handover* horizontal. Esse processo acontece, aproximadamente, na metade do percurso de cada UE.

Cada UE executa, a partir do segundo 2 da simulação, até o segundo 148, uma aplicação. As aplicações existentes no cenário foram escolhidas através de um mapeamento (PROJECT, 2006) para as 4 classes de QoS das redes UMTS (*Streaming, Conversational, Background, Interactive*).

Os nós 1 e 4 executam aplicações que simulam uma aplicação VoIP pertencente à classe *Conversational*. É como se eles estivessem conversando um com o outro através do programa Skype. O nó 2 executa uma aplicação que simula a classe *Streaming*, como se assistisse a um vídeo no YouTube. Além desta aplicação, o nó 2 executa ainda uma aplicação da classe *Interactive*, que simula uma situação de requisição e resposta do cliente para o servidor e vice-versa. O nó 3 executa uma aplicação que simula a classe *Background*, simulando o *download* de um arquivo grande. Todas as aplicações instaladas nos nós começam e terminam no mesmo instante da simulação, o segundo 2 e o segundo 148, respectivamente.

Existe um nó não representado na imagem que age como o servidor de todas as aplicações, exceto as aplicações VoIP, que conectam uma UE a outra. Esse nó correspondente está conectado ao SGW/PGW da rede LTE através de uma conexão física com capacidade de 100 GB/s e atua como se fosse um servidor de Internet.

## 4.2 Configurações das Simulações

Todas as simulações foram executadas em um laptop *Apple MacBook Air* modelo 2013 de 13 polegadas. As configurações do computador podem ser vistas no Quadro 3.

**Quadro 3 – Configurações do computador usado para executar as simulações**

<b>Processador</b>	Dual-core, Intel Core i5 4200U 1.3 GHz
<b>Memória RAM</b>	8 GB LPDDR3 1600 MHz
<b>Sistema Operacional</b>	Mac OSX Yosemite 10.10.3
<b>Placa de Vídeo</b>	Intel Iris 5200

Fonte: elaborado pelo autor

Os parâmetros de configuração usados no simulador NS-3 para os cenários testados são discriminados na Tabela 2 e explicados em seguida, quando necessário.

O tempo de simulação escolhido foi de 150 segundos, suficiente para que os nós se deslocassem até um ponto em que o *handover* ocorresse, de acordo com sua velocidade

**Tabela 2 – Parâmetros de configuração usados nas simulações**

Tempo de simulação	150 segundos
Número de execuções	33
Número de nós	4
Número de eNBs	2
UdpClient::Interval	10 ms
LteHelper::UseIdealRrc	Falso
PathLossModel	Cost231
HandoverAlgorithm	A2A4Rsrq
Potência de transmissão eNB	46 dB
OnTime	ExponentialRandomVariable(0.352)
OffTime	ExponentialRandomVariable(0.65)
Posição da eNB 1	(0, 0)
Posição da eNB 2	(1500, 0)
Posição do nó 1	(20, 240)
Posição do nó 2	(100, 640)
Posição do nó 3	(1500, 240)
Posição do nó 4	(1480, 640)
Velocidade dos nós	10 m/s

Fonte: elaborado pelo autor

de 10 m/s (equivalente a 36 km/h). O modelo de mobilidade escolhido para os nós foi o *ConstantVelocityMobilityModel*, que faz com que os nós se desloquem em linha reta a uma velocidade constante. A simulação foi executada 33 vezes para que houvesse variação nos resultados e a média fosse obtida. O intervalo de confiança para os resultados obtidos na simulação é de 95%. O parâmetro Interval diz respeito ao intervalo entre pacotes enviados em aplicações UDP. Trata-se de um valor recomendado na documentação do simulador para que não haja infinitos pacotes enviados durante a simulação, o que acarretaria em problemas de execução. O parâmetro *UseIdealRrc* foi configurado como falso para que a simulação da sinalização de rádio controlada pelo RRC estivesse sujeita a perdas, como falhas de estabelecimento da conexão com o usuário. O parâmetro *PathLossModel* indica o modelo de perda de potência na propagação das ondas de rádio usadas na simulação, no caso o modelo COST 231. O parâmetro *HandoverAlgorithm* indica qual o algoritmo de *handover* deve ser usado para tratar a mudança de eNB no nível de interface X2. O algoritmo A2A4Rsrq faz com que o *handover* para uma eNB diferente ocorra na interface X2 se o sinal de uma eNB na vizinhança for mais forte que o sinal da eNB atual. Os parâmetros *OnTime* e *OffTime* dizem respeito às aplicações VoIP, e servem para definir o tempo de atividade e o tempo de inatividade, uma vez que nesse tipo de aplicação o usuário alterna momentos de fala (atividade) e escuta (inatividade). Os valores das variáveis aleatórias são a média usada em sua distribuição.

### 4.3 Funcionalidades MIP, SIP e MIH

O simulador NS-3 não implementa os protocolos e padrões MIP, SIP e MIH, de forma nativa. Para incorporar total ou parcialmente suas funcionalidades ao simulador, havia três possíveis caminhos. O primeiro deles seria encontrar alguma implementação externa desses módulos. O segundo seria implementá-los modificando arquivos internos do simulador. O terceiro seria implementá-los em alto nível dentro do programa de configuração da simulação.

A primeira opção mostrou-se infrutífera, pois não foram encontradas implementações feitas por terceiros dos módulos SIP e MIP, e apenas protótipos não funcionais do módulo MIH puderam ser encontrados, e não atendiam às necessidades do modelo. A segunda opção demandaria um tempo extremamente grande e possivelmente uma equipe de pesquisadores dedicados à tarefa, para realiza-la de forma viável. Optou-se então, neste trabalho, por adicionar as funcionalidades necessárias em alto nível dentro do programa de simulação.

As funcionalidades MIP foram implementadas na forma de funções *callback* C++ que atuam como mensagens enviadas aos nós. As mensagens de *advertising* das eNBs, que informam aos usuários sua posição, são enviadas toda vez que os usuários se movimentam. A distância recebida nessas mensagens é usada para cálculo da distância dos nós até a eNB para fins de decisão de *handover*. As próprias eNBs agem como *home agents* e *foreign agents*, de forma que não há necessidade de adicionar nós à rede para este propósito. Como o *handover* ocorre para uma rede de mesma tecnologia, não há necessidade de se atribuir um *care-of address* para nós que mudem de eNB, e o tunelamento se torna desnecessário por se tratar da mesma rede e da existência do módulo SIP.

O módulo MIH, a exemplo do módulo MIP, foi implementado através de funções C++ que atuam como mensagens e são disparadas de acordo com certos tipos de evento. Apenas as mensagens MIES e MICS necessárias foram implementadas. O MIIS foi deixado de fora. A entidade MIHF atua como um objeto global que tem acesso a todas as variáveis da simulação, dentre elas as eNBs e os nós, e o gerenciamento dos eventos é feito por este objeto único global. O Quadro 4 lista os eventos MIH implementados e o contexto que os leva a ser disparados.

Implementar o protocolo SIP de forma completa no NS-3 seria uma tarefa extremamente árdua, visto que se trata de um protocolo complexo, com muitos tipos de agente, notificações e funcionalidades. Optou-se então por implementar em alto nível apenas o que fosse necessário para as simulações do modelo de *handover*. A exemplo do que ocorre no MIH, existe uma entidade SIP global, que é um objeto com acesso a todo o cenário de simulação. Esse objeto age como *SIP Proxy* e *SIP Registrar*, e gerencia as

**Quadro 4 – Eventos MIH presentes nas simulações**

Evento	Contexto
Mies_subscribe	Inicialização dos nós
Mies_link_detected	Nó entra na área de cobertura da eNB
Mies_link_going_down	Nó sairá da cobertura da eNB no próximo movimento
Mies_link_handover_imminent	Mudança de eNB no próximo movimento
Mies_link_down	Saída da área de cobertura de uma eNB
Mies_link_handover_complete	Nó se conectou a outra eNB
Mies_link_up	Antes de <i>handover_complete</i>
Mics_handover_commit	Imediatamente após <i>handover_complete</i>

Fonte: elaborado pelo autor

sessões. Dentre suas capacidades, estão a criação e o gerenciamento de sessões e uma lista com o endereço de todos os nós, caso ocorra o envio de mensagens solicitando estes endereços. As sessões são estabelecidas entre nós e eNBs no momento do *attach* (quando o nó se conecta à eNB), e entre nós e seus interlocutores quando se inicia uma aplicação.

#### 4.4 Classes QoS em redes 3G e 4G

Para as redes de terceira geração (3G), o 3GPP estipulou quatro classes de qualidade de serviço (QoS) que representariam os tipos possíveis de aplicações que trafegariam por aquelas redes. Cada classe QoS se referia a tipos de aplicações com características peculiares e que por conseguinte possuíam requisitos diferentes de rede para que fornecessem qualidade ótima aos usuários. Cada uma das quatro classes definidas pelo 3GPP para as redes de terceira geração possuía requisitos mínimos de largura de banda, atraso máximo permitido e taxa de erros que deveriam ser cumpridos pela rede para que a qualidade de serviço fosse garantida aos usuários.

Nas redes de quarta geração (LTE), o QoS funciona de maneira distinta. Eliminou-se a separação nas 4 classes que existiam nas redes de terceira geração e foram definidas 9 portadoras EPS, cada uma com seu respectivo índice QCI (*QoS class identifier*) e parâmetros que indicam o tipo de tratamento a ser recebido pelas aplicações que utilizam cada portadora. Cada uma das portadoras EPS tem uma taxa de atraso máximo, taxa máxima de erros permitida, uma classe de prioridade, que varia de 1 a 9 e indica a prioridade que será dada aos pacotes pertencentes a cada portadora, e ainda um *flag* que indica se a portadora é GBR (*guaranteed bit rate*) ou non-GBR (*non-guaranteed bit rate*). Portadoras GBR têm uma taxa de bits garantida e um limite máximo de banda individual, além de ser imunes a perdas de pacotes durante períodos de congestionamento da rede. Já portadoras non-GBR não possuem garantia de taxa de bits, partilham de um limite de banda compartilhado com outras portadoras pertencentes ao mesmo nó móvel e ainda são suscetíveis a perdas de pacotes durante períodos de congestionamento. O

Quadro 5 lista as portadoras EPS presentes nas redes LTE e seus respectivos parâmetros de prioridade, atraso e taxa de erro. A Tabela cita ainda exemplos de aplicações que usam cada portadora.

**Quadro 5 – Tipos de portadoras EPS presentes nas redes LTE e suas características de desempenho.**

QCI	Tipo de Recurso	Prioridade	Atraso (ms)	Perda de Pacotes	Exemplos
1	GBR	2	100	$10^{-2}$	Skype
2	GBR	4	150	$10^{-3}$	Skype com video
3	GBR	3	50	$10^{-3}$	Jogos em tempo real
4	GBR	5	300	$10^{-6}$	Youtube
5	Non-GBR	1	100	$10^{-6}$	IMS
6	Non-GBR	6	300	$10^{-6}$	Popcorntime
7	Non-GBR	7	100	$10^{-3}$	Premiere Play
8	Non-GBR	8	300	$10^{-6}$	Email, chat, FTP
9	Non-GBR	9	300	$10^{-6}$	Email, chat, FTP

Fonte: (WIKIPEDIA, 2015)

Embora as classes QoS que existiam nas redes de terceira geração não estejam mais presentes diretamente nas redes LTE, é possível fazer um mapeamento que faça a correspondência entre as portadoras e as antigas classes QoS, criando uma relação de pertinência de cada portadora a uma classe QoS, com base nos parâmetros fornecidos pelas portadoras às aplicações que as utilizem. O Quadro 6, elaborado pelo 3GPP, traz um mapeamento de classes QoS de terceira geração para as portadoras EPS de quarta geração, classificando-as dentro das classes *Background*, *Conversational*, *Interactive* e *Streaming* com base no que cada uma das classes requeria nas redes 3G e nos parâmetros que cada portadora EPS é capaz de prover.

**Quadro 6 – Mapeamento das portadoras EPS para as antigas classes QoS das redes de terceira geração.**

GPRS QCI value	Traffic Class	THP	Signaling Indication	Source Statistics Descriptor
1	Conversational	n/a	n/a	speech
2	Conversational	n/a	n/a	unknown
3	Streaming	n/a	n/a	speech
4	Streaming	n/a	n/a	unknown
5	Interactive	1	Yes	n/a
6	Interactive	1	No	n/a
7	Interactive	2	No	n/a
8	Interactive	3	No	n/a
9	Background	n/a	n/a	n/a

Fonte: (PROJECT, 2006)

## 5 RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados obtidos nas simulações descritas no capítulo anterior. Conforme mencionado anteriormente, as simulações tiveram como objetivo averiguar, por meio da coleta de métricas quantitativas, se o modelo de *handover* horizontal proposto logrou êxito tanto em garantir que o *handover* multicamadas fosse executado sem entraves tais como perda de conectividade dos nós com suas respectivas estações-base, como garantir que o desempenho das aplicações simuladas permanecesse dentro do mínimo estipulado pelo 3GPP para cada uma das classes QoS nas redes LTE.

### 5.1 Tempo de *Handover*

As medições de tempo de *handover* têm como meta avaliar se o tempo total de *handover*, ou seja, o período de tempo que engloba o momento em que a entidade MIHF do nó sinalizou que havia iminência de *handover* até o momento em que a conexão com a estação-base para a qual o nó migraria foi finalizada, é baixo o suficiente para que as aplicações em curso não sejam afetadas e para que os usuários não percebam que uma mudança de rede ocorreu, o que torna o *handover* suave.

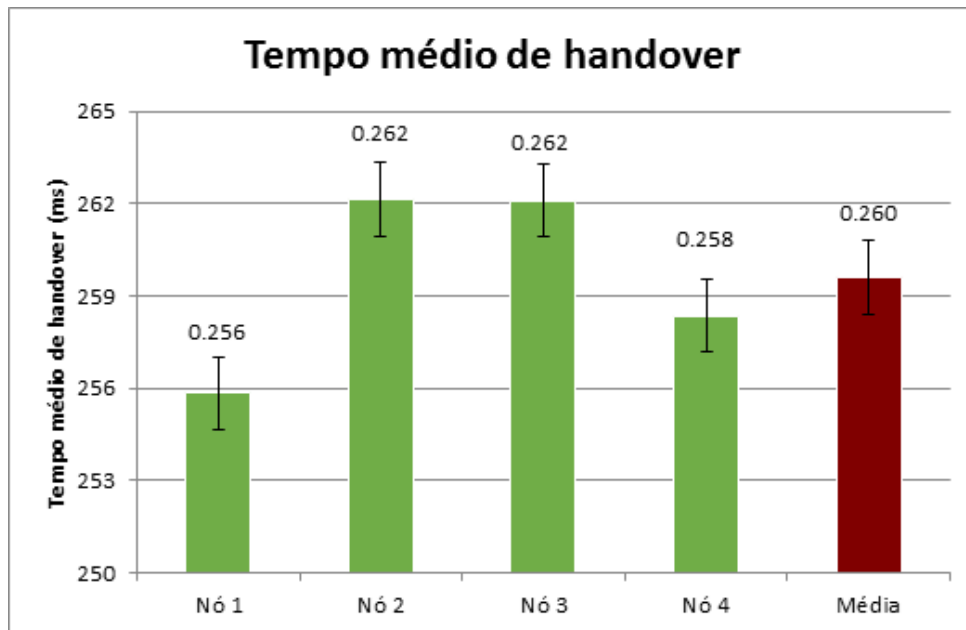
Nos experimentos realizados, o tempo de *handover* começou a ser medido quando o evento MIES *handover\_imminent* foi disparado pela entidade MIHF do nó que iria realizar o *handover* e terminou quando o evento MICS *handover\_commit* foi concluído, indicando que o processo de *handover* multicamadas havia sido concluído, assim como o *handover* de interfaces X2 que conectam os nós às eNBs.

A Figura 12 apresenta o tempo médio de *handover* de cada um dos 4 nós presentes no cenário após a execução de 33 iterações da simulação, com sementes distintas. O gráfico contém, ainda, a média total dos tempos de *handover*, que contempla os tempos obtidos para os 4 nós.

Todos os 4 nós tiveram tempos de *handover* bem próximos, o que pode ser explicado pela baixa quantidade de nós no cenário, seu movimento previsível, linear e em baixa velocidade, e pelo comportamento similar atribuído a cada nó na simulação, já que a diferença entre os nós é basicamente a aplicação que cada um executa.

O tempo médio de 260 milissegundos do começo ao fim do procedimento de *handover* é superior ao tempo obtido por (ATOURASSAP; FIGUEIREDO, 2012), que ficou abaixo de 100 ms em todos os casos, mas ainda assim é um tempo baixo o suficiente para que seja imperceptível aos usuários e não cause efeitos nas aplicações, o que pode ser corroborado pela ausência de perdas de pacotes em todas as aplicações presentes na simulação.

Figura 12 – Tempos médios de *handover* para cada nó e tempo médio total



Fonte: elaborada pelo autor

Embora o modelo multicamadas e os passos para a mudança de rede descritos neste trabalho sejam bastante semelhantes aos de (ATOURASSAP; FIGUEIREDO, 2012), a diferença nos tempos pode ser explicada pelo fato de que se tratam de redes móveis diferentes (o trabalho de Atourassap usou redes WiMax e UMTS, ao passo que este trabalho investigou redes LTE) e, sobretudo, simuladores diferentes. A troca do simulador NS-2 para o NS-3 faz com que seja bastante difícil de prover uma comparação direta entre os resultados, uma vez que os simuladores são implementados de maneira completamente diferente e até mesmo a forma de configurar os cenários foi completamente refeita no NS-3 em comparação ao NS-2.

A grande quantidade de eventos disparados nas várias camadas de rede contribui para que o tempo de *handover* alcance a média de 260 ms aferida neste trabalho. A partir do instante em que a necessidade de se fazer um *handover* é comprovada, eventos MIP, SIP e MIH são disparados pelos nós para garantir a plena execução do *handover* multicamadas, e há ainda eventos da própria rede LTE para realizar o *handover* de interfaces X2. Caso os nós realizassem um *handover* para outra tecnologia de rede, é possível que os tempos fossem ainda maiores, pois os eventos que já ocorrem se somariam a outros eventos como, por exemplo, autenticação na nova rede.

Em relação a outros trabalhos da literatura, como (JOHN; MADLOPHA; VENTURA, 2013; KUHNERT; WIETFELD, 2014; ATOURASSAP; FIGUEIREDO, 2012), pode-se dizer que o tempo total de *handover* obtido nos experimentos deste trabalho é difícil de ser comparado diretamente aos obtidos por aqueles. Embora (JOHN; MADLOPHA; VENTURA,

2013) e (ATOURESSAP; FIGUEIREDO, 2012) tenham obtido tempos inferiores em seus experimentos, é prudente frisar que, no caso de (JOHN; MADLOPHA; VENTURA, 2013), trata-se de um modelo menos complexo, que não envolve múltiplas camadas em sua concepção, além de ter sido testado em circunstâncias completamente diferentes das deste trabalho. No caso de (ATOURESSAP; FIGUEIREDO, 2012), embora o modelo seja o mesmo, a diferença pode ser explicada tanto pelo uso de redes LTE em vez de UMTS como pela plataforma diferente de simulação. Diferenças na coleta dos resultados e na arquitetura dos simuladores podem provocar variações nos resultados. Finalmente, no caso de (KUHNERT; WIETFELD, 2014), os tempos encontrados são similares para o experimento em laboratório e ligeiramente superiores aos encontrados por eles nos experimentos práticos. Novamente, Kuhnert e Wietfeld (2014) usaram uma plataforma de testes inteiramente diferente em laboratório, e valeram-se de testes reais em seu segundo experimento, tornando uma comparação direta dos resultados de pouca valia para se tirar conclusões sólidas.

## 5.2 Resultados para as classe QoS Simuladas

As classes QoS têm como objetivo agrupar aplicações com necessidades distintas em classes com certos requisitos de desempenho por parte da rede. Aplicações pertencentes a determinadas classes têm necessidades diferentes no que tange a métricas de rede como atraso de pacotes, largura de banda e variação no atraso médio de pacotes. É vital que a introdução de novas entidades no modelo de rede, tais como padrões e protocolos que atuam nos nós, não prejudique o funcionamento adequado das aplicações executadas pelos usuários.

O 3GPP define as classes *Conversational*, *Background*, *Streaming* e *Interactive*, abrangendo aplicações como chamadas VoIP, *download* de arquivos, *streaming* de vídeos e navegação *web*, respectivamente. Adicionalmente, as redes LTE contam com 9 tipos de *QoS Class Identifiers* (QCI), que identificam 9 tipos de portadoras EPS, cada qual com garantias diferentes de desempenho para acomodar os vários tipos de aplicações que existem hoje em dia.

O Quadro 7 lista os tipos de portadoras EPS com seus respectivos QCIs, classe de prioridade, tipo de recurso e métricas de desempenho. Em tipos de recurso, GBR (*Guaranteed Bit Rate*) diz respeito a portadoras com garantia de largura de banda, ao passo que non-GBR faz referência a portadoras sem garantia de banda. Quanto menor a prioridade de uma portadora, maior a chance de seus pacotes serem descartados em caso de congestionamento na rede.

**Quadro 7 – Tipos de portadoras EPS presentes nas redes LTE e suas características de desempenho.**

QCI	Tipo de Recurso	Prioridade	Atraso (ms)	Perda de Pacotes	Exemplos
1	GBR	2	100	$10^{-2}$	Skype
2	GBR	4	150	$10^{-3}$	Skype com video
3	GBR	3	50	$10^{-3}$	Jogos em tempo real
4	GBR	5	300	$10^{-6}$	Youtube
5	Non-GBR	1	100	$10^{-6}$	IMS
6	Non-GBR	6	300	$10^{-6}$	Popcorntime
7	Non-GBR	7	100	$10^{-3}$	Premiere Play
8	Non-GBR	8	300	$10^{-6}$	Email, chat, FTP
9	Non-GBR	9	300	$10^{-6}$	Email, chat, FTP

Fonte: (WIKIPEDIA, 2015)

### 5.2.1 Classe *Conversational*

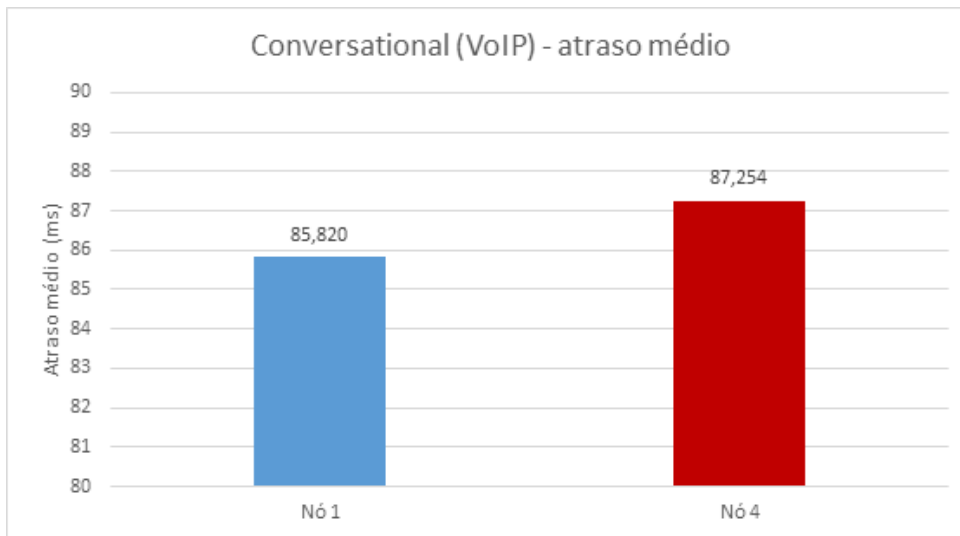
A classe *Conversational* engloba aplicações que envolvem conversação, como chamadas de voz, chamadas telefônicas e videoconferência em tempo real. Tipicamente, aplicativos pertencentes a essa classe não possuem requisitos altos de largura de banda, entretanto são muito sensíveis a atrasos nos pacotes, porque como necessariamente envolvem a participação de pessoas, quaisquer demoras na entrega dos pacotes geram atrasos incômodos nas conversas. Como o objetivo é entregar pacotes o mais rápido possível, essas aplicações usam o protocolo UDP, que não possui garantia de entrega.

Nas simulações executadas para este trabalho, a classe *Conversational* foi representada por uma aplicação que simula uma chamada VoIP. A aplicação foi modelada com base na classe *OnOffApplication*, que alterna períodos de atividade e inatividade, semelhante ao que ocorre em uma chamada VoIP real, em que interlocutores ora falam, ora escutam. Os tempos de atividade e inatividade são representados por variáveis aleatórias com distribuições de probabilidade de 35% e 65% (RAMROOP, 2011) respectivamente. A portadora usada nessa aplicação foi a *GBR\_CONV\_VOICE*, correspondente ao QCI 1 do Quadro 7. Os nós 1 e 4 tiveram essa aplicação instalada e uma conversa entre eles foi simulada.

A Figura 13 mostra os resultados médios de atraso para essa aplicação. Tanto o nó 1 quanto o nó 4 tiveram atrasos médios muito parecidos, na faixa de 85 ms, que fica abaixo do que se espera para aplicações que usam portadoras de QCI 1. Esses valores são suficientes para que a conversa ocorra sem percepções incômodas de atraso. O gráfico foi apresentado em forma de histograma porque a classe *FlowMonitor* do NS-3, responsável pela coleta dos dados quantitativos, fornece apenas a soma dos atrasos de todos os pacotes, e não fornece dados individuais.

Na Figura 14, é possível ver o resultado médio de *jitter*, ou variação no atraso

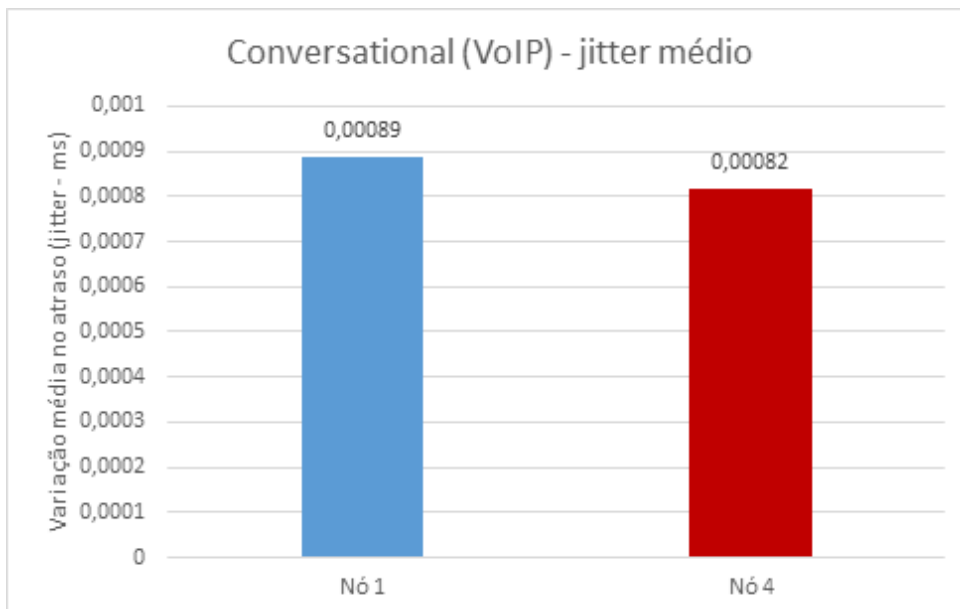
**Figura 13 – Atraso médio para a aplicação pertencente à classe *Conversational***



Fonte: elaborada pelo autor

dos pacotes, para essa aplicação. A média da variação de atraso ficou na casa dos microssegundos, sendo um valor praticamente desprezível frente à ordem de grandeza do atraso, de milissegundos. Isso indica que, embora o simulador não forneça valores de atraso individual para os pacotes, não houve variação significativa desses valores.

**Figura 14 – *Jitter* médio para a aplicação pertencente à classe *Conversational***



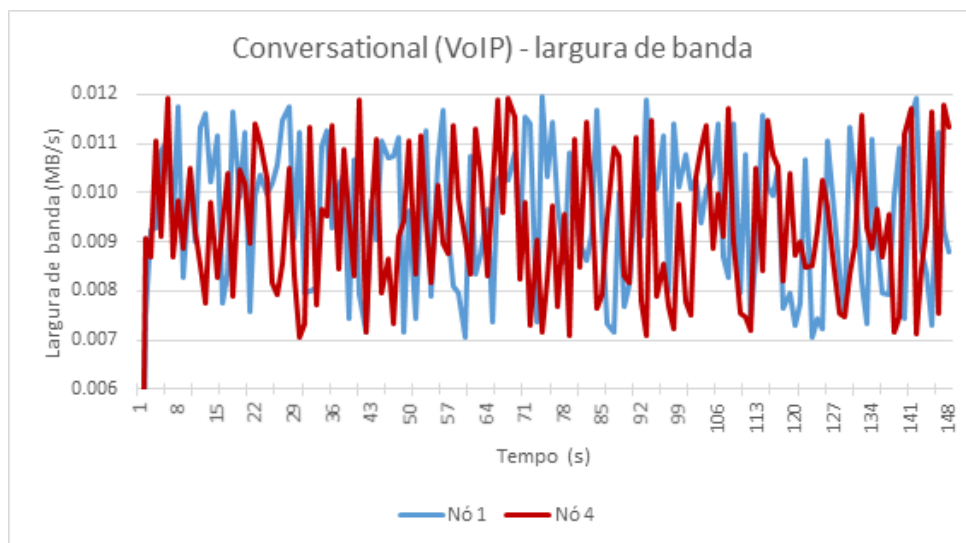
Fonte: elaborada pelo autor

A Figura 15 traz os resultados de largura de banda média obtidos para a aplicação que modela uma aplicação VoIP. Chama a atenção o fato de a largura de banda ser muito baixa, por se tratar de uma rede LTE capaz de fornecer banda na casa dos *megabytes* por

segundo. Aplicações VoIP não possuem requisitos muito elevados para largura de banda, pois é possível transmitir voz com qualidade usando poucos recursos (as redes de telefonia o fazem com cerca de 33 kbps). A aparente instabilidade no gráfico provocada pelas pequenas variações na largura de banda podem ser explicadas pela alternância de períodos de atividade e inatividade dos nós que causa pequenas, porém visíveis perturbações no gráfico. A largura de banda média aferida para o nó 1 foi de 9,5 kbps e 9,3 kbps para o nó 4.

Em suma, os resultados para atraso médio e variação média de atraso mostram que as aplicações conseguiram ser executadas com a qualidade necessária. A largura de banda obtida é aparentemente baixa para aplicações funcionando em redes LTE, mas para a classe *Conversational* isso não configura um problema, pois a métrica mais importante é o atraso e aplicações VoIP tipicamente não necessitam de muita largura de banda para operar com qualidade.

**Figura 15 – Largura de banda média para a aplicação pertencente à classe *Conversational***



Fonte: elaborada pelo autor

### 5.2.2 Classe *Background*

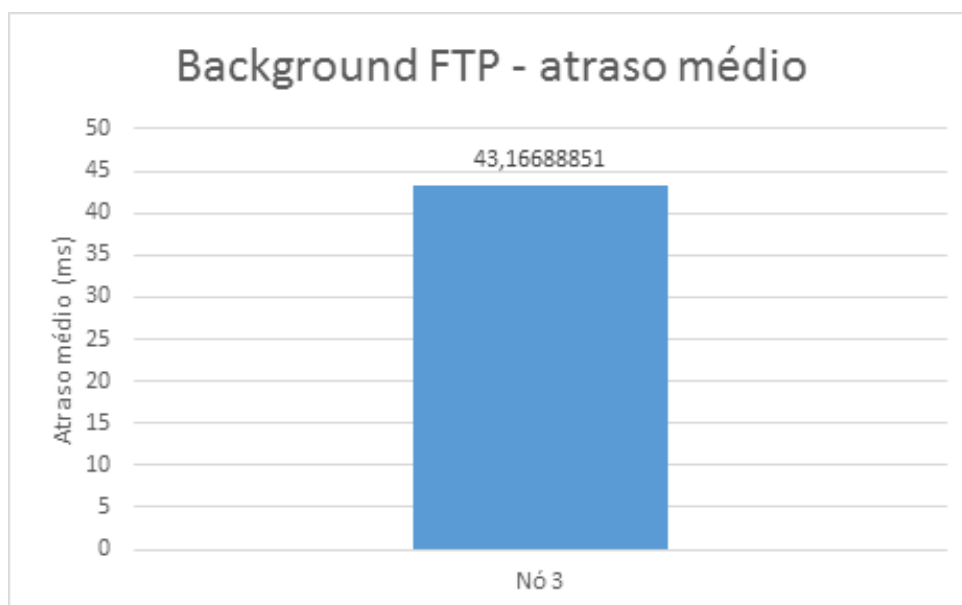
Aplicações pertencentes à classe *Background* são aquelas cuja característica principal é não esperar que os dados cheguem em uma hora predeterminada, mas sim que cheguem perfeitamente intactos. A prioridade, portanto, é a integridade e ordem dos pacotes, por isso operam usando o protocolo TCP, que possui garantia de entrega ordenada dos pacotes. Exemplos de aplicações pertencentes à classe *Background* são *downloads* de arquivos, clientes de e-mail que executam em plano de fundo e SMS. Para esta classe, a baixa perda de pacotes e baixas taxas de erro são mais importantes que um atraso

mais baixo. Um exemplo de aplicação da classe *Background* é o programa Dropbox, que sincroniza arquivos entre máquinas no plano de fundo enquanto o usuário realiza outras tarefas.

Neste trabalho, a classe *Background* foi representada por uma aplicação que simula o *download* de um arquivo muito grande usando o protocolo TCP. Para configurar a aplicação, a classe *BulkSendApplication* foi usada como base. A aplicação foi configurada para receber pacotes ininterruptamente de um nó correspondente até que a simulação chegasse ao fim. A portadora usada na configuração dessa aplicação foi a *NGBR\_VIDEO\_TCP\_DEFAULT*, que pode corresponder aos QCI's 6, 8 e 9, ambos com as mesmas características de desempenho. Apenas um nó, o nó 3, teve essa aplicação instalada na simulação.

A Figura 16 mostra os resultados de atraso médio para esta aplicação da classe *Background*. Novamente, o gráfico é um histograma pela impossibilidade de se obter valores individuais de atraso através da ferramenta *FlowMonitor* do simulador. Observa-se que o valor médio final de atraso para esta aplicação, de 43 ms, é de cerca de metade dos valores encontrados para a aplicação da classe *Conversational*, embora o atraso não seja uma métrica crítica para a classe *Background*. É possível que esse resultado seja fruto da implementação das portadoras no simulador, que não foi investigada a fundo, ou de oscilações provocadas pelos períodos de inatividade da aplicação pertencente à classe *Conversational*, já que também não se investigou a fundo a maneira como o *FlowMonitor* coleta e agrega os valores de atraso.

**Figura 16 – Atraso médio para a aplicação pertencente à classe *Background***

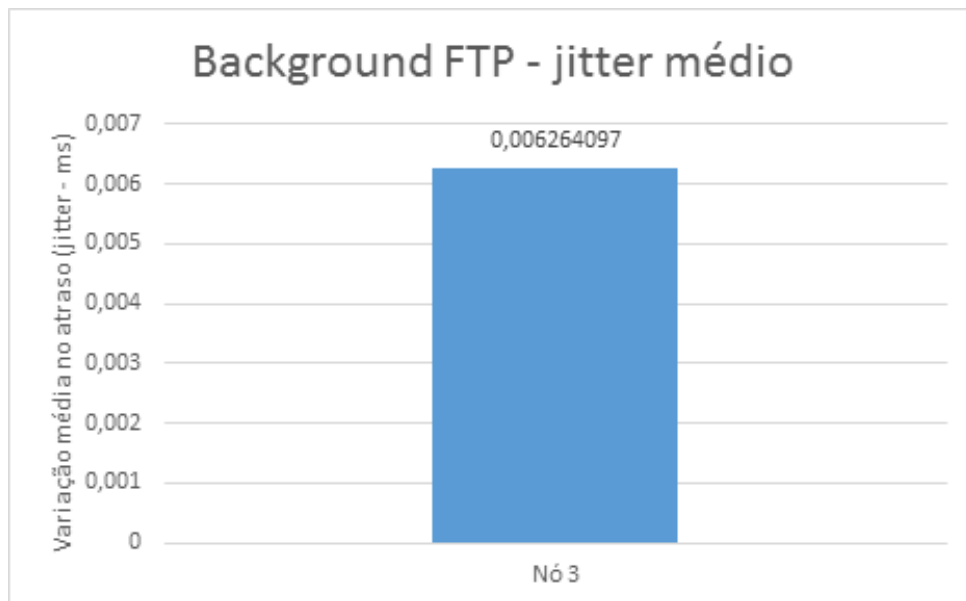


Fonte: elaborada pelo autor

Como pode ser visto na Figura 17, o mesmo comportamento que se observou

na aplicação da classe *Conversational* em relação à variação no atraso dos pacotes também ocorreu para a classe *Background*. O valor médio de *jitter* ficou na casa dos microssegundos, cerca de mil vezes abaixo do valor médio de atraso, e, por conseguinte desprezível.

**Figura 17 – *Jitter* médio para a aplicação pertencente à classe *Background***

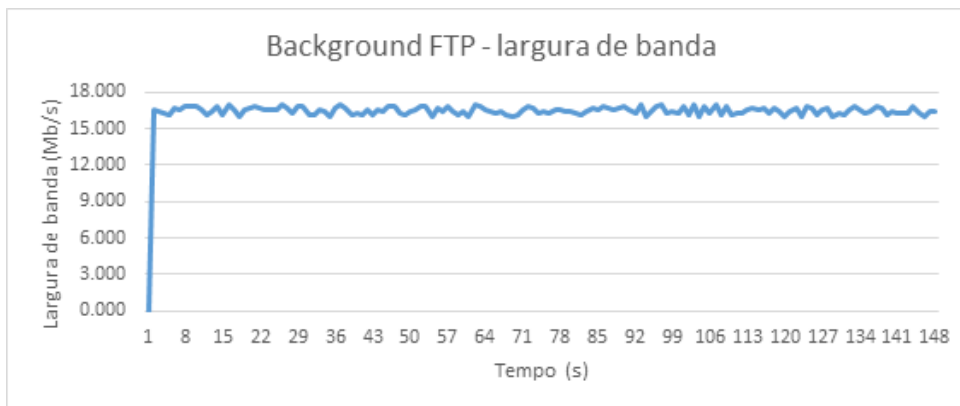


Fonte: elaborada pelo autor

Por outro lado, os resultados de largura de banda média obtidos para a classe *Background* foram bem diferentes daqueles obtidos para a aplicação *Conversational*. Como a aplicação consistiu basicamente em baixar pacotes fornecidos por um nó correspondente de forma irrestrita, os valores médios de largura de banda encontrados foram muito superiores àqueles da classe *Conversational*, e é provável que correspondam à capacidade máxima da rede simulada, da forma como foi configurada. A Figura 18 mostra que a largura de banda média nunca ficou abaixo de 15 MB/s, exceto no instante 1, em que a aplicação ainda não havia sido iniciada. Esses valores são compatíveis com valores reais obtidos em testes com uma rede LTE, conforme a Figura 19.

Além dos testes feitos no simulador, para o caso da classe *Background* foi possível realizar também testes reais, na rede LTE da operadora TIM. Para tanto, utilizou-se um smartphone LG G3 e o aplicativo Ookla SpeedTest de teste de velocidade, que consiste em fazer o *download* e o *upload* de arquivos grandes e medir a velocidade média. O aplicativo não informa o tamanho dos arquivos utilizados. Foram realizados dois testes num espaço de tempo de 25 minutos, sendo um teste em uma área em que não havia grande quantidade de usuários e outro teste em uma área com alta densidade de usuários (Feira Hippie de Belo Horizonte, na Av Afonso Pena). Os resultados podem ser vistos na Figura 19

**Figura 18 – Largura de banda média para a aplicação pertencente à classe *Background***



**Fonte: elaborada pelo autor**

O primeiro teste apresentou largura de banda média superior a 30 Mb/s, ao passo que o segundo teste apresentou resultados mais modestos, chegando a quase 15 Mb/s. A diferença pode ser explicada pela densidade de usuários no local, uma vez que redes móveis apresentam desempenho inferior quando há muitos usuários simultâneos. Os resultados de *upload* não foram levados em conta, porque nas simulações no NS-3 não houve nenhum teste de *upload* de arquivos. O primeiro teste apresentou largura de banda média superior a 30 Mb/s, ao passo que o segundo teste apresentou resultados mais modestos, chegando a quase 15 Mb/s. A diferença pode ser explicada pela densidade de usuários no local, uma vez que redes móveis apresentam desempenho inferior quando há muitos usuários simultâneos. Os resultados de *upload* não foram levados em conta, porque nas simulações no NS-3 não houve nenhum teste de *upload* de arquivos.

Os testes práticos servem como base de comparação e validação dos resultados obtidos com o simulador. O resultado de largura de banda média para a classe *Background* ficou próximo do resultado obtido no teste prático em local densamente ocupado, embora o cenário de testes só possuísse 4 nós. Mais testes são necessários em cenários com mais usuários para aferir a escalabilidade da rede, mas o resultado do simulador se mostrou compatível com resultados reais.

Figura 19 – Teste de largura de banda na rede LTE da operadora TIM



Fonte: elaborada pelo autor

### 5.2.3 Classe Streaming

Aplicações da classe *Streaming* são aquelas que envolvem vídeo e áudio em tempo real, como, por exemplo, assistir a um vídeo no YouTube. Assim como na classe *Conversational*, como há o fator tempo real envolvido, o objetivo dessas aplicações é entregar pacotes rapidamente para que o usuário não se sinta frustrado com atrasos ou pausas para carregamento (*buffering*). Dessa forma, o fator mais preponderante para o sucesso dessas aplicações é um baixo atraso aliado a uma boa largura de banda, já que arquivos de vídeo em alta definição podem demandar bastante da rede. O fato de priorizarem a rapidez na entrega dos pacotes faz com que muitas aplicações operem sobre protocolos como RTSP (*Real Time Streaming Protocol*), que alia TCP e UDP.

Nas simulações realizadas, a classe *Streaming* foi representada por uma aplicação que simula o *streaming* de um vídeo real em alta definição, definido por um arquivo *trace* contendo todos os *frames* que compõem o vídeo, com seus respectivos

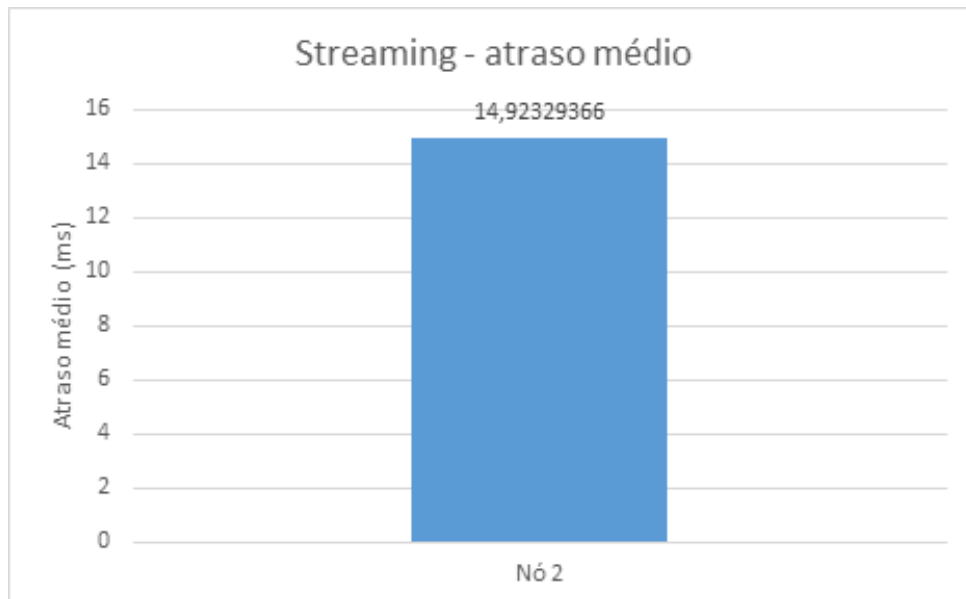
tamanhos em bytes, totalizando 1,5 GB. Para modelar a aplicação, foi usada a classe *UdpTraceClientApplication*, que simula aplicações de *streaming* por UDP a partir de arquivos contendo os quadros da mídia a ser consumida. A portadora EPS usada para esta aplicação, a exemplo da classe *Background*, foi a *NGBR\_VIDEO\_TCP\_DEFAULT*. Apenas o nó 2 teve essa aplicação instalada nas simulações realizadas.

A Figura 20 mostra os resultados médios de atraso para a aplicação da classe *Streaming*. De todas as aplicações testadas, esta foi a que obteve os melhores resultados de atraso médio de pacotes, com uma média de 14,9 ms. Existem algumas explicações para o fato de o atraso da classe *Streaming* ter sido menor que o da classe *Background*, embora ambas usem o mesmo tipo de portadora EPS. O primeiro fator que pode ter causado essa diferença foi o fato de a aplicação da classe *Streaming* usar o protocolo UDP para entregar seus pacotes, ao passo que a aplicação *Background* usou o protocolo TCP. O protocolo UDP é um protocolo sem garantia de entrega, que se preocupa mais com a rapidez na entrega dos pacotes do que com a sua integridade. Essa característica pode ter contribuído para que o atraso médio obtido para a classe *Streaming* fosse menor. Um outro fator que pode ter influenciado é o fato de a aplicação *Streaming* usar um arquivo texto contendo todos os quadros do filme cujo *streaming* estava sendo simulado. Ou seja, o simulador tinha conhecimento de antemão de todos os pacotes que seriam enviados durante a simulação, pois o tempo de simulação, o tamanho do pacote e o tamanho total do arquivo *trace* são informações disponíveis antes do início da simulação. Diferenças de implementação das classes *BulkSendApplication* e *UdpTraceClientApplication* também podem explicar a diferença, embora uma análise do código fonte não tenha sido feita a fim de procurar esse tipo de diferença.

Assim como aconteceu com as aplicações das outras duas classes simuladas, o *jitter* ou variação média no atraso dos pacotes foi demasiadamente pequeno, a ponto de não exercer qualquer influência nos demais resultados colhidos. Como é possível ver na Figura 21, a ordem de grandeza do *jitter* é de microssegundos, mil vezes inferior à ordem de milissegundos do atraso médio de pacotes.

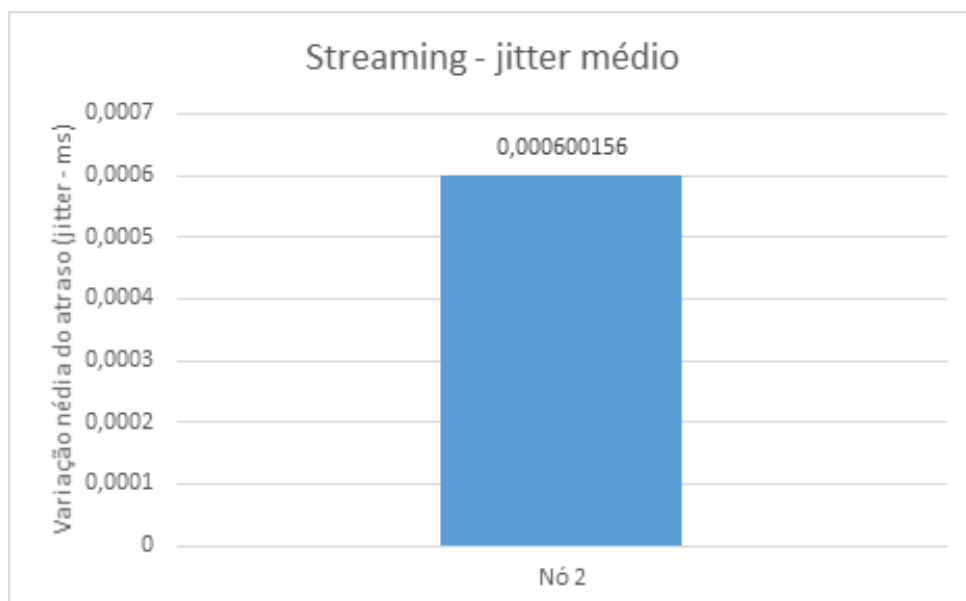
Além de ser necessário que o atraso médio dos pacotes seja baixo para que as aplicações *Streaming* funcionem com qualidade, no caso de mídias como vídeos em alta definição, cada vez mais comuns na Internet, é necessária também uma quantidade significativa de banda para transferir os quadros em tempo hábil para que sejam reproduzidos sem gargalos para o usuário. A Figura 22 mostra que os resultados obtidos para largura de banda na classe *Streaming*, embora inferiores aos da classe *Background*, são suficientes para reproduzir vídeos em resolução 1280x720 como no caso do vídeo usado na simulação, porque estes possuem apenas 24 quadros por segundo. O resultado inferior ao da classe *Background* pode ser inclusive explicado porque, como os quadros a ser transmitidos eram todos conhecidos de antemão e o arquivo de *trace* contém timbres de

Figura 20 – Atraso médio para a aplicação pertencente à classe *Streaming*



Fonte: elaborada pelo autor

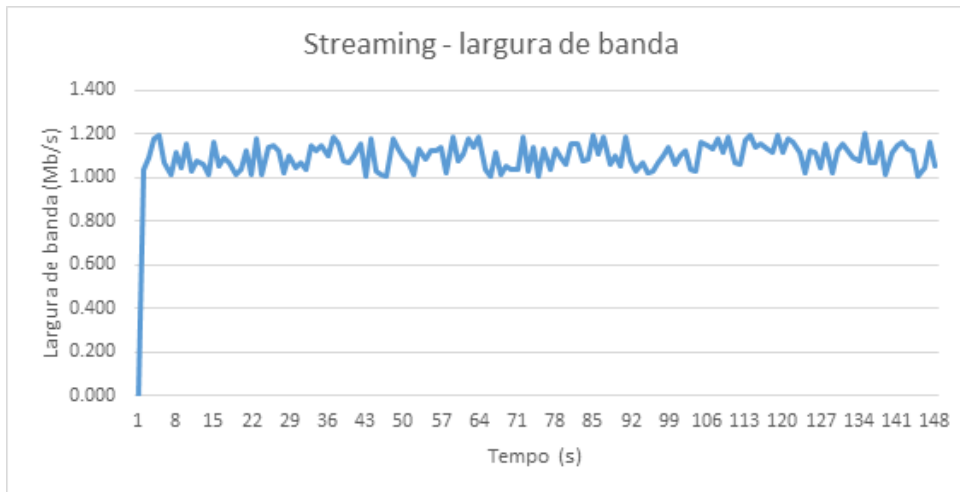
Figura 21 – *Jitter* médio para a aplicação pertencente à classe *Streaming*



Fonte: elaborada pelo autor

hora, é possível que a rede tenha usado apenas a banda necessária para transmitir os quadros sem fazer *bufferização* e desperdiçar banda que poderia ser alocada para outra finalidade. A largura de banda média para a classe *Streaming* flutuou entre 1 e 1,2 Mb/s. Seria necessário realizar mais testes, como por exemplo usado arquivos trace de um vídeo com maior resolução, para investigar se a largura de banda escalaria de acordo com a necessidade ou se permaneceria nesse patamar.

**Figura 22** – Largura de banda média para a aplicação pertencente à classe *Streaming*



Fonte: elaborada pelo autor

#### 5.2.4 Classe *Interactive*

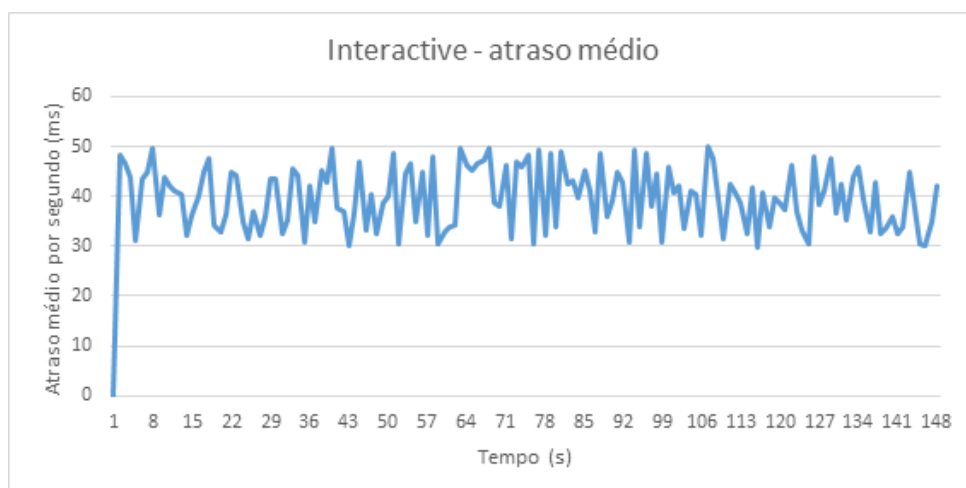
Aplicações pertencentes à classe *Interactive* são do tipo requisição-resposta, ou seja, um nó envia uma requisição a seu nó correspondente e aguarda uma resposta cujo conteúdo atenda a sua requisição dentro de um tempo esperado. Devido a essa característica de esperar a resposta dentro de um certo tempo, ao contrário por exemplo de aplicações da classe *Background*, as aplicações da classe *Interactive* têm sensibilidade ao atraso, e por isso essa métrica deve ser minimizada para que a melhor qualidade seja garantida aos usuários. Uma outra característica relevante das aplicações *Interactive* é a expectativa de preservação do conteúdo dos pacotes, o que não ocorre por exemplo na classe *Streaming*. Essa expectativa de integridade faz com que seja necessário um canal que garanta baixas taxas de erro para que as aplicações funcionem corretamente. Em redes LTE isso significa associar às aplicações da classe *Interactive* portadoras que tenham como características baixas taxas de atraso e de erro.

Nas simulações realizadas para este trabalho, a classe *Interactive* foi representada no NS-3 por uma aplicação do tipo *V4Ping*. Trata-se de uma aplicação cujo funcionamento consiste em enviar mensagens ECHO ICMP (*Internet Control Message Protocol*) para um nó e aguardar a confirmação de recebimento, seguindo um padrão requisição-resposta adequado à classe *Interactive*. O pacote de resposta contém a informação do RTT (*Round-trip Total Time*), que é a soma do tempo gasto para que o pacote de requisição complete a viagem até o interlocutor somado ao tempo que o pacote de resposta gasta para chegar ao nó inicial. O NS-3 permite, para aplicações desse tipo, que o intervalo entre o envio de cada pacote ECHO seja configurado. Nas simulações realizadas para este trabalho, o intervalo foi configurado como 0, ou seja, serão enviados tantos pacotes quanto

a rede permitir, e para cada segundo de simulação a média dos atrasos será calculada. A portadora EPS escolhida para esta aplicação foi a portadora NON-GBR de QCI 5 que, segundo o mapeamento presente no Quadro x, corresponde à classe *Interactive*, por possuir um *delay-budget* máximo de 100 ms e taxa de erro máxima de 10<sup>-6</sup>. A aplicação foi instalada apenas no nó 2 para as simulações realizadas.

A Figura 23 mostra os resultados de atraso médio para esta aplicação da classe *Interactive*. Ao contrário das outras aplicações, para a qual apenas a média total do atraso foi fornecida, devido a características da classe *FlowMonitor*, para a aplicação da classe *Interactive* foi possível obter resultados de atraso para cada pacote, porque o RTT é relatado pelo pacote de resposta e capturado através de um *trace sink* do NS-3. Como a aplicação foi configurada para mandar a maior quantidade possível de pacotes e foi colocada em uma portadora de baixa prioridade, a quantidade de pacotes enviados não foi a mesma para todos os segundos da simulação, o que provavelmente se deve a questões internas de agendamento de pacotes do simulador. Para cada segundo, o RTT de cada pacote foi coletado, dividido por 2 (para não se contabilizar atraso duplicado) e em seguida dividido pelo número total de pacotes enviados naquele segundo, para se obter o atraso médio para aquele segundo específico. É possível observar que o atraso médio flutuou entre 30 e 50 ms, valores maiores que os encontrados para a classe *Streaming*, cujos pacotes usam o protocolo UDP (a aplicação *V4Ping* usa TCP pela necessidade de confirmação) e similares aos valores encontrados para a classe *Background* (que também usa TCP). Trata-se de um bom resultado, uma vez que o *delay-budget* da portadora usada para esta aplicação é de 100 ms, o que significa que uma média de atraso de até 100 ms seria tolerável para o funcionamento com qualidade de uma aplicação pertencente à classe *Interactive*.

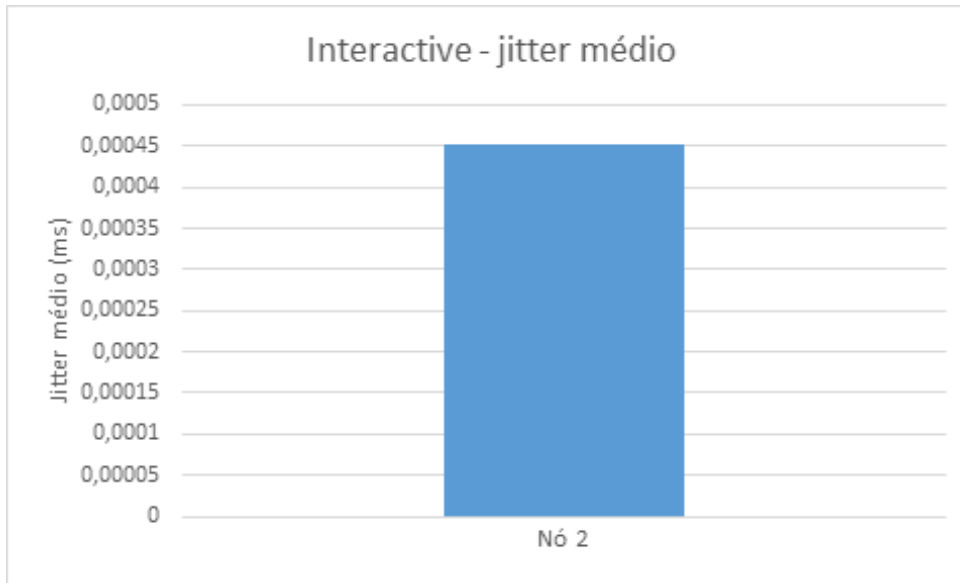
**Figura 23** – Atraso médio para a aplicação pertencente à classe *Interactive*



Fonte: elaborada pelo autor

Os resultados de *jitter* para a classe *Interactive* seguiram o mesmo padrão das outras classes: os valores foram baixos demais para ser considerados relevantes. Como pode ser visto na Figura 24, o *jitter* médio para a aplicação V4Ping foi de cerca de 0,45 microssegundo, o que no contexto da ordem de grandeza da métrica de atraso, que é medida em milissegundos, não é relevante.

**Figura 24 – *Jitter* médio para a aplicação pertencente à classe *Interactive***

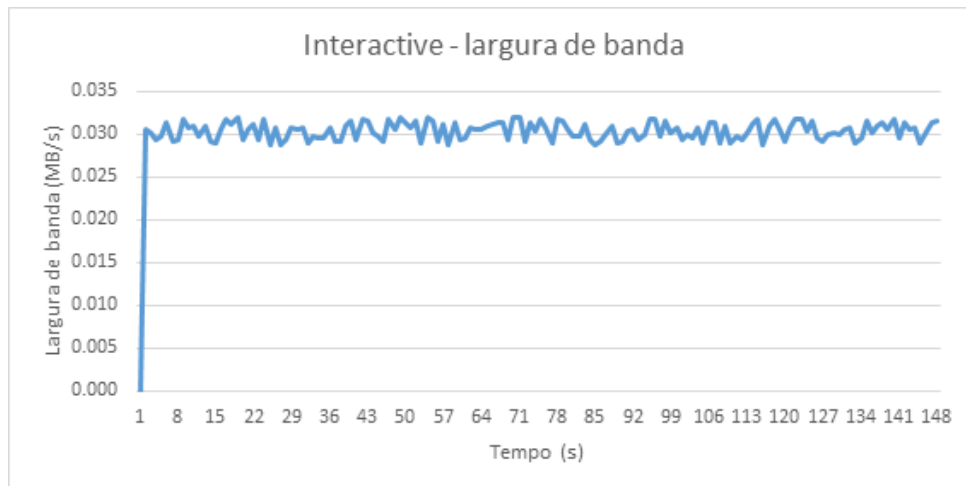


**Fonte: elaborada pelo autor**

Em relação à largura de banda, é possível observar na Figura 25 que a aplicação da classe *Interactive* demandou uma quantidade muito pequena de banda, na faixa de 30 KB/s, pouco superior à classe *Conversational* e inferior às demais classes. Isso ocorre porque os pacotes enviados pela aplicação *V4Ping* têm tamanho muito pequeno, de 32 *bytes*. Mesmo que sejam enviados muitos pacotes por segundo, a quantidade de banda necessária ainda será pequena. Embora a quantidade de dados trafegada possa parecer pequena, a aplicação do mundo real que melhor representa a classe *Interactive*, a navegação *web*, também não utiliza grande quantidade de banda se um período de vários segundos ou minutos for considerado. Em um cenário típico de navegação *web*, um usuário acessa um *link*, o conteúdo desse *link* é requisitado ao servidor, baixado, e então mostrado ao usuário, que tende a permanecer por um certo tempo consumindo aquele conteúdo, para só então fazer uma nova requisição. Apenas situações atípicas, como *websites* que sejam altamente dinâmicos ou apresentem conteúdo multimídia muito pesado, fugiriam desse padrão. Considera-se então que a aplicação utilizada representa um cenário típico de uso de uma aplicação da classe *Interactive*, apesar do padrão de tráfego simulado não ser exatamente o que se encontraria em uma aplicação real. A pouca variação nos resultados de largura de banda pode ser explicada porque embora o número de pacotes enviados por segundo pela aplicação *V4Ping* tenha variado, essa variação não foi muito intensa, com o

envio de aproximadamente 1 pacote a cada 1 ms.

**Figura 25 – Largura de banda média para a aplicação pertencente à classe *Interactive***



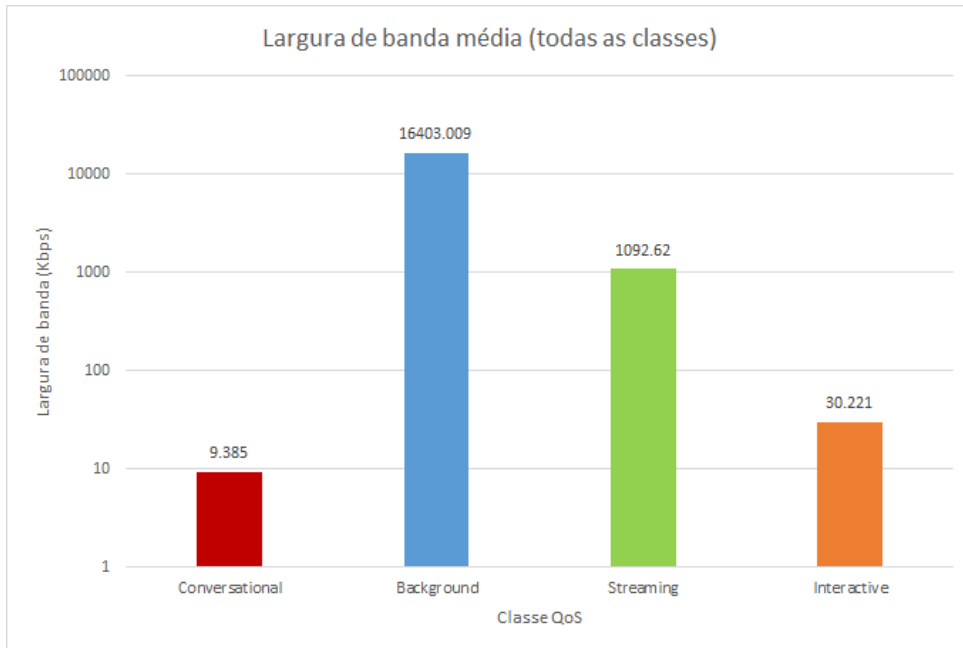
Fonte: elaborada pelo autor

### 5.2.5 Comparativo entre as classes

A Figura 26 contém os resultados de largura de banda média para todas as classes QoS analisadas. A largura de banda obtida para as classes *Conversational* e *Interactive* pode ser considerada baixa frente à capacidade de uma rede LTE, mas é necessário levar em consideração que aplicações pertencentes a essas classes tipicamente não requerem muita banda para funcionar bem. Chamadas VoIP, por exemplo, não ser que sejam realizadas em alta definição, consomem uma quantidade muito baixa de recursos da rede. A navegação *web*, que é a principal representante da classe *Interactive*, pode ter um consumo de banda que varia radicalmente em função do tipo de *website* visitado, mas levando em consideração conteúdos predominantemente textuais, com algumas imagens, e considerando que o conteúdo é baixado na íntegra para depois ser consumido pelos usuários durante um período de tempo, a necessidade de largura de banda ao longo do tempo é diluída e não se torna tão grande. As classes *Background* e *Streaming* agregam aplicações que naturalmente consomem uma maior quantidade de recursos da rede, como *download* de arquivos e *streaming* de conteúdo multimídia. Como pode ser observado na Figura 26, a largura de banda média obtida nas simulações para essas duas classes fica na casa dos Mbps, ao passo que as demais classes tiveram largura de banda média na casa dos kbps.

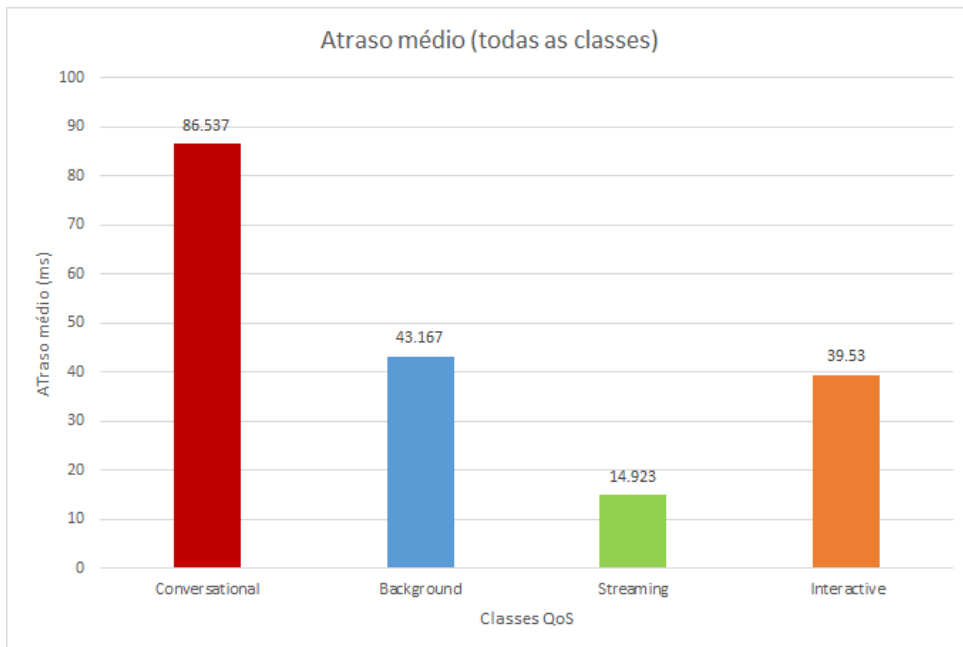
Os dados de atraso médio para as quatro classes QoS avaliadas nas simulações se encontram na Figura 27. Embora os resultados tenham variado entre as classes QoS avaliadas, todos os atrasos médios mensurados ficaram abaixo dos 100 ms, o que

Figura 26 – Largura de banda média para todas as classes QoS avaliadas



Fonte: elaborada pelo autor

Figura 27 – Atraso médio para todas as classes QoS avaliadas

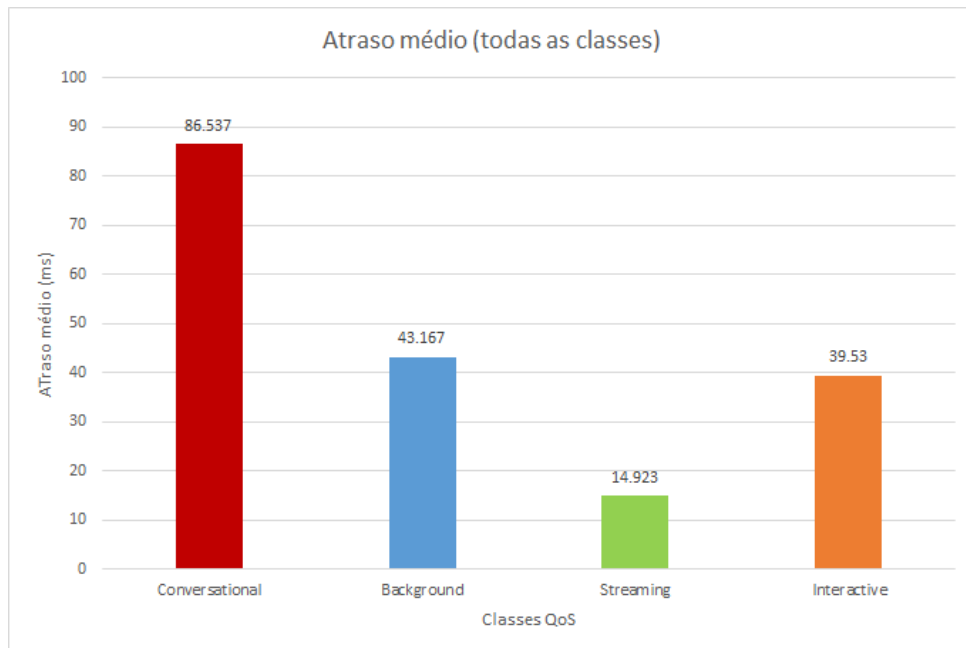


Fonte: elaborada pelo autor

significa que estão dentro do *budget* de atraso estipulado para 8 das 9 portadoras EPS disponíveis nas redes LTE (há uma portadora cujo propósito é executar jogos em tempo real cujo *budget* de atraso é 50 ms). O resultado mais discrepante ficou por conta da classe *Streaming*, que apresentou atraso médio abaixo dos 15 ms. Esse resultado pode ser

explicado pelo fato de as informações necessárias para montar todos os pacotes estarem disponíveis de antemão à aplicação que simula essa classe no NS-3, o que pode ter feito com que os pacotes fossem montados mais rapidamente que os pacotes das outras classes.

**Figura 28 – Jitter médio para todas as classes QoS avaliadas**



**Fonte: elaborada pelo autor**

Em relação ao *jitter*, como pode ser observado na Figura 28, todas as classes tiveram resultados parecidos: o *jitter* ficou uma ordem de grandeza abaixo do atraso médio aferido. Isso aconteceu porque o atraso não variou muito de pacote para pacote nas aplicações simuladas, o que pode ser uma consequência do baixo número de usuários, que não gera congestionamento na rede.



## 6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho teve como objetivo apresentar um modelo multicamadas para *handovers* horizontais em redes LTE usando os protocolos MIP e SIP e o padrão IEEE 802.21 (MIH). O modelo visa permitir a criação de um ambiente de mobilidade irrestrita sem perda de conectividade, atribuindo, aos protocolos e padrão usados, funcionalidades de controle de conectividade e execução de *handover* para que à medida em que usuários passem por procedimentos de *handover*, suas conexões em curso sejam mantidas, garantindo a execução contínua de suas aplicações, sem gargalos perceptíveis e respeitando os padrões mínimos de qualidade estipulados pelo 3GPP. O modelo tem como objetivo, ainda, ser facilmente extensível e adaptável a ambientes em que coexistam redes de tecnologias diferentes. Os protocolos e padrão usados são independentes da tecnologia de rede subjacente, e por isso a adaptação do modelo a ambientes heterogêneos não requer uma reestruturação, apenas mudanças no procedimento de *handover* e gerenciamento de conexões disponíveis.

A solução multicamada apresentada é vantajosa, uma vez que a presença de múltiplos protocolos faz com que seja possível distribuir as tarefas de gerenciamento do ambiente e execução do *handover* entre eles, de forma que um único protocolo não acumule funções, o que pode prejudicar o desempenho do modelo como um todo. O uso de MIH permite um gerenciamento das conexões disponíveis de forma mais precisa, por atuar em camadas mais baixas. O constante monitoramento do ambiente de rede em que se encontram os usuários é fundamental para decisões mais acertadas de *handover*. O uso de SIP em conjunto com MIP também propicia melhorias ao modelo, que passa a contar com gerenciamento de sessões na camada de aplicação para encontrar interlocutores que venham a mudar de rede e conseqüentemente de endereço IP, em detrimento do uso do tunelamento oferecido pelo protocolo MIP. Caso os componentes do modelo (MIP, SIP e MIH) fossem usados de forma isolada, o modelo não seria tão completo em seu gerenciamento multicamada, e nem tão eficiente, pela sobrecarga de funções imposta a um único protocolo ou mesmo impossibilidade de se obter o mesmo nível de funcionalidade, já que não seria possível gerenciar a localização dos usuários pelas várias redes se, por exemplo, apenas o MIH fosse usado.

Simulações foram realizadas usando o simulador de redes NS-3 a fim de verificar se o procedimento de *handover* era feito com sucesso, se a conexão era mantida do início ao fim do processo e se o desempenho das aplicações simuladas estava de acordo com o mínimo estipulado pelo 3GPP para cada uma das 4 classes QoS. O cenário de simulação continha duas eNBs, 4 usuários, um nó correspondente e pelo menos uma aplicação representando cada classe QoS: uma aplicação VoIP representando a classe *Conversational*; uma aplicação FTP representando a classe *Background*; uma aplicação

de *streaming* de vídeo representando a classe *Streaming*; e uma aplicação do tipo *requisição-resposta* representando a classe *Interactive*. Foram coletados dados relativos ao tempo de *handover*, largura de banda média, atraso médio e *jitter* médio. Um teste prático foi conduzido usando uma aplicação FTP na rede LTE da operadora TIM. Os dados coletados foram comparados às referências produzidas pelo 3GPP para verificar se as aplicações executadas no cenário de simulação atendiam aos requisitos de qualidade do 3GPP.

Os resultados mostraram que o modelo multicamadas de *handover* horizontal garantiu o *handover* para todos os usuários sem perda de conexão, e que todas as aplicações em execução no cenário mantiveram a todo momento seu fluxo de dados, e superaram todos os requisitos mínimos definidos pelo 3GPP para aplicações de suas respectivas classes. O tempo de *handover* alcançado nos testes foi, na média, aproximadamente 260 ms, ou cerca de um quarto de segundo. Esse tempo não foi considerado perceptível pelos usuários, e não interferiu de forma deletéria no desempenho das aplicações em curso durante os procedimentos de *handover*. A simulação que envolveu a classe QoS *Background*, que foi comparada com um experimento prático cujo objetivo era avaliar a mesma classe, obteve resultados de largura de banda similares, com valores médios na casa dos 15,5 MB/s na simulação e 14,7 MB/s no teste prático usando uma rede LTE comercial da operadora TIM e um *smartphone* LG G3. Trabalhos similares encontrados na literatura apresentaram tempos de *handover* similares, porém nenhum trabalho que utilizasse o mesmo simulador ou configurações semelhantes foi encontrado para uma comparação direta. Também não foram encontrados trabalhos semelhantes que fizessem o mapeamento das 9 portadoras EPS da rede LTE para as 4 classes QoS para fins de análise de qualidade.

Como trabalhos futuros, sugere-se a adaptação do modelo a ambientes heterogêneos, em que coexistam redes de tecnologias e propósito distintos. Um cenário interessante seria a integração de redes LTE e Wi-Fi, pois trata-se da integração de uma rede metropolitana de longo alcance com uma rede doméstica de curto alcance, cobrindo a maior parte dos cenários típicos de uso de usuários de telefonia móvel. Adicionalmente, o estudo e introdução de técnicas de decisão de *handover* pode trazer ao modelo melhoras de desempenho no que tange à escolha da melhor rede para se conectar quando for necessário um *handover*. Diversas técnicas existem na literatura, e um estudo comparativo dessas técnicas integradas ao modelo seria de grande valia para o avanço do estado da arte.

## REFERÊNCIAS

ALAMRI, N. M.; ADRA, N. Integrated mip-sip for ims-based wimax-umts vertical handover. In: IEEE. TELECOMMUNICATIONS (ICT), 2012 19TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON. [S.l.], 2012. p. 1–6.

ATOURASSAP, F. MODELO DE REDE DE NOVA GERAÇÃO BASEADA NA COMBINAÇÃO DE PROTOCOLOS DE MOBILIDADE. Dissertação (Mestrado) — Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais.

ATOURASSAP, F.; FIGUEIREDO, F. d. L. P. D. Modelo de ngn baseado em mip, iee 802.21 e sip para computação ubíqua. XXXIX SEMINÁRIO INTEGRADO DE SOFTWARE E HARDWARE, july 2012.

BALDO, N. et al. An open source product-oriented lte network simulator based on ns-3. In: ACM. PROCEEDINGS OF THE 14TH ACM INTERNATIONAL CONFERENCE ON MODELING, ANALYSIS AND SIMULATION OF WIRELESS AND MOBILE SYSTEMS. [S.l.], 2011. p. 293–298.

EKLUND, C. et al. Ieee standard 802.16: a technical overview of the wirelessman/sup-tm/air interface for broadband wireless access. COMMUNICATIONS MAGAZINE, IEEE, IEEE, v. 40, n. 6, p. 98–107, 2002.

GOOGLE. **Os novos donos da internet: Classe C, de conectados.** March 2015. Disponível em: <<https://www.google.com/intl/ALL.br/think/research-studies/novos-donos-internet-classe-c-conectados-brasil.html>>. Acesso em: 28 jun. 2015.

ICKIN, S. et al. The effects of packet delay variation on the perceptual quality of video. In: IEEE. LOCAL COMPUTER NETWORKS (LCN), 2010 IEEE 35TH CONFERENCE ON. [S.l.], 2010. p. 663–668.

IEEE Standard for Information technology–Telecommunications and information exchange between systems Local and metropolitan area networks–Specific requirements Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. IEEE STD 802.11-2012 (REVISION OF IEEE STD 802.11-2007), p. 1–2793, 2012.

INFO, R. **Número de smartphones supera o de computadores no Brasil.** April 2015. Disponível em: <<http://info.abril.com.br/noticias/mercado/2015/04/numero-de-smartphones-supera-o-de-computadores-no-brasil.shtml>>. Acesso em: 28 jun. 2015.

ITU-T. **International Telecommunication Union - General Overview of NGN.** december 2004.

JAILTON, J. et al. A quality of experience handover architecture for heterogeneous mobile wireless multimedia networks. *COMMUNICATIONS MAGAZINE, IEEE*, v. 51, n. 6, p. 152–159, 2013. ISSN 0163-6804.

JOHN, C.; MADLOPHA, S.; VENTURA, N. Pmipv6-based make-before-break handover for real-time services in 3gpps evolved packet core. In: *IEEE. INFORMATION NETWORKING (ICOIN), 2013 INTERNATIONAL CONFERENCE ON*. [S.l.], 2013. p. 125–130.

JOHNSON, S.; NATH, S.; VELMURUGAN, T. An optimized algorithm for vertical handoff in heterogeneous wireless networks. In: *INFORMATION COMMUNICATION TECHNOLOGIES (ICT), 2013 IEEE CONFERENCE ON*. [S.l.: s.n.], 2013. p. 1206–1210.

JOHNSTON, A. B. **Understanding the Session Initiation Protocol**. 2. ed. [S.l.]: Boston, 2007.

KHAN, M. M. A.; ISMAIL, M. F.; DIMYATI, K. Seamless handover between wimax and umts. In: *IEEE. COMMUNICATIONS (MICC), 2009 IEEE 9TH MALAYSIA INTERNATIONAL CONFERENCE ON*. [S.l.], 2009. p. 826–830.

KHAN, M. Q.; ANDRESEN, S. H. Application of media independent handover (mih) for intra technology handover. In: *MOSHARAKA INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMMUNICATIONS, NETWORKING AND INFORMATION TECHNOLOGY AMMAN JORDAN DEC*. [S.l.: s.n.], 2009.

KIM, B.-K. et al. Enhanced fmipv4 horizontal handover with minimized channel scanning time based on media independent handover (mih). In: *IEEE. NETWORK OPERATIONS AND MANAGEMENT SYMPOSIUM WORKSHOPS, 2008. NOMS WORKSHOPS 2008*. IEEE. [S.l.], 2008. p. 52–55.

KIM, D. P.; KOH, S. J. Analysis of handover latency for mobile ipv6 and msctp. In: *IEEE. COMMUNICATIONS WORKSHOPS, 2008. ICC WORKSHOPS' 08*. IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON. [S.l.], 2008. p. 420–424.

KUHNERT, M.; WIETFELD, C. Performance evaluation of an advanced energy-aware client-based handover solution in heterogeneous lte and wifi networks. In: *IEEE. VEHICULAR TECHNOLOGY CONFERENCE (VTC SPRING), 2014 IEEE 79TH*. [S.l.], 2014. p. 1–5.

LASSOUED, I.; BONNIN, J.; BELGHITH, A. Towards an architecture for mobility management and resource control. In: *WIRELESS COMMUNICATIONS AND NETWORKING CONFERENCE, 2008. WCNC 2008*. IEEE. [S.l.: s.n.], 2008. p. 2846–2851. ISSN 1525-3511.

LEE, C.-S.; KNIGHT, D. Realization of the next-generation network. *COMMUNICATIONS MAGAZINE, IEEE*, v. 43, n. 10, p. 34–41, 2005. ISSN 0163-6804.

MA, L. et al. A new method to support umts/wlan vertical handover using setp. *WIRELESS COMMUNICATIONS, IEEE, IEEE*, v. 11, n. 4, p. 44–51, 2004.

OLIVA, A. D. L. et al. An overview of ieee 802.21: media-independent handover services. *WIRELESS COMMUNICATIONS, IEEE*, v. 15, n. 4, p. 96–103, 2008. ISSN 1536-1284.

PERKINS, C. E. **Mobile IP**. COMMUNICATIONS MAGAZINE, IEEE, v. 35, n. 5, p. 66–82, May 1997.

PROJECT 3rg G. P. **QoS Requirements for UMTS Networks**. April 1999. Disponível em: <[http://www.3gpp.org/ftp/tsg\\_sa/wg1\\_serv/TSGS1\\_03-HCourt/Docs/Docs-Long\\_Names/S1-99362\\_QoS\\_Nortel\\_Performance\\_requirements\\_for\\_UMTS.doc](http://www.3gpp.org/ftp/tsg_sa/wg1_serv/TSGS1_03-HCourt/Docs/Docs-Long_Names/S1-99362_QoS_Nortel_Performance_requirements_for_UMTS.doc)>. Acesso em: 17 jun. 2015.

PROJECT 3rg G. P. **3GPP TSG-SA2 Meeting 55**. October 2006. Disponível em: <[http://www.3gpp.org/ftp/tsg\\_sa/WG2\\_Arch/TSGS2\\_55\\_Busan/Docs/](http://www.3gpp.org/ftp/tsg_sa/WG2_Arch/TSGS2_55_Busan/Docs/)>. Acesso em: 28 jun. 2015.

PROJECT, N.-. **Design Documentation**. December 2014. Disponível em: <<https://www.nsnam.org/docs/release/3.21/models/html/lte-design.html>>. Acesso em: 26 jun. 2015.

RAMROOP, S. A diffserv model for the ns-3 simulator. EN LIGNE]. DISPONIBLE: [HTTP://WWW. ENG. UWI. TT/DEPTS/ELEC/STAFF/RVADAMS/SRAMROOP/INDEX. HTM](http://www.eng.uwi.tt/depts/elec/staff/rvadams/sramroop/index.htm), 2011.

SANTOS, W. P. d. et al. **Modelo de handover vertical suave entre redes WiMAX e UMTS**. XVI WORKSHOP DE GERÊNCIA E OPERAÇÃO DE REDES E SERVIÇOS, may 2011.

SEZIA, S.; TOUFIK, I.; BAKER, M. LTE: THE UMTS LONG TERM EVOLUTION. [S.l.]: Wiley Online Library, 2009.

SHAYEA, I.; ISMAIL, M.; NORDIN, R. Advanced handover techniques in lte-advanced system. In: IEEE. COMPUTER AND COMMUNICATION ENGINEERING (ICCCE), 2012 INTERNATIONAL CONFERENCE ON. [S.l.], 2012. p. 74–79.

SINGHROVA, A.; PRAKASH, N. Adaptive vertical handoff decision algorithm for wireless heterogeneous networks. In: IEEE. HIGH PERFORMANCE COMPUTING AND COMMUNICATIONS, 2009. HPC'09. 11TH IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON. [S.l.], 2009. p. 476–481.

SODERMAN, P. et al. Handover in the wild: The feasibility of vertical handover in commodity smartphones. In: IEEE. COMMUNICATIONS (ICC), 2013 IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON. [S.l.], 2013. p. 6401–6406.

TANENBAUM, A. S. **Computer Networks**. 2. ed. [S.l.]: Vrije Universiteit Amsterdam, Holanda, 2003.

TELECOMUNICAÇÕES, T. I. em. **Estatísticas de Celulares no Brasil**. June 2015. Disponível em: <<http://www.teleco.com.br/ncel.asp>>. Acesso em: 28 jun. 2015.

WIKIPEDIA. **QoS Class Identifier**. February 2015. Disponível em: <[https://en.wikipedia.org/wiki/QoS\\_Class\\_Identifier](https://en.wikipedia.org/wiki/QoS_Class_Identifier)>. Acesso em: 28 jun. 2015.

XIONG, M.; CAO, J. A clustering-based context-aware mechanism for iee 802.21 media independent handover. In: IEEE. WIRELESS COMMUNICATIONS AND NETWORKING CONFERENCE (WCNC), 2013 IEEE. [S.l.], 2013. p. 1569–1574.