

Nivia Cruz Quental

# **CPMIPv6: Uma Abordagem Intradomínio e Interdomínio para Redes IP Móveis**

Brasil

2016

Nivia Cruz Quental

# **CPMIPv6: Uma Abordagem Intradomínio e Interdomínio para Redes IP Móveis**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação do Centro de Informática da UFPE como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor em Ciência da Computação.

Universidade Federal de Pernambuco – UFPE

Centro de Informática

Programa de Pós-Graduação

Orientador: Paulo André da Silva Gonçalves

Brasil

2016

*Esta tese é dedicada à minha família e todos aqueles que enfrentam dificuldades para desenvolver pesquisa relevante.*

# Agradecimentos

Agradeço a Deus, cuja presença sinto nos momentos de maior incerteza, mas também no amor à minha volta e no êxtase da descoberta.

Agradeço aos meus pais Roberto e Ozita Quental; meus irmãos Roberto e Jamily Quental; meus primos, tios, cunhados e avós, pela companhia constante, solidariedade, amor e encorajamento durante toda a minha trajetória.

Agradeço ao meu orientador Paulo Gonçalves, pelo curto, porém precioso tempo dedicado a me tornar uma pesquisadora melhor. Agradeço também pela disponibilização de recursos de hardware para experimentos.

Agradeço aos meus grandes amigos Érica Teixeira e Fernando Aires pelos conselhos e exemplo de ética e competência em suas áreas de atuação.

Agradeço aos parceiros e amigos do projeto CIn/Samsung, pelas oportunidades de aprendizado técnico e compartilhamento de experiências, recursos de hardware e pela amizade. Agradeço aos funcionários do CIn-UFPE pela manutenção e provimento de recursos de hardware, software e laboratórios que tornaram possíveis os experimentos.

Agradeço aos amigos que fiz durante minha formação no CEFET-PE (atual IFPE) e na Escola Politécnica de Pernambuco, por todos os momentos de companheirismo e aprendizado.

*Instruir-te-ei, e ensinar-te-ei o caminho  
que deves seguir; guiar-te-ei com os meus olhos.  
Não sejas como o cavalo, nem como a mula, que não  
tem entendimento, cuja boca precisa de cabresto e  
freio para que não se cheguem a ti. (Salmo 32:8,9)*

# Resumo

A continuidade de sessões de comunicação entre sistemas finais, denominados nós, sobre redes móveis heterogêneas mediante *handover* tem sido objeto de estudo de pesquisas recentes. A ampla difusão de aplicativos multimídia para dispositivos móveis, permitindo a interação entre usuários que se deslocam em uma rede móvel, tornam esse problema ainda mais relevante e atual. No âmbito da mobilidade IP, alguns dos principais desafios envolvem aliar interoperabilidade entre tecnologias de acesso e baixa latência de *handover*, além de permitir a transição entre redes de domínios diferentes de forma transparente. O protocolo Proxy MIP versão 6 (PMIPv6) torna locais as operações de gerenciamento de mobilidade de modo a reduzir o overhead de comunicação em relação ao *Mobile IP* (MIP). Entretanto, o consequente isolamento da gerência de mobilidade ao domínio local impede que a transição entre diferentes domínios ocorra de forma transparente ao usuário.

A presente tese apresenta o Clustered PMIPv6 (CPMIPv6) como uma abordagem intradomínio e interdomínio de baixo custo e latência para a camada de rede baseada no Protocolo PMIPv6. Essa abordagem consiste em utilizar gerenciamento de mobilidade distribuído como forma de compartilhar e antecipar informações de nós móveis à entidade-âncora de cada domínio. Para tal, um *cluster* é formado por essas entidades-âncora e a comunicação entre elas ocorre por meio de um protocolo P2P. Esse gerenciamento torna a obtenção de informações dos nós móveis simplificada em *handovers* interdomínios futuros. O caráter distribuído do CPMIPv6 associado ao mínimo de acréscimo de mensagens de sinalização além daquelas existentes no PMIPv6 permite manter a infraestrutura da rede original, sem introduzir entidades centralizadoras.

Comparações entre soluções do Estado da Arte e o CPMIPv6 são realizadas por meio de modelagem e simulação. Com auxílio do simulador NS-3, um subconjunto dessas soluções são avaliadas em um cenário básico com baixo número de usuários e de redes disponíveis. Os resultados de experimentos utilizando modelagem executados em cenários com alta densidade de nós indicam que o CPMIPv6 obteve custo de sinalização ao menos 12% menor, latência no mínimo 16% inferior e perda de pacotes ao menos 16% menor. Ademais, o CPMIPv6 obtém *goodput* superior às demais abordagens. Ambos experimentos confirmam o CPMIPv6 como a abordagem intradomínio e interdomínio com melhor desempenho nos cenários avaliados. O CPMIPv6 é um importante salto na evolução dos sistemas de comunicações móveis extrapolando as fronteiras das tecnologias de enlace e limites de domínio sem perder as vantagens da comunicação no âmbito local.

**Palavras-chaves:** CPMIPv6. Handover. Mobilidade interdomínio.

# Abstract

Communication sessions continuity among wireless devices during handover in heterogeneous networks have been studied in recent research. The evolution and widespread multimedia applications for mobile gadgets make that problem even more relevant.

Some of the main challenges in IP mobility include associating access technologies interoperability, low handover latency, and seamless handover among different domains. Proxy MIP version 6 (PMIPv6) protocol aims at reducing signaling overhead in comparison to Mobile IP (MIP) making local the management operations. However, that local management prevents the possibility of seamless interdomain handover.

This thesis presents Clustered PMIPv6 (CPMIPv6) as a low-cost and low-latency approach for intradomain and interdomain handover in the network layer based on PMIPv6. That approach consists in using distributed mobility management as a mean to share and anticipate mobile nodes information to anchor entities in each domain. In order to achieve this, domain entities from each domain forms a cluster and uses a P2P protocol for communication. That management simplifies mobile nodes information gathering used in future interdomain handovers. CPMIPv6 distributed feature associated to a minimum set of additional signaling messages to PMIPv6 allows to maintain the original networks infrastructure without introducing centralized entities.

Comparisons among state of the art approaches and CPMIPv6 are made by means of analytical modeling and simulation. Simulations were run with the NS-3 network simulator with a subset of the approaches in a small scenario with low number of nodes and available networks. Modeling results in scenarios with high node densities have shown that CPMIPv6 reduced cost in at least 12%, reduced latency at least in 16%, and caused at least 16% reduction on packet loss. CPMIPv6 additionally obtained better goodput values. Both experiments confirmed CPMIPv6 as the best interdomain approach in the selected scenarios. Thus, CPMIPv6 is an important leap to the mobile communication systems evolution going beyond link-layer technologies and domain frontiers without losing the advantages of local signaling.

**Key-words:** CPMIPv6. Handover. Interdomain mobility.

# Lista de ilustrações

Figura 2.1 – Exemplo de rede de acesso sem fio. . . . .	22
Figura 2.2 – Arquitetura geral do sistema LTE. . . . .	28
Figura 2.3 – Fluxo de <i>handover</i> no sistema LTE. . . . .	29
Figura 2.4 – Configurações do IEEE 802.11: (a) Infraestruturada;(b) <i>ad hoc</i> . . . . .	30
Figura 2.5 – Procedimento de associação no IEEE 802.11. . . . .	31
Figura 2.6 – Controle de acesso no IEEE 802.11. . . . .	32
Figura 2.7 – Arquitetura da rede IEEE 802.16 . . . . .	33
Figura 2.8 – <i>Handover</i> no IEEE 802.16(a) Iniciado na rede;(b) Iniciado pelo nó. . . . .	34
Figura 3.1 – Exemplo de cenário de VHO. . . . .	39
Figura 3.2 – Exemplo de cenário de GVHO. . . . .	39
Figura 3.3 – Arquitetura de uma entidade MIH . . . . .	41
Figura 3.4 – Comparação entre as implementações para a função <code>t_atts()</code> . . . . .	49
Figura 3.5 – Exemplo de processamento no simulador. . . . .	51
Figura 3.6 – Probabilidade de bloqueio <i>versus</i> número de nós no cenário 1. . . . .	52
Figura 3.7 – Fração de nós bloqueados <i>versus</i> número de nós no cenário 1. . . . .	52
Figura 3.8 – Latência <i>versus</i> número de nós no cenário 1. . . . .	53
Figura 3.9 – Probabilidade de bloqueio <i>versus</i> número de nós no cenário 2. . . . .	54
Figura 3.10–Fração de nós bloqueados <i>versus</i> número de nós no cenário 2. . . . .	54
Figura 3.11–Latência <i>versus</i> número de nós no cenário 2. . . . .	55
Figura 4.1 – Arquitetura do Mobile IP. . . . .	61
Figura 4.2 – Fluxo de mensagens do Mobile IP. . . . .	62
Figura 4.3 – Arquitetura do PMIPv6. . . . .	63
Figura 4.4 – Fluxo de mensagens do PMIPv6. . . . .	64
Figura 4.5 – Fluxo de mensagens do FPMIPv6 no modo preditivo. . . . .	65
Figura 4.6 – Fluxo de mensagens do FPMIPv6 no modo reativo. . . . .	65
Figura 4.7 – <i>Handover</i> interdomínio no esquema de Park <i>et al.</i> . . . . .	70
Figura 4.8 – <i>Handover</i> interdomínio no esquema I-PMIPv6. . . . .	71
Figura 4.9 – <i>Handover</i> interdomínio no esquema EIMHP. . . . .	72
Figura 4.10– <i>Handover</i> interdomínio do esquema No-Gap. . . . .	73
Figura 5.1 – Domínios no CPMIPv6. . . . .	77
Figura 5.2 – Exemplo de Rede Kademia com espaço de chaves de 3 bits . . . . .	78
Figura 5.3 – Registro no CPMIPv6. . . . .	82
Figura 5.4 – Desregistro no CPMIPv6. . . . .	83
Figura 5.5 – <i>Handover</i> intradomínio no CPMIPv6. . . . .	83
Figura 5.6 – <i>Handover</i> interdomínio no CPMIPv6. . . . .	84
Figura 6.1 – Cenário básico. . . . .	87



Figura 6.2 – Um domínio com sete subredes. . . . .	88
Figura 6.3 – Topologia e distâncias em saltos. . . . .	88
Figura 6.4 – Custo de sinalização <i>versus</i> número de nós móveis. . . . .	95
Figura 6.5 – Latência média de <i>handover</i> <i>versus</i> número de nós móveis. . . . .	96
Figura 6.6 – <i>Goodput</i> <i>versus</i> número de nós móveis. . . . .	97
Figura 6.7 – Custo de sinalização <i>versus</i> $\beta$ . . . . .	98
Figura 6.8 – Custo de sinalização <i>versus</i> SMR. . . . .	99
Figura 6.9 – Custo de sinalização <i>versus</i> velocidade. . . . .	99
Figura 6.10–Latência <i>versus</i> probabilidade de falha no meio sem fio. . . . .	100
Figura 6.11–Perda de pacotes <i>versus</i> probabilidade de falha no meio sem fio. . . . .	101
Figura 6.12– <i>Goodput</i> <i>versus</i> SMR. . . . .	101
Figura 6.13– <i>Goodput</i> <i>versus</i> probabilidade de falha no meio sem fio. . . . .	102
Figura A.1–Diagrama de classes do módulo PMIPv6. . . . .	121
Figura A.2–Fluxo de envio/recebimento das mensagens de PBU e PBA. . . . .	123
Figura B.1 –Diagrama de classes do módulo Kademia. . . . .	124
Figura C.1 –Diagrama de classes do módulo CPMIPv6. . . . .	126
Figura D.1 –Diagrama de classes do módulo No-Gap. . . . .	128
Figura E.1 –Diagrama de classes do módulo I-PMIP. . . . .	130

# Lista de tabelas

Tabela 2.1 – Trabalhos relacionados a mobilidade IP Interdomínio. . . . .	37
Tabela 3.1 – Parâmetros dos experimentos. . . . .	50
Tabela 3.2 – Trabalhos relacionados a <i>handover</i> na camada de enlace. . . . .	57
Tabela 4.1 – Abordagens para mobilidade IP Interdomínio. . . . .	75
Tabela 5.1 – Exemplo de tabela de roteamento para o par “110” em 3 <i>k-buckets</i> . . .	78
Tabela 5.2 – Armazenamento dos 128 <i>k-buckets</i> . . . . .	80
Tabela 5.3 – Abordagens para mobilidade IP Interdomínio (revisitado). . . . .	85
Tabela 6.1 – Mensagens de cada esquema de <i>handover</i> interdomínio. . . . .	93
Tabela 6.2 – Amostras de trace de tráfego veicular. . . . .	94
Tabela 6.3 – Parâmetros de avaliação. . . . .	97

# Lista de abreviaturas e siglas

**3GPP** *Third Generation Partnership Project.*

**AAA** *Authentication, Authorization, and Accounting.*

**ATM** *Asynchronous Transfer Mode.*

**BS** *Base Station.*

**C-SAP** *Control SAP.*

**CDMA** *Code Division Multiple Access.*

**CHT** *Channel Holding Time.*

**CN** *Core Network.*

**CoA** *Care-of Address.*

**CPMIPv6** *Clustered Proxy Mobile IPv6.*

**CPS** *Common Part Sublayer.*

**CS** *Convergence Sublayer.*

**D2D** *Device to Device.*

**DHT** *Distributed Hash Table.*

**DMM** *Distributed Mobility Management.*

**DS-WCDMA** *Direct-Sequence WCDMA.*

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

**EBB** *Entry Before Break.*

**EDGE** *Enhanced Data rates for GSM Evolution.*

**EPC** *Evolved Packet Core.*

**ETSI** *European Telecommunications Standards Institute.*

**FA** *Foreign Agent.*

**FBSS** *Fast Base Station Switch.*

**FCS** *Fast Cell Selection.*

**FDMA** *Frequency Division Multiple Access.*

**FMIP** *Mobile IPv6 Fast Handovers.*

**FPMIPv6** *Fast Handovers for Proxy Mobile IPv6.*

**GPRS** *General Packet Radio Service.*

**GVHO** *Group Vertical Handover.*

**HA** *Home Agent.*

**HHO** *Hard Handover.*

**HMIPv6** *Hierarchical Mobile IPv6.*

**HSS** *Home Subscriber Server.*

**ICMP** *Internet Control Message Protocol.*

**IEEE** *Institute of Electrical and Electronics Engineers.*

**IETF** *Internet Engineering Task Force.*

**IINR** *Interference to other Interferences-plus-Noise Ratio.*

**IMS** *IP Multimedia Subsystem.*

**IOT** *Internet of Things.*

**IP** *Internet Protocol.*

**IPv4** *IP, versão 4.*

**IPv6** *IP, versão 6.*

**LMA** *Local Mobility Anchor.*

**LR** *Localized Routing.*

**M-SAP** *Management SAP.*

**MAG** *Mobile Access Gateway.*

**MDHO** *Macro-Diversity Handover.*

**MICS** *Media Independent Command Service.*

**MIES** *Media Independent Event Service.*

**MIHF** *Media Independent Handover Function.*

**MIIS** *Media Independent Information Service.*

**MIMO** *Multiple Input Multiple Output.*

**MIP** *Mobile IP.*

**MME** *Mobility Management Entity.*

**MS** *Mobile Station.*

**NCMS** *Network Control and Management System.*

**OFDMA** *Orthogonal Frequency Division Multiple Access.*

**P-GW** *Packet Data Network Gateway.*

**PCRF** *Policy and Charging Resource Function.*

**PMIPv6** *Proxy Mobile IPv6.*

**QoE** *Quality of Experience.*

**QoS** *Quality of Service.*

**RBFNN** *Radial Basis Function Neural Network.*

**RRC** *Resource Radio Control.*

**RSS** *Received Signal Strength.*

**S-GW** *Serving Gateway.*

**SAP** *Service Access Point.*

**SC-FDMA** *Single Carrier Frequency Division Multiple Access.*

**SDN** *Software Defined Networks.*

**SHO** *Soft Handover.*

**SIP** *Session Initiation Protocol.*

**SIR** *Signal-to-interference ratio.*

**SMR** *Session-to-Mobility Ratio.*

**SOFDMA** *Scalable OFDMA.*

**SS** *Subscriber Station.*

**TDMA** *Time Division Multiple Access.*

**TPMIPv6** *Transient Binding for Proxy Mobile IPv6.*

**TTT** *Time-to-Trigger.*

**UE** *User Equipment.*

**UMTS** *Universal Mobile Telecommunication System.*

**VHO** *Vertical Handover.*

**VLC** *Visible Light Communications.*

# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>17</b>
1.1	Motivação	17
1.2	O CPMIPv6	19
1.3	Hipótese e Objetivos	20
1.4	Organização da Tese	20
<b>2</b>	<b>REDES DE ACESSO MÓVEIS</b>	<b>21</b>
2.1	Sistemas de Comunicações sem fio	21
2.2	<i>Handover</i>	23
2.2.1	Critérios de Iniciação de Handover	24
2.2.2	Mecanismos de Execução de Handover	25
2.2.3	Métricas de Avaliação de Desempenho	26
2.3	Sistemas LTE ( <i>Long Term Evolution</i> )	27
2.4	Sistemas IEEE 802.11	30
2.5	Sistemas IEEE 802.16	32
2.6	Trabalhos relacionados a <i>handover</i> em redes de acesso móveis	35
2.7	Conclusão	37
<b>3</b>	<b>MOBILIDADE VERTICAL NA CAMADA DE ENLACE</b>	<b>38</b>
3.1	Decisão em VHO	38
3.2	O padrão IEEE 802.21 - <i>Media Independent Handover</i> (MIH)	40
3.3	Trabalhos Relacionados	41
3.3.1	Trabalhos relacionados ao VHO	41
3.3.2	Trabalhos relacionados ao GVHO	43
3.4	Uma Estratégia de Tentativas para GVHO	44
3.4.1	Esquema de GVHO de Lee e Cho	45
3.4.2	Proposta de estratégia para tentativas de GVHO	48
3.4.3	Avaliação de desempenho	49
3.4.4	Resultados para o cenário 1	51
3.4.5	Resultados para o cenário 2	53
3.5	Conclusão	55
<b>4</b>	<b>MOBILIDADE EM REDES IP</b>	<b>61</b>
4.1	<i>Mobilidade IP</i>	61
4.1.1	Mobile IP (MIP)	61
4.1.2	<i>Proxy Mobile IPv6</i> (PMIPv6) e extensões	62

<b>4.2</b>	<b>Trabalhos relacionados</b>	<b>66</b>
4.2.1	Trabalhos relacionados ao MIP	66
4.2.2	Trabalhos relacionados ao PMIPv6 e extensões	67
<b>4.3</b>	<b>Mobilidade IP Interdomínio</b>	<b>69</b>
4.3.1	Abordagens para <i>handover</i> interdomínio em redes IP	70
4.3.1.1	Abordagem sem otimização	70
4.3.1.2	Abordagem baseada no LMA como âncora de sessão	71
4.3.1.3	Abordagem baseada em entidades centrais	71
4.3.1.4	Abordagem baseada em especialização de MAG	72
<b>4.4</b>	<b>Conclusão</b>	<b>74</b>
<b>5</b>	<b>CLUSTERED PMIPV6 (CPMIPV6)</b>	<b>76</b>
<b>5.1</b>	<b>Arquitetura do CPMIPv6</b>	<b>76</b>
5.1.1	Kademlia	77
5.1.2	Gerenciamento do <i>cluster</i>	79
<b>5.2</b>	<b>Sinalização do CPMIPv6</b>	<b>81</b>
<b>5.3</b>	<b>Conclusão</b>	<b>85</b>
<b>6</b>	<b>AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO</b>	<b>86</b>
<b>6.1</b>	<b>Cenários</b>	<b>86</b>
6.1.1	Cenário básico	86
6.1.2	Cenário amplo	87
<b>6.2</b>	<b>Metodologias</b>	<b>89</b>
6.2.1	Simulação	89
6.2.2	Modelagem	90
<b>6.3</b>	<b>Resultados</b>	<b>92</b>
6.3.1	Experimento 1: Cenário básico	92
6.3.2	Experimento 2: Cenário amplo	96
<b>6.4</b>	<b>Conclusão</b>	<b>102</b>
<b>7</b>	<b>CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS</b>	<b>103</b>
<b>7.1</b>	<b>Contexto da Tese e Contribuições</b>	<b>103</b>
<b>7.2</b>	<b>Publicações</b>	<b>105</b>
<b>7.3</b>	<b>Trabalhos Futuros</b>	<b>106</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>108</b>
	<b>Glossário</b>	<b>119</b>



<b>APÊNDICES</b>	<b>120</b>
<b>APÊNDICE A – NS-3 - ARQUITETURA - MÓDULO PMIPV6 . .</b>	<b>121</b>
<b>APÊNDICE B – NS-3 - ARQUITETURA - MÓDULO KADEMLIA</b>	<b>124</b>
<b>APÊNDICE C – NS-3 - ARQUITETURA - MÓDULO CPMIPV6 .</b>	<b>126</b>
<b>APÊNDICE D – NS-3 - ARQUITETURA - MÓDULO NO-GAP . .</b>	<b>128</b>
<b>APÊNDICE E – NS-3 - ARQUITETURA - MÓDULO I-PMIP . . .</b>	<b>130</b>

# 1 Introdução

Um projeto de redes móveis contempla, em geral, especificações das tecnologias de acesso, planejamento da topologia, distribuição de entidades de rede e protocolos para gerenciamento de mobilidade. No âmbito da mobilidade, o *handover* interdomínio transparente em redes heterogêneas ainda é uma questão em aberto. No presente capítulo são apresentadas as motivações para a pesquisa nessa área, os objetivos e a estrutura da tese.

## 1.1 Motivação

*Handover* (ou *handoff*) é o processo que permite a um nó móvel manter o seu fluxo de tráfego mediante a mudança de enlace (RAPPAPORT, 2008) (IEEE-802.21, 2008). Esse processo pode ser iniciado pelo próprio nó móvel ou pelo seu ponto de acesso (*Point of Attachment* - PoA). Essa mudança precisa ocorrer de forma transparente ao usuário, sendo o custo de sinalização, a latência e a perda de pacotes fatores críticos de desempenho.

Recentemente, o conceito de *handover* não tem sido mais apenas ligado à continuidade de uma chamada telefônica, mas também à continuidade de sessões de *streaming* e à manutenção de QoS e do acesso à Internet. A variedade de aplicativos disponíveis para *tablets* e *smartphones* inclui aplicativos de teleconferências, compartilhamento de vídeos e monitoramento de dispositivos em tempo real, entre outros. Aplicativos como Skype<sup>1</sup>, Periscope<sup>2</sup> e zcast<sup>3</sup> permitem que usuários transmitam conteúdo de áudio e vídeo para um ou mais usuários por meio da Internet. A possibilidade de uso de equipamentos que adaptam dispositivos móveis a veículos ampliam os possíveis cenários de uso (MURPHY; NAFAA; SERAFINSKI, 2013). Nesses casos, o *handover* tem papel fundamental no desempenho e bom funcionamento desses aplicativos. Em meios com grande perda, um *handover* que não agrave esse problema é fundamental na qualidade de experiência (*Quality of Experience* - QoE) do usuário final (JELASSI et al., 2012). A QoE também é influenciada pelo critério de seleção de redes e pela forma como a transferência de contexto é realizada.

As novas gerações de *tablets* e *smartphones* trazem também ao usuário o suporte a diversas tecnologias sem fio como 3G, WiMAX, Wi-Fi e LTE em um mesmo aparelho. Isso permite extrapolar o conceito de transferência de um canal para outro em uma mesma tecnologia para o *handover* em redes heterogêneas. Nesse novo cená-

---

<sup>1</sup> [www.skype.com](http://www.skype.com)

<sup>2</sup> <https://www.periscope.tv/>

<sup>3</sup> <https://zcast.co/>

rio, a necessidade de se manter a sessão do usuário permanece, encorajando novas pesquisas na área de *handover* vertical (*Vertical Handover* - VHO) (SHEN; ZENG, 2008) (STEVENS-NAVARRO; LIN; WONG, 2008) (CAI; LIU, 2008) (LEE et al., 2009b) (TANIUCHI et al., 2009) (CICCONETTI; GALEASSI; MAMBRINI, 2010) (ANDERSSON; FORTE; SCHULZRINNE, 2010) (LEE; CHO, 2011) (KIM; KIM, 2011) (ZEKRI; JOUABER; ZEGHLACHE, 2012) (JEONG et al., 2012) (QUENTAL; GONÇALVES, 2014a) (LIU; CHENG; HUANG, 2015). Quando o *handover* ocorre simultaneamente em vários nós móveis, é caracterizado o *Handover* Vertical em Grupo (*Group Vertical Handover* - GVHO). Nesse caso, a questão do balanceamento de carga entre os PoAs candidatos e da forma como decisões são tomadas pelas entidades envolvidas tornam-se críticas para o sucesso da operação (CAI; LIU, 2008)(NIYATO; HOSSAIN, 2009)(LEI; HUI; ZHENG, 2010)(LEE; CHO, 2011)(NING et al., 2013)(QUENTAL; GONÇALVES, 2014b).

O *handover* na camada de enlace, entretanto, pode não ser suficiente para que se conservem os dados de uma sessão. Caso o nó móvel siga além das fronteiras de sua rede de acesso, é necessário atualizar as tabelas de roteamento, as informações de autenticação e a nova localização do nó móvel. Esse é um cenário bastante comum, quando se considera tecnologias veiculares, em casos de uso que envolvem automóveis, trens e ônibus com pessoas utilizando os seus dispositivos enquanto percorrem longas distâncias.

Para tal, o IETF (*Internet Engineering Task Force*) adicionou o suporte à mobilidade aos protocolos IPv4 e IPv6, com a especificação do *Mobile IP* MIP (JOHNSON; PERKINS; ARKKO, 2004). O MIP permite que o nó conserve seu endereço IP inicial, mesmo que saia da sua área de cobertura de origem (ZEKRI; JOUABER; ZEGHLACHE, 2012). Assim como na camada de enlace, o processo de *handover* no nível IP pode resultar em atrasos que prejudicam a experiência do usuário e operações com alto consumo de energia no dispositivo móvel. Para tratar destes problemas, o IETF também tem proposto extensões ao MIP, como o *Mobile IPv6 Fast Handovers* (KODLI, 2009)(FMIP), o *Proxy Mobile IPv6*(PMIPv6) (GUNDAVELLI et al., 2008), e o *Fast Handovers for Proxy Mobile IPv6*(FPMIPv6) (YOKOTA et al., 2011).

No âmbito de mobilidade IP, um desafio atual é o suporte ao *handover* interdomínio (TAGHIZADEH et al., 2012). O MIP permite o deslocamento entre diferentes domínios. Contudo, a presença de uma única entidade-âncora disponível para gerenciar a mobilidade do nó torna o protocolo custoso à medida que o nó se afasta de sua rede de origem. As extensões *Proxy* de MIP possuem a vantagem de descentralizar o controle de mobilidade transferindo-o para domínios locais, contudo, eliminam o caráter interdomínio do MIP por terem como premissa a mobilidade em um domínio único.

Diversas propostas para *handover* interdomínio têm sido apresentadas na literatura (PARK E. LEE; NOH; KIM, 2010) (ZHONG et al., 2010) (NEUMANN et al., 2009)

(JOE; LEE, 2012). Park *et al.* (PARK E. LEE; NOH; KIM, 2010) propõem um esquema de repasse de mensagens de sinalização do PMIPv6 entre domínios vizinhos passando pelas entidades âncoras de cada domínio. Contudo, a necessidade da introdução de um túnel extra e a duplicação de mensagens de sinalização promovem a degradação do desempenho. A proposta de Zhong *et al.* (ZHONG et al., 2010) requer a introdução de uma entidade centralizadora para manter a informação dos nós durante a visita a novos domínios. A presença da entidade centralizadora reduz a sinalização de *handover* em comparação à proposta de Park *et al.*. Entretanto, isso implica na introdução de um ponto único de falha, causando uma mudança expressiva na infraestrutura de rede do PMIPv6, além de tornar-se um gargalo de comunicação. Neumann *et al.* (NEUMANN et al., 2009) propõem manter a entidade-âncora de origem durante o *handover* interdomínio. Contudo, a dependência de uma estrutura centralizadora que guarde e retorne a localização do nó móvel ainda existe. Joe e Lee (JOE; LEE, 2012) propõem a especialização de entidades de mobilidade na fronteira entre dois domínios, otimizando a sinalização. Uma vez que essa proposta requer adicionalmente modificação nos roteadores de borda, ela apresenta obstáculos à integração com sistemas legados devido à mudança na infraestrutura de rede e requer a adição de uma entidade centralizadora, assim como algumas das propostas anteriores.

## 1.2 O CPMIPv6

O *Clustered PMIPv6* (CPMIPv6) é uma abordagem para *handover* interdomínio e intradomínio para o PMIPv6, que busca atingir requisitos de baixo custo e latência, distribuição e retro-compatibilidade. O CPMIPv6 utiliza um conjunto mínimo de mensagens além daquelas utilizadas no PMIPv6 para gerenciamento dos nós além do domínio de origem. A abordagem consiste na formação de um *cluster* de entidades-âncora pertencentes a cada domínio, que se comunicam seguindo uma lógica de DHT (*Distributed Hash Table*) derivada da tecnologia Kademlia (MAYMOUNKOV; MAZIÈRES, 2002). A difusão de informações dos nós móveis pelas entidades do *cluster* durante o registro de nós e durante o *handover* garante a eficiência dos *handovers* seguintes. Essa antecipação da informação faz com que a sinalização de *handover* não gere gargalos nas entidades no núcleo da rede, o que reduz a latência em comparação às abordagens do estado da Arte.

O CPMIPv6 promove o reuso de entidades já existentes em uma rede legada, e preserva o caráter de *proxy* local do PMIPv6 na maior parte do tempo, uma vez que o seu âncora contacta outras entidades externas apenas em momentos de transição entre domínios. Assim, o CPMIPv6 é uma solução de *handover* interdomínio e intradomínio que alia baixa latência de *handover*, descentralização do gerenciamento de mobilidade e compatibilidade com as arquiteturas de rede pré-existentes.

## 1.3 Hipótese e Objetivos

A hipótese defendida pela presente tese é: o uso de uma rede DHT para a obtenção antecipada de informações de nós móveis é decisivo para que se tenha gerenciamento de mobilidade intradomínio e interdomínio de baixo custo e latência de *handover*.

O objetivo geral da tese é, por meio do CPMIPv6, mostrar que é possível equilibrar requisitos de desempenho em mobilidade intradomínio e interdomínio ao mesmo tempo em que se preserva as características das entidades de rede existentes. A presente tese tem como objetivos específicos:

- Propor como contribuição principal da tese uma solução intradomínio e interdomínio para redes móveis PMIPv6 por meio de:
  - Utilização de arquiteturas DHT na formação de um *cluster* para difusão eficiente de informações de rede sem o uso de entidades centralizadoras, evitando a inclusão de mais um salto no caminho de dados e controle;
  - Reaproveitamento de entidades-âncora legadas na formação do *cluster*, garantindo compatibilidade com sistemas pré-existentes;
  - Realização de difusões preditivas de informações no *cluster* de modo a não ser necessária a realização de consultas no momento do *handover*;
  - Envio de mensagens assíncronas para atualização do *cluster* de modo a não gerar *overhead* de sinalização para entidades do domínio local;
- Realizar avaliação de desempenho por meio de modelagem e simulação de modo a comprovar a hipótese levantada.

## 1.4 Organização da Tese

O Capítulo 2 apresenta as principais tecnologias de redes de acesso sobre as quais são executados processos de gerenciamento de mobilidade. No Capítulo 3 é apresentado um panorama das principais tecnologias de acesso de quarta geração, bem como soluções para *handover* vertical na camada de enlace, apresentando uma estratégia de tentativas para o caso de *handover* vertical em grupo como contribuição secundária da tese. O Capítulo 4 apresenta o Estado da Arte das soluções para *handover* na camada IP e os desafios do *handover* interdomínio. O Capítulo 5 apresenta o CPMIPv6 e suas características. O Capítulo 6 descreve a metodologia utilizada e os resultados dos experimentos de avaliação de desempenho do CPMIPv6 em comparação com outras abordagens do Estado da Arte. Finalmente, são apresentadas em seguida, as conclusões da tese e os encaminhamentos para trabalhos futuros.

## 2 Redes de Acesso Móveis

O advento e evolução das pesquisas em Eletromagnetismo desde o fim do século XIX tornou a radiofrequência uma via de comunicação fundamental para sistemas de controle remoto, sensores, telefonia celular, computadores portáteis e até mesmo equipamentos domésticos. Esses sistemas, que eram limitados a poucos usuários até o início da década de noventa, evoluíram para as complexas redes metropolitanas sem fio, mantendo milhares de usuários conectados simultaneamente. Neste capítulo, as principais redes de acesso metropolitanas sem fio são apresentadas, sobre as quais protocolos de gerenciamento e aplicativos móveis são executados. O objetivo deste capítulo é apresentar conceitos básicos e tecnologias importantes para uma melhor compreensão da presente tese.

### 2.1 Sistemas de Comunicações sem fio

Os sistemas de comunicações sem fio são constituídos por uma arquitetura que de forma geral inclui (IEEE-802, 2002):

- Nós móveis, clientes do sistema;
- PoAs, para controle dos nós móveis a seu alcance;
- Rede de enlaces sem fio que conecta PoAs e nós móveis;
- Entidades de gerência de mobilidade e de PoAs;
- Entidades de acesso à rede externa (Internet ou outros serviços).

As redes metropolitanas sem fio abrangem áreas correspondentes a *campi* universitários, bairros e cidades. Atualmente, suportam uma grande quantidade de usuários simultaneamente graças à divisão da área de cobertura em células, fazendo-se reuso de frequências. Adicionalmente, mecanismos de multiplexação por tempo, código e frequências ortogonais são empregados, garantindo um maior número de usuários e altas taxas de transferência.

A Figura 2.1 apresenta um exemplo de rede metropolitana sem fio. Em geral, o modelo hexagonal de célula é adotado por ser facilmente tratável do ponto de vista matemático (BALTZIS, 2011). Cada célula é coordenada por um ponto de acesso.

De acordo com Nóbrega (NOBREGA, 2011), as gerações mais antigas de sistemas celulares foram projetadas para o tráfego de voz. Os sistemas 1G eram analógicos e usavam

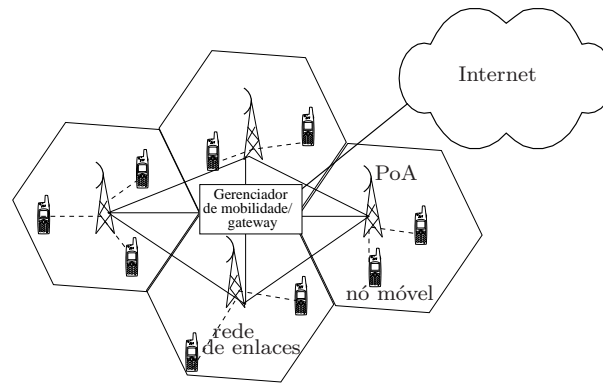


Figura 2.1 – Exemplo de rede de acesso sem fio.

o acesso ao meio FDMA (*Frequency Division Multiple Access*); os sistemas 2G evoluíram para suportar transporte de dados utilizando o padrão GSM (*Global System for Mobile Communications*), sendo uma combinação dos esquemas TDMA (*Time Division Multiple Access*) e FDMA de acesso ao meio; a compatibilidade com as redes IP foi obtida nas gerações 2,5G com os padrões EDGE (*Enhanced Data Rates For GSM Evolution*) e GPRS (*General Packet Radio Services*) e 3G, que introduziu a tecnologia UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System*) com o modo de acesso DS-WCDMA (*Direct Sequence - Wide Code Division Multiple Access*), permitindo aumentar as taxas de transferência. A geração 4G tem como padrão o LTE (*Long Term Evolution*), que oferece suporte a múltiplas interfaces e utiliza o modo de acesso OFDMA (*Orthogonal Frequency-Division Multiple Access*). O 4G funciona de maneira semelhante à rede IEEE 802.16.

Os diferenciais das tecnologias de quarta geração são (FIGUEIREDO; PEREIRA, 2008):

- Infraestrutura mais simples em comparação com os sistemas 3G baseados em CDMA;
- Rede totalmente IP;
- Tolerância a distorções por multipercurso, causadas por obstáculos entre transmissor e receptor, criando efeito de repetição de sinais atrasados (efeito “fantasma”);
- Uso dinâmico do espectro com seleção de canais e aumento da largura espectral sob demanda por meio do método de acesso SOFDMA;
- Mecanismos de criptografia;
- Implementação de QoS.

O IEEE 802.11 foi projetado como padrão para redes locais sem fio. O baixo custo viabiliza a ampla adesão por fabricantes e usuários finais e se estende de ambientes *indoor* a ambientes abertos, com a instalação de *hot-spots* em lugares públicos. A organização em

Redes *Mesh* (AKYILDIZ; WANG, 2005) oferece uma arquitetura em malha para redes sem fio locais e metropolitanas. Neste contexto, dois tipos de nós se distinguem: roteadores e sistemas finais. O primeiro possui, além das capacidades de roteamento em malha, funcionalidades de *gateway* ou *bridge*, permitindo a comunicação em múltiplos saltos, análogo à Internet. Essa tecnologia é comumente empregada em ambientes remotos, onde não há infraestrutura fixa para comunicação sem fio.

Os passos seguintes na evolução das redes metropolitanas convergem para o que recentemente foi batizado como 5G (ERICSSON, 2013). Com o 5G seria possível atender um maior número de conexões em uma mesma área de cobertura, incluindo comunicação massiva entre pessoas e entre objetos de acordo com princípios da Internet das Coisas (*Internet of Things - IOT*). Para a implantação das redes 5G, as seguintes tecnologias vêm sendo estudadas: *Massive MIMO (Multiple Input Multiple Output)*, que prevê uma quantidade maior de antenas em uma mesma área; comunicações *Device-to-Device (D2D)*, entre dispositivos móveis, sem necessidade da estação-base; *Visible Light Communications (VLC)*, que usa tecnologia de comunicação ótica; armazenamento em *cache* na estação-base para conteúdos populares; uso do espectro de frequência acima de 10GHz para comunicação em curtas distâncias (BUZZI et al., 2016). Fabricantes de equipamentos como Ericsson, Samsung e Nokia têm realizado testes de laboratório para avaliar as taxas de transmissão previstas nessa nova geração, que prometem ser da ordem de Gbps (MUNDY, 2016). Os principais desafios envolvem economia de energia e minimização da emissão de CO<sub>2</sub> ao mesmo tempo que se garante aumento nas taxas de transmissão. A liberação para uso comercial do 5G está estimada para meados do ano 2020.

Ainda neste capítulo serão apresentadas em maiores detalhes as tecnologias LTE, IEEE 802.11 e IEEE 802.16.

## 2.2 *Handover*

Eventualmente, a transferência de uma chamada em curso de uma célula para outra à medida que um nó móvel se desloca pela sua área de cobertura se faz necessária. Esse processo é denominado *handover* (POLLINI, 1996). O principal objetivo do *handover* é manter a continuidade de um serviço ao mesmo tempo em que efetua mudanças de rede decorrentes de movimentação do usuário de maneira transparente. O tipo de *handover* mais simples é o *handover* horizontal, que é aquele que ocorre em redes homogêneas, ou seja, redes sobre uma mesma tecnologia de acesso. O *handover* horizontal é tratado nesse capítulo. Para cenários onde os nós móveis realizam essa operação simultaneamente faz-se necessário o emprego de técnicas de *handover* em grupo (*Group Handover - GHO*) (CHOWDHURY; CHAE; JANG, 2012). Algumas abordagens contemplam otimização, balanceamento de carga e gerenciamento de recursos. O *handover* em redes heterogêneas,



conhecido como *handover* vertical é tratado no Capítulo 3.

O *handover* pode ser requisitado pelo nó móvel, ou pelo seu PoA, dependendo da implementação da tecnologia de acesso. O processo de *handover* se divide em três etapas (ZEKRI; JOUABER; ZEGHLACHE, 2012):

- *Descoberta* - Momento em que se faz a descoberta de serviços e a coleta de informações do estado da rede. Nessa etapa também se utiliza um critério específico para detectar a necessidade de *handover*, como potência, taxa de transmissão, carga sobre um PoA, nível de bateria, entre outros.
- *Decisão* - Durante essa etapa, as redes disponíveis são avaliadas com base nos dados coletados na etapa anterior e um algoritmo de decisão escolhe o PoA-alvo.
- *Execução* - Nessa etapa, mensagens de controle são trocadas entre nó móvel, PoA-alvo e PoA de origem para realizar a mudança de enlace. A execução deve causar o mínimo de interrupção possível na comunicação, de modo a parecer imperceptível ao usuário. Essa etapa é fortemente dependente das tecnologias de acesso envolvidas.

Por outro lado, Kim *et al.* (KIM et al., 2010) consideram quatro etapas para a realização do *handover*:

- *Iniciação* - Correspondente às etapas descoberta e decisão;
- *Preparação* - Referente à troca de mensagens entre PoA de origem e PoA-alvo para reserva de recursos necessária para a mudança de enlace;
- *Execução* - Referente à mudança de enlace;
- *Finalização* - Liberação de recursos do PoA anterior.

Ambas as classificações são amplamente adotadas na literatura (LEE; CHO, 2011), (LAMPROPOULOS; SALKINTZIS; PASSAS, 2008), (SILVA et al., 2012), (CICCONETTI; GALEASSI; MAMBRINI, 2010). A segunda notação será a mais empregada neste capítulo, uma vez que para as tecnologias LTE, WiMAX e WiFi as etapas de descoberta e decisão se sobrepõem. Para o Capítulo 3, a primeira notação é a mais adequada, pois a etapa de decisão ganha maior distinção e complexidade devido às questões de transferência entre redes de diferentes tecnologias.

### 2.2.1 Critérios de Iniciação de Handover

Em qualquer esquema de *handover*, considera-se que o ambiente sem fio é constantemente monitorado, seja pela rede ou pelo nó móvel. Mudanças expressivas nas condições

desse ambiente podem disparar requisições de *handover*. Os critérios a seguir são os mais tradicionalmente empregados na etapa de iniciação (ZEKRI; JOUABER; ZEGHLACHE, 2012) (POLLINI, 1996):

- *Received Signal Strength* (RSS) - Detecta o PoA com sinal mais potente. Costuma causar *handovers* desnecessários quando o PoA de origem ainda possui sinal adequado;
- RSS com limiar - O *handover* é iniciado apenas quando o RSS do PoA de origem assume um valor abaixo de um limiar predeterminado e existe um candidato com RSS maior. Em áreas de sobreposição, essa informação pode não ser suficiente para determinar qual dos PoAs possui melhor qualidade de sinal;
- RSS com histerese - Apenas determina que uma rede possui melhores condições que outra quando a diferença entre os RSSs ultrapassa um valor predeterminado. Essa técnica evita o efeito *ping-pong*, onde o nó constantemente realiza *handover* saindo e retornando ao PoA de origem devido à flutuação do RSS.
- RSS com limiar e histerese - Uma combinação dos dois critérios anteriores;
- Técnicas de previsão - Procura prever valores futuros de RSS.

Risco de segurança, largura de banda disponível e carga sobre PoAs são geralmente encontrados em propostas para *handover* vertical (ZEKRI; JOUABER; ZEGHLACHE, 2012). Esses critérios levam em consideração a conversão entre tecnologias e o balanceamento de carga na rede e serão melhor discutidos no Capítulo 3. Alguns critérios incluem avaliação não apenas do PoA, mas também da qualidade do enlace. Uma métrica conhecida é o *Signal-to-Interference Ratio* (SIR), que define o grau de interferência co-canal, um dos maiores causadores da degradação de desempenho. Outra importante métrica para avaliar o enlace é o *Bit Error Rate* (BER), que determina a confiabilidade de um canal para aplicações que requerem baixa tolerância a perdas.

Padrões de redes metropolitanas sem fio comumente deixam a critério dos fabricantes de dispositivos e dos consórcios dos quais participam definir a métrica utilizada para descoberta do *handover*.

### 2.2.2 Mecanismos de Execução de Handover

Para execução de *handover*, a implementação do *Hard Handover* (HHO) está presente em todas as tecnologias. Nesse caso, o nó móvel apenas entra em contato com seu PoA-alvo uma vez que se desconecta do seu PoA de origem. Durante essa fração de tempo em que o nó móvel se encontra sem comunicação com nenhum PoA, pacotes podem ser

perdidos. Desta forma, mecanismos opcionais de *Soft Handover* (SHO) (KIM et al., 2010) (FIGUEIREDO; PEREIRA, 2008) têm sido implementados nas recentes tecnologias de redes móveis para evitar essa ruptura súbita de comunicação, com:

- *Seamless Handover* - Procedimento que consiste em permitir que o nó móvel troque informações com um PoA candidato antes de escolhê-lo como alvo. Caso seja escolhido, o tempo de interrupção de comunicação é reduzido. O termo *Seamless Handover* também é usado para designar de forma geral o *handover* transparente, ou seja, imperceptível ao usuário;
- EBB (*Entry Before Break*) - A interrupção da comunicação com o PoA de origem ocorre apenas após o fim da execução do *handover* para o PoA-alvo;
- *Handover* Multiportadora - Quando suportado pela tecnologia de acesso, o nó móvel mantém comunicação com PoA de origem e PoA-alvo em portadoras diferentes, permitindo conexões simultâneas;
- FBSS (*Fast Base Station Switch*) ou FCS (*Fast Cell Selection*) - Neste esquema, o nó mantém uma lista de PoAs denominada *Active Set* e periodicamente seleciona um deles como âncora, para trocar mensagens de controle. Desta forma, a troca de PoA ocorre de maneira simplificada, sem a necessidade de mensagens explícitas, reusando a mensagem de sinalização que descreve a qualidade do sinal;
- MDHO (*Macro-Diversity Handover*)- Se diferencia do anterior por requerer que o nó troque mensagens específicas de *handover* com os PoAs do *Active Set*.

### 2.2.3 Métricas de Avaliação de Desempenho

As métricas comumente utilizadas para avaliar o desempenho de um esquema de *handover* são (POLLINI, 1996) (TAGHIZADEH et al., 2012) (MCNAIR; AKYILDIZ; BENDER, 2001) (MAKAYA; PIERRE, 2008):

- Probabilidade de bloqueio de chamada - probabilidade de se impedir a realização de uma nova chamada, que pode ser influenciada pela alocação de canais durante o *handover* (IOANNOU et al., 2002);
- Probabilidade de bloqueio de *handover* - probabilidade de uma requisição de *handover* ser recusada pela rede;
- Probabilidade de *handover* - probabilidade de um *handover* ser requisitado antes do fim de uma sessão;
- Probabilidade de perda de chamada - probabilidade de uma sessão se encerrar devido à falha no *handover*;

- Probabilidade de *handover* desnecessário - probabilidade de um esquema incentivar o *handover* quando o *link* atual ainda é adequado;
- Taxa de *handover* - Número de *handovers* realizados em uma unidade de tempo ou por chamada. Pode ajudar a estimar a probabilidade de *handover*;
- Duração da interrupção - Tempo em que o nó móvel não se comunica com nenhum PoA durante o *handover*;
- Número de pacotes perdidos - Quantidade de pacotes não entregues ao destino devido à interrupção causada pelo *handover*;
- Custo do *handover* - Quantidade de mensagens de controle enviadas e recebidas para realizar o *handover*;
- *Goodput* - Métrica que se refere à quantidade de tráfego útil transportado por uma aplicação em um período de tempo; pode tanto ser medida em *bytes* por segundo como em porcentagem que relaciona a quantidade de tráfego útil e o tráfego total em uma sessão;
- Latência de *handover* - Tempo decorrido desde a iniciação até a conclusão do *handover*.

As métricas probabilidade de *handover*, de perda de chamada, de *handover* desnecessário, taxa de *handover* e duração da interrupção estão geralmente associadas à mobilidade do ponto de vista da camada de enlace. O número de pacotes perdidos, custo do *handover*, *goodput* e latência possuem significados mais genéricos e são aplicáveis a protocolos de mobilidade tanto na camada de enlace, de rede e de aplicação. Essas quatro últimas métricas são estudadas em experimentos com destaque na presente tese.

### 2.3 Sistemas LTE (*Long Term Evolution*)

O LTE é a tecnologia de quarta geração padronizada pelo ETSI (*European Telecommunications Standards Institute*) e adotada pelo 3GPP (*Third Generation Partnership Project*) com o objetivo de trazer convergência entre voz e dados em uma rede totalmente IP. No Brasil a faixa de frequências utilizada é de 2,5 GHz a 2,69 GHz dividida em canais de 10 MHz a 35 MHz e o acesso múltiplo é feito via OFDMA no *downlink* e SC-FDMA no *uplink* (ETSI/3GPP, 2009). Permitindo taxas de transmissão em torno de 200 Mbps, o LTE se estabelece como uma evolução da rede de acesso UMTS (ALCATEL-LUCENT, 2009). A Figura 2.2 apresenta sua arquitetura. O conjunto de todas as entidades do LTE compreendem o *Evolved Packet System* (EPS), que se divide em:

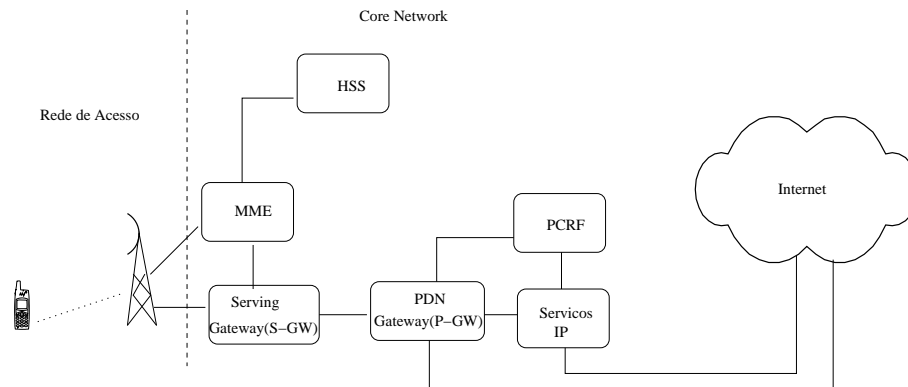


Figura 2.2 – Arquitetura geral do sistema LTE.

- E-UTRAN (*Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network*) - Rede de acesso que liga nós móveis aos seus PoAs. Essa rede possui os elementos:
  - UE (*User Equipment*) - Terminologia para designar o nó móvel;
  - e-NodeB - Terminologia para designar um PoA;
- EPC (*Evolved Packet Core*) - Refere-se ao sistema que liga a rede de acesso à rede externa. Possui os seguintes elementos:
  - S-GW (*Serving Gateway*) - Interface para redes 2G, 3G;
  - P-GW (*Packet Data Network Gateway*) - Interface para outras redes de pacotes na camada de rede;
  - MME (*Mobility Management Entity*) - Gerenciamento de mobilidade e autorização de serviços;
  - HSS (*Home Subscriber Server*) - Serviços de autenticação, registro de usuários e visitantes;
  - PCRF (*Policy and Charging Resource Function*) - Provisão de banda para QoS de acordo com o perfil do usuário;
  - Serviços IP da operadora.

A arquitetura de protocolos do LTE é dividida em um plano de usuário e um plano de controle. O plano de usuário consiste em protocolos para convergência de dados, enlace e controle de acesso ao meio. O plano de controle inclui o protocolo RRC (*Resource Radio Control*), que é responsável pelas funções a seguir (TELESYSTEM, 2009):

- Informações do Sistema - Fazer *broadcast* de informações do sistema;
- Controle de Conexão do RRC - Realizar estabelecimento controle de conexão, sinalização, fluxos, com mecanismos de segurança e *handover*;

- Mobilidade controlada pela rede - Procedimentos de mobilidade e transferência de contexto;
- Medições e relatórios.

A Figura 2.3 apresenta o fluxo de *handover* no sistema LTE. A descoberta ocorre por meio de RSS com histerese em um mecanismo conhecido como TTT (*Time-to-Trigger*) (BAE; CHUNG; SO, 2011). O LTE prevê apenas o *handover* iniciado pelo PoA de origem, sendo essa a entidade responsável por requisitar o *handover* e escolher o PoA-alvo (ETSI/3GPP, 2012). O PoA-alvo responde a requisição informando se possui condições de realizá-lo (2). Uma vez confirmado, o PoA de origem informa o nó que ele irá realizar o *handover* (3) e passa a reencaminhar o fluxo de dados ao PoA-alvo (4). O nó envia uma mensagem de confirmação ao PoA-alvo (5). Uma vez confirmado o *handover*, o PoA-alvo solicita ao MME que atualize a informação do caminhos de dados (6). Recebendo a confirmação do MME (7), o PoA-alvo informa ao PoA de origem que ele pode liberar os seus recursos (8).

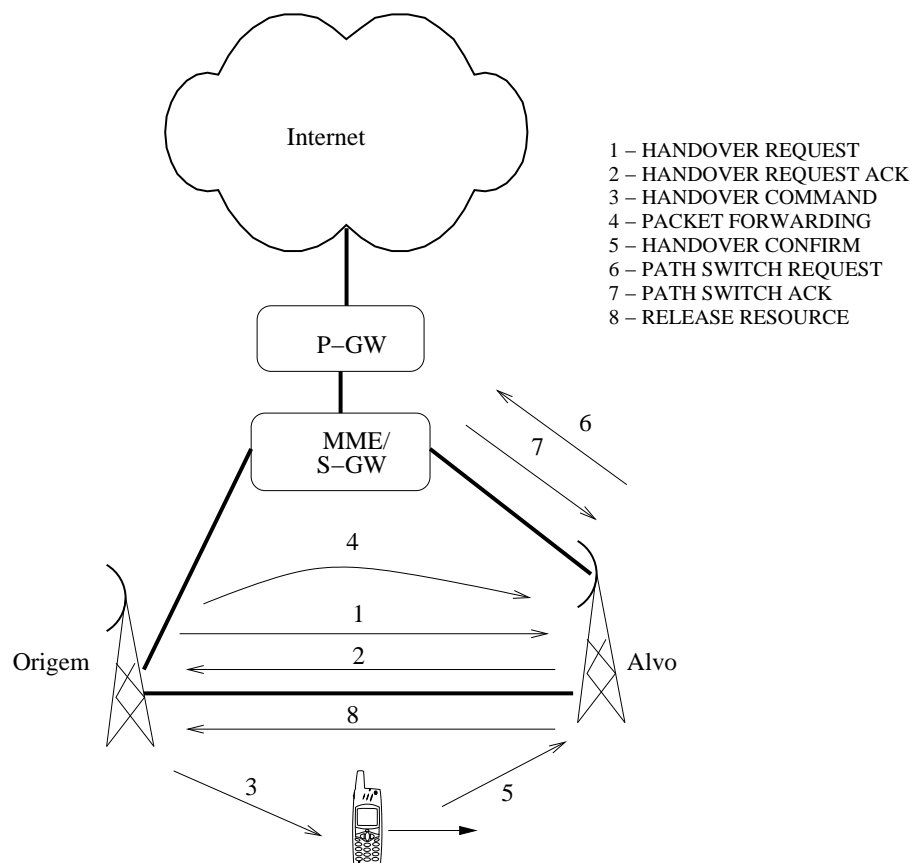


Figura 2.3 – Fluxo de *handover* no sistema LTE.

## 2.4 Sistemas IEEE 802.11

O IEEE 802.11 (IEEE-802.11, 2012) é o padrão de redes locais sem fio adotado pela Wi-fi Alliance<sup>1</sup>, que garante a compatibilidade entre dispositivos produzidos pelos fabricantes participantes. Por operar em faixas não licenciadas, é um padrão mundialmente difundido e possui emendas para dar suporte à segurança, Qualidade de Serviço (*Quality of Service - QoS*), múltiplas antenas transmissoras e receptoras para aumento do alcance e de número de usuários, entre outras. A emenda 802.11g é uma das mais populares, por ser compatível com seu antecessor 802.11b, operando na mesma faixa de 2,4 GHz a uma velocidade máxima de 54 Mbps, superior aos 11Mbps do 802.11b. Atualmente, com o uso da tecnologia de múltiplas antenas com o padrão IEEE802.11n e seu sucessor IEEE 802.11ac, a taxa de transferência pode ser aumentada para a ordem de gigabytes por segundo (ARUBA, 2013).

No IEEE 802.11, pode-se distinguir duas configurações:

- Infraestruturada, onde os dispositivos móveis se comunicam por meio de uma ou mais infraestruturas com papel de ponto de acesso; essa configuração é conhecida como *Basic Service Set* (BSS), conforme mostra Figura 2.4a; quando várias BSSs são configuradas pra se comunicarem entre si em um sistema de distribuição a arquitetura é conhecida como *Extended Service Set* (ESS);
- *Ad Hoc*, onde os dispositivos móveis realizam conexões entre si sem auxílio de uma infraestrutura, geralmente em caráter temporário; essa configuração é conhecida como *Independent Basic Service Set* (IBSS) conforme mostra Figura 2.4b.

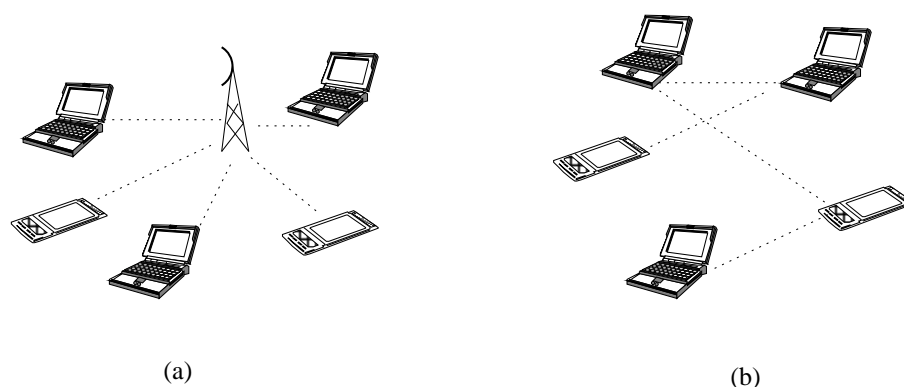


Figura 2.4 – Configurações do IEEE 802.11: (a) Infraestruturada;(b) *ad hoc*.

O *handover* no IEEE 802.11 é, a princípio, realizado com a desconexão do PoA de origem e a escolha de um PoA-alvo, ambos por meio da avaliação do RSS (KULADINITHI et al., 2010) (CISCO, 2016). A Figura 2.5 detalha o processo de associação no IEEE 802.11. A ação é controlada pelo próprio nó móvel, que após a desconexão

<sup>1</sup> <http://www.wi-fi.org/>

envia mensagens de **Probe Request** (PRQ) para os PoAs da sua redondeza, que por sua vez respondem com a mensagem **Probe Reply** (PRP), que informa as características da rede candidata. O nó se conecta à rede compatível que possuir RSS maior. Dependendo das características da nova rede, a autenticação é necessária. O nó envia uma mensagem de autenticação e recebe resposta de reconhecimento pelo PoA-alvo. Finalmente, o nó móvel envia a mensagem de associação **Association Request** (ARQ) e o PoA-alvo responde com **Association Reply** (ARP), criando assim um registro para esse nó e permitindo a troca de dados. Nenhuma informação de contexto é trocada entre o PoA de origem e o PoA-alvo envolvidos no processo.

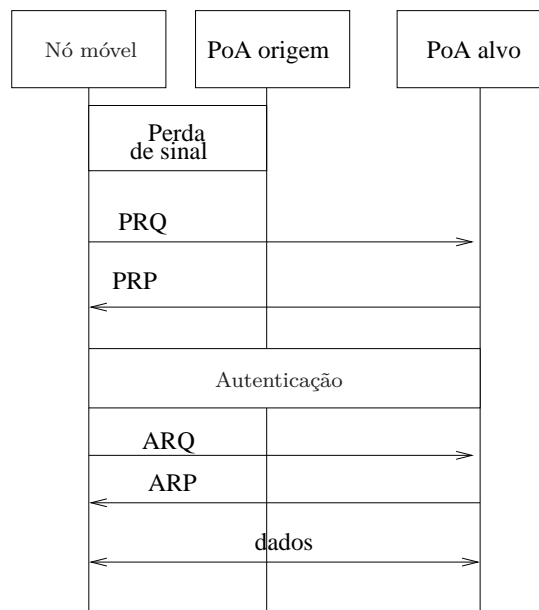


Figura 2.5 – Procedimento de associação no IEEE 802.11.

O controle de acesso ao meio é realizado por meio de troca de mensagens entre os nós móveis de modo a evitar colisões. O protocolo para acesso ao meio utilizado é o *Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance* (CSMA/CA). O CSMA/CA consiste no envio de quadros após um período denominado DIFS (*Distributed Inter Frame Space*) e no recebimento de um quadro de reconhecimento após um intervalo mais curto que o DIFS, conhecido como SIFS (*Short Inter Frame Space*). Entretanto, dois nós móveis ainda podem enviar quadros que colidam caso estejam impedidos de escutar as transmissões um do outro, porém capazes de transmitir a um terceiro nó, que sofrerá com as colisões. Este problema, conhecido como “problema do terminal oculto” é minimizado com o auxílio de dois quadros de controle adicionais para solicitar e autorizar reserva do canal: o RTS (*Request To Send*) e o CTS (*Clear To Send*), respectivamente. Por meio desses dois quadros, os demais nós móveis alocam um vetor de alocação de rede (*Network Allocation Vector* - NAV) no qual se baseiam para determinar o tempo de espera até requisitar o envio de dados. Assim, caso os nós não detectem o quadro RTS, ao menos poderão detectar o quadro de CTS enviado pelo receptor. A Figura 2.6 ilustra esse processo. Ainda em



caso de colisão, os nós devem calcular um tempo de espera ou *backoff* para aguardar o momento de realizar uma nova tentativa de acesso. Esse período de *backoff* é calculado em função de um *time slot* definido pelo padrão (no caso do 802.11g é de  $9 \mu\text{s}$ ) e aumenta à medida que novas colisões sucessivas ocorrem. O conceito de *time slot* envolve a duração da transmissão de um pulso eletrônico entre dois nós.

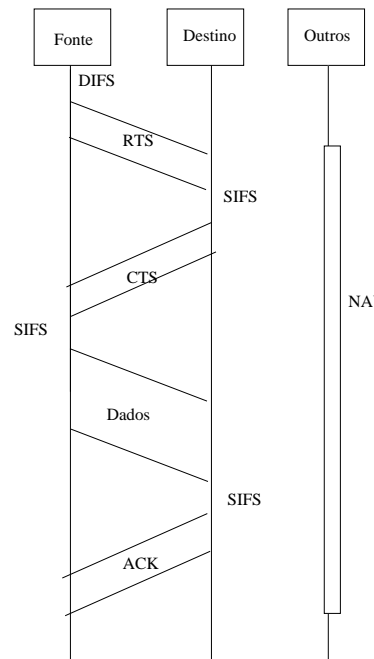


Figura 2.6 – Controle de acesso no IEEE 802.11.

## 2.5 Sistemas IEEE 802.16

O IEEE 802.16 foi o padrão de redes metropolitanas sem fio adotado pelo Fórum WiMAX (*Worldwide Interoperability Microwave Access*), que garante a compatibilidade entre dispositivos de rede produzidos pelos fabricantes participantes deste fórum (FIGUEIREDO; PEREIRA, 2008). Sua cobertura é da ordem de quilômetros e as taxas de transmissão são de até 120 Mbps. O espectro abrange as faixas licenciadas entre 10 e 66 GHz, onde as altas frequências obrigam a sua operação em linha de visada, e entre 2 GHz e 10 GHz (sem linha de visada) abrangendo faixas licenciadas e não licenciadas. No Brasil, a faixa não licenciada utilizada pelo WiMAX é a de 5,8 GHz. A largura dos canais pode variar de 20 a 28 MHz. Esses canais são multiplexados utilizando o modo de acesso OFDMA. A arquitetura do WiMAX é apresentada na Figura 2.7. Ela é constituída por :

- *Mobile Stations* (MS) - Assumem o papel de nós móveis;
- *Subscriber Stations* (SS) e *Base Stations* (BS) - Equivalentes aos PoAs, sendo a SS uma entidade que pode conectar nós a um PoA;

- *Core Network* (CN) - Mantém as entidades de gerenciamento de mobilidade e de acesso às redes externas, como IP e ATM.

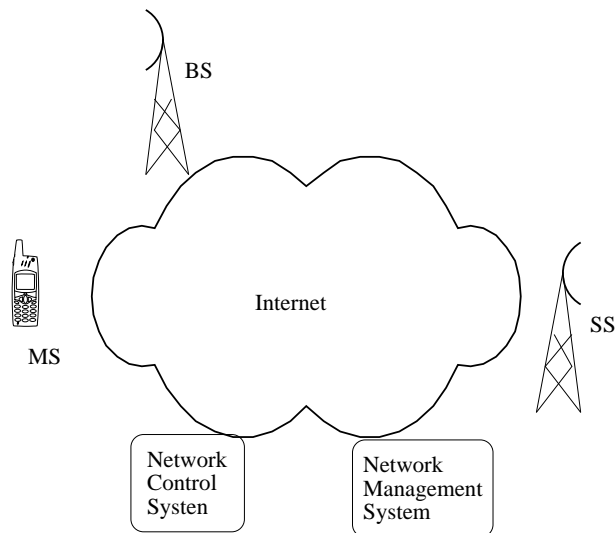


Figura 2.7 – Arquitetura da rede IEEE 802.16

Quanto à topologia, além da opção ponto-multiponto, o padrão também prevê a topologia *mesh*. Desta forma, um nó móvel pode se comunicar com um PoA por meio de dispositivos intermediários, em uma lógica *multihop*.

A camada de enlace é dividida em um plano de dados e um de controle. O plano de dados possui as subcamadas a seguir:

- *CS* (*Convergence Sublayer*) - Transforma dados da camada superior em quadros da camada MAC;
- *CPS* (*Common Part Sublayer*) - Responsável pelo controle de alocação de banda e estabelecimento e manutenção de conexões;
- *Security Sublayer* - Provê autenticação, troca de chaves e criptografia.

No plano de controle há o NCMS (*Network Control and Management System*), situado na CN que encaminha quadros de controle e gerenciamento para nós e PoAs por meio das interfaces:

- *Control SAP* (C-SAP) - Responsável pelo fluxo de dados, gerenciamento de recursos e *handover*;
- *Management SAP* (M-SAP) - Responsável por coleta de estatísticas, configuração de sistema, *triggers*, entre outras tarefas.

As MSs, BSs e SSs possuem interfaces C-SAP e M-SAP para se comunicar com o NCMS.

A necessidade de se realizar o *handover* é detectada de acordo com critérios definidos pelos fabricantes de dispositivos (IEEE-802.16-2012, 2012). Um critério comumente usado é o de RSS relativo com histerese (CASEY; VESELINOVIC; JANTTI, 2008).

A Figura 2.8 apresenta esse processo de requisição e indicação de *handover*. As informações de PoAs candidatos são obtidas por meio da mensagem MOB\_NBR-ADV, enviada periodicamente pelo PoA de origem. Em seguida, o nó móvel solicita autorização do seu PoA de origem para iniciar o processo de *scanning* de modo a obter mais informações sobre os PoAs candidatos. Para tal, envia a mensagem MOB\_SCN-REQ e recebe a resposta MOB\_SCN-RSP, que informa em que períodos o nó pode realizar o *scanning*. Em caso de *handover* iniciado pela rede, a resposta já é enviada, mesmo sem solicitação. O nó envia um relatório ao seu PoA de origem para informá-lo dos resultados do *scanning*. Opcionalmente, o nó móvel pode trocar mensagens com os candidatos encontrados caso esteja configurado para realizar *Soft handover*. Essa troca de mensagens é conhecida como *associação*. Após a iniciação, o nó ou o PoA de origem faz a requisição de *handover*. Caso seja um *handover* iniciado pelo nó, a mensagem enviada ao PoA de origem é MOB\_MSHO-REQ, que responde com a mensagem MOB\_BSHO-RSP. Caso seja um *handover* iniciado pela rede, a mensagem enviada ao nó móvel é a MOB\_BSHO-REQ. Uma vez confirmada a requisição, o nó envia uma mensagem MOB\_HO-IND indicando se realizará o *handover* ou se pretende desistir ou recusar a sugestão de PoA-alvo que possa ter recebido.

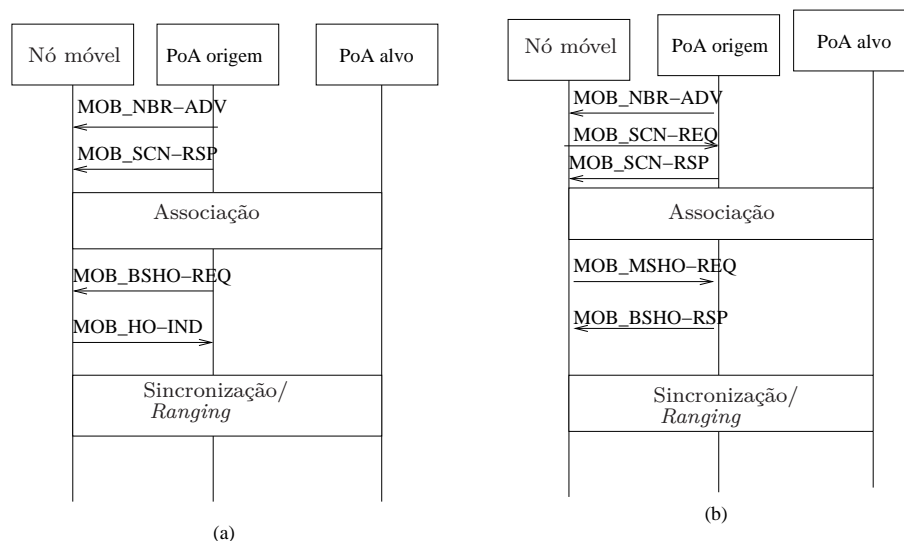


Figura 2.8 – *Handover* no IEEE 802.16(a) Iniciado na rede;(b) Iniciado pelo nó.

Uma vez optando por realizar o *handover*, o nó passa a trocar mensagens para entrar na cobertura do PoA-alvo. Para execução, a rede pode usar os esquemas opcionais de *Soft handover*: FBSS ou MDHO. A execução ocorre de acordo com os passos a seguir:

- Sincronização com PoA-alvo - Obtenção das características de *uplink* e *downlink* que o nó deverá assumir e sincronização do *downlink*. Recepções anteriores de MOB\_NBR-ADV agilizam o processo;
- *Ranging* com PoA-alvo - Sincronização do *uplink*. Caso já tenha ocorrido uma associação anterior, a operação é ainda mais rápida.
- Encerramento do contexto do PoA de origem - Máquina de estados do PoA de origem é descartada.

## 2.6 Trabalhos relacionados a *handover* em redes de acesso móveis

Nesta seção são apresentados trabalhos relacionados a propostas de aperfeiçoamento das técnicas de *handover* aplicáveis às redes de acesso metropolitanas.

Kim *et al.* (KIM et al., 2010) apresentam um *survey* dos esquemas de *handover* com destaque às tecnologias IEEE 802.16m e 3GPP *LTE-Advanced*, além de apresentar esquemas que vêm sendo analisados por seus respectivos consórcios. De acordo com os autores, é necessário considerar o trânsito entre zonas com as tecnologias em suas versões antigas e zonas que consideram os esquemas propostos e negociação entre estações-base para garantir a integridade de dados.

No contexto de algoritmos de decisão, o trabalho de Choi (CHOI, 2010) propõe uma nova métrica para selecionar pontos de acesso para *handover*: o *Interference to other Interferences-plus-Noise Ratio* (IINR). O foco está em melhorar o desempenho em termos de vazão. A questão da interferência entre células durante o *handover* é discutida e esquemas baseados em cooperação são apresentados como solução para evitar esse problema. Por outro lado, a cooperação deve ser projetada com cautela, uma vez que a seleção do dispositivo móvel que fará o *handover* poderá influenciar no desempenho geral da rede, já que células adjacentes participam deste processo. O artigo propõe um esquema de decisão para os métodos *Soft Handover* e o *Fast Cell Selection*. Neste esquema, o dispositivo móvel só realiza o *handover* se houver ganho de vazão. Para tal, utiliza a métrica proposta IINR. Os autores observaram por meio de simulação que houve melhoria da vazão nos cenários estudados.

A preocupação com a economia de energia é destaque no artigo de Hunukumbure *et al.* (HUNUKUMBURE; AGARWAL; VADGAMA, 2011), onde é proposta a arquitetura de *Twin State Network*. Esta arquitetura consiste em manter estações-base que são habilitadas ou desabilitadas de acordo com a demanda dos usuários em dado momento, fazendo com que se economize energia em períodos que não são de pico. Adicionalmente, mecanismos de *handover* são propostos de acordo com a arquitetura proposta tendo em

vista a tecnologia LTE. A avaliação é feita com a ferramenta Atool<sup>2</sup>. Os autores concluem que há vantagens no uso da arquitetura de *Twin State Network* para a economia de energia, porém em cenários de alta densidade de nós, pode haver falha de *handover* devido à redução de PoAs disponíveis.

O trabalho de Kanwal e Sfadar (KANWAL; SAFDAR, 2016) também destaca a questão da economia de energia em redes LTE. A solução consiste em reduzir o histerese, antecipando a detecção do *handover* e economizando energia no PoA de origem. A expansão de largura de banda proposta pelo artigo permite uma melhor alocação dos recursos. A avaliação é feita por modelagem matemática e, de acordo com os autores, houve redução de 35% do consumo de energia, porém com aumento de falhas no enlace.

No trabalho de Park *et al.* (PARK *et al.*, 2009) propõe-se economizar energia por meio de gerência de mobilidade sensível a contexto. A proposta foi implementada para o IEEE 802.11 de maneira que o período de *scanning* e o número de canais escaneados variavam de acordo com o tipo de aplicação e condições da rede. De acordo com resultados de simulação, esta otimização reduziu a latência de rede, trazendo como consequência a economia de energia na operação de *handover*.

Chowdhury *et al.* propõem um esquema de gerenciamento de recursos para GHO utilizando uma política de alocação dinâmica de banda em redes femtocelulares no cenário veicular (CHOWDHURY; CHAE; JANG, 2012). O esquema utiliza a proximidade de novos nós e a QoS necessária como informação para alocação de banda apenas quando necessário. Os resultados de simulação apontam uma redução na probabilidade de perda de chamadas em comparação a esquemas sem o critérios de QoS e de prioridade.

Jeong *et al.* (JEONG *et al.*, 2012) propõem um esquema de GHO específico para o padrão IEEE 802.16e. Ele consiste em reduzir o número de pacotes necessários para realização de *handover* por meio de uma leitura de canal baseada em grupo. Os nós móveis formam grupos, cada qual com uma agenda para o *handover* de cada nó. Os resultados obtidos por simulação e por modelos de Markov mostram que o esquema reduz a probabilidade de bloqueio de *handover*.

Fu *et al.* (FU *et al.*, 2012) apresentam um esquema de autenticação baseado em grupo para redes WiMAX. Neste esquema, o PoA envia mensagens de segurança para o grupo de nós se algum membro deste grupo requisitar o GHO. O objetivo principal é reduzir a latência do *handover* ao mesmo tempo que preserva a privacidade. As métricas avaliadas são a latência, o custo de comunicação e o custo computacional. Os resultados mostram que as duas primeiras métricas são reduzidas, entretanto, a última sofre aumento.

A tecnologia de 5G em IOT é destaque no trabalho de Sánchez *et al.* (SÁNCHEZ; SÁNCHEZ-PICOT; RIVERA, 2015). Os autores apresentam os futuros de-

---

<sup>2</sup> <http://www.forsk.com>

Tabela 2.1 – Trabalhos relacionados a mobilidade IP Interdomínio.

Tecnologia	Critério de descoberta de handover	Mecanismo de execução de handover
LTE	RSS com histerese	HHO
IEEE 802.11	RSS	HHO
IEEE 802.16	RSS com histerese	HHO, FBSS ou MDHO

safios do gerenciamento de mobilidade nesse contexto. De acordo com o trabalho, a velocidade de certos tipos de *drones* pode colocar em cheque a arquitetura em redes femtocelulares no 5G. Outro desafio é a continuidade de comunicação quando uma sessão é transferida da rede 5G para outras redes de acesso, como o seu antecessor, o 4G. Esta é uma evidência de que o *handover* vertical é uma tendência cada vez mais presente.

## 2.7 Conclusão

Esse capítulo apresentou um panorama sobre sistemas de comunicação sem fio e as principais tecnologias de acesso adotadas atualmente: o LTE, WiFi e WiMAX. O 5G ainda é uma tecnologia em fase de testes e até o momento a gerência de mobilidade nessa tecnologia ainda não foi definida. Para gerenciamento de mobilidade na camada de enlace essas tecnologias realizam *handover* por meio de seus pontos de acesso com base na qualidade do sinal percebida nos nós móveis. A Tabela 2.1 traz um resumo das técnicas de *handover* implementadas por padrão nessas tecnologias.

Diversos trabalhos têm procurado refinar os critérios de iniciação de *handover* de modo a permitir uma transição com latência mais baixa, além de procurar observar aspectos de QoS, balanceamento de carga e economia de energia. Observa-se que o avanço das tecnologias de nós móveis, de dispositivos nômades à *drones* com capacidade de altas velocidades, reforça o apelo pelo *handover* vertical eficiente, amplamente discutido no próximo capítulo

## 3 Mobilidade Vertical na Camada de Enlace

A crescente popularização de dispositivos com duas ou mais interfaces de diferentes tecnologias de enlace permite expandir as redes móveis tradicionais para as redes móveis heterogêneas. Este capítulo apresenta em maior profundidade as pesquisas relacionadas ao aperfeiçoamento de técnicas de *handover* vertical (VHO) e *handover* vertical em grupo (GVHO) na camada de enlace e o padrão *Media Independent Handover* - MIH como camada auxiliar para a detecção de eventos, execução de comandos e consultas entre diferentes tecnologias. Ao fim do capítulo, é apresentada uma proposta de estratégia de tentativas de GVHO com o objetivo de se obter baixos valores de latência de *handover* como uma contribuição secundária desta tese.

### 3.1 Decisão em VHO

O processo que permite a transferência de chamadas de nós entre redes de diferentes tecnologias de enlace é conhecido como *Handover Vertical* (*Vertical Handover* (VHO)) (ZEKRI; JOUABER; ZEGHLACHE, 2012). A Figura 3.1 apresenta um cenário de VHO. O *Handover Vertical em Grupo* (*Group Vertical Handover* - GVHO) é um caso particular de VHO onde vários nós realizam *handover* simultaneamente. Nesse caso, questões adicionais como balanceamento de carga precisam ser levadas em consideração no processo de escolha de um PoA-alvo. A Figura 3.2 mostra um cenário de GVHO.

Na maioria das tecnologias sem fio, o *handover* ocorre quando a potência recebida pelo nó móvel decai abaixo de um limiar ou quando o mesmo se distancia excessivamente de seu PoA de origem. Em esquemas mais simples, a etapa de descoberta é suficiente para a escolha do PoA-alvo. No caso do VHO, esse processo pode ser mais complexo por precisar levar em consideração não apenas as informações coletadas na etapa anterior, como também aspectos relacionados à tecnologia dos possíveis PoA-alvos. Assim, para o VHO, a etapa de decisão torna-se ainda mais influente na latência de *handover* obtida que para os esquemas que não incluem suporte a redes heterogêneas.

Os critérios para a etapa de decisão podem ser os mais diversos, como a largura de banda disponível nas redes candidatas, a QoS esperada, consumo de bateria, tipo de tráfego (voz ou dados) utilizado pela aplicação entre outros.

As principais estratégias de decisão de VHO adotadas na literatura envolvem:

- *Uso de uma entidade centralizadora* (NIYATO; HOSSAIN, 2009) (NING et al., 2013) - A gerência do *handover* é responsabilidade de uma *relay station*, retirando a complexidade dos nós móveis, além de diminuir o grau de incerteza e garantir um de-

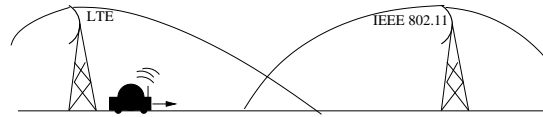


Figura 3.1 – Exemplo de cenário de VHO.

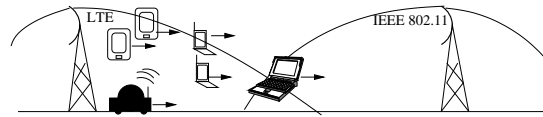


Figura 3.2 – Exemplo de cenário de GVHO.

sempenho melhor que a abordagem descentralizada. Um ponto negativo é a baixa tolerância a falhas;

- *Algoritmos distribuídos* (LEI; HUI; ZHENG, 2010) - Utiliza técnicas conhecidas de paralelismo e sincronização. São geralmente de fácil compreensão, porém limitados quanto à adaptabilidade a novos cenários;
- *Atrasos aleatórios* (CAI; LIU, 2008) - Estações móveis optam por tentar o *handover* após um intervalo de tempo aleatório, evitando que tentativas simultâneas de *handover* ocorram. Trata-se de um subtipo de algoritmo distribuído muito utilizado em pesquisas da área;
- *Inteligência Artificial (IA)* (CHINNAPPAN; BALASUBRAMANIAN, 2016) (KUNARAK, 2016) (NIYATO; HOSSAIN, 2009) - O emprego de técnicas de Aprendizado por reforço e redes neurais permite que os nós aprendam mais sobre a rede à medida que realizam tentativas de *handover*. Esta abordagem não requer interação com outros nós, porém pode gerar problemas de desempenho;
- *Teoria de jogos* (CAI; LIU, 2008) (NIYATO; HOSSAIN, 2009) - Mapeia os cenários de *handover* em jogos cooperativos ou não-cooperativos, onde os nós são jogadores interessados em obter sua recompensa. A recompensa pode ser uma maior largura de banda, um gasto menor de energia ou maior segurança. O equilíbrio de Nash é a situação desejada, onde todos os nós não possuem mais estratégias para obter uma melhor recompensa, garantindo o equilíbrio. A principal vantagem é o mapeamento quase perfeito de um cenário de *handover* em grupo em modelos competitivos da Teoria de Jogos. Por outro lado, nem sempre é possível a consideração de parâmetros adicionais no modelo;
- *Derivação de problemas de otimização* (LEE; CHO, 2011) - A decisão é modelada com equações matemáticas acompanhadas de uma condição pré-determinada. A partir daí, o problema é solucionado para encontrar o valor ideal para as variáveis dessas equações. Requerendo uma modelagem mais complexa, a derivação para problemas de otimização é mais flexível que a abordagem de Teoria de Jogos.



O critério escolhido para a etapa de decisão é ainda mais decisivo nas pesquisas de GVHO que nas pesquisas de VHO. Quando não são consideradas as consequências advindas da escolha de uma rede em favor de outra ou quando se restringe a decisão de *handover* à preferência individual de um nó móvel, os resultados podem ser desastrosos do ponto de vista de desempenho. Decisões equivocadas podem levar vários nós móveis a optar pela mesma rede ou por uma rede que não seja adequada às suas necessidades, causando uma alocação de recursos ineficiente, além de prejudicar o desempenho dos demais usuários.

O padrão IEEE 802.21 (TANIUCHI et al., 2009) descreve o *handover* independente de mídia (*Media Independent Handover* - MIH), o qual pode auxiliar na determinação de critérios para decisão de VHO e GVHO.

## 3.2 O padrão IEEE 802.21 - *Media Independent Handover* (MIH)

O MIH é uma camada de abstração comum entre tecnologias de enlace que permite que redes heterogêneas possam trocar informações e realizar o *handover*. O MIH enfrenta desafios relacionados ao mapeamento de primitivas dependentes da tecnologia, bem como questões de segurança, incorporação em esquemas de *handover* legados, gerenciamento de energia, e armazenamento de dados das redes para posterior envio (TANIUCHI et al., 2009).

O MIH requer que cada tecnologia de acesso proveja sua implementação do padrão e a correspondência entre mensagens MIH e primitivas da rede. Os principais elementos do MIH são:

- *MIH Function* (MIHF) - Módulo que detecta mudanças e controla o estado do enlace e provê informações de vizinhança;
- *Service Access Points* (SAPs) - Módulo que define interfaces dependentes e independentes de mídia;
- *MIH Users* - Quaisquer entidades da rede que utilizem ou consultem os serviços de MIH. Os usuários do MIH geralmente são os nós móveis, PoAs e eventuais entidades que proveem informações de outras redes.

A Figura 3.3 apresenta a arquitetura de uma entidade MIH. A sua MIHF é usada na comunicação com a MIHF de outras entidades, reportando eventos da tecnologia de enlace ou enviando/recebendo comandos por meio das primitivas dependentes de mídia. O mapeamento entre essas primitivas e mensagens MIH é feito por meio dos SAPs.

O MIHF divide-se em três serviços: o *Media Independent Event Service* (MIES), que detecta mudanças na camada de enlace e dispara gatilhos para camadas superiores;

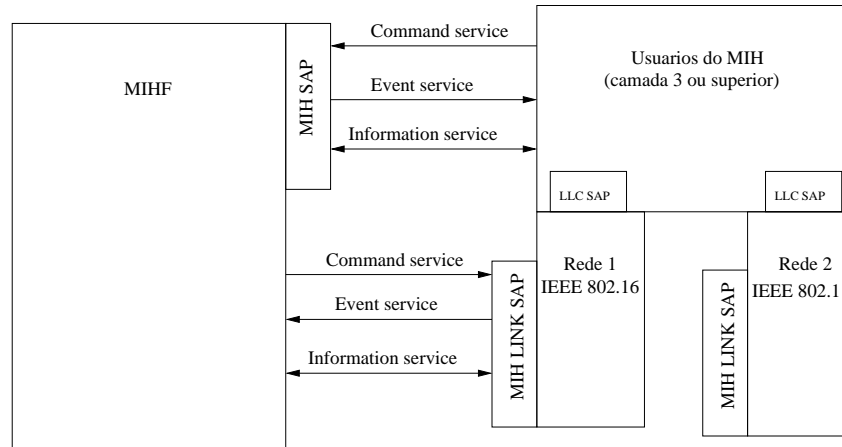


Figura 3.3 – Arquitetura de uma entidade MIH

o *Media Independent Command Service* (MICS), que controla propriedades do enlace e o *Media Independent Information Service* (MIIS), que provê informações de rede para ser usado em esquemas de decisão. Um cenário de *handover* com MIH pode ter como premissa a existência do MIIS para auxiliar os nós móveis a obter informações de vizinhança, evitando que ele utilize seus próprios recursos de busca, economizando energia.

O MIH tem sido utilizado amplamente em pesquisas relacionadas à descoberta e à decisão de *handover* (LEE; CHO, 2011) (BAE; CHUNG; SO, 2011) (KHAN; ANDRESEN, 2012) (LIANG; CHANG; CHEN, 2011) (SILVA et al., 2012) (KHAN et al., 2015).

### 3.3 Trabalhos Relacionados

Esta seção apresenta os trabalhos relacionados ao VHO e ao GVHO na camada de enlace. O estudo desses trabalhos auxilia na identificação das vantagens e desvantagens das soluções propostas quanto aos critérios de decisão de *handover* adotados. O estudo leva à proposição de uma estratégia de tentativas de GVHO para se obter baixa latência, que é parte integrante da proposta da presente tese.

#### 3.3.1 Trabalhos relacionados ao VHO

Zekri *et al.* (ZEKRI; JOUABER; ZEGHLACHE, 2012) apresentam um amplo levantamento de soluções para VHO destacando os principais desafios técnicos. O trabalho ainda apresenta os padrões de rede metropolitanas e seus processos de gerenciamento de mobilidade.

Park *et al.* propõem a integração entre as tecnologias WiMAX e CDMA2000 (PARK; YU; IHM, 2007). A proposta consiste em introduzir mensagens da camada de enlace com técnicas de *cross-layering* e o estabelecimento de túneis na camada IP. As

simulações são realizadas com a ferramenta OPNET<sup>1</sup>. As métricas avaliadas foram a latência ao longo do tempo e variando com a velocidade dos nós e a taxa de perda de pacotes ao longo do tempo. De acordo com os autores, essas métricas são reduzidas com o uso do esquema proposto em comparação com um esquema fracamente acoplado.

Shen *et al.* (SHEN; ZENG, 2008) propõem um critério de decisão de VHO baseado em uma função de custo. Os autores consideram largura de banda, carga do tráfego e RSS. Os resultados de simulação mostram que o critério proposto afeta diversos parâmetros do sistema, os quais precisam ser cuidadosamente analisados.

Stevens-Navarro *et al.* (STEVENS-NAVARRO; LIN; WONG, 2008) utilizam um processo de decisão Markoviano com o objetivo de maximizar a recompensa por enlace em aplicativos de voz e dados. Os resultados da simulação mostram que o algoritmo proposto possui melhor desempenho que algoritmos baseados em modelos aditivos com pesos.

O uso de informações de contexto de rede ao se realizar o *handover* é também tema do trabalho de Gondi *et al.* (GONDI; AGOULMINE, 2010). Estas informações incluem localização, largura de banda necessária, *status* da bateria, interfaces de rede disponíveis e chaves para autenticação entre outras. Nesse trabalho é dada atenção à segurança durante o *handover* em redes heterogêneas.

Kim *et al.* (KIM et al., 2011) propõem uma camada de enlace comum às tecnologias LTE e IEEE 802.11n. Adicionalmente, são apresentados três esquemas de decisão baseados na largura de banda e custo empregando técnicas de redes neurais. As simulações medem vazão, custo e taxa de sucesso do *handover*. Os resultados apontam que o esquema proposto apresenta melhores resultados nessas métricas que esquemas baseados em RSS.

Nóbrega (NOBREGA, 2011) propõe um *framework* para suporte à VHO baseado nas preferências do usuário. O referido *framework* compõe-se de três módulos: Módulo de Transparência para Predição de Caminho por meio do método denominado AKAIKE para a seleção dos parâmetros mais adequados e regressão linear múltipla; Módulo de Transparência na Busca de Informação por meio de serviços MIH; e Módulo de Transparência para Seleção de Redes 4G por meio de acesso a preferências do usuário. Os módulos são comparados com a seleção de redes baseados na potência do sinal, MIPv6 e com abordagens hierárquicas para obtenção de informações da rede. O autor conclui que foi possível aumentar a vazão, antecipar a fase de seleção de redes, diminuindo a latência do *handover*.

O trabalho de Kunarak (KUNARAK, 2016) propõe o uso da rede neural *Radial Basis Function Neural Network* (RBFNN) para tomada de decisão de *handover* com base no RSS, velocidade dos nós e custo monetário. A autora afirma que a pro-

---

<sup>1</sup> <http://br.riverbed.com/products/performance-management-control/opnet.html>

posta reduz o número de *handovers* desnecessários e perda de chamadas em comparação com o uso de algoritmos de *backpropagation* e RSS com limiar. O uso de lógica *fuzzy* é empregado na decisão de VHO no trabalho de Chinnappan e Balasubramanian (CHINNAPPAN; BALASUBRAMANIAN, 2016), usando como parâmetros o custo do *handover*, a velocidade dos nós e carga nas redes candidatas, que formam um fator de QoS a ser comparado entre as redes candidatas. De acordo com os autores, o número de *handovers* realizados e o custo computacional é reduzido em comparação com outras abordagens de lógica *fuzzy*.

### 3.3.2 Trabalhos relacionados ao GVHO

O uso de uma *relay station* como entidade centralizadora é proposta por Shan *et al.* (SHAN *et al.*, 2008). A *relay station* coordena o GVHO de usuários dentro de um trem levando-se em conta a localização e a direção na qual os nós seguem. São avaliadas a probabilidade de bloqueio do *handover* e a de perda de chamada em função do número de chamadas por minuto. Os resultados são comparados a um esquema sem a inteligência na *relay station* e o trabalho conclui que há uma redução significativa nessas métricas com a adoção do esquema.

Ning *et al.* (NING *et al.*, 2013) propõem a introdução de uma entidade de rede denominada *Radio Resource Management Center* (RRMC). Essa entidade é responsável por coletar dados de nós e redes candidatas. Assim, o RRMC decide qual grupo de nós pode realizar *handover* para uma determinada rede. O processo de decisão é baseado em *Fuzzy Clustering*, técnica utilizada para agrupar nós com características similares. Os resultados de simulação mostram que a proposta reduz a probabilidade de bloqueio em comparação a um outro esquema descentralizado (LEE; CHO, 2011).

Cai e Liu (CAI; LIU, 2008) apresentam três algoritmos descentralizados de GVHO: o primeiro é baseado em equilíbrio de Nash, onde a lógica de tentativas reside na estratégia de cada jogador; o segundo se baseia em atrasos aleatórios com variação em um intervalo constante ao se fazer requisições de *handover*; o terceiro é uma versão modificada do anterior considerando a latência do *handover* como base do cálculo. As avaliações de desempenho mostram resultados semelhantes entre as abordagens em relação à latência.

Um modelo baseado em jogos evolucionários é proposto no trabalho de Niyato e Hossain (NIYATO; HOSSAIN, 2009). São consideradas duas abordagens: a primeira com o uso de uma entidade central para fornecer informações de vizinhança; a segunda é uma abordagem descentralizada que utiliza aprendizado por reforço, permitindo que os nós infram o estado da rede para escolha de PoAs. Na segunda abordagem, a estratégia de tentativas de *handover* é gerenciada pela experiência adquirida pelo próprio nó. A porcentagem de nós que escolhem o mesmo PoA foi a métrica escolhida. Conclui-se que cada abordagem possui vantagens dependendo do cenário onde é empregada.

O trabalho de Obaytuwana e Falowo (OBAYIUWANA; FALOWO, 2016) propõe o MULTIMOORA (*MULTI*pllicative form with *Multi-Objective Optimization Ratio Analysis*), onde o GVHO é modelado como um problema de decisão multicritério. Os parâmetros considerados são a velocidade do nó, taxa de transferência, nível de segurança, latência da rede e custo do serviço. O MULTIMOORA é comparado a uma solução que usa o algoritmo TOPSIS em cenários que consideravam diferentes classes de serviço (voz, vídeo e *download* de arquivos) e diferentes velocidades. De acordo com os autores, o MULTIMOORA apresenta maior número de chamadas aceitas que o TOPSIS em cenários de alta velocidade.

Lei *et al.* (LEI; HUI; ZHENG, 2010) comparam três esquemas para resolver o problema de GVHO: o primeiro procura dividir as requisições simultâneas por meio de atrasos aleatórios; no segundo esquema, os nós selecionam os PoAs de acordo com uma probabilidade pré-definida; no terceiro, a rede coleta informações do estado da rede e gerencia o *handover*. As métricas avaliadas foram a latência, a taxa de perda de pacotes e a taxa de rejeição. Os resultados mostram que a terceira abordagem obteve os melhores resultados na maioria dos cenários avaliados.

No trabalho de Lee e Cho (LEE; CHO, 2011), o foco é a proposta de um esquema de GVHO baseado na solução de um problema de otimização com o objetivo de minimizar a latência limitando a probabilidade de bloqueio de *handover*. As métricas avaliadas foram a latência e a probabilidade de bloqueio em função do número de nós. Os resultados apresentam uma redução da latência com relação a um esquema tido como convencional.

### 3.4 Uma Estratégia de Tentativas para GVHO

Nesta seção é proposta uma estratégia de tentativas de *handover* a ser integrada ao esquema proposto por Lee e Cho (LEE; CHO, 2011), com o objetivo de reduzir a latência do *handover* (QUENTAL; GONÇALVES, 2013) (QUENTAL; GONÇALVES, 2014a) (QUENTAL; GONÇALVES, 2014b). O trabalho de Lee e Cho (LEE; CHO, 2011) se destaca das demais pesquisas na literatura de GVHO por não requerer a presença de uma entidade centralizadora para coordenar o GVHO, sendo mais tolerante a falhas. A solução também provê balanceamento de carga e a convivência com dispositivos que não suportam o esquema. Entretanto, a estratégia de tentativas de *handover* adotada é baseada em atraso constante, o que prejudica o desempenho quando se aumenta o número de nós envolvidos. A estratégia de tentativas de *handover* tem influência direta no desempenho do esquema adotado. Uma vez tomada a decisão, o nó ou seu PoA de origem podem determinar se irá requisitar o *handover* imediatamente ou se essa requisição deve ser adiada para evitar o bloqueio de *handover*, dada as condições da rede. O objetivo da proposta apresentada nesta seção é obter melhores resultados de latência por meio de uma estra-

tégia de tentativas que se utiliza das informações sobre a rede-alvo e do próprio esquema de *handover*.

A solução consiste em adiar o *handover* em um tempo determinado por um algoritmo de *backoff* exponencial no caso do nó optar por não requisitar o *handover* imediatamente. O algoritmo usa como parâmetro informações do próprio esquema, como o número de tentativas já realizadas, e o tipo da tecnologia de acesso do PoA-alvo pretendido.

A proposta permite distribuir as requisições em *slots* de tempo distintos de modo a reduzir o número total de tentativas de *handover*. Os resultados mostram a redução da latência e a suavização da sua curva de crescimento como consequências da integração da estratégia de tentativas ao esquema de Lee e Cho. Nas próximas seções são detalhados o esquema de Lee e Cho tomados como referência, a proposta para melhoria de desempenho e uma avaliação de desempenho comparando as abordagens. Ambos os esquemas foram implementados em um simulador criado exclusivamente para essa avaliação, de modo a permitir validar a simulação da solução de Lee e Cho comparando-o aos resultados apresentados originalmente por esses autores.

### 3.4.1 Esquema de GVHO de Lee e Cho

O esquema de Lee e Cho (LEE; CHO, 2011) tem como objetivo a minimização da latência de *handover*  $L$  em cada nó móvel envolvido no GVHO, tendo como condição a limitação da probabilidade de bloqueio de *handover* em um instante de tempo  $t$  ( $P_{HoBlock}(t)$ ) abaixo de um limiar ( $P_{HoBlockThreshold}$ ):

**Minimizar**  $L$

**Sujeito a**  $P_{HoBlock}(t) \leq P_{HoBlockThreshold}$ ,

O cálculo de  $L$  é feito com base na quantidade de iterações ( $N_{HO}$ ) até que o nó se arrisque a iniciar o *handover* e o tempo decorrido entre essas iterações ( $\Delta t$ ), conforme mostra a Equação (3.1). Os autores também consideram que a execução do *handover* tem duração também igual a  $\Delta t$ . Caso o nó decida tentar o *handover* na primeira iteração, considera-se que a latência total seja  $\Delta t$ .

$$L = N_{HO} \cdot \Delta t, \quad (3.1)$$

A Equação (3.2) apresenta o cálculo de  $P_{HoBlock}(t)$ . O valor de  $P_{HoBlock}(t)$  depende do número de redes candidatas, largura de banda disponível em cada uma, e do número de nós participantes do GVHO em um dado instante. Lee e Cho consideram que esses parâmetros são obtidos por meio de consultas a serviços MIH e comunicação *ad hoc*.

$$P_{HoBlock}(t) = \sum_{k=1}^K \sum_{i=C_k(t)}^{M-1} \frac{(i+1 - C_k(t)) \cdot (M-1)!}{(i+1)! \cdot (M-1-i)!} \times \left( (P_{sel}^k)^{i+1} \cdot (1 - P_{sel}^k)^{M-1-i} \right), \quad (3.2)$$

onde:

- $M$  representa o tamanho do subconjunto de nós escolhido para realizar o GVHO simultaneamente;
- $K$  representa o número de redes candidatas com áreas de cobertura sobrepostas;
- $C_k(t)$  é a largura de banda disponível no instante de tempo  $t$  para uma rede  $k$ . O modelo considera que a largura de banda disponível é representada por um valor inteiro. Cada nó consome uma unidade no *handover*;
- $P_{sel}^k$  é a probabilidade de se selecionar a rede  $k$ .

É importante observar que o valor escolhido para  $M$  é decisivo para que a condição do problema de otimização seja alcançada. O conjunto de nós que está em movimento será dividido em subconjuntos de tamanho  $M$ , cada subconjunto realizando o GVHO por vez. Quanto maior  $M$ , menor será o tempo de espera de um nó para que chegue a sua vez, reduzindo assim a latência de *handover* para todos os nós. Para isso, é necessário encontrar o maior número de nós que poderia tentar o *handover* simultaneamente sem que a condição de  $P_{HoBlock}(t) \leq P_{HoBlockThreshold}$  seja perdida. Esse valor,  $M_{ótimo}(t)$ , pode ser inicializado com 1, sendo incrementado de 1 em 1 enquanto  $P_{HoBlock}(t)$  permanecer abaixo do limite de  $P_{HoBlockThreshold}$ . Esse procedimento é descrito no Algoritmo 1.

---

**Algoritmo 1:** Encontrar valor de  $M_{ótimo}$

---

```

 $M_{ótimo} = 1$  ;
repeat
  |  $p =$  Equação (3.2) ;
  |  $M_{ótimo} = M_{ótimo} + 1$  ;
until  $p \leq P_{HoBlockThreshold}$ ;
```

---

Além disso, os autores propõem a aplicação da condição de *Karush-Kuhn-Tucker* (KKT) à Equação (3.2) a fim de se determinar o valor de  $P_{sel}^k$ . Porém, de acordo com os autores, o valor de  $P_{sel}^k$  pode ser aproximado de forma heurística, utilizando a Equação (3.3) e simplificando esse processo.

$$P_{sel}^k(t) = C_k(t) / \sum_{k=1}^K C_k(t). \quad (3.3)$$

A probabilidade  $P_{HO}(t)$  com a qual o nó pode tentar iniciar o *handover* é dada por:

$$P_{HO}(t) = M_{ótimo}(t) / M. \quad (3.4)$$

Se o nó opta por não tentar o *handover* imediatamente, uma nova iteração será realizada após o intervalo de tempo constante  $\Delta_t$ . O nó leva o número de iterações necessário para garantir que a probabilidade de bloqueio não ultrapasse  $P_{HoBlockThreshold}$ .

O Algoritmo 2 apresenta um resumo desse processo, que é executado por cada nó participante do GVHO, de modo a tomar sua decisão de tentar o *handover* enquanto infere o comportamento dos demais. Ao fim da execução do algoritmo, cada nó terá tido uma latência de *handover* média de valor  $L$ . Para o Algoritmo 2, considera-se que:

---

**Algoritmo 2:** Esquema de GVHO de Lee e Cho
 

---

```

L = 0;
c_atts = 1;
Mtotal = num. participantes no GVHO;
Mrestantes = Mtotal;
while Mrestantes ≥ 0 do
  achar Mótimo em função da Eq (3.2) usando Mrestantes como parâmetro;
  calcular PHO (Eq. 3.4);
  if decisão(PHO) then
    decide pela rede k dependendo de Pselk (Eq 3.3);
    NHO = c_atts;
    break ;
  else
    L += t_atts(c_atts);
    c_atts++;
  end
  Mrestantes = Mrestantes - Mótimo
end
L += LHOexec;

```

---

- $M_{total}$  é o número total de nós móveis;
- $M_{restantes}$  é o contador de nós que ainda não realizaram *handover*;
- $decisão()$  é a função que retorna **true** com probabilidade  $P_{HO}(t)$ ;
- $L_{HOexec}$  é a duração da etapa de execução do *handover*. É igual a  $\Delta t$ ;
- $t\_atts()$  é a função que calcula o período de tempo entre iterações consecutivas. Os autores consideram que essa função sempre retorna  $\Delta t$ ;
- $c\_atts$  é o contador de iterações. Quando a função  $decisão()$  retorna **true** na primeira iteração, a latência total do *handover* é  $L_{HOexec}$ .

É importante notar que caso haja bloqueio de *handover*, ou seja, caso não haja largura de banda na rede escolhida para aquele nó, o algoritmo não prevê novas tentativas.



A função  $t\_atts()$  caracteriza a estratégia de tentativas de *handover*. No caso da proposta de Lee e Cho, ela é baseada em atraso constante.

### 3.4.2 Proposta de estratégia para tentativas de GVHO

Apesar de apresentar um esquema promissor de GVHO, o trabalho de Lee e Cho carece de uma estratégia adequada para tentativas de *handover*. Sendo baseada em atraso constante, ela causa um impacto negativo no desempenho à medida em que se aumenta o número de nós envolvidos. A forma como a função  $t\_atts()$  do Algoritmo 2 é implementada influencia na capacidade do sistema de suportar mais nós móveis.

Assim, propõe-se modificar  $t\_atts()$  para uma implementação de *backoff* exponencial (KWAK; SONG; MILLER, 2005). Os algoritmos de *backoff* exponencial quando usados em mecanismos de acesso ao meio possuem a particularidade de manter a probabilidade de colisão e a probabilidade de transmissão convergindo para um valor estacionário à medida que se aumenta o número de nós disputando o meio (KWAK; SONG; MILLER, 2005). A implementação deve usar o algoritmo de *backoff* exponencial tendo o contador  $c\_atts$  como parâmetro e a duração de um *slot* de tempo tomado como referência. A proposta trata de associar a técnica de atraso aleatório à solução do problema de otimização.

Esta estratégia de tentativas de GVHO, apesar de ser proposta para melhorar o desempenho da solução de Lee e Cho, é genérica o suficiente para ser empregada em qualquer outro esquema de GVHO. A Equação (3.5) apresenta uma versão alternativa para  $t\_atts()$  empregando o *backoff* exponencial:

$$t\_atts(c\_atts) = \begin{cases} \text{uniforme}[0..2^{c\_atts} - 1] \cdot \text{timeSlot} , \\ \quad \text{Se } c\_atts \leq \text{LimBackFactor} \\ \text{uniforme}[0..2^{\text{LimBackFactor}} - 1] \cdot \text{timeSlot} , \\ \quad \text{caso contrário} \end{cases} \quad (3.5)$$

onde *random* é uma função que escolhe um número uniformemente distribuído sobre um intervalo; *LimBackFactor* é o número de iterações que limita o tamanho do intervalo para a função *random*; e *timeSlot* é o valor da variável de *slot* de tempo da camada de enlace da tecnologia da rede candidata. Essa informação é obtida via serviço MIH. A infraestrutura necessária para a consulta a serviços MIH é abstraída nessa proposta.

A latência do *handover* depende diretamente do número total de iterações no Algoritmo 2, que podem variar de acordo com o retorno da função *decisão()*. O *backoff* exponencial permite que os nós tenham a chance de adiar suas tentativas de *handover* em um tempo menor que  $\Delta t$ , ou até mesmo tentar imediatamente. Quando um nó adia a sua tentativa de *handover*, outros nós têm a chance de fazê-la, reduzindo a concorrência nas próximas iterações. A consequência é a execução mais antecipada do *handover* para a maioria dos nós, reduzindo a latência média.

A Figura 3.4 apresenta o comportamento da função  $t\_atts()$  em função do número de iterações. O valor de *timeSlot* considerado foi o *timeSlot* do padrão IEEE 802.11g ( $9\mu s$ ). É importante observar que com a estratégia proposta, o valor é sempre menor que a abordagem de Lee e Cho.

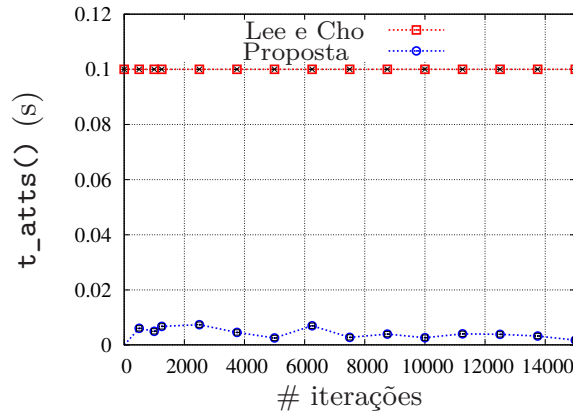


Figura 3.4. Comparação entre as implementações para a função  $t\_atts()$ .

### 3.4.3 Avaliação de desempenho

As métricas avaliadas são latência de *handover*, probabilidade de bloqueio de *handover* e a fração de nós bloqueados. Um nó é considerado bloqueado quando tem sua requisição de *handover* negada pelo PoA de destino devido à falta de recursos. Nesse caso, nenhuma outra tentativa é realizada. Essas métricas são avaliadas em função do crescimento do número de nós envolvidos no GVHO, que varia de 20 a 100. Considera-se que os dispositivos se encontram dentro de veículos em uma mesma via enquanto cruzam fronteira entre áreas de cobertura de duas tecnologias diferentes: de LTE para IEEE 802.11.

A maioria dos parâmetros utilizados nos experimentos possuem os mesmos valores do trabalho de Lee e Cho (LEE; CHO, 2011) e estão listados na Tabela 3.1. Os valores de limiares para probabilidade de bloqueio 0,01 e 0,02 são baseados em valores típicos (TELECORDIA, 2009) (KARRAY, 2010) (CHEKURI et al., 2000) e o valor 0,05 foi acrescentado de modo a avaliar o comportamento do *handover* mediante um critério menos rigoroso. O valor de *timeSlot* é baseado no valor da variável *timeSlot* do padrão IEEE 802.11, que seria a rede de destino. O valor de *FatorLimBack* é baseado em experimentos preliminares, onde se observou que para a quantidade máxima de nós utilizada nos experimentos, um fator superior a 10 poderia aumentar a latência desnecessariamente.

O tempo de permanência em um canal (*Channel Holding Time* — CHT) é o intervalo de tempo em que um nó ocupa um canal em uma célula devido a uma nova sessão ou *handover* durante uma sessão em andamento. A modelagem do CHT depende em geral do tempo de manutenção de uma chamada, das dimensões da célula, do tempo

Tabela 3.1 – Parâmetros dos experimentos.

Parâmetro	Valor
$\Delta t$	0,1 s
$P_{HoBlockThreshold}$	0,01 ; 0,02 e 0,05
$timeSlot$	$9 \cdot 10^{-6} s$
$FatorLimBack$	10
valor médio do CHT	60 s
número de PoAs candidatos	5

de permanência na célula, da estratégia de alocação de recursos e da arquitetura da rede (ZHANG; SOONG, 2004). Entretanto, estudos mostram que o CHT pode ser aproximado a uma variável aleatória com distribuição exponencial (KHEDHER; VALOIS; TABBANE, 2003) (ZHANG; SOONG, 2004). O valor médio do CHT considerado nos experimentos está disponível na Tabela 3.1.

A caracterização de redes heterogêneas, assim como no trabalho de Lee e Cho, é dada pelos diferentes valores de largura de banda disponíveis. Esta caracterização foi mantida para permitir compatibilidade com o modelo apresentado por esses autores (LEE; CHO, 2011). Considera-se que durante a simulação, os nós executam tentativas de requisição baseados na estratégia de *backoff* exponencial; uma vez requisitado o *handover*, os nós permanecem consumindo uma unidade de banda por um período de tempo definido pela variável aleatória com distribuição exponencial que define o CHT. Assim, são considerados os seguintes cenários:

**Cenário 1** - Todos os PoAs possuem 20 unidades de banda.

**Cenário 2** - Dois PoAs têm 15, dois PoAs têm 17, e um PoA tem 20 unidades de banda, respectivamente.

O esquema de Lee e Cho foi originalmente implementado pelos autores em um simulador próprio. De modo a simplificar o processo de validação (feito em conjunto com os autores), um simulador na linguagem C++ foi implementado para representar o esquema original e com a solução de tentativas de *handover* proposta. Além disso, desta forma é possível abstrair aspectos relacionados a detalhes de alocação de banda e movimentação dos nós. A Figura 3.5 ilustra como o simulador opera enquanto se encontra em certo estado. No estado apresentado, o *nó 3* acabou de tomar sua decisão. Há uma fila de eventos a serem executados na ordem do tempo agendado. Inicialmente, há  $n$  eventos de nós tentando requisitar o *handover* simultaneamente, no instante  $t = t_0$ . Então, cada evento é retirado da fila e processado de acordo com o Algoritmo 2 na parte interna do laço `while`. No caso da Figura 3.5, o *nó 3* optou por adiar o *handover* para o instante  $t_3$ , aguardando assim mais uma iteração. A esta altura, o *nó 1* já teve o seu evento processado (em  $t = t_0$ ) e sua decisão de adiar o *handover* para o instante  $t_1$  também o fez aguardar

mais uma iteração. Na Figura 3.5 também é apresentado um evento para o nó 2, que optou por executar o *handover* no instante  $t2$ , sem mais adiamentos. A alocação de banda se dá no evento de execução, posterior ao processamento da decisão. Assim, em um instante  $t$  a rede está no mesmo estado para todos os nós, refletindo a simultaneidade das operações.

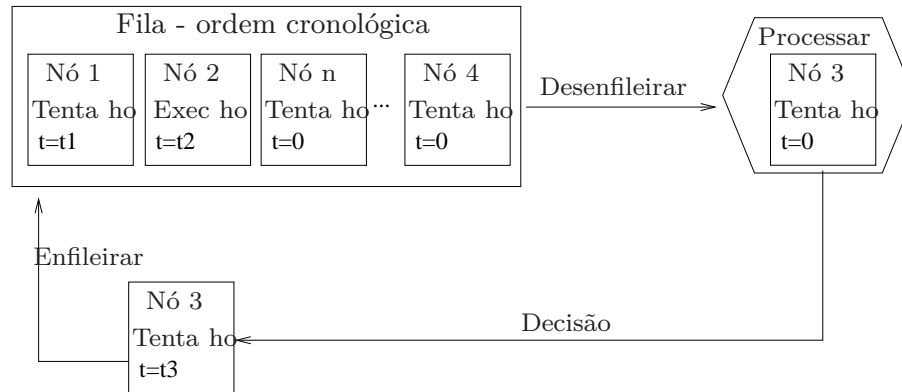


Figura 3.5. Exemplo de processamento no simulador.

Os valores plotados nos gráficos possuem 99% de nível de confiança. Os intervalos de confiança são imperceptíveis na maioria dos resultados. O foco da avaliação não é o esquema de decisão em si, e sim o impacto do emprego da estratégia de tentativas proposta.

### 3.4.4 Resultados para o cenário 1

A Figura 3.6 apresenta os resultados para probabilidade de bloqueio de *handover* no cenário 1. A probabilidade aumenta até que o número de nós alcance 55 para o limiar 0,01, 60 para o limiar 0,02 e 70 para o limiar 0,05. A partir desse ponto, as curvas se estabilizam, pois a probabilidade atinge o limiar definido pelo problema de otimização. Nesse momento, o valor de  $M_{ótimo}(t)$  não pode mais aumentar, levando os nós restantes a adiar a requisição do *handover*. A consequência da estabilização da curva da probabilidade de bloqueio é o aumento da latência. As curvas com e sem a estratégia proposta são semelhantes uma vez que as condições do problema de otimização são as mesmas. É importante também observar que a estratégia de tentativas proposta não causou danos a esta métrica, mesmo que o intervalo entre iterações seja menor que o esquema de Lee e Cho.

A Figura 3.7 mostra os resultados para a fração de nós bloqueados no cenário 1. É possível observar que ao se aproximar de 100 nós, o número médio de nós bloqueados no esquema de Lee e Cho é maior que o valor encontrado no esquema com a estratégia proposta. Porém, pelo intervalo de confiança é possível observar que os valores são estatisticamente próximos. Isso se reflete no gráfico da probabilidade de bloqueio na Figura 3.6. Para todos os limiares, a probabilidade de bloqueio é um pouco menor quando o número

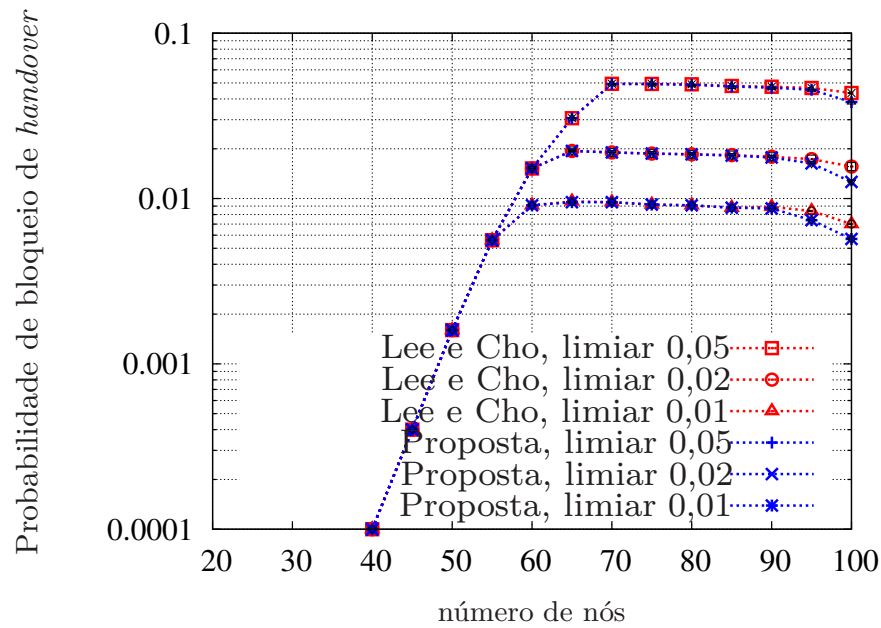


Figura 3.6. Probabilidade de bloqueio *versus* número de nós no cenário 1.

de nós está entre 95 e 100. Isso ocorre devido à natureza aleatória das tentativas, que evita a colisão entre os *handovers*.

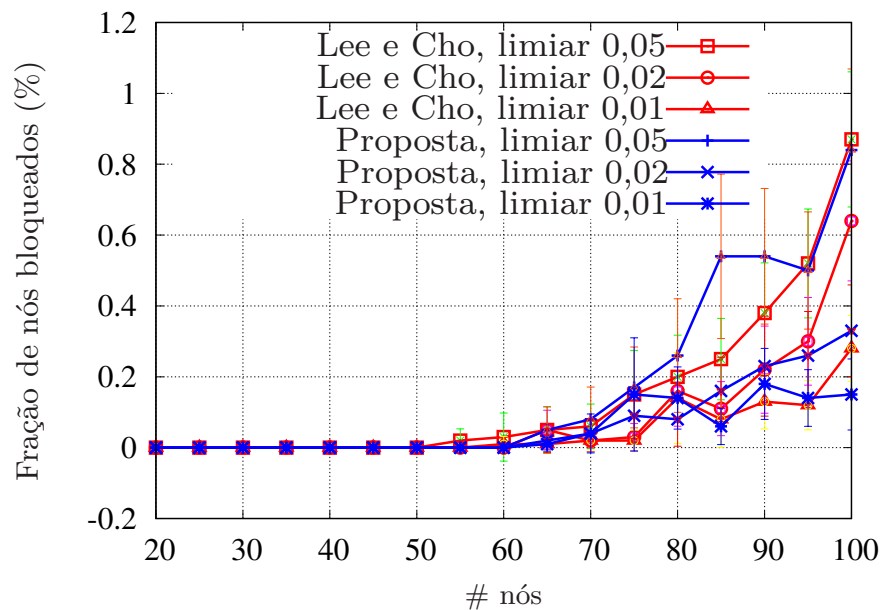


Figura 3.7. Fração de nós bloqueados *versus* número de nós no cenário 1.

A Figura 3.8 apresenta os resultados para a latência no cenário 1. No esquema de Lee e Cho, observa-se que a latência começa a aumentar a partir de 55 nós para o limiar 0,01. Para o limiar 0,02, a latência começa a aumentar a partir de 60 nós. No caso do limiar 0,05, o crescimento da latência se dá a partir de 70 nós. Este crescimento se deve à estabilização da probabilidade de bloqueio, o que torna o esquema mais conservador e faz com que os nós adiem por mais tempo o *handover*. Quanto menor o limiar, mais

conservador o esquema se torna. Isto se aplica a ambos os esquemas, com e sem a estratégia proposta. No entanto, observamos que a curva do esquema com a estratégia proposta é mais suave, devido à otimização na lógica de tentativas. Para o limiar 0,05, a proposta reduz a latência em 11% para 80 nós e em 38% para 100 nós. Para o limiar 0,02, a latência se reduz em 18% para 80 nós e em 50% para 100 nós. Finalmente, para o limiar 0,01, ocorre uma redução de 22,5% para 80 nós e de 58% para 100 nós.

A redução da latência ocorre devido à estratégia proposta, que flexibiliza e reduz o intervalo entre iterações. O uso de *backoff* exponencial permite que os nós tentem o *handover* mais cedo e em instantes diferentes de tempo.

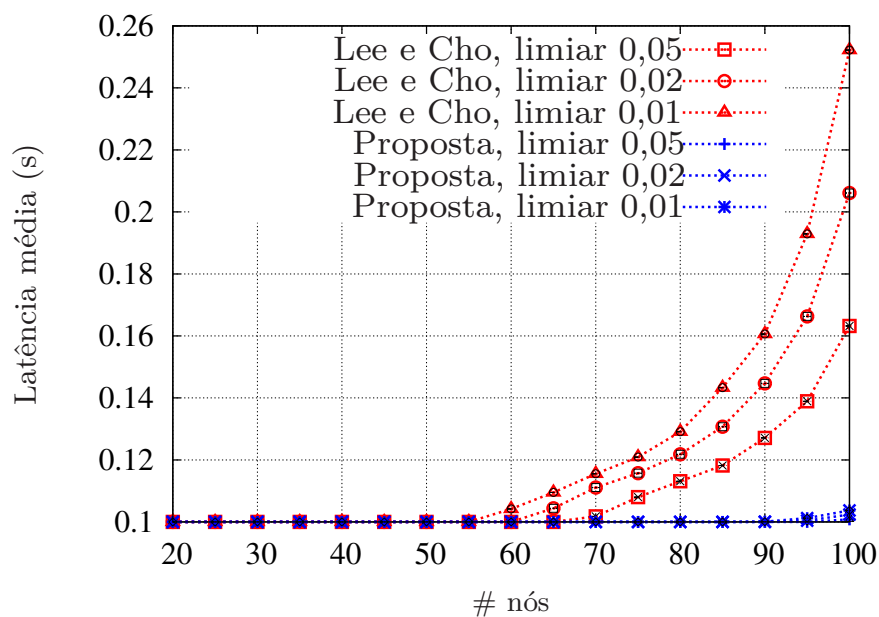


Figura 3.8. Latência *versus* número de nós no cenário 1.

### 3.4.5 Resultados para o cenário 2

A Figura 3.9 apresenta os resultados para o cenário 2. Ela apresenta similaridades com a Figura 3.6, porém, as curvas se estabilizam mais cedo: a partir de 50 nós para os limiares 0,01 e 0,02 e a partir de 55 nós para o limiar 0,05. Uma vez que a largura de banda total disponível nesse cenário é menor, a disputa por recursos é maior, fazendo com que a probabilidade de bloqueio aumente mais rapidamente com o aumento do número de nós. Da mesma forma que no cenário anterior, porém, uma vez atingido o limiar, a probabilidade de bloqueio se estabiliza. Entretanto, observa-se que a mesma sofre uma redução a partir de 85 nós. Esse fenômeno pode ser compreendido por meio da Figura 3.10, que apresenta a fração de nós bloqueados.

O crescimento expressivo do número de nós bloqueados na Figura 3.10 faz com que esses nós desistam do *handover* devido ao bloqueio da requisição. Assim, para os nós restantes, a probabilidade de bloqueio diminui. Esse fenômeno também ocorre no caso do

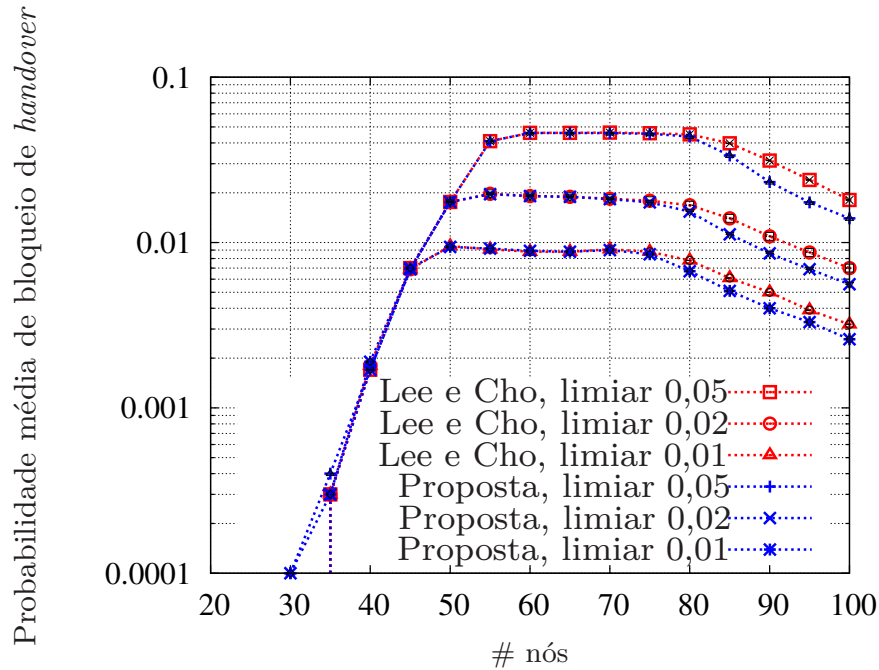


Figura 3.9. Probabilidade de bloqueio *versus* número de nós no cenário 2.

esquema com a estratégia proposta, porém, o número de nós bloqueados é menor. Isso ocorre porque a randomização das tentativas torna a requisição de *handover* um processo menos arriscado. Este comportamento é observado para todos os limiares.

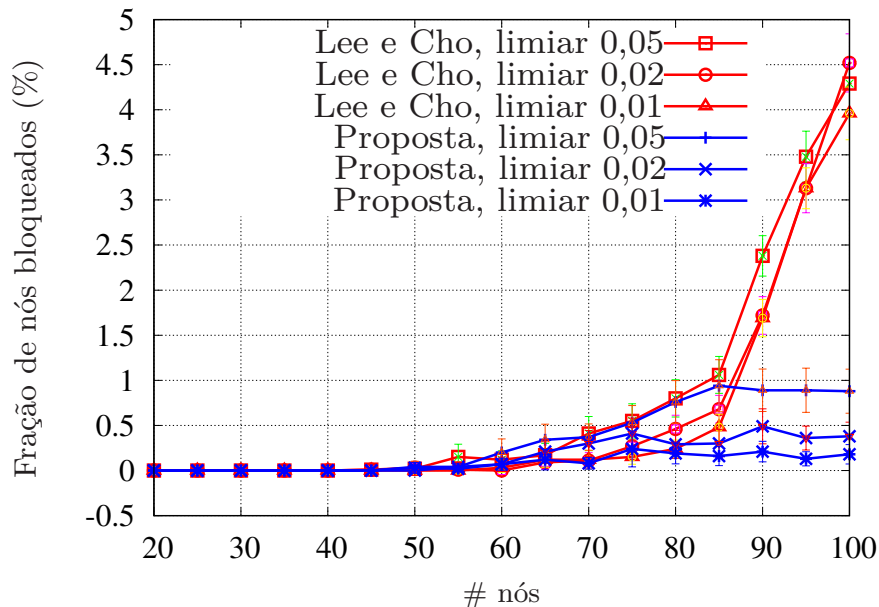


Figura 3.10. Fração de nós bloqueados *versus* número de nós no cenário 2.

A Figura 3.11 mostra os resultados para a latência no cenário 2. Assim como no cenário 1, as curvas com os limiares 0,01 e 0,02 apresentam valores maiores para a latência que a curva com o limiar 0,05. No esquema de Lee e Cho, a latência começa a aumentar a partir de 60 nós para o limiar 0,01, a partir de 65 nós para o limiar 0,02 e a partir de 70 nós no limiar 0,05. Espera-se valores maiores na latência nesse cenário, uma vez que

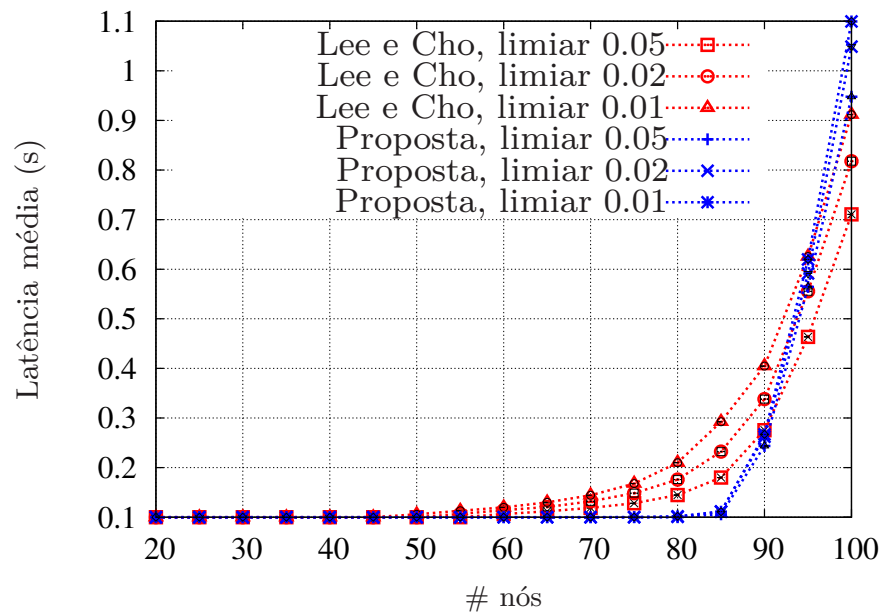


Figura 3.11. Latência *versus* número de nós no cenário 2.

a largura de banda total disponível é menor que no cenário 1. A Figura 3.11 também apresenta as diferenças entre as latências com e sem a estratégia proposta. Para o limiar 0,05, a latência tem uma redução de 30% para 80 nós. Para o limiar 0,02, a redução é de 42% para 80 nós e de 51,5% para o limiar de 0,05. Adicionalmente nota-se que para 95 nós, a latência do esquema com a estratégia proposta é maior que no esquema sem a proposta. Ao se atingir 100 nós, a latência é maior em 25%, 22% e 17% nos limiares 0,05; 0,02 e 0,01, respectivamente. Isso se deve à quantidade menor de nós bloqueados no esquema com a estratégia proposta, que pode ser vista na Figura 3.10. Os nós restantes, mais numerosos com a estratégia proposta, acabam por realizar mais adiamentos e, conseqüentemente, sofrem uma latência maior.

### 3.5 Conclusão

Neste capítulo foram apresentados os principais conceitos relacionados à mobilidade na camada de enlace no contexto de *handover* vertical. A Tabela 3.2 apresenta um resumo dos trabalhos relacionados a *handover* horizontal (discutidos no Capítulo 2) e vertical. Uma vez que o *handover* horizontal é um processo já consolidado na literatura, a maioria das pesquisas recentes se concentra na questão da economia de energia, que tem se tornado cada vez mais importante dado o consumo crescente da bateria pelos dispositivos móveis com a variedade de aplicativos disponíveis. As pesquisas relacionadas ao VHO destacam em sua maioria a necessidade de se propor estratégias de decisão que garantam que o nó móvel seja transferido para a rede de melhor qualidade, usando parâmetros possíveis de serem obtidos por todas as tecnologias envolvidas. As pesquisas relacionadas



às variantes GHO e GVHO procuram adicionar às questões de VHO a importância de se manter a baixa latência e o equilíbrio na gerência de recursos em face ao *handover* em massa ao mesmo tempo que procura-se minimizar a probabilidade de insucesso nesse processo.

Neste capítulo também foi apresentada uma proposta de estratégia para tentativas de GVHO. A estratégia foi baseada em *backoff* exponencial de modo a permitir uma melhor distribuição das tentativas dos diversos nós ao longo do tempo. Os resultados da avaliação de desempenho no cenário estudado mostraram que a estratégia reduziu em até 51,5% a latência de *handover* em relação ao resultado obtido por Lee e Cho (LEE; CHO, 2011). Por outro lado, um reduzido período entre as iterações no algoritmo fazem o processamento aumentar para os nós móveis. Apesar de um esquema de *handover* ter sido utilizado como referência, a estratégia proposta pode ser aplicada a outros esquemas de GVHO.

Tabela 3.2 – Trabalhos relacionados a *handover* na camada de enlace.

Publicação	Foco	Handover	Rede de acesso	Meio de transmissão	Avaliação	Prós	Contras
(CHOI, 2010)	Melhorar vazão por meio do critério de inicialização IINR	tradicional	LTE	não informado	simulação própria	Implementação simples; melhora da vazão;	Limitado ao LTE
(HUNUKUMBURE; AGARWAL; VADGAMA, 2011)	Economia de energia	tradicional	LTE	não informado	Atoll	Economia de energia em PoAs	Handover pode falhar em cenários de maior densidade
(KANWAL; SAFDAR, 2016)	Economia de energia	tradicional	LTE	não informado	modelagem	Economia de energia em PoAs	Aumento de falha no enlace
(PARK et al., 2009)	Economia de energia	tradicional	IEEE 802.11	não informado	simulação própria	Redução de latência; economia de energia;	Limitado ao IEEE 802.11
(CHOWDHURY; CHAE; JANG, 2012)	Gerência de recursos	GHO	não informado	carro	simulação própria	Redução da probabilidade de bloqueio de chamadas	Não avaliou latência
(JEONG et al., 2012)	Desempenho	GHO	IEEE 802.16e	não informado	modelagem	Redução da probabilidade de bloqueio de chamadas	Limitado ao IEEE 802.16e
(FU et al., 2012)	Desempenho	GHO	WiMAX	carro	simulação própria	Redução da latência e custo durante autenticação	Aumento do custo computacional
(PARK; YU; IHM, 2007)	Desempenho	VHO	WiMAX CDMA2000	carro	OPNET	Redução da latência e perda de pacotes	Forte acoplamento com camada de enlace

(SHEN; ZENG, 2008)	Critério de <i>handover</i>	VHO	não informado	carro	modelagem	Não foram realizadas comparações	Não foram realizadas comparações
(STEVENS-NAVARRO; LIN; WONG, 2008)	Desempenho	VHO	IEEE 802.11b +MIH	carro	NS-2	Redução de handovers desnecessários	Avaliação pouco realista
(GONDI; AGOULMINE, 2010)	Critério de <i>handover</i>	VHO	IEEE 802.11, 802.16, e 3G	a pé	Testbed	Não foram realizadas comparações	Alteração nas tecnologias de acesso
(KIM et al., 2011)	Critério de <i>handover</i>	VHO	IEEE 802.11n e LTE	carro a pé	simulação própria	Aumento da vazão e taxa de sucesso do handover; redução do custo	Avaliação pouco realista
(NOBREGA, 2011)	Critério de <i>handover</i>	VHO	IEEE 802.11, 802.16 +MIH	carro	modelagem + NS-2	Aumento da vazão e redução da latência do handover; aproveitamento de informação de QoS	Análise de custo
(KUNARAK, 2016)	Critério de <i>handover</i>	VHO	IEEE 802.11, LTE WCDMA	carro	não informado	reduz o número de <i>handovers</i> desnecessários e perda de chamadas	Não mede latência
(CHINNAPPAN; BALASUBRAMANIAN, 2016)	Critério de <i>handover</i>	VHO	IEEE 802.11, 802.16 UMTS	carro	MATLAB	reduz o número de <i>handovers</i> e o custo computacional	Não mede latência

(SHAN et al., 2008)	Desempenho	GVHO	IEEE 802.16	trem	simulação própria	Redução da probabilidade de bloqueio e perda de handover	Ponto único de falha
(NING et al., 2013)	Desempenho	GVHO	não informado	trem	simulação própria	Redução da probabilidade de bloqueio	Ponto único de falha
(CAI; LIU, 2008)	Desempenho	GVHO	1x-EVDO, HSDPA, IEEE 802.11a,b, 802.16	trem	modelagem	Não foram realizadas comparações com outros trabalhos	Não foram realizadas comparações com outros trabalhos
(NIYATO; HOSSAIN, 2009)	Critério de <i>handover</i>	GVHO	CDMA, IEEE 802.11, 802.16	não informado	modelagem	Não foram realizadas comparações com outros trabalhos	Não foram realizadas comparações com outros trabalhos
(OBAYIUWANA; FALOWO, 2016)	Critério de <i>handover</i>	GVHO	UMTS, IEEE 802.11, LTE	não informado	não informado	aumento da taxa de admissão de chamadas	Não mede latência nem custo
(LEI; HUI; ZHENG, 2010)	Desempenho	GVHO	não informado	trem	modelagem	Redução da latência, taxa de perdas e taxa de bloqueio de handover	Em alguns cenários uma das abordagens não favorece GVHO
(LEE; CHO, 2011)	Desempenho	GVHO	IEEE 802.11, 802.16 +MIH	trem	simulação própria	Redução da latência e taxa de bloqueio de handover	Estratégia de tentativas de handover baseada em atraso constante
(QUENTAL; GONÇALVES, 2014b)	Desempenho	GVHO	IEEE 802.11, LTE +MIH	trem	simulação própria	Redução da latência	Requer aprofundar estudos em alocação de recursos



## 4 Mobilidade em Redes IP

Após a realização de *handover* na camada de enlace, faz-se necessário atualizar informações de roteamento, endereçamento e autenticação. O *handover* entre redes no nível IP tornou-se assim uma questão de vital importância nas pesquisas de Gerência de Mobilidade. Esse tipo de *handover* é inerentemente vertical, pois funciona sobre as tecnologias de acesso, abstraindo o processo de VHO na camada de enlace.

Entretanto, a gerência de mobilidade em redes IP adiciona um novo desafio: a transição transparente e de baixa latência entre domínios diferentes. Taghizadeh *et al.* (TAGHIZADEH *et al.*, 2012) consideram que um domínio é a representação lógica de uma rede de acesso sem fio. Essa representação lógica está relacionada a uma área onde uma mesma operadora controla a confiabilidade e autenticação das entidades de rede.

Neste capítulo são apresentadas as principais tecnologias de mobilidade IP e os desafios relacionados ao *handover* entre diferentes domínios.

### 4.1 Mobilidade IP

Nesta seção são apresentadas as principais tecnologias padronizadas pelo IETF em mobilidade IP.

#### 4.1.1 Mobile IP (MIP)

Sendo o padrão de mobilidade IP mais conhecido do IETF, o *Mobile IP* (MIP) (JOHNSON; PERKINS; ARKKO, 2004) propõe que um nó móvel mantenha o seu endereço IP original enquanto se move além de sua rede original, denominada *Home Network*, coordenada por um *Home Agent* (HA). O MIP possui padronizações para o IPv4 e IPv6.

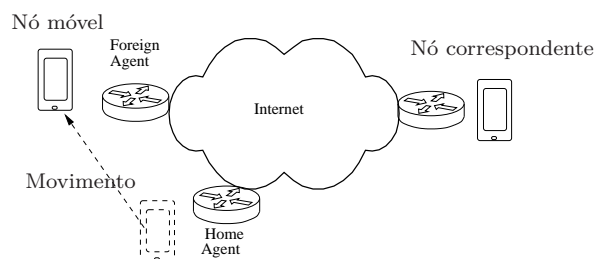


Figura 4.1. Arquitetura do Mobile IP.

A Figura 4.1 apresenta a arquitetura do MIP. Ao chegar em uma rede estrangeira, o nó móvel recebe um novo endereço IP de um agente estrangeiro (*Foreign Agent* - FA) para que esse nó seja alcançável dentro dessa rede. Assim, o nó precisa informar seu

HA sobre seu endereço na rede estrangeira, conhecido por *Care-of Address* (CoA). O HA mantém uma tabela que associa o endereço original e o CoA denominada *binding table*. Isso permite que o nó correspondente, aquele com o qual o nó móvel se comunica, mantenha a comunicação via HA, que reencaminha a mensagem ao FA, que finalmente a entrega ao nó móvel. O nó móvel assim sempre será conhecido por seu endereço original, que é traduzido em CoA pelo HA. A Figura 4.2 apresenta esse fluxo de mensagens de controle do MIP. As mensagens BU e BA referem-se à atualização da tabela do HA (mensagens de *Binding Update* e *Binding Acknowledgment*, respectivamente).

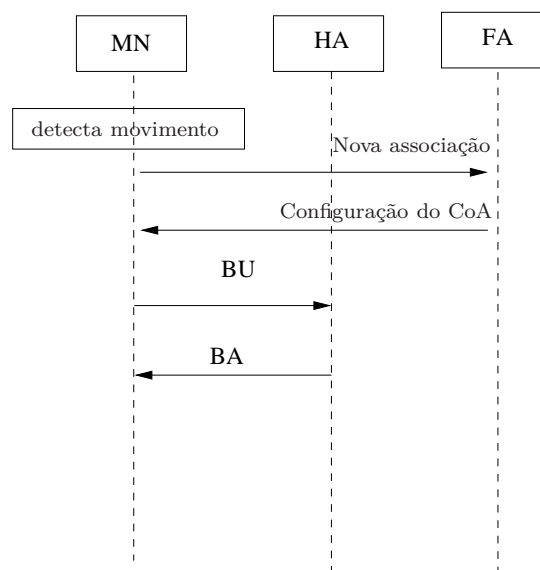


Figura 4.2. Fluxo de mensagens do Mobile IP.

A extensão *Mobile IPv6 Fast Handovers* (FMIP) (KODLI, 2009) tem o objetivo de reduzir a latência do *handover* antecipando a configuração de endereços com a detecção de movimentos do nó.

A extensão *Hierarchical Mobile IPv6* (SOLIMAN et al., 2008) procura diferenciar mobilidade local e global. Essa diferenciação evita *overhead* na mobilidade local propondo uma entidade denominada *Mobility Anchor Point*. Uma vez que a sinalização do nó é feita com essa nova entidade, a latência pode ser reduzida.

#### 4.1.2 Proxy Mobile IPv6 (PMIPv6) e extensões

O MIP requer que o dispositivo móvel possua a implementação do protocolo no seu sistema operacional, o que leva a um consumo adicional de energia, pois precisa estar em contato com uma entidade central da qual eventualmente se distancia, o que aumenta o custo de comunicação. Para resolver essa questão, o grupo de trabalho em gerenciamento de mobilidade distribuída (*Distributed Mobility Management* - DMM) do IETF propôs o *Proxy Mobile IPv6* (PMIPv6) (GUNDAVELLI et al., 2008). O PMIPv6 tem como objetivo tirar a responsabilidade do nó móvel de operações como a atualização

de endereço, reduzindo o consumo de energia e sendo assim um protocolo mais adaptável a dispositivos legados. O PMIPv6 introduz duas novas entidades de rede: o *Mobile Access Gateway* (MAG) e o *Local Mobility Anchor* (LMA). Desse modo, a responsabilidade da gerência de mobilidade é passada a essas duas entidades. De acordo com a RFC 5213 (GUNDAVELLI et al., 2008), a representação de domínio para o PMIPv6 inclui LMAs e MAGs entre os quais associações de segurança podem ser configuradas e há autorização para envio de mensagens de sinalização em nome dos nós móveis.

A Figura 4.3 ilustra essa arquitetura. O MAG torna-se responsável por enviar atualizações de endereço e manter o controle da localização do nó móvel, evitando a troca de mensagens pelo dispositivo sem fio, além de repassar pacotes do caminho de dados para o nó móvel. O LMA possui função semelhante à do HA: gerencia todos os MAGs de sua região e atribui prefixos de endereços para uso dos nós móveis, que são repassados via MAG.

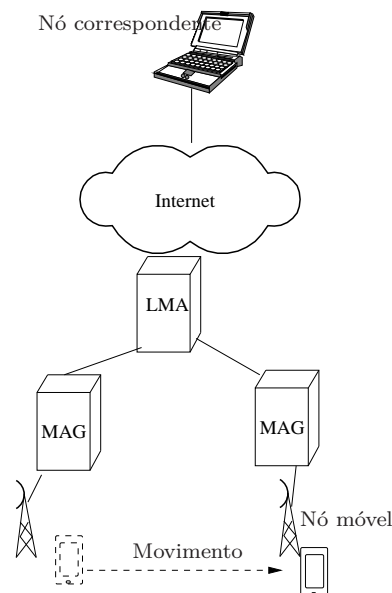


Figura 4.3. Arquitetura do PMIPv6.

A Figura 4.4 apresenta o fluxo de mensagens para o PMIPv6. Ao se mover de uma rede para outra, o nó móvel requisita uma nova rota ao novo MAG (NMAG) pela mensagem *Rtr Sol* do protocolo ICMP. Em seguida, o NMAG solicita ao LMA que atualize suas informações por meio da mensagem *Proxy Binding Update* (PBU), recebendo um reconhecimento pela mensagem *Proxy Binding Acknowledgment* (PBA).

Os padrões WiMAX e LTE possuem as entidades *Access Service Network Gateway* (ASN-GW) e *Serving Gateway* (S-GW), respectivamente, que são responsáveis por gerenciar a mobilidade dos nós na rede de acesso. Em uma implementação de PMIPv6, essas entidades assumiriam o papel de MAG. Eventualmente poderiam acumular a função do LMA ou opcionalmente utilizar as entidades *Packet Data Network Gateway* (P-GW) do LTE e alguma entidade da *Connectivity Service Network* (CSN) do WiMAX. Esse caso



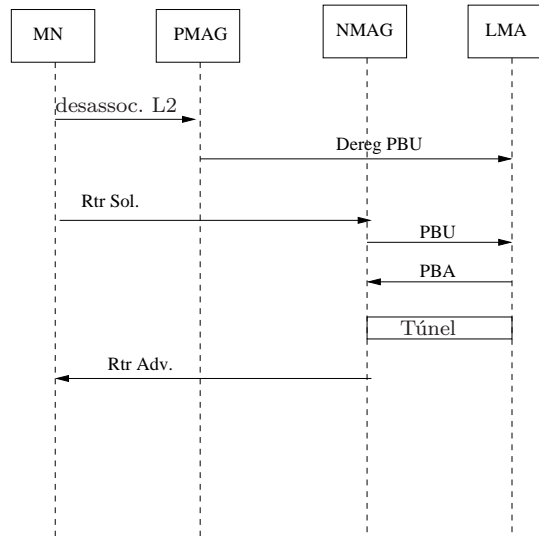


Figura 4.4. Fluxo de mensagens do PMIPv6.

seria mais indicado para que a arquitetura suporte a mobilidade interdomínio.

A extensão *Transient Binding for Proxy Mobile IPv6* (TPMIPv6) (LIEBSCH; MUHANNA; BLUME, 2011) é uma otimização do PMIPv6 para *handover* entre MAGs no caso *multihoming*. É acrescentada uma mensagem de TPBU para atualizar o LMA sobre mudança de interface antes que a interface anterior seja desconectada, antecipando a sinalização.

A extensão *Fast Handovers for Proxy Mobile IPv6* (FPMIPv6) (YOKOTA et al., 2011) adiciona um esquema de *buffering* e criação de um túnel entre o MAG anterior (PMAG) e o NMAG enquanto as mensagens de controle do *handover* ainda estão sendo trocadas. Essa extensão permite reduzir o número de pacotes perdidos durante o processo.

O FPMIPv6 pode funcionar em dois modos: preditivo e reativo. No modo preditivo, ilustrado na Figura 4.5, o PMAG configura um túnel para o NMAG por meio das mensagens HI (*Handover Indication*) e HACK (*Handover Acknowledgment*) assim que detecta que o enlace está prestes a ser desfeito pelo nó. Após se associar à rede, o NMAG troca mensagens com o LMA da mesma forma que no PMIPv6. Para descobrir o endereço do NMAG correto, o PMAG recebe do nó móvel o endereço do PoA-alvo, que o mapeia para o NMAG correspondente. Opcionalmente, o NMAG pode enviar e receber novamente as mensagens de HI e HACK para informar quando está pronta para receber as mensagens do túnel. Durante o *handover* o NMAG acumula as mensagens em um *buffer* para repassar ao nó assim que a conexão entre os dois for estabelecida. É importante observar que no modo preditivo, a rede de acesso ou o nó devem estar preparados para fornecer ao PMAG a informação do PoA-alvo.

No modo reativo do FPMIPv6 o estabelecimento do túnel entre PMAG e NMAG ocorre após o nó se conectar ao enlace da nova rede. Nesse caso, o NMAG é que inicia

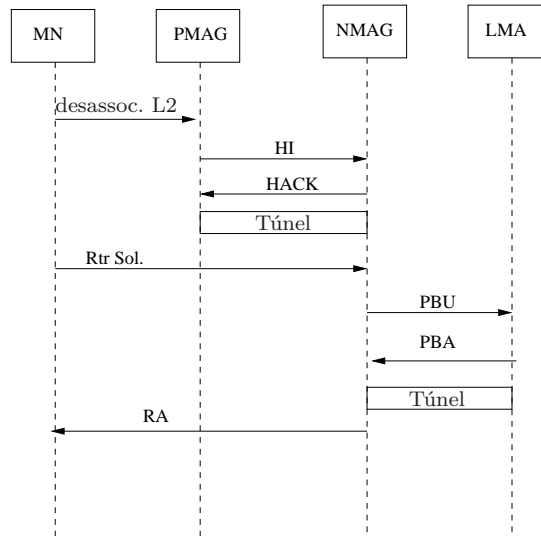


Figura 4.5. Fluxo de mensagens do FPMIPv6 no modo preditivo.

a comunicação com o PMAG para a configuração do túnel, enviando a mensagem de HI para receber a mensagem de HACK como resposta. Assim como no modo preditivo, o restante da comunicação é semelhante ao que ocorre no PMIPv6. O modo reativo tem a vantagem de não requerer que a rede de acesso envie informações específicas da rede-alvo, uma vez que o contato com o NMAG é feito após o *handover* no novo enlace.

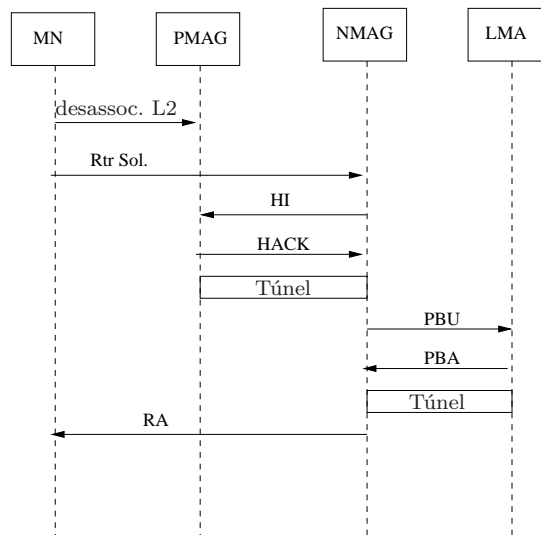


Figura 4.6. Fluxo de mensagens do FPMIPv6 no modo reativo.

De acordo com Chung *et al.* (CHUNG et al., 2013), o FPMIPv6 apresenta limitações em sua concepção. Por exemplo, o FPMIPv6 considera como premissa que todos os MAGs possuam um mapeamento dos PoAs para o MAG correspondente. Nem sempre essa condição é possível, especialmente no caso de *handover* entre redes heterogêneas ou *handover* interdomínio. Um outro problema apontado por Chung *et al.* é a possibilidade de sobrecarga nas entidades envolvidas no túnel, caso vários *handovers* ocorram simultaneamente na mesma região. Os MAGs geralmente são entidades com uma capacidade de

processamento inferior à de um LMA, de modo que faz-se necessário estabelecer parâmetros mínimos de processamento e largura de banda para essas entidades. De acordo com a RFC 5949 (YOKOTA et al., 2011), o FPMIPv6 é capaz de reduzir a perda de pacotes em relação ao PMIPv6, porém, o seu *overhead* de sinalização, gera um aumento na latência.

Em geral, os protocolos de mobilidade IP tratam do *handover* após a execução deste na camada de enlace. Porém, a abordagem de *cross-layering* pode ser desejável dependendo do esquema proposto. Essa implementação pode ser realizada com o auxílio de eventos e comandos MIH. A otimização do MIP utilizando MIH é objeto de diversas pesquisas, que envolvem inclusive o uso de protocolos de camadas superiores, como o *Session Initiation Protocol* (SIP) (ANGOMA et al., 2011) (BANERJEE; DAS; ACHARYA, 2005) (MUNASINGHE; JAMALIPOUR, 2009). Uma outra forma de otimização observada na literatura é o emprego de *Localized Routing* no PMIPv6 de modo a facilitar a manutenção de rotas otimizadas após o *handover* (RASEM; MAKAYA; ST-HILAIRE, 2012). Já o trabalho de Jabir *et al.* foca na otimização do *handover* intradomínio do PMIPv6 por meio da formação de subdomínios (JABIR et al., 2014). Na tese de Silva (SILVA, 2011) o foco é exclusivamente na camada de aplicação com uso do protocolo SIP, onde QoS, seleção de caminhos interdomínios e mobilidade são gerenciados levando em consideração o caminho fim a fim com auxílio de uma entidade centralizadora denominada E-MVNO (*Enhanced Mobile Virtual Network Operator*). O E-MVNO integra as entidades dos diferentes domínios e é responsável por determinar as rotas de acordo com os critérios de QoS definidos.

## 4.2 Trabalhos relacionados

Nesta seção são apresentadas as propostas para otimização dos protocolos de mobilidade MIP, PMIPv6 e FPMIPv6.

### 4.2.1 Trabalhos relacionados ao MIP

Yeh *et al.* (YEH; CHEN; AGRAWAL, 2009) propõem o FINCH (*Fast Intra-Network and Cross-layer Handover*), um mecanismo complementar ao Mobile IPv4 para gerenciamento de mobilidade intradomínio para WiMAX. O objetivo principal do FINCH é reduzir a latência de *handover*. Utilizando técnicas de *cross-layering*, os autores destacam que o FINCH permite que se utilize caminhos mais curtos na comunicação, reduzindo o tempo de *handover*. A ideia consiste em usar o FINCH para gerenciar o *handover* intradomínio e usar o MIP no caso interdomínio, onde o HA seria responsável pelo gerenciamento de mobilidade. O desempenho de FINCH é comparado com os mecanismos MIP, FMIP, HMIP, Cellular IP (CAMPBELL; GOMEZ; VALKO, 1999) e HAWAII (RAMJEE et al., 2002) por meio de simulação numérica. As métricas avaliadas foram latência, perda de

pacotes, custo de atualização da localização e custo total. De acordo com os autores, o FINCH apresentou a segunda menor latência e perda de pacotes, sendo apenas maior que no FMIP. O FINCH possui melhor desempenho no custo de atualização da localização e no custo total apenas se for empregada a sua versão com paginação (P-FINCH).

Kim *et al.* (KIM; SHIN; SHIN, 2008) apresentam uma proposta para o HMIPv6. Os autores propõem executar o *handover* no nível IP e na camada de enlace simultaneamente, de modo a reduzir a latência geral do *handover*. Os resultados mostram a redução dessa métrica e da perda de pacotes em um cenário intradomínio em comparação com o HMIPv6.

Angoma *et al.* (ANGOMA et al., 2011) propõem uma arquitetura de integração entre WLAN, 3G e WiMAX. Para tal, três camadas middleware são integradas ao MIPv4: *Driver Management Component layer*, *Discovery and Monitoring Component layer* e *Selection and Handover Execution Component layer*. A interligação com a camada de enlace é feita com um serviço do MIH. A avaliação consiste na criação de um *testbed* comparando-se a latência do *handover* no sistema sobre WLAN, 3G e WiMAX. Os autores concluem que o sistema proposto executado sobre 3G é o mais lento.

Munasinghe e Jamalipour (MUNASINGHE; JAMALIPOUR, 2009) propõem uma arquitetura de integração WiMAX com 3GPP com continuidade de sessão. A integração nesse caso é feita entre o MIPv4 e protocolos de camadas superiores. Os autores criam uma arquitetura que utiliza o *IP Multimedia Subsystem* (IMS) como controlador de sessões, que por sua vez, utiliza o protocolo SIP. Avaliações foram realizadas com modelagem analítica e simulação com a ferramenta OPNET (OPNET, 2015). As métricas avaliadas foram latência, taxa de perda de pacotes, *jitter* e custo de sinalização x número de *handovers*. As comparações foram realizadas entre SIP puro e a solução proposta, que mostrou melhor desempenho nas quatro métricas.

Magnano *et al.* (MAGNANO et al., 2015) propõem uma solução para o problema da comunicação em longa distância entre o nó móvel e o HA. A solução consiste em prever o *handover* inferindo o padrão de movimentação dos nó por meio de modelagem markoviana. Os autores observaram redução da latência, perda de pacotes e melhora da vazão em comparação às soluções E-FMIP (um FMIP em modo preditivo) e *context P-CSF* (uma extensão ao MIP que oferece transferência de contexto).

#### 4.2.2 Trabalhos relacionados ao PMIPv6 e extensões

Banerjee, Das e Acharya (BANERJEE; DAS; ACHARYA, 2005) propõem associar MIH, PMIPv6 e SIP para garantir continuidade de sessão durante VHO. O MIH é usado para reportar eventos da camada de enlace, enquanto o PMIPv6 tem o papel de atualizar endereços IP. O SIP é utilizado para reiniciar sessões sempre que necessário. A arquitetura

foi avaliada por meio de um *testbed*. Os resultados mostram eliminação da perda de pacotes e controle do *jitter*. A latência não foi avaliada.

O trabalho de Kim e Kim (KIM; KIM, 2011) aborda a questão da vazão do TCP durante o *handover* no FPMIPv6. A solução inclui MIH para negociação de QoS, pré-registro e pré-autenticação. As simulações foram realizadas com OPNET e os resultados mostram que a proposta reduz a vazão do TCP em comparação com o FPMIPv6 puro.

Chung *et al.* (CHUNG et al., 2013) propõem uma abordagem de consulta por proxy CoA sob demanda para tratar do problema do acesso ao endereço proxy-CoA quando se muda de um PMAG para um NMAG de outra rede. No FPMIPv6 tradicional, o LMA consegue contactar o NMAG, mas não possui o proxy-CoA antes do *handover* se o NMAG for de outra rede. Assim, os autores propõem a criação das mensagens HPAR e HPAP para obtenção desse endereço pelo LMA e das mensagens FPBU e FPBA para bufferizar e estabelecer ou liberar conexões do LMA com o MAG. Os testes foram realizados com simulação própria e observou-se que a proposta reduz a latência e a probabilidade de se ultrapassar o limite da mesma. Uma desvantagem dessa solução é a transferência da responsabilidade de localização do proxy-CoA do NMAG para o LMA, gerando um gargalo na rede com as novas mensagens.

Rasem, Makaya e St-Hilaire propõem o suporte a roteamento baseado em localização (*Localized Routing* - LR) no FPMIPv6 para o modo preditivo (RASEM; MAKAYA; ST-HILAIRE, 2012) e reativo (RASEM; ST-HILAIRE; MAKAYA, 2012). Isso permite recuperar uma rota ótima previamente estabelecida entre nó móvel e seu correspondente após o *handover*. Com o uso de LR os dados não precisam passar pelo LMA, nem pelo MAG, melhorando o desempenho da aplicação. Para tal, as mensagens LRI e LRA usadas para iniciar e reconhecer o *Localized Routing* são embutidas nas mensagens de HI e HACK do FPMIPv6. A avaliação é feita com simulador próprio e foram medidas a latência e a taxa de perda de pacote. Observa-se uma redução significativa na latência e a manutenção da taxa de perda de pacotes.

Zhou *et al.* (ZHOU et al., 2010) comparam o desempenho entre PMIPv6, FPMIPv6 e TPMIPv6. A avaliação foi realizada por meio do simulador NS-2 (NS-2, 2015). De acordo com o cenário e parâmetros adotados, conclui-se que o FPMIPv6 tem a maior latência e a menor perda de pacotes UDP. Conclui-se também que o TPMIPv6 tem a menor latência porém, tem a maior perda se o nó passar mais de 1 s em zona de interseção.

O trabalho de Wang e Bi (WANG; BI, 2014) propõe uma abordagem de DMM baseada em Redes Definidas por Software (*Software Defined Networks* - SDNs) para resolver limitações do MIP. Os autores argumentam que o uso de SDNs permite abstrair a estrutura da rede evitando que o nó móvel precise se comunicar constantemente com o *Home Agent*. Por meio de SDN, cria-se uma camada de abstração sobre a rede, fazendo com que a informação de *binding* fique armazenada em uma caminho otimizado entre o

nó e seu correspondente. A abordagem é comparada com o PMIPv6 e de acordo com os autores o número de sequência do TCP apresenta um crescimento mais linear e o RTT (*Round Trip Time*) apresenta valores menores após ocorrência de *handover*. Por outro lado, a latência e o custo não são avaliados.

### 4.3 Mobilidade IP Interdomínio

Diferentemente do MIP, no PMIPv6 e em suas extensões, os LMAs não possuem conhecimento global da rede, tampouco de domínios externos, como um HA teria. O HA consegue acessar domínios além do seu graças à comunicação com o nó móvel, que se encarrega de informar sobre atualização do CoA. Como essa comunicação é eliminada no PMIPv6, não é possível rastrear o nó móvel quando este deixa o domínio.

Entretanto, os cenários veiculares, cada vez mais frequentes em situações realísticas, tornam provável e necessária a sinalização de *handover* entre redes de domínios diferentes (JOE; LEE, 2012) (BAIK et al., 2009) (ZHONG et al., 2010) (CHUNG et al., 2013) (ZHOU et al., 2010) (JIA, 2015).

Taghizadeh *et al.* (TAGHIZADEH et al., 2012) classificam as soluções de mobilidade IP quanto à comunicação entre domínios:

- **Domínio único** - Um único domínio envolve toda a rede. Não se considera a existência de outros domínios além dessa rede. Um cenário de domínio único pode ser implementado com o protocolo PMIPv6, uma vez que a autenticação se limita ao MAG correspondente, que é uma entidade local.
- **Multidomínio hierárquico** - Cada rede de acesso é gerenciada por um esquema de mobilidade localizado, como o PMIPv6, sendo a comunicação entre estas redes gerenciadas por um esquema global de mobilidade IP, como o MIP.
- **Multidomínio de pares** - O *handover* em cada rede é gerenciado por um esquema de mobilidade IP local e o *handover* entre redes é realizado pela comunicação entre esses esquemas sem hierarquia entre eles.

Se o MIP possui problemas de *overhead* de sinalização, o PMIPv6 por sua vez fragmenta a rede, pois isola os nós em um domínio local. Desta forma, faz-se necessária uma abordagem que permita *handover* interdomínio conservando a simplicidade do PMIPv6 e mantendo as suas vantagens com relação ao não envolvimento do nó móvel nas operações de gerenciamento. O maior interesse da presente tese se encontra nas soluções que se enquadram no tipo *Multidomínio de pares*, uma vez que é a alternativa mais distribuída, e portanto, mais extensível e tolerante a falhas.

### 4.3.1 Abordagens para *handover* interdomínio em redes IP

Nesta seção são apresentadas diversas abordagens para se obter *handover* interdomínio, classificadas pela abordagem da solução.

#### 4.3.1.1 Abordagem sem otimização

Park *et al.* (PARK E. LEE; NOH; KIM, 2010) propõem uma abordagem para prover *handover* interdomínio ao PMIPv6 sem qualquer tipo de otimização ou entidades adicionais, acrescentando repasse das mensagens já conhecidas do padrão a entidades de domínios vizinhos. É uma solução de *multidomínio de pares*.

A Figura 4.7 apresenta o fluxo de sinalização. O nó é responsável pela requisição de autenticação. Cada domínio possui o seu próprio serviço de autenticação, autorização e auditoria (*Authentication, Authorization, and Accounting - AAA*). Deve haver um túnel extra entre o LMA anterior e o LMA novo além do túnel já existente entre LMA e NMAG. Avaliações foram realizadas com o simulador QualNET (QUALNET, 2015) medindo a perda de pacotes e a latência em comparação com o esquema que usa PMIPv6/MIP hierarquicamente. Os autores concluem que a proposta é mais adequada em cenários de *handover* frequente. Devido ao maior repasse de mensagens em comparação ao PMIPv6, é esperado um aumento considerável do *overhead* de sinalização. Também é esperado um *overhead* adicional de encapsulamento de cabeçalhos devido ao túnel extra criado entre os LMAs. Uma consequência direta é o aumento da latência. Uma solução semelhante é apresentada em (ZHOU *et al.*, 2010).

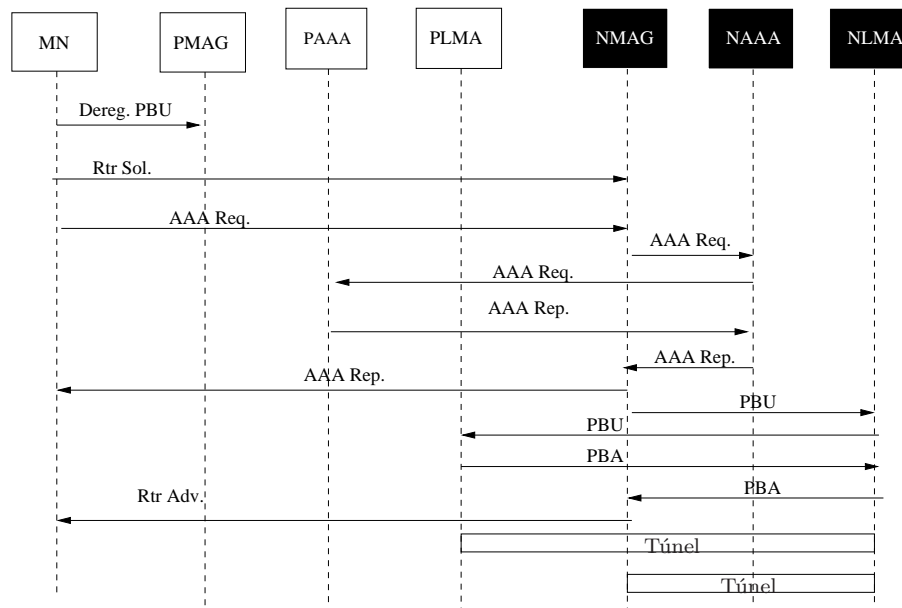


Figura 4.7. *Handover* interdomínio no esquema de Park *et al.*

#### 4.3.1.2 Abordagem baseada no LMA como âncora de sessão

Neumann *et al.* (NEUMANN et al., 2009) propõem o I-PMIP, uma abordagem de suporte a *handover* interdomínio ao PMIPv6 que mantém o mesmo LMA até o fim da sessão. Para tal, parte-se da premissa de que os LMAs de domínios vizinhos são fisicamente próximos e que conhecem seus endereços. Trata-se de uma solução de *multidomínio de pares*. O LMA de origem mantido como âncora do *handover* é denominado *Session Mobility Anchor* (SMA). O I-PMIP prevê uma entidade adicional chamada *Virtual Mobility Anchor* (VMA), responsável por manter a informação do domínio onde o nó se encontra. A Figura 4.8 apresenta as mensagens de sinalização do I-PMIP. O SMA repassa os dados ao futuro LMA no novo domínio, que cria um túnel para o novo MAG. O VMA é atualizado cada vez que o nó se move para outro domínio. Não é realizada avaliação de desempenho, e sim apenas uma comparação entre as equações da latência no MIP, HMIP e H-PMIP. De acordo com os autores, o I-PMIP teria latência inferior à dos demais esquemas. Entretanto, a atualização do VMA a cada *handover* faz com que essa entidade seja um gargalo de rede e ponto único de falha na arquitetura. Outra desvantagem do I-PMIP é que, assim como na abordagem sem otimização, requer a adição de um túnel além daquele previsto no PMIPv6, aumentando o *overhead* da entrega de pacotes.

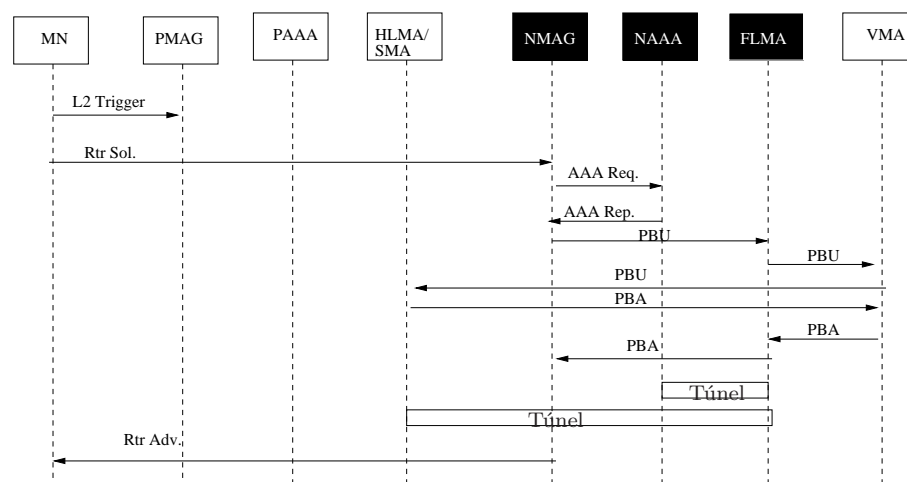


Figura 4.8. *Handover* interdomínio no esquema I-PMIPv6.

#### 4.3.1.3 Abordagem baseada em entidades centrais

Zhong *et al.* (ZHONG et al., 2010) propõem o *Enabling Inter PMIPv6 Domain Handover* (EIPMH). O EIPMH introduz uma entidade central denominada *Traffic Distributor* (TD), que redireciona dados para o LMA enquanto o nó estiver além do seu domínio original. Os TDs são configurados estaticamente e possuem conhecimento de outros TDs, seus prefixos IP e mapeamento para os LMAs. O TD assume a responsabilidade do LMA de atribuir prefixos IP ao nó móvel além de agir como *gateway* para a rede externa. Esta é uma abordagem de *multidomínio hierárquica*.



A Figura 4.9 apresenta o fluxo de mensagens de controle para essa proposta. Assim que o nó se registra no NMAG, o seu LMA correspondente faz uma consulta ao LMA de origem por meio da mensagem `PBU_Forwading`. Essa consulta busca informações adicionais do nó e do TD responsável pela comunicação com a Internet. O TD cria um túnel com o novo LMA. Também é criado um túnel entre LMAs além do túnel já existente entre o novo LMA e NMAG.

A avaliação de desempenho é realizada por meio do simulador NS-2 (NS-2, 2015) comparando o EIPMH com o I-PMIP. As métricas avaliadas são latência e vazão e os resultados mostram melhor desempenho no EIPMH. Entretanto, a avaliação não considera o *overhead* extra causado pelo túnel entre o TD e o LMA, tampouco a consulta com a mensagem `PBU_Forwading` e a troca de um MAG para outro. Adicionalmente, não é tratada a questão do *handover* entre os TDs, o que torna a proposta incompleta. Pelo fato do EIPMH introduzir dois túneis extras ao PMIPv6, espera-se um aumento do *overhead* de entrega de pacotes em relação ao PMIPv6.

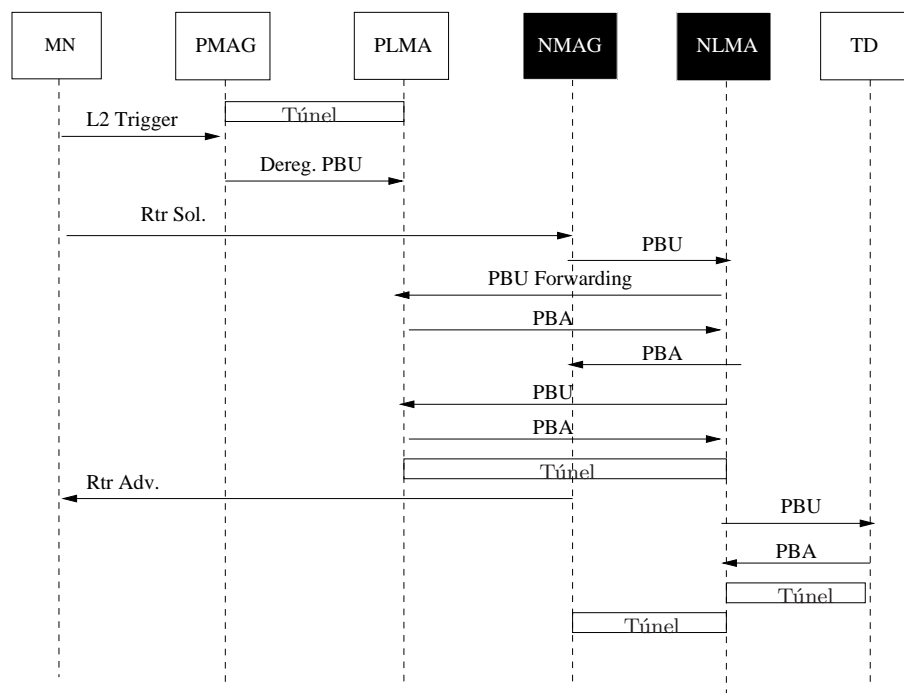


Figura 4.9. *Handover* interdomínio no esquema EIMHP.

#### 4.3.1.4 Abordagem baseada em especialização de MAG

Joe e Lee (JOE; LEE, 2012) apresentam uma abordagem para *handover* interdomínio baseada em uma arquitetura que distingue dois tipos de MAG: *Boundary* e *Overlapping* MAG (BMAG e OMAG, respectivamente). Assim como em alguns casos anteriores, é uma solução de *multidomínio de pares*. O BMAG é associado a apenas um LMA enquanto o OMAG se associa a mais de um LMA, de domínios diferentes. Espera-se que tanto o BMAG quanto o OMAG estejam em áreas de sobreposição entre dois domínios.

Os autores partem da premissa de que há apenas uma entidade de autenticação para todos os domínios. A presença de um *gateway* garante a manutenção do endereço IP.

Os autores propõem duas soluções: reativa e *no-gap*. Na solução reativa, um caminho é criado entre o nó correspondente e os LMAs antigo e novo. O novo LMA é descoberto por meio de localização geográfica pelo BMAG. Os autores não especificam como a consulta é realizada. A solução também prevê que a funcionalidade do BMAG seja replicada em roteadores de borda. Nessa solução, faz-se necessária a criação de um túnel entre o *gateway* e o novo LMA, entre os LMAs e entre o novo LMA e o NMAG.

Na solução *no-gap*, o OMAG cria dois caminhos simultâneos assim que o nó entra em sua área de cobertura. Assim, o nó recebe informação redundante de ambos LMAs. A Figura 4.10 apresenta o fluxo de chamadas de sinalização para a solução *no-gap*. Além das mensagens PMIPv6, as mensagens FBD e FBDA são trocadas entre o novo LMA e o *gateway* para confirmar e obter informação adicional sobre o nó. Adicionalmente, o novo LMA faz a autenticação do nó. Também é necessário criar um túnel entre o *gateway* e o novo LMA e entre o LMA e o OMAG.

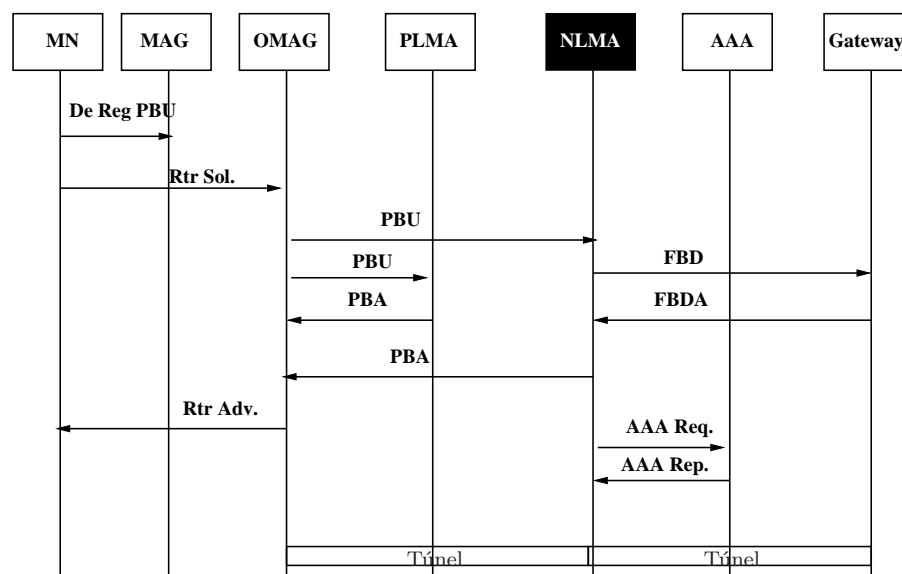


Figura 4.10. Handover interdomínio do esquema No-Gap.

A avaliação de desempenho compara as duas soluções propostas com o MIPv6, FPMIPv6 e EIPMH. A métrica avaliada foi a latência. De acordo com o cenário estudado, os autores concluem que ambas as soluções propostas possuem melhor desempenho sendo *no-gap* a mais eficiente. Entretanto, a avaliação desconsiderou o *overhead* de busca e da criação de túneis adicionais. Além disso, os autores omitem que na solução *no-gap* é necessário que o OMAG também troque sinalização PBU/PBA com o LMA anterior no *handover* e no registro inicial, já que os autores não descrevem como se distingue o tratamento de um LMA para o outro. A solução *No-Gap* também requer uma mudança no sistema legado, incluindo configuração de roteadores de borda de modo a viabilizar a existência da

entidade OMAG. Uma proposta semelhante ao *no-gap* foi feita por Lee et al. (LEE et al., 2009a).

## 4.4 Conclusão

Este capítulo apresentou os principais conceitos relacionados à mobilidade na camada de rede. Foram apresentados os principais protocolos propostos pelo IETF e suas extensões. Também foi introduzido o conceito de *handover* interdomínio e os principais trabalhos relacionados.

Os estudos do Estado da Arte mostram que uma solução em *handover* interdomínio requer, além da baixa latência, uma perda de pacotes tolerável e uma arquitetura robusta. Assim, algumas soluções optam pela presença de uma entidade global de modo a reduzir o *overhead*. Outras soluções chamam atenção para a questão da simplificação da autenticação. Algumas soluções buscam atribuir novas funções a entidades existentes. A Tabela 4.1 resume a conformidade dessas soluções em relação aos objetivos específicos da presente tese.

A abordagem de Park *et al.* (PARK E. LEE; NOH; KIM, 2010) propõe o repasse de mensagens PMIPv6 considerando que os LMAs e entidades de autenticação de domínios diferentes possam se comunicar. Assim, é esperado um *overhead* de sinalização dobrado devido a esse repasse. Também é esperado um *overhead* adicional de encapsulamento de cabeçalhos devido ao túnel extra criado entre os LMAs. Uma consequência direta é o aumento da latência. Assim, essa abordagem apresenta as seguintes limitações:

- gera um aumento expressivo de mensagens de sinalização em relação ao PMIPv6;
- requer a adição de um túnel além daquele previsto no PMIPv6, o que aumenta o *overhead* da entrega de pacotes.

O I-PMIP (NEUMANN et al., 2009) utiliza o LMA de origem como âncora durante o *handover*, estando associado ao nó ao menos até o fim da sessão em andamento. Entretanto, faz-se necessária a existência de uma entidade para armazenar a localização atual do nó. As principais desvantagens do I-PMIP são:

- requerer uma entidade central, introduzindo um gargalo e ponto único de falha na arquitetura da rede;
- assim como na abordagem sem otimização, requer a adição de um túnel além daquele previsto no PMIPv6, aumentando o *overhead* da entrega de pacotes;
- requer mudanças na forma como sistemas PMIPv6 legados funcionam.

Tabela 4.1 – Abordagens para mobilidade IP Interdomínio.

Solução	Número de mensagens adicionais no HO Interdomínio	Número de túneis extras	Manutenção da infraestrutura	Compatibilidade com sistema legado
Sem otimização	8	1	Sim	Sim
I-PMIP	6	1	Não	Não
EIPMH	6	2	Não	Não
No-Gap	4	1	Não	Sim

O EIPMH (ZHONG et al., 2010) introduz uma entidade distribuidora de tráfego para gerenciar a transição entre LMAs. A proposta prevê a possível existência de várias dessas entidades, cada uma responsável por uma área de cobertura. Observa-se que o problema de *handover* interdomínio é apenas adiado para o nível dos distribuidores de tráfego, tornando a solução incompleta. Adicionalmente, o EIPMH apresenta as seguintes desvantagens:

- introduz dois túneis extras ao PMIPv6, aumentando o *overhead* de entrega de pacotes;
- requer mudanças na forma como sistemas PMIPv6 legados funcionam.

A abordagem *No-Gap*, que consiste em especializar o MAG localizado em regiões de sobreposição (JOE; LEE, 2012), requer uma mudança estrutural em roteadores de borda em sistemas legados. Adicionalmente, o nó recebe mensagens redundantes do mesmo MAG vindas de diferentes LMAs a partir do mesmo *gateway*. Além disso, a solução *No-Gap* requer uma mudança estrutural no sistema legado, incluindo configuração de roteadores de borda de modo a viabilizar a existência da entidade OMAG.

Assim, conclui-se que o principal desafio relacionado ao *handover* interdomínio é aliar baixo custo de sinalização, controle distribuído da mobilidade, melhor aproveitamento do tráfego útil garantindo compatibilidade com infraestrutura e protocolo legados do PMIPv6.

## 5 *Clustered PMIPv6* (CPMIPv6)

O Capítulo 4 apontou as principais limitações das abordagens do Estado da Arte para resolver o problema do *handover* intra e interdomínio em redes PMIPv6. Elas incluem: a existência de entidades globais pelas quais passa sinalização extra e síncrona durante essas operações, criando-se gargalos na rede; a modificação da arquitetura física, o que dificulta a convivência com sistemas legados; e o aumento da quantidade de túneis necessários para o caminho de dados, aumentando o *overhead* de encapsulamento de pacotes. Neste capítulo são apresentadas as motivações para o uso de protocolos P2P em gerenciamento distribuído da mobilidade, a arquitetura do CPMIPv6 e a sinalização para *handover*.

### 5.1 Arquitetura do CPMIPv6

O *Clustered PMIPv6* (CPMIPv6) é uma abordagem para *handover* intradomínio e interdomínio de baixa latência que procura superar as limitações encontradas em soluções do Estado da Arte. A Figura 5.1 apresenta a arquitetura do CPMIPv6. O CPMIPv6 propõe organizar as entidades-âncora de cada domínio em uma estrutura denominada *cluster*. Sobre essa estrutura funciona um protocolo DMM de mensagens assíncronas semelhante ao protocolo Kademlia, usado em redes par a par (*Peer to Peer* - P2P). Os dados compartilhados no *cluster* são estruturas de dados que representam informações atualizadas dos nós móveis, fazendo com que os LMAs conheçam informações desses nós antecipadamente antes que os mesmos visitem seus domínios. Essa antecipação da informação aliada ao caráter assíncrono das mensagens de gerenciamento do *cluster* fazem com que o *handover* tenha custo e latência menores que nas abordagens do Estado da Arte.

O uso de um protocolo P2P para configurar o *cluster* do CPMIPv6 permite replicar informações necessárias ao gerenciamento de mobilidade de forma rápida entre os seus pares e de modo a evitar a criação de gargalos. Uma rede P2P é um sistema distribuído, onde seus pares se comunicam em uma rede de topologia dinâmica e por um tempo transitente (LUA et al., 2005). Na Internet, estas redes são conhecidas como redes *overlays*, uma vez que seus protocolos permitem que as funcionalidades de encaminhamento sejam implementadas na camada de aplicação ou sobrepostas à mesma, formando uma espécie de sub-rede virtual. Isto permite que detalhes da topologia física da rede sejam transparentes aos usuários de P2P. Estas redes vêm sendo intensamente utilizadas desde o fim dos anos 90 e isto ocorreu graças ao seu grande sucesso entre usuários de aplicações de compartilhamento de arquivos e sessões de Voz sobre IP.

A geração mais recente de redes P2P, conhecidas como *Redes P2P Estruturadas*,

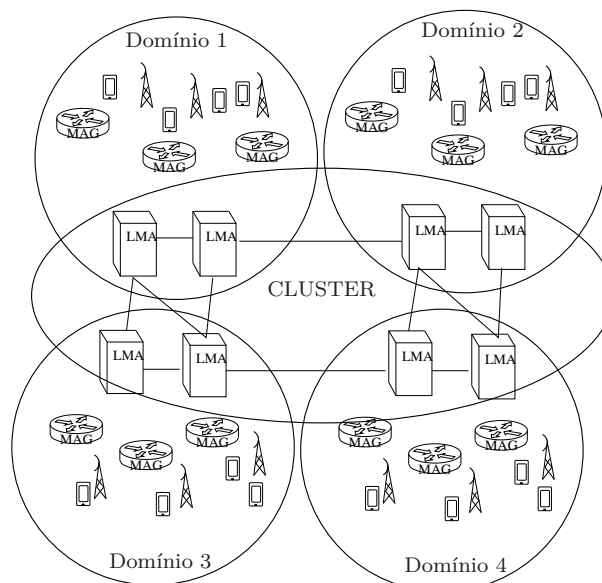


Figura 5.1. Domínios no CPMIPv6.

realiza difusão e consulta de objetos através de Tabelas *Hash* Distribuídas ou (*Distributed Hash Tables* - DHTs). As DHTs são geralmente empregadas em sistemas onde o principal objetivo é fazer descoberta de serviços ou localização de objetos em sistemas distribuídos. Objetos, neste contexto, podem ser vistos como nomes em um serviço de DNS ou arquivos em um serviço de compartilhamento, por exemplo. A cada par pertencente à DHT é atribuído um identificador único (um *nodeID*), assim como cada objeto armazenado possui uma chave correspondente (HU; DAS; PUCHA, 2005). Esses objetos são mapeados aos pares da rede por meio de uma função de *hash* que retorna o *nodeID* do par onde cada dupla <chave, valor> será armazenada. Assim, cada par pode armazenar várias duplas <chave, valor>. Exemplos de DHTs incluem Chord (STOICA et al., 2003), Pastry (ROWSTRON; DRUSCHEL, 2001), Tapestry (ZHAO et al., 2004), Viceroy (MALKHI; NAOR; RATAJCZAK, 2002) e Kademia (MAYMOUNKOV; MAZIÈRES, 2002). Um protocolo para redes DHT que se destaca dos demais pelo desempenho de acesso a chaves e valores, acesso à tabela de roteamento e entrada/saída de pares é o da rede Kademia (LUA et al., 2005), detalhado na Seção 5.1.1. A Seção 5.1.2 apresenta de que forma a Kademia é usada e modificada no gerenciamento do *cluster* do CPMIPv6.

### 5.1.1 Kademia

A Kademia é uma DHT tolerante a falhas com desempenho logarítmico que armazena as duplas <chave, valor> em pares cujos *nodeIDs* estiverem mais próximos à chave usando a operação XOR para medição de distância (MAYMOUNKOV; MAZIÈRES, 2002). O uso de XOR facilita o processo de análise formal, devido à sua aritmética simples. Um exemplo de rede Kademia pode ser observado na Figura 5.2. Neste exemplo, a dis-

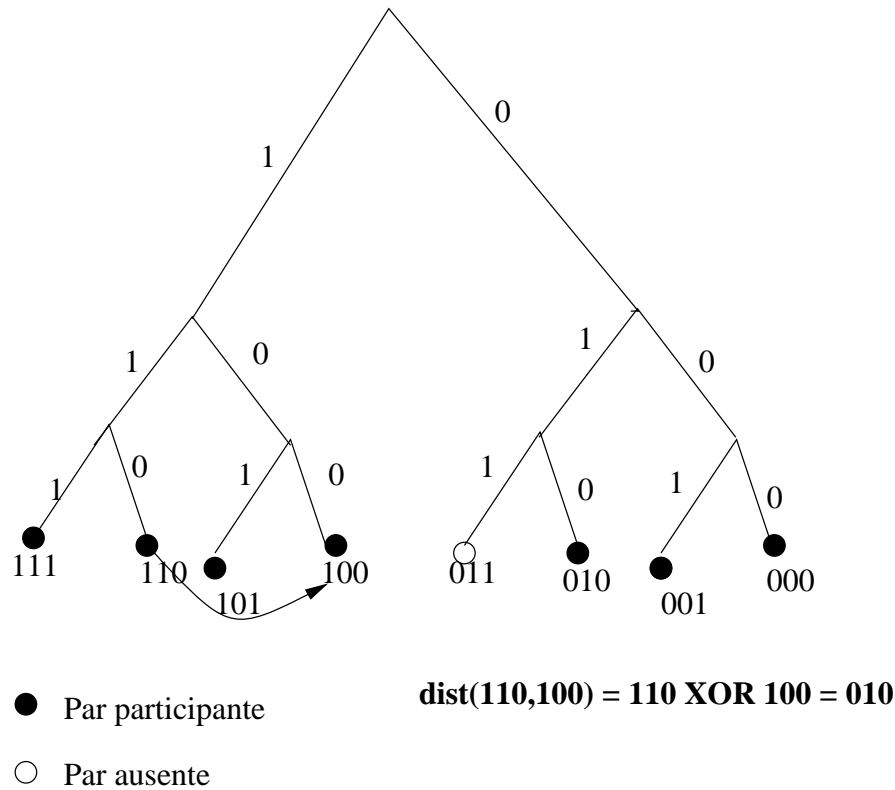


Figura 5.2 – Exemplo de Rede Kademlia com espaço de chaves de 3 bits

Tabela 5.1 – Exemplo de tabela de roteamento para o par “110” em 3 *k-buckets*.

Pares com distância $1(2^0)$ a $2(2^1)$	[ (IP, port, “111”) ]
Pares com distância $(2^1)$ a $(2^2)$	[ (IP, port, “100”), (IP, port, “101”) ]
Pares com distância $(2^2)$ a $(2^3)$	[ (IP, port, “000”), (IP, port, “001”), (IP, port, “010”) ]

tância entre os nós identificados por “110” e “100” é 2 (“10” em binário), pois equivale ao resultado de uma operação de XOR entre eles. Assim, dada uma chave, é possível procurar na tabela de roteamento qual o par que a armazena, verificando qual o par que está a uma menor “distância” desta chave. Por padrão as chaves e *nodeIDs* têm tamanho de 160 bits. Os *nodeIDs* são gerados no momento em que o par entra na DHT. Cada par mantém uma tabela de roteamento na forma de um conjunto de 160 *k-buckets*, onde *k* é um parâmetro que representa o tamanho máximo de uma vizinhança. Dependendo da distribuição dos *nodeIDs* na rede o *k-bucket* não será completamente preenchido. O número de *buckets* corresponde ao número de bits escolhido para representar as chaves. Na Tabela 5.1 tem-se três *k-buckets* porque neste exemplo os *nodeIDs* são representados por três bits. O par “011” não aparece na tabela por não estar presente na rede nesse momento. Cada entrada num *bucket* é uma tupla <endereço IP, porta UDP, nodeID>. Pares são adicionados aos *buckets* à medida que entram na DHT. Um par é inserido no *bucket* *i* de outro par, se a distância entre eles estiver entre  $2^i$  e  $2^{i+1}$ , onde  $0 \leq i < \#buckets$ .

A Kademlia possui quatro principais primitivas:

- PING - Verifica se o par está online;
- STORE - Instrui o par a armazenar uma dupla <chave, valor>;
- FIND\_NODE - Recebe *nodeID* de 160bits. O receptor envia lista dos  $k$  pares mais próximos ao *nodeID* em tuplas <IP, UDP port, ID>;
- FIND\_VALUE - Semelhante ao retorno de FIND\_NODE, porém o parâmetro é a chave de 160 bits. Se o par que receber a mensagem possuir a chave, retorna o valor correspondente, caso contrário, retorna os  $k$  pares mais próximos ao *nodeID* em tuplas <IP, UDP port, ID>.

Uma importante operação da Kademlia é o *lookup*. Um *lookup* é utilizado para encontrar os  $k$  pares mais próximos de uma chave ou de um outro par (representado pelo seu *nodeID*). A busca se inicia quando o par de origem seleciona os  $\alpha$  pares do seu *k-bucket* mais próximo e manda requisições simultâneas de FIND\_NODE ou FIND\_VALUE (caso queira descobrir os  $k$  pares mais próximos de uma chave). O parâmetro  $\alpha$  é um fator de paralelismo, que pelo padrão Kademlia é igual a 3. Quando esses pares respondem à consulta, o par de origem da busca atualiza os seus *k-buckets* e seleciona mais  $\alpha$  pares para repetir a consulta até que todos os pares do *k-bucket* mais próximo já tenham sido consultados e que o *k-bucket* não cresça mais. A inicialização de um par na rede Kademlia se utiliza do *lookup* para encontrar os seus vizinhos na primeira vez que entra na rede. Para entrar na rede Kademlia, um par precisa conhecer ao menos um par já pertencente à mesma. O par iniciante manda então uma mensagem de *lookup* colocando o próprio *nodeID* como parâmetro de busca. Assim, por meio do *lookup* ele popula os seus *k-buckets*.

Para manter a rede atualizada, o padrão da Kademlia estabelece que pares republiquem suas chaves a cada hora e pares originadores republiquem suas chaves a cada 24 horas. Um par que não realiza operações durante 24 horas é considerado expirado e pode ser removido dos *k-buckets* quando for necessário espaço para armazenar itens mais recentes.

### 5.1.2 Gerenciamento do *cluster*

O *cluster* do CPMIPv6 é uma DHT que preserva todas as propriedades da Kademlia cujos pares são os LMAs de cada domínio. O *cluster* armazena duplas <chave, valor> em cada LMA, onde:

- A chave é o prefixo de endereço do nó na rede de origem;



Tabela 5.2 – Armazenamento dos 128 *k*-buckets.

Pares com distância $1(2^0)$ a $2(2^1)$	Lista de $k$ LMAs
...	...
Pares com distância $(2^i)$ a $(2^{i+1})$	Lista de $k$ LMAs
Pares com distância $(2^{127})$ a $(2^{128})$	Lista de $k$ LMAs

- O valor é uma estrutura de dados que contém o endereço atual do MAG, do LMA, o identificador do nó móvel na rede de origem, o identificador do enlace entre o nó móvel e a rede de origem e o principal prefixo de endereço fornecido ao nó móvel pela sua rede de origem;
- O *nodeID* de um par no *cluster* é o endereço IP do LMA;
- As chaves e *nodeIDs* estão no espaço de endereços de 128 bits, como todo endereço IPv6 ao invés do endereço de 160 bits da implementação padrão da Kademlia.

Os pares <chave, valor> são armazenados nos LMAs cujos IPs são mais próximos ao prefixo do nó móvel. Essa proximidade é determinada pela operação de XOR, ou seja, não se trata de proximidade geográfica. Entretanto, os IPs com prefixos mais próximos tendem a pertencer à mesma operadora (AHLERS, 2012), de modo que seja mais provável o estabelecimento de rotas otimizadas entre eles.

Cada LMA no *cluster* precisa ter um armazenamento dos seus *k*-buckets. O *k*, que determina o tamanho máximo de uma vizinhança, é um parâmetro que depende do número médio de domínios que um nó pode cruzar durante uma sessão de comunicação. Esse valor pode ser obtido pelo projetista da rede por meio de estudo da velocidade média das vias por onde os domínios se expandem. Cada *bucket* armazena os identificadores dos *k* LMAs cuja distância para si é *n*, onde *n* varia de 1 a 128. A Tabela 5.2 apresenta um exemplo do armazenamento dos 128 *k*-buckets.

As primitivas da Kademlia PING, STORE, FIND\_NODE, FIND\_VALUE e o procedimento de busca funcionam da mesma forma prevista por esta DHT. O procedimento de entrada de um LMA no *cluster* é feito em tempo de implantação do sistema CPMIPv6, seguindo acordos entre as operadoras de telecomunicações envolvidas. É razoável considerar que os LMAs que farão parte do *cluster* sejam configurados dessa maneira, pois não se supõe a saída de um LMA, uma entidade fixa, durante a realização de chamadas. A configuração estática é uma premissa que simplifica questões de segurança e manutenção de consistência de dados na atualização das chaves. Essa configuração estática permite que domínios possam confiar uns nos outros, tornando desnecessária a repetição de procedimentos de autenticação ao se mudar de domínio. Desta forma, os serviços de autenticação dentro do domínio podem permanecer inalterados, como no PMIPv6.

Cada LMA possui informação de todos os MAGs conectados aos LMAs da vizinhança, graças às operações de armazenamento do *cluster* durante o registro inicial do nó móvel na rede. Essas informações são atualizadas durante o *handover* e serão úteis em *handovers* interdomínios futuros.

A escolha de uma arquitetura P2P com Kademlia para o *cluster* permite que:

- LMAs possam se comunicar sem adição de hierarquia entre eles;
- O gerenciamento de mobilidade ocorra sem necessidade de entidade centralizadora, o que evitará o surgimento de gargalos no núcleo da rede;
- Os MAGs possam abstrair a existência do *cluster*, para os quais o protocolo PMIPv6 funciona sem modificações;
- A difusão da mensagem **STORE** da Kademlia durante o *handover* torna desnecessária a consulta da informação do nó durante o *handover* seguinte; em uma eventualidade (ex: falha na difusão), o processo de *lookup* seria realizado em média em  $\log(n)$  passos.

O CPMIPv6 introduz novas primitivas **UPDATE** e **DELETE** para atualizar e remover as chaves, respectivamente. Essas primitivas, que seguem a mesma lógica do comando **STORE**, não pertencem à implementação original da Kademlia. A configuração estática inicial do *cluster* permite que o CPMIPv6 implemente essas primitivas de forma consistente, uma vez que os LMAs considerados vizinhos sempre serão os mesmos.

## 5.2 Sinalização do CPMIPv6

O CPMIPv6 possui a vantagem de prover mobilidade intradomínio e interdomínio com mudanças pontuais no fluxo de mensagens de controle do PMIPv6. Para a sinalização, o CPMIPv6 considera as seguintes premissas:

- Os MAGs são fisicamente alcançáveis a partir de um LMA de um domínio vizinho - para que estas entidades se comuniquem, é necessária a infraestrutura física mínima de enlaces de rede;
- Os LMAs funcionam como *gateways* para a Internet - assim como se considera no PMIPv6;
- Cada domínio possui seu próprio serviço de AAA - assim como se considera no PMIPv6.

A Figura 5.3 ilustra o fluxo de mensagens de sinalização no momento do registro de um nó móvel na rede. Ele envia a mensagem ICMP Rtr Sol solicitando ao MAG mais próximo uma rota de acesso à rede externa. O MAG primeiramente autentica o nó com o serviço de AAA de seu domínio. Uma vez que o nó é autenticado, o MAG envia uma mensagem de PBU ao seu LMA. Até esse momento, o fluxo de registro é idêntico ao do PMIPv6. A partir de então, o LMA envia o comando STORE derivado da Kademlia para armazenar essa associação no *cluster*. Assim, os LMAs em domínios vizinhos podem ter acesso ao mapeamento do nó ao seu MAG. A execução do comando STORE é assíncrona e não requer aguardar a resposta do *cluster* para o envio da mensagem de PBA para o MAG. O nó é registrado e o MAG pode finalmente anunciar a sua rota por meio da mensagem ICMP Rtr Adv para o nó.

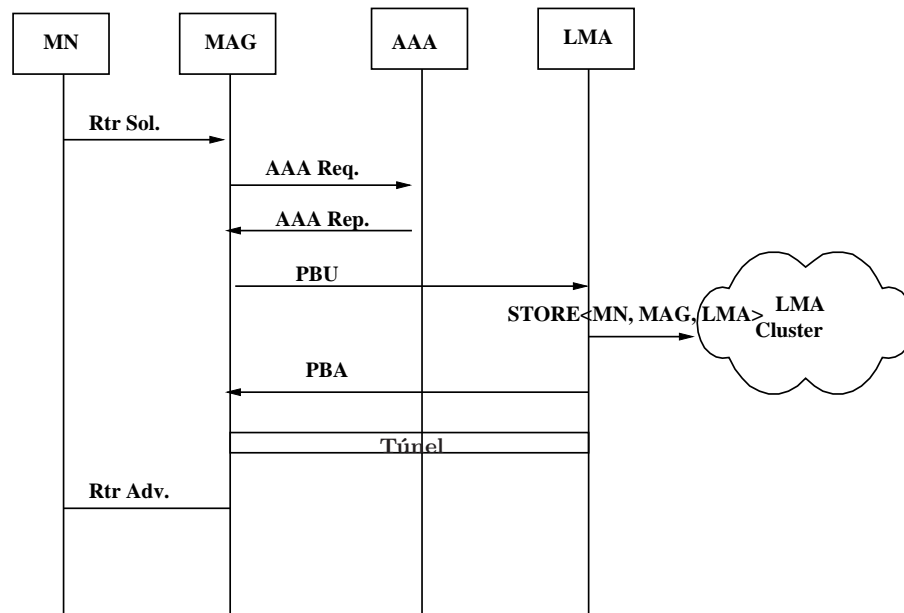


Figura 5.3. Registro no CPMIPv6.

A Figura 5.4 apresenta o processo de desregistro. O processo é inicialmente idêntico ao que ocorre no PMIPv6. Após detectar o evento de desligamento, o MAG envia a mensagem PBU ao LMA para o desregistro. O LMA aguarda um intervalo de tempo fixo denominado INITIAL\_BINDACK\_TIMEOUT (JOHNSON; PERKINS; ARKKO, 2004) para remover de fato a associação entre nó e MAG. A seguir, o LMA precisa enviar a mensagem DELETE ao *cluster*. Essa operação, assim como STORE, é assíncrona e independe da sinalização trocada entre LMA e MAG. Assim, o LMA pode enviar a mensagem PBA para o MAG e finalizar o processo de desregistro.

A Figura 5.5 apresenta o fluxo de sinalização para o *handover* intradomínio. O fluxo é similar àquele proposto pelo padrão PMIPv6, com a adição da mensagem UPDATE para atualizar o *cluster* após a associação com o novo MAG. É importante observar que, uma vez que o CPMIPv6 não remove nenhum tratamento de sinalização do PMIPv6, o sistema pode conviver com entidades legadas. No caso de um LMA legado, ele não

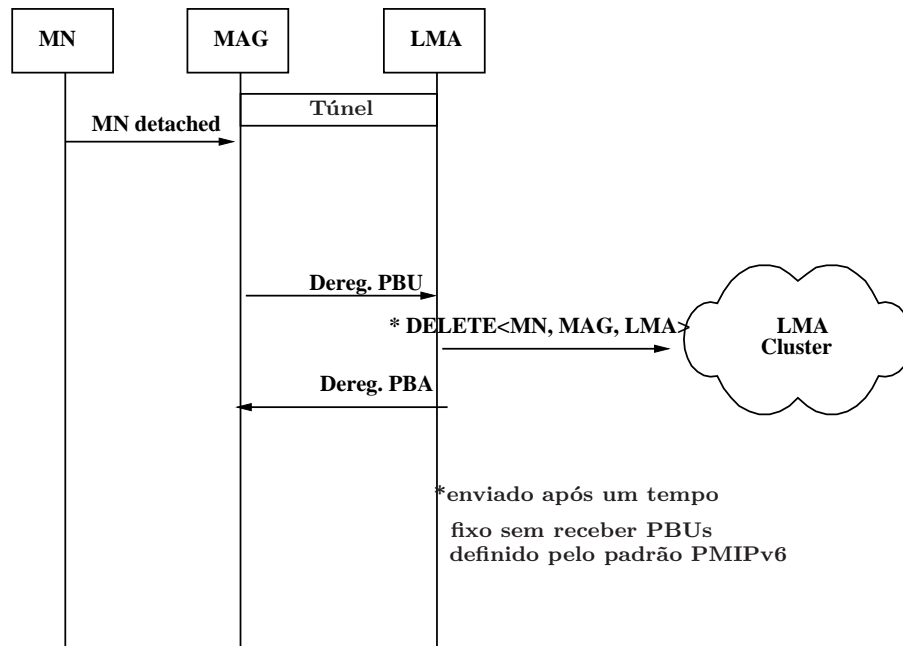


Figura 5.4. Desregistro no CPMIPv6.

pertenceria ao *cluster* e não realizaria *handover* interdomínio e sim apenas intradomínio, que é o esperado no PMIPv6.

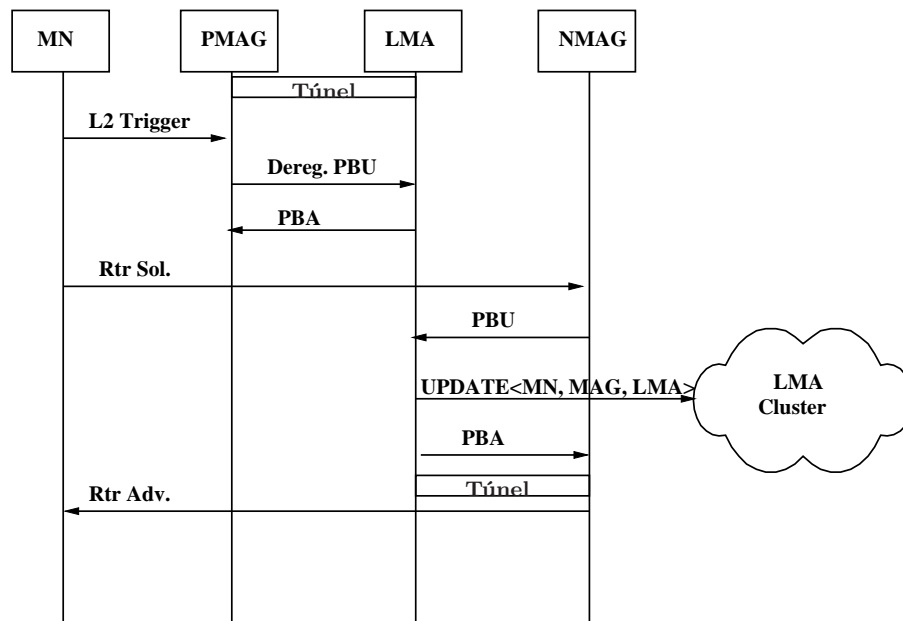


Figura 5.5. Handover intradomínio no CPMIPv6.

A Figura 5.6 apresenta a sinalização para o *handover* interdomínio. O nó envia a mensagem PBU para o PMAG para realizar o desregistro. O PLMA aguarda durante o intervalo `INITIAL_BINDACK_TIMEOUT` para realizar a remoção definitiva do registro. Quando o nó entra no novo domínio e se comunica com o NMAG, envia a mensagem `PBUNoProf` para o novo LMA (NLMA), pois não identifica o nó como cadastrado em seu perfil. O NLMA encontra em seu registro a antiga associação do nó com o PMAG e o PLMA,

identifica-o como nó estrangeiro e envia as informações desse nó para o NMAG por meio da mensagem PBAProf. O NLMA então envia a mensagem PBUInterdomain para o PLMA informando que o nó está em um novo domínio. Assim, o PLMA desiste de remover o registro e o atualiza. Uma premissa do CPMIPv6 é que essas mensagens são trocadas em um intervalo inferior a `INITIAL_BINDACK_TIMEOUT`. Dependendo das características do cluster como atraso fim a fim pode ser necessário realizar um ajuste deste valor. Finalmente, o PLMA atualiza o *cluster* com a nova associação por meio da primitiva `UPDATE` e responde com `PBAInterdomain` para o PLMA. O PLMA altera as configurações de seu túnel para contactar com o NMAG e o processo é finalizado. É importante notar que é o PLMA e não o NLMA que cria o túnel com o NMAG. O PLMA é mantido no caminho dos dados até o fim da sessão, de modo a simplificar a transferência de contexto para o novo domínio.

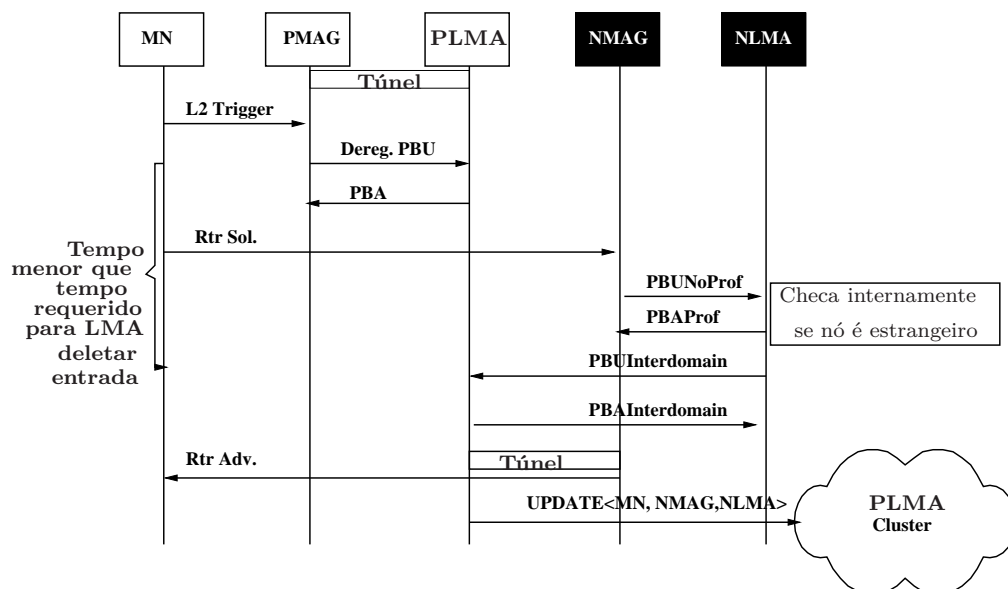


Figura 5.6. Handover interdomínio no CPMIPv6.

O maior ganho do CPMIPv6 vem da antecipação dos LMAs sobre o conhecimento de informações dos nós móveis, a serem usadas no próximo *handover*. As mensagens trocadas no *cluster* não adicionam custo para o handover em curso, sendo assíncronas. A vantagem do uso de mensagens assíncronas reside no fato do MAG não precisar aguardar a finalização de procedimentos nos pares no *cluster*, que ficam no núcleo da rede e poderiam se tornar gargalo para a latência do handover. Os MAGs assim podem abstrair a existência do *cluster*, para os quais o protocolo PMIPv6 funciona sem modificações. Assim, é esperado que o custo e a latência de *handover* sejam menores do que nas propostas do Estado da Arte.

Tabela 5.3 – Abordagens para mobilidade IP Interdomínio (revisitado).

Solução	Número de mensagens adicionais no HO Interdomínio	Número de túneis extras	Manutenção da infraestrutura	Compatibilidade com sistema legado
Sem otimização	8	1	Sim	Sim
I-PMIP	6	1	Não	Não
EIPMH	6	2	Não	Não
No-Gap	4	1	Não	Sim
CPMIPv6	4	0	Sim	Sim

### 5.3 Conclusão

Este capítulo apresentou o CPMIPv6, uma abordagem para *handover* interdomínio e intradomínio aplicável a sistemas PMIPv6. A Tabela 5.3 é uma versão revisitada da Tabela 4.1, incluindo-se o CPMIPv6. O CPMIPv6 gera mudanças mínimas na sinalização do PMIPv6, de modo que o conhecimento sobre *handover* interdomínio fica restrito a um *cluster* de LMAs e transparentes aos MAGs. Essa transparência faz com que a mobilidade intradomínio não seja afetada do ponto de vista dos MAGs. O tratamento de mensagens do protocolo original PMIPv6 não é afetado, sendo o CPMIPv6 assim compatível com sistemas PMIPv6 legados. O CPMIPv6 provê gerenciamento de mobilidade distribuído e antecipa aos LMAs informações de nós móveis para *handovers* futuros por meio de mensagens assíncronas. Além disso, possui as características de não introduzir pontos únicos de falha e não requerer tunelamento extra, o que evita um *overhead* adicional de encapsulamento de pacotes. Desta forma, é esperado que o custo e a latência de *handover* sejam menores ou equiparáveis às propostas estudadas no Estado da Arte. Com vistas a confirmar essa conclusão, faz-se necessária avaliação de desempenho do CPMIPv6 comparado às soluções do Estado da Arte.

## 6 Avaliação de Desempenho

Este capítulo apresenta uma avaliação de desempenho do CPMIPv6 comparando-o com as abordagens para *handover* interdomínio apresentadas no Capítulo 4. O CPMIPv6 é comparado com as abordagens No-Gap (JOE; LEE, 2012), I-PMIP (NEUMANN et al., 2009), EIPMH (ZHONG et al., 2010) e a abordagem sem otimização (PARK E. LEE; NOH; KIM, 2010). Em um primeiro momento, um subconjunto dessas abordagens são avaliadas em um cenário básico. O cenário básico, além de refletir situações de veículos percorrendo trajetos locais, permite o acompanhamento simplificado da troca de mensagens de sinalização de *handover*. Posteriormente, um cenário mais amplo considerando alta densidade de usuários é avaliado, refletindo um tráfego mais intenso e percursos mais longos. São utilizadas duas metodologias para avaliação: simulação e modelagem. A simulação e a modelagem são empregadas no cenário básico e o cenário amplo é avaliado por meio da modelagem, que permite aumentar a escala dos experimentos de forma mais simplificada que no simulador. Uma vez que o objeto de estudo neste experimento é o *handover* na camada de rede, nenhum esquema de VHO é implementado na camada de enlace em qualquer das metodologias. Assim, no *handover* na camada de enlace é considerado que o nó se desconecta de uma rede e em seguida se registra em outra.

Nas próximas seções são apresentados cenários estudados, os detalhes de cada metodologia e os resultados obtidos.

### 6.1 Cenários

Esta seção apresenta os dois tipos de cenários empregados nos experimentos: cenário básico e cenário amplo.

#### 6.1.1 Cenário básico

A Figura 6.1 apresenta o cenário básico. Seu objetivo é representar casos em que veículos com dispositivos móveis embutidos percorrem curtas distâncias, como quarteirões e cruzamentos. Duas células são consideradas, uma LTE e outra IEEE 802.11g. Cada célula forma um domínio, cada um gerenciado por um LMA. Além disso, cada célula possui um MAG. Na rede cabeada, é esperada uma largura de banda de 100 Mbps.

Considera-se que todos os nós móveis estão realizando uma chamada VoIP para um mesmo nó remoto não-móvel durante um tempo de 300 s, como expectadores que interagem na Internet com um apresentador durante uma enquete. O tamanho do pa-

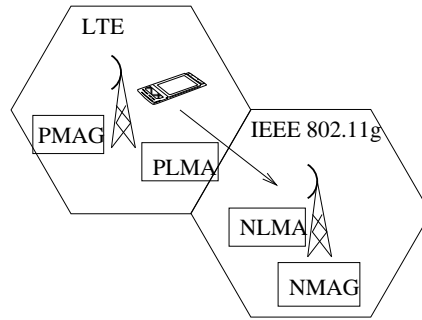


Figura 6.1. Cenário básico.

cote de dados é de 250 *bytes* (CHU et al., 2005) e o tamanho médio das mensagens de sinalização considerado é de 160 *bytes*. Os nós se encontram inicialmente na rede LTE e eventualmente se movimentam de maneira a cruzar o domínio chegando à rede wifi e assim realizar o *handover* interdomínio. As velocidades podem variar entre 0 e 90 Km/h, com valor médio de 60 Km/h. A distância de um MAG a um LMA e entre LMAs é de um salto.

As métricas avaliadas são custo de sinalização, latência de *handover* e *goodput*. O custo de sinalização é o número de mensagens de sinalização trocadas durante o *handover*; a latência é medida como o tempo decorrido entre o envio da primeira e a última sinalização de *handover*; o *goodput* é a medida do tráfego útil em bytes por segundo durante a transmissão.

### 6.1.2 Cenário amplo

Neste cenário, considera-se o modelo hexagonal de célula, sendo cada célula uma subrede do domínio. Um domínio é formado por sete subredes, em um arranjo como o apresentado na Figura 6.2. Assim como no cenário básico, cada subrede é coordenada por um MAG e há um LMA para cada domínio. Considera-se que cada subrede possui uma área de aproximadamente 1,87 km<sup>2</sup>, ou com 5 km de perímetro (ALEKSICA et al., 2013). A densidade de concentração dos nós é de 200 nós/km<sup>2</sup> (TAGHIZADEH et al., 2012). Este cenário é mais adequado para refletir tráfego e velocidades em grandes capitais.

A Figura 6.3 mostra duas células vizinhas deste cenário, incluindo entidades de todas as propostas, inclusive CPMIPv6. A distância em saltos entre as entidades é baseada no modelo de Makaya e Pierre (MAKAYA; PIERRE, 2008).

Na rede sem fio, considera-se o padrão IEEE 802.11g. Na rede cabeada, a largura de banda é de 100 Mbps, assim como no cenário básico.

O parâmetro  $k$  de Kademia usado no CPMIPv6 é 10. Esse valor se baseia em um cenário onde os nós se deslocam a uma velocidade média de 15 m/s (60 km/h) e, assim, podem cruzar em torno de 10 domínios. A comunicação entre os nós móveis é



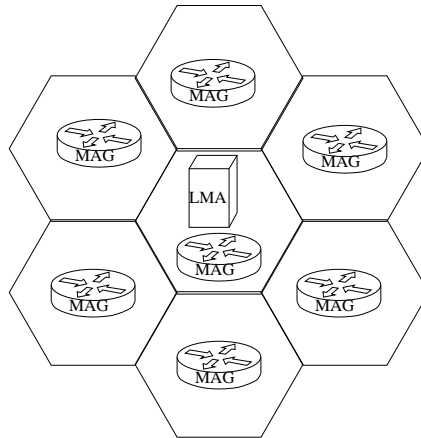


Figura 6.2. Um domínio com sete subredes.

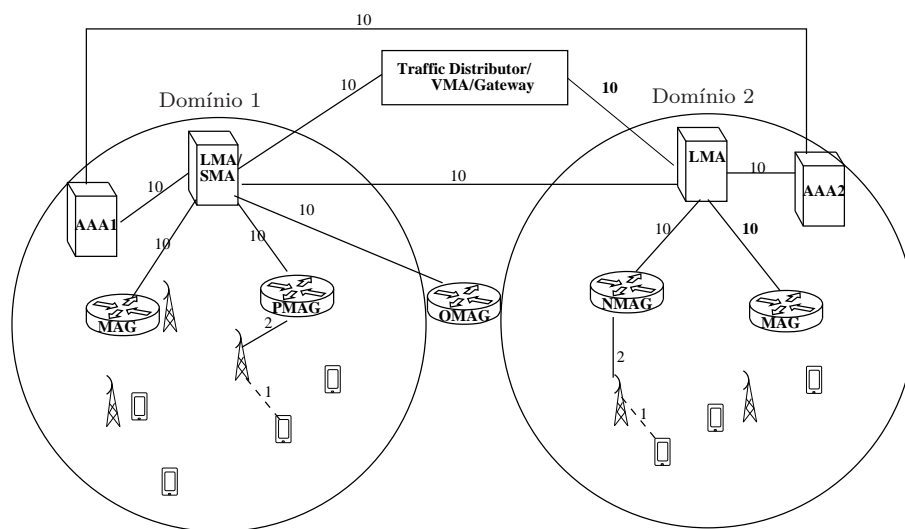


Figura 6.3. Topologia e distâncias em saltos.

ponto a ponto, como em uma chamada VoIP. O aplicativo *Skype* é tomado como referência para parâmetros de sessão, por ser um dos aplicativos de comunicação mais populares do mundo com aproximadamente 500 milhões de usuários (MAJEED et al., 2015). Como no cenário básico, o tamanho do pacote de dados é de 250 *bytes* (CHU et al., 2005) e o tamanho médio das mensagens de sinalização é de 160 *bytes*. A duração média da sessão é de 13 minutos uma vez que o baixo custo de chamadas pelo *Skype* faz com que as chamadas tenham duração maior que aquelas iniciadas por operadoras de telecomunicações (GUHA; DASWANI; JAIN, 2006). As métricas avaliadas são as mesmas do cenário básico: custo de sinalização, latência de *handover* e *goodput*. Além destas métricas, uma vez que este cenário tem maior intensidade de tráfego, a quantidade de pacotes perdidos durante o *handover* também é avaliado.

## 6.2 Metodologias

Esta seção apresenta detalhes sobre os dois tipos de metodologias utilizados para a avaliação: simulação e modelagem.

### 6.2.1 Simulação

Nessa metodologia, o simulador de eventos discretos *Network Simulator* - NS-3 (NS-3, 2016) é usado para implementação de protocolos de *handover* interdomínio e intradomínio. A versão do NS-3 utilizada é a 3.19 com um *patch* adicional que implementa o protocolo PMIPv6 (CHOI et al., 2010) (TRUNG et al., 2011).

Para simulação de mobilidade no NS-3, é importante a escolha de um modelo que se aproxime ao máximo dos padrões de mobilidade veiculares. Modelos de mobilidade sintéticos são adequados à modelagem matemática e tendem a ser escaláveis e a possuir um custo baixo de implantação. Porém, os modelos disponíveis no NS-3 não são adequados para simulação de mobilidade veicular (BATBYAL; BHAUMIK, 2015). Assim, para o NS-3, optou-se pelo uso de *modelos baseados em traces*, que permitem uma proximidade maior com o mundo real (NAUMOV; BAUMANN; GROSS, 2006). Uma desvantagem é a dificuldade de variação na escala dos cenários, mais facilmente obtida com os *modelos sintéticos*. Os *traces* utilizados são arquivos no formato texto com múltiplas linhas que indicam o instante de tempo na simulação em que o deslocamento deve se iniciar, o identificador do nó móvel, sua velocidade e coordenadas da posição de destino. Esse formato é o mesmo utilizado pelo simulador antecessor NS-2 (NS-2, 2015). No contexto da simulação com NS-3, o arquivo de *trace* é interpretado por meio da classe `Ns2MobilityHelper`.

O custo de sinalização, latência de *handover* e *goodput* na simulação são calculados da seguinte forma:

- O custo de sinalização é medido como contagem do total de mensagens de sinalização relacionadas ao *handover* intradomínio e interdomínio;
- A latência é medida como o tempo decorrido entre o envio da primeira mensagem de `Proxy Binding Update` e a última mensagem de resposta `Proxy Binding Acknowledgment` (ou sinalização correspondente) processado no MAG que detecta o *handover*;
- O *goodput* é medido em *bytes*/segundo como o número de *bytes* recebidos com sucesso na camada de aplicação, dividido pelo tempo decorrido de simulação.

## 6.2.2 Modelagem

A modelagem adotada nesta tese, descrita nas próximas seções é baseada em equações, parâmetros e métricas tiradas de *frameworks* de avaliação de protocolos de mobilidade baseados em IPv6 propostos e testados por Taghizadeh *et al.* (TAGHIZADEH *et al.*, 2012), McNair, Akyldiz e Bender *et al.* (MCNAIR; AKYILDIZ; BENDER, 2001) e Makaya e Pierre *et al.* (MAKAYA; PIERRE, 2008). Ela permite considerar cenários mais amplos de forma mais simplificada que no simulador NS-3.

A presente modelagem considera o modelo de mobilidade *Fluid-Flow* (ZHANG; PIERRE, 2008). O *Fluid-Flow* descreve padrões de mobilidade veiculares modelando o movimento de nós como um fluxo de fluido contínuo. Tem como parâmetros a velocidade média ( $v$ ), a área de cobertura e perímetro do domínio ( $A_D$  e  $L_D$ , respectivamente) e a área de cobertura e perímetro da subrede ( $A_M$  e  $L_M$ , respectivamente). A direção do movimento é uniformemente distribuída em um intervalo de 0 a  $2\pi$ . Nesse modelo, a taxa de cruzamento de domínios ( $\mu_D$ ) é equivalente à taxa de *handovers* interdomínio ( $Ng$ ). A taxa de *handovers* intradomínio ( $Nl$ ) é a diferença entre a taxa de cruzamento de subredes ( $\mu_M$ ) e a taxa de cruzamento de domínios ( $\mu_D$ ). As equações a seguir ilustram as taxas de *handover* interdomínio e intradomínio. Quanto maior a velocidade, maior será a taxa de *handover*. A área de cobertura é inversamente proporcional a essa taxa.

$$\mu_M = \frac{vL_M}{\pi A_M} \quad (6.1)$$

$$Ng = \mu_D = \frac{vL_D}{\pi A_D} \quad (6.2)$$

$$Nl = \mu_M - \mu_D \quad (6.3)$$

O parâmetro *Session-to-Mobility Ratio* (SMR) descreve a mobilidade dos nós, relacionando a taxa de chegada de sessões ( $\lambda_S$ ) com a taxa de cruzamento de subrede ( $\mu_M$ ). Caso o SMR se aproxime de zero, a mobilidade é considerada alta. Quanto maior o valor do SMR, mais estáticos são os nós:

$$SMR = \frac{\lambda_S}{\mu_M}. \quad (6.4)$$

No presente modelo, a equação do custo de sinalização ( $C_{x-y}$ ) para cada mensagem trocada entre duas entidades  $x$  e  $y$  também inclui a distância em saltos entre as entidades envolvidas ( $H_{(x-y)}$ ), o meio de transmissão e o custo de processamento no receptor ( $PC_y$ ) (TAGHIZADEH *et al.*, 2012).

$$C_{x-y} = \alpha(H_{(x-y)}) + \beta + PC_y, \text{ onde} \quad (6.5)$$

$$PC_y = \varsigma \log N_{MN}^y. \quad (6.6)$$

Os parâmetros  $\alpha$  e  $\beta$  representam os coeficientes de unidades de custo de transmissão em mensagens/salto nos meios cabeado e sem fio, respectivamente. Caso nenhuma das entidades envolvidas seja móvel,  $\beta$  tem valor zero. O custo de processamento ( $PC_y$ ) é medido com base no número de registros de nós armazenados e uma constante normalizadora equivalente à alocação de banda ( $\varsigma$ ). Caso a mensagem de sinalização não implique busca em repositório,  $PC_y$  pode ser considerado zero. O custo de sinalização em um *handover* é o somatório dos custos de todas as mensagens de sinalização usadas pela abordagem avaliada.

A latência de *handover* é o somatório das latências de cada mensagem de sinalização trocadas entre duas entidades  $x$  e  $y$  ( $T_{x-y}$ ). A equação da latência para cada sinalização é dada por (TAGHIZADEH et al., 2012):

$$T_{x-y} = \frac{1+q}{1-q} \left( \frac{M_{size}}{B_{wl}} + L_{wl} \right) + H_{x-y} \left( \frac{M_{size}}{B_w} + L_w + T_q \right). \quad (6.7)$$

A primeira parte da soma é o *overhead* do meio sem fio e é desconsiderada caso a mensagem não envolva entidades móveis. O parâmetro  $q$  é a probabilidade de falha no enlace sem fio. Considera-se que uma falha no enlace sem fio implica retransmissões nessa camada e desconsidera-se a questão do descarte de conteúdo por *timeout*. O parâmetro  $M_{size}$  é o tamanho médio de uma mensagem e  $B_{wl}$  e  $B_w$  são as larguras de banda sem fio e com fio, respectivamente. Os parâmetros  $L_{wl}$  e  $L_w$  são os atrasos de propagação no meio sem fio e com fio. Finalmente,  $T_q$  é o atraso médio de fila em cada roteador.

O custo de sinalização médio de um *handover* é calculado como uma média ponderada dos custos de *handover* intradomínio e interdomínio. De forma análoga é encontrada a latência média do *handover*:

$$custo = \frac{custo \ intradom \times Nl + custo \ interdom \times Ng}{Nl + Ng}. \quad (6.8)$$

$$latência = \frac{latência \ intradom \times Nl + latência \ interdom \times Ng}{Nl + Ng}. \quad (6.9)$$

O custo de *handover* durante uma sessão inteira é calculado com base no número médio de *handovers* realizados na sessão:

$$custo \ na \ sessão = custo \ interdom \times Ng \times duração \ sessão. \quad (6.10)$$

A perda média de pacotes em um *handover* é o número médio de pacotes que deixam de ser enviados/recebidos durante o *handover* (TAGHIZADEH et al., 2012). É, portanto, o produto entre a latência de *handover* e a taxa de chegada de pacotes ( $\lambda_p$ ):

$$PL = T\lambda_p. \quad (6.11)$$

O *goodput* neste modelo relaciona o tráfego útil de dados com o tráfego total durante uma sessão (TOT). A equação a seguir, que mede o *goodput* em *bytes*/segundo, é uma adaptação da equação que calcula o *goodput* como valor absoluto em *bytes* (TAGHIZADEH et al., 2012):

$$Goodput = \frac{TOT - (P_{size} \times PL_{sess\tilde{a}o} + TOT \times PD)}{dura\tilde{c}\tilde{a}o\ da\ sess\tilde{a}o}, \text{ onde} \quad (6.12)$$

$$TOT = dura\tilde{c}\tilde{a}o\ da\ sess\tilde{a}o \times \lambda_p \times P_{size}, \quad (6.13)$$

$$PD = \frac{40 \times H_{t\acute{u}nel}}{(40 + P_{size}) \times H_{MN-CN}}. \quad (6.14)$$

O fator *PD* é o *overhead* da entrega de pacotes. O PD é o custo do encapsulamento de cabeçalhos IP (representados como os 40 *bytes* na equação) em túneis ao longo do caminho entre o nó móvel e seu correspondente. Os parâmetros para se determinar o PD são o tamanho do pacote IP ( $P_{size}$ ) e o tamanho do túnel em saltos ( $H_{t\acute{u}nel}$ ).

A Tabela 6.1 resume o fluxo de mensagens de sinalização trocadas durante o *handover* para cada abordagem discutida na Seção 4.3.1. Conforme afirmado anteriormente, custo do *handover* é o somatório dos custos de cada uma dessas sinalizações. O mesmo é feito com relação à latência. As sinalizações em **negrito** são trocadas apenas durante o *handover* interdomínio. As setas duplas indicam que se trata de duas sinalizações, uma de requisição e outra de resposta. As mensagens assíncronas do CPMIPv6, como **STORE** não são incluídas na tabela, uma vez que são enviadas de forma independente do andamento do *handover*.

## 6.3 Resultados

Esta seção apresenta uma análise dos resultados em dois experimentos: um considerando o cenário básico e outro que considera o cenário amplo.

### 6.3.1 Experimento 1: Cenário básico

Nesta primeira etapa, são realizados experimentos sobre o CPMIPv6 e um subconjunto das abordagens apresentadas na Seção 4.3.1, formado pelas abordagens No-Gap e I-PMIP. Ambas foram escolhidas por possuírem maior probabilidade de se equipararem

Tabela 6.1 – Mensagens de cada esquema de *handover* interdomínio.

Esquema	Mensagens de Handover
CPMIPv6	DeReg (PMAG→LMA) <b>PBUNo</b> (NMAG↔NLMA) <b>PBUI</b> (NLMA↔LMA) UpdateAsync (LMA→Cluster) AddConf (MN↔NMAG)
No-Gap	PBU (OMAG↔PLMA) PBU (OMAG↔NLMA) FBD (NLMA↔NGW) PoInc (NLMA↔NPS) AddConf (MN↔NMAG)
I-PMIP	DeReg (PMAG→SMA) PoInc (NMAG↔PS) PBU (NMAG↔NLMA) AddConf (MN↔NMAG) PBU (NLMA↔VMA) PBU (VMA↔SMA)
EIPMH	DeReg (PMAG→LMA) QueryMN (NFLMA↔PFLMA) PBU (NMAG↔NFLMA) PBU (NFLMA↔PFLMA) <b>PBU</b> (NFLMA↔TD) AddConf (MN↔NMAG)
Sem otimização	DeReg (MAG→LMAh) <b>PoInc</b> (MN↔NMAGv) PoInc (MAGv↔NAAAv) <b>PoInc</b> (AAAv↔NAAAh) PBU (MAGv↔NLMAv) <b>PBU</b> (LMAv↔NLMAh) AddConf (MN↔NMAGv)

ao CPMIPv6 em termos de sinalização e número de túneis extras, conforme mostrou a Tabela 5.3.

Nesta etapa o desempenho é avaliado por meio de simulação com o NS-3. Os resultados são validados com resultados obtidos pelas equações da modelagem descritos na Seção 6.2.2.

Para a simulação, módulos para CPMIPv6, No-Gap e I-PMIP foram criados. O detalhamento de cada módulo pode ser visto nos Apêndices C, D e E. Para o funcionamento do CPMIPv6 no simulador, um módulo Kademia foi criado, cuja implementação é descrita no Apêndice B. A camada de aplicação é modelada como uma aplicação VoIP utilizando a classe `OnOffApplication` disponível na distribuição do NS-3 executada so-

Tabela 6.2 – Amostras de trace de tráfego veicular.

Número do <i>trace</i>	Quantidade de nós
0	37
1	26
2	17
3	11
4	12
5	15
6	17
7	17
8	16
9	12

bre o protocolo de transporte UDP, geralmente utilizado em aplicações multimídia. Os principais parâmetros da aplicação são o período de atividade, período de silêncio, taxa de envio e tamanho do pacote. Os períodos de atividade e silêncio são modelados como variáveis aleatórias com distribuição exponencial com duração média de 0,352 s e 0,65 s, respectivamente (HASSAN; GARCIA; BRUN, 2005).

Os traces de movimento utilizados foram retirados do trabalho de Naumov, Baumann e Gross (NAUMOV; BAUMANN; GROSS, 2006), que adaptaram rastreamentos de tráfego coletados na cidade de Zurique, Suíça, com auxílio de um simulador multiagente de tráfego microscópico (*Multi-agent Microscopic Traffic Simulator* – MMTS). São disponibilizados 10 arquivos de *trace* que descrevem o tráfego dos nós móveis, cuja quantidade varia entre eles de acordo com a Tabela 6.2. As velocidades variam entre 0 e 90km/h para um mesmo veículo. Os *traces* consideram que os nós se movem durante 300 s de simulação. O *trace* número 2 foi descartado pelo fato das movimentações dos nós não terem causado *handover*. Os *traces* número 4 e 7 foram descartados por apresentarem resultados muito próximos aos *traces* 9 e 6, respectivamente.

A quantidade de nós definida pelos arquivos de *traces* não foram suficientes para saturar o núcleo da rede de modo a gerar perdas significativas.

O custo, a latência e o *goodput* são medidos para cada amostra do arquivo de *trace*. Desta forma, não é esperada a visualização de intervalos de confiança, pois não há arquivos de *trace* suficientes com a mesma quantidade de nós de modo a se realizar cálculos estatísticos em um mesmo ponto. Os gráficos também apresentam os valores correspondentes às equações na modelagem descritas na Seção 6.2.2, para fins de validação.

A Figura 6.4 apresenta o custo de sinalização em função do número de nós móveis. É esperado que, nesse caso, o custo total aumente à medida que mais nós se movem e buscam realizar o *handover*. Confirma-se que o CPMIPv6 possui o custo mais baixo por prover menos modificação na sinalização do protocolo PMIPv6 que as demais abordagens,

que requerem troca de mensagens síncronas com entidades adicionais (o *gateway*, no caso do No-Gap e o VMA no caso do I-PMIP). No caso do CPMIPv6, o MAG não precisa aguardar a atualização do *cluster* para finalizar o *handover*; na verdade, ele sequer tem conhecimento da existência do *cluster*. O I-PMIP e o No-Gap apresentam custos semelhantes. Nesse cenário CPMIPv6 um custo ao menos 12% menor que o I-PMIP e o No-Gap. Nos pontos que descrevem os resultados correspondentes ao uso das equações da modelagem, observa-se que o custo é um pouco maior que na simulação pelo fato de incluir o custo de processamento, porém, é possível notar que os valores ainda estão próximos.

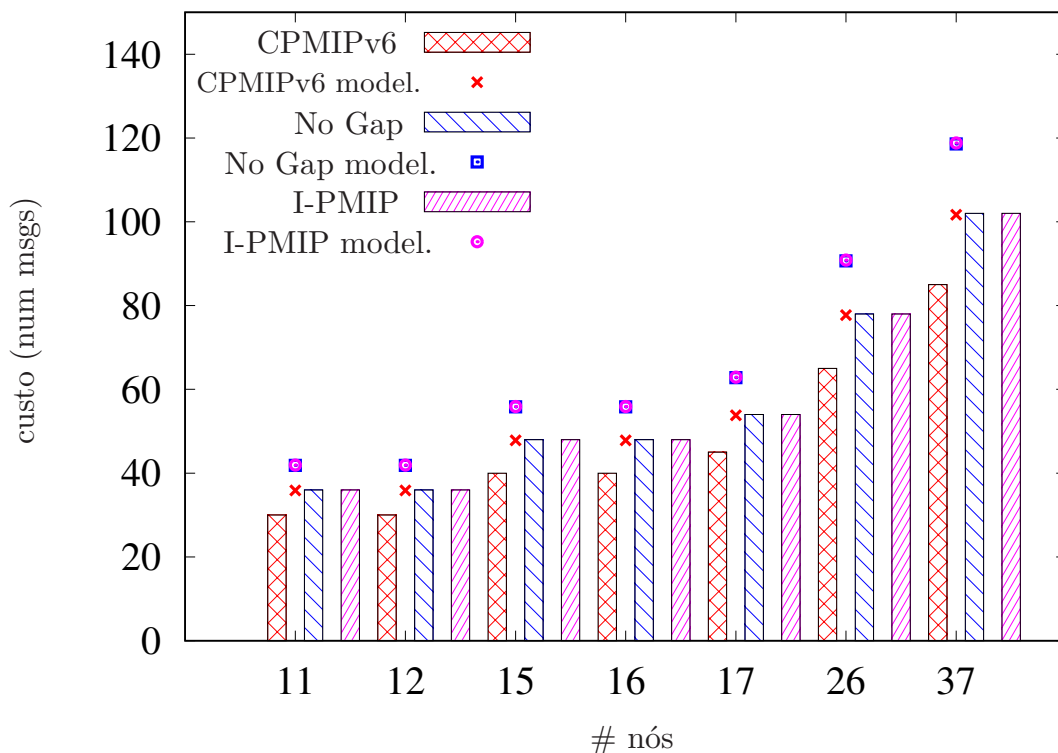


Figura 6.4. Custo de sinalização *versus* número de nós móveis.

A Figura 6.5 apresenta a latência de *handover* interdomínio em função da quantidade de nós móveis. É possível observar que a latência pouco se altera com o aumento do número de nós. Isso ocorre devido às características do arquivo de *trace*, onde os nós raramente realizam *handovers* simultaneamente. Esse fenômeno inclusive faz com que a perda de pacotes durante o *handover* seja praticamente desprezível. O CPMIPv6 apresenta a menor latência. Aqui é possível confirmar o efeito do envio de atualizações assíncronas para o *cluster*. O fluxo de sinalização do *cluster* é mantido fora da rota utilizada pelas entidades locais do domínio. Observa-se que o mesmo não ocorre com o No-Gap e I-PMIP, que comprometem a característica de tráfego local do PMIPv6. O CPMIPv6 altera minimamente a sinalização no *handover* intradomínio, bem como registro e saída da rede, de modo a ter uma latência menor nesse caso que no *handover* interdomínio, fazendo com que a latência média seja ao menos 25% menor que no No-Gap e 33% inferior à latên-



cia do I-PMIP. A latência no No-Gap é menor que no I-PMIP pelo fato da sinalização enviada aos dois LMAs pelo OMAG ocorrerem simultaneamente, diminuindo o impacto dessa sinalização adicional na latência do *handover*. Observa-se que os valores são muito próximos daqueles obtidos via modelagem.

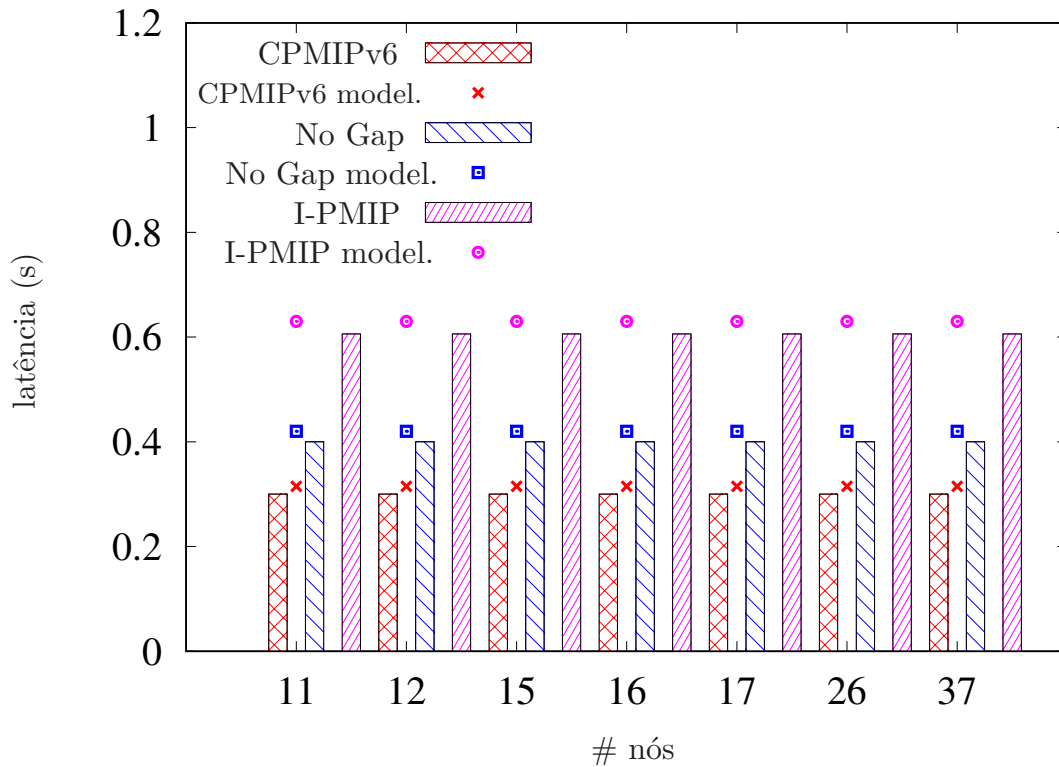


Figura 6.5. Latência média de *handover* versus número de nós móveis.

A Figura 6.6 apresenta o *goodput* em função da quantidade de nós móveis. Devido às características da aplicação de VoIP onde os vários nós móveis estão conectados a um mesmo nó remoto fixo, é esperado que o tráfego útil recebido no nó fixo aumente à medida que interage com mais nós móveis. Observa-se que o CPMIPv6 tem *goodput* em média 17% maior que no No-Gap e no I-PMIP por não gerar um *overhead* de tunelamento adicional. O I-PMIP e o No-Gap alternam-se com *goodput* pior de modo que não há maiores diferenças entre eles. Os valores calculados com a fórmula de *goodput* da modelagem apresentam resultados semelhantes.

### 6.3.2 Experimento 2: Cenário amplo

Uma vez observados os ganhos de desempenho do CPMIPv6 frente à outras duas abordagens em um cenário básico, pode-se realizar experimentos em uma escala maior, envolvendo as demais abordagens. Para tal, é usada a modelagem descrita na Seção 6.2.2, que permite considerar um número maior de nós e subredes de forma mais simplificada que a simulação com o NS-3.

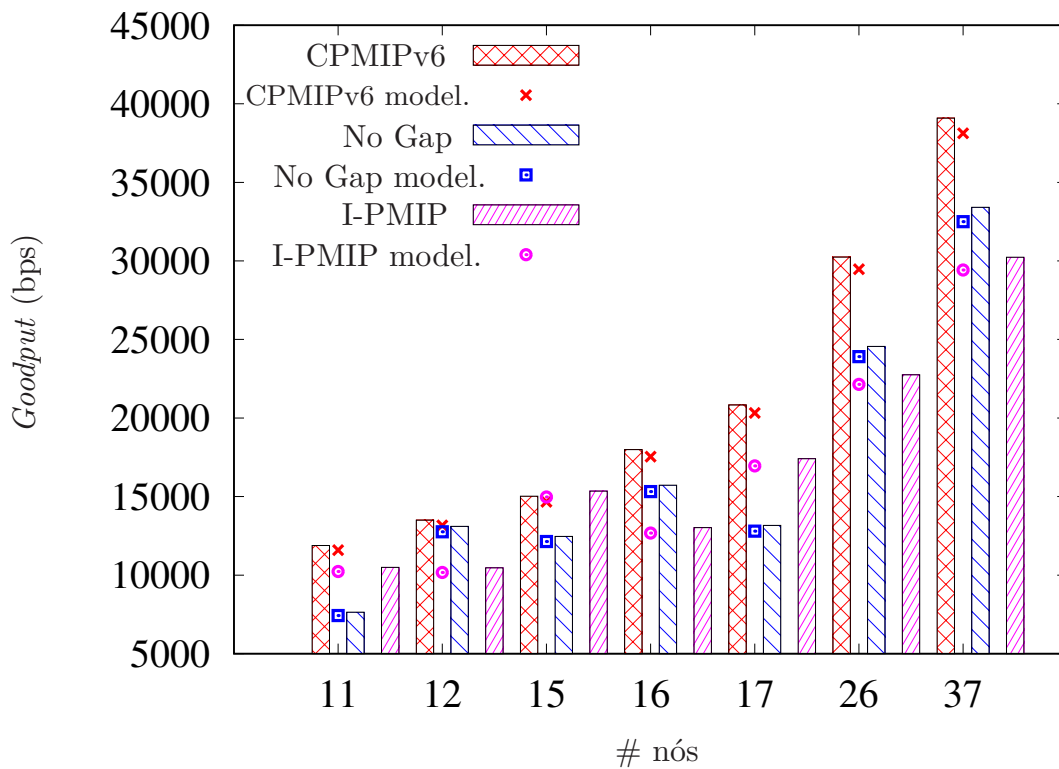
Figura 6.6. *Goodput* versus número de nós móveis.

Tabela 6.3 – Parâmetros de avaliação.

Parâmetro	Valor padrão	Intervalo
Velocidade ( $v$ )	15 m/s	5 - 40 m/s
Prob. falha no enlace sem fio ( $q$ )	0,5	0 - 0,8
Fator de custo no meio cabeado ( $\alpha$ )	1 mensagens/salto	-
Fator de custo no meio sem fio ( $\beta$ )	10 mensagens/salto	1 - 10
Fator de custo de processamento ( $\zeta$ )	0,01	-
Tempo de fila ( $T_q$ )	5 ms	-
Tempo de permanência na subrede ( $1/\mu_M$ )	300 s	-
Atraso de propagação no meio com fio ( $L_w$ )	0,72 $\mu$ s	-
Atraso de propagação no meio sem fio ( $L_{wl}$ )	10 ms	-
Taxa de chegada de pacotes ( $\lambda_p$ )	13 pacotes/s (30kbps)	-
Taxa de chegada de sessões ( $\lambda_S$ )	0,001 sessões/s	-

Nesta seção são apresentados gráficos das métricas de custo de sinalização (Eqs. 6.6, 6.9 e 6.10), latência (Eqs. 6.7 e 6.9), perda de pacotes (Eq. 6.11) e *goodput* (Eq. 6.14) comparando-se o CPMIPv6 com os esquemas No-Gap, I-PMIP, EIPMH, e o esquema sem otimização. As equações foram implementadas na linguagem C++ e validadas por meio de comparações com os gráficos obtidos por Taghizadeh *et al.* (TAGHIZADEH *et al.*, 2012).

A Tabela 6.3 apresenta os parâmetros de modelagem. Eles são baseados nos trabalhos de Taghizadeh *et al.* (TAGHIZADEH *et al.*, 2012) e Chu *et al.* (CHU *et al.*, 2005).

A Figura 6.7 apresenta os resultados do custo médio de um *handover* em função do fator  $\beta$ . O aumento de  $\beta$  se reflete diretamente no custo, aumentando-o para todos os esquemas. É possível observar que o EIPMH tem o maior custo, uma vez que há mais sinalização devido à existência do *Traffic Distributor*. O CPMIPv6 tem o custo mais baixo devido ao menor número de mensagens trocadas. A presença de um *cluster* que mantenha informações de domínio proativamente no CPMIPv6 simplifica a comunicação no momento do *handover* e faz com que menos mensagens sejam trocadas. O LMA já possui a informação de potenciais nós visitantes (obtida pelas difusões assíncronas no *cluster* a cada *handover*) e não precisa consultar o *cluster* em tempo de *handover*. O CPMIPv6 é no mínimo 21% menos custoso que os esquemas sem otimização I-PMIP, e No-Gap, que têm custos similares.

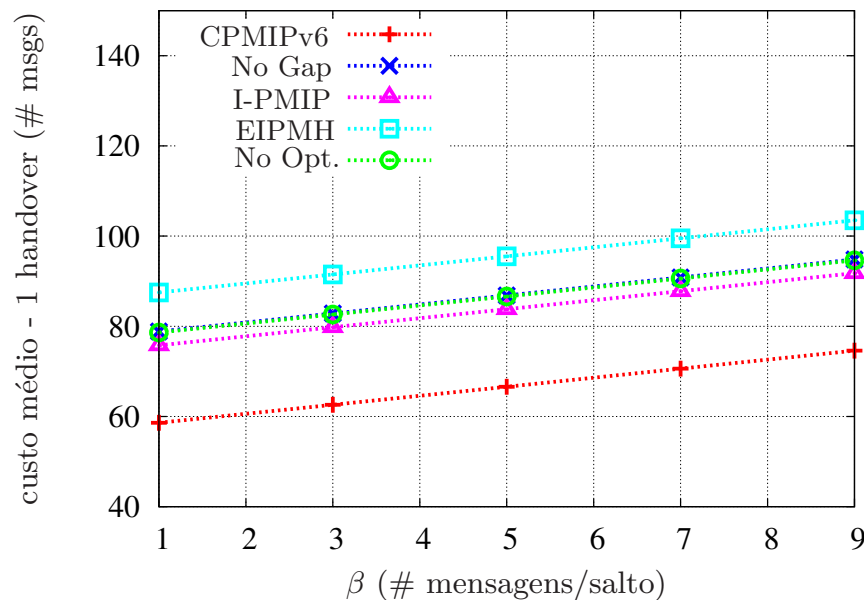


Figura 6.7. Custo de sinalização *versus*  $\beta$ .

A Figura 6.8 apresenta a influência do SMR no custo durante uma sessão. O custo tende a se reduzir com o aumento do SMR, pois um alto SMR indica baixa mobilidade. O esquema sem otimização apresenta o pior desempenho e o CPMIPv6 apresenta o custo mais baixo, uma vez que requer menos mensagens. O número de mensagens tem um papel importante neste cenário pois com baixos valores de SMR, a mobilidade é maior e o número de *handovers* durante uma mesma sessão também é maior, aumentando o custo de sinalização. Na situação de mais alta mobilidade, o CPMIPv6 tem custo 20% menor que o esquema No-Gap.

A Figura 6.9 mostra o custo de uma sessão em função da velocidade média dos nós. Altas velocidades levam a uma mobilidade mais intensa e, assim, a um número maior de *handovers*. Mais uma vez, o CPMIPv6 apresenta o custo mais baixo, seguido pelo No-Gap. Os esquemas I-PMIP e EIPMH possuem resultados similares e o esquema sem otimização

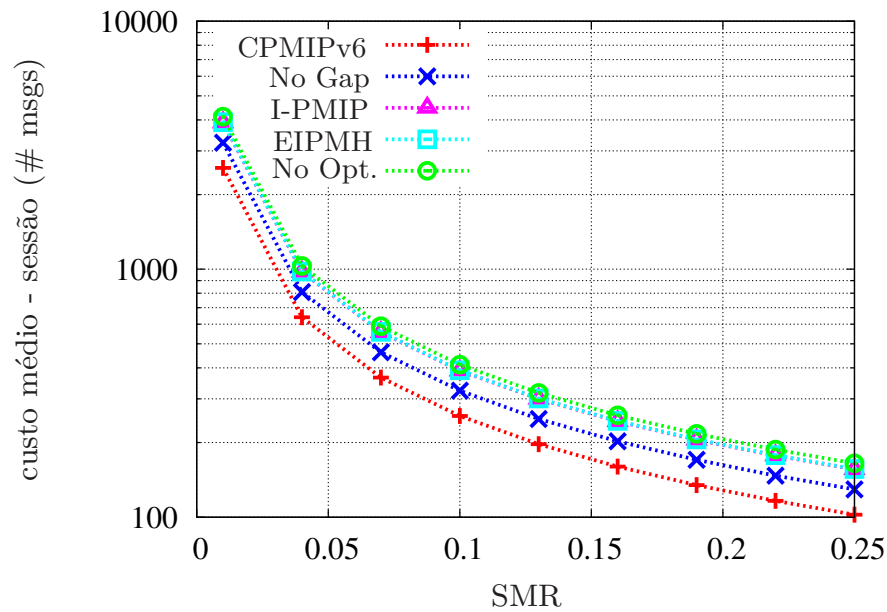


Figura 6.8. Custo de sinalização *versus* SMR.

possui o custo mais alto. No caso onde a velocidade é de 40 m/s, o CPMIPv6 possui custo ao menos 20% menor que No-Gap.

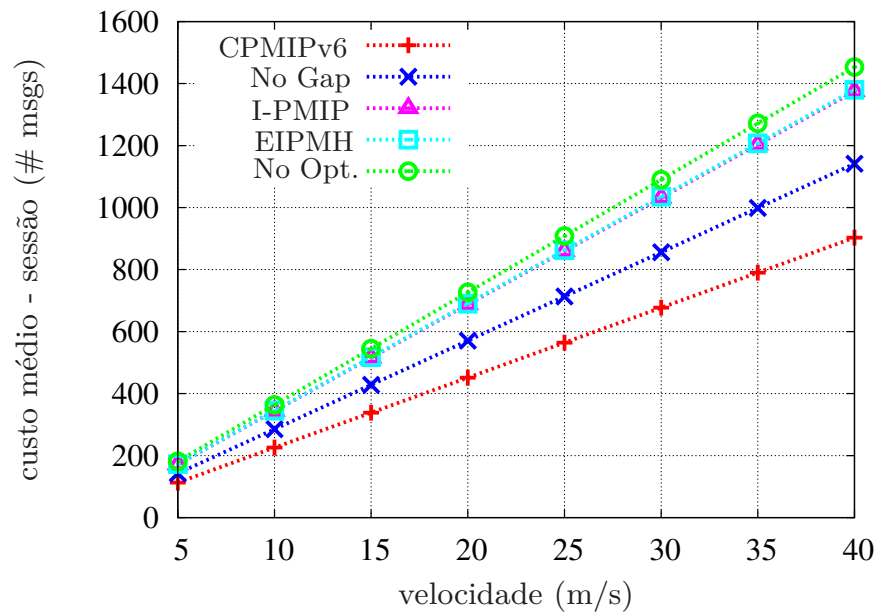


Figura 6.9. Custo de sinalização *versus* velocidade.

A Figura 6.10 apresenta a latência média de *handover* quando se varia a probabilidade de falha do enlace sem fio. Essa probabilidade representa a confiabilidade do meio sem fio e quanto mais alta for, maior será o impacto negativo na latência devido a retransmissões na camada de enlace. O EIPMH tem a maior latência, influenciada pela maior quantidade de mensagens trocadas até a probabilidade de 0,65. A partir desse ponto o esquema sem otimização mostra uma latência maior. É importante observar que

o CPMIPv6 apresenta a menor latência, pelo menos 16% menor no pior caso. Esse melhor desempenho se deve à não existência de interações desnecessárias no nível da *core network* e na WLAN, como atualização em entidades centralizadoras, ou registros e autenticações na rede visitada.

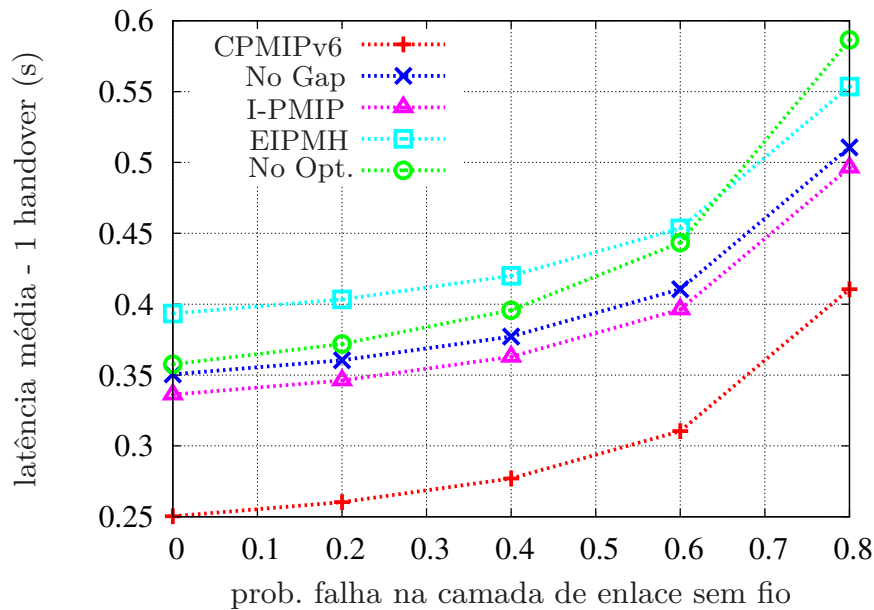


Figura 6.10. Latência *versus* probabilidade de falha no meio sem fio.

A Figura 6.11 apresenta o número de pacotes perdidos em função da probabilidade de falha no meio sem fio. A perda de pacotes está diretamente relacionada à latência do *handover*. Assim, o CPMIPv6 tem a menor perda em comparação com as demais propostas, reduzindo a perda em no mínimo 16% com relação à abordagem I-PMIP. A perda pode parecer baixa para os valores de probabilidade altos, porém, é importante ressaltar que trata-se de falhas e retransmissões na camada de enlace e desconsidera-se a questão do descarte de conteúdo por *timeout*.

A Figura 6.12 apresenta o *goodput versus* SMR. O *goodput* tende a aumentar e estabilizar enquanto o SMR cresce, pois a mobilidade é reduzida e a perda de pacotes é menor. Já a Figura 6.13 apresenta o *goodput versus* a probabilidade de falha no enlace sem fio. O aumento dessa variável reduz o *goodput* de maneira pouco significativa para todos os esquemas avaliados. Isso ocorre porque a perda de pacotes é baixa devido à baixa participação da componente sem fio no caminho de dados, limitando a influência dessa variável. É importante lembrar que uma probabilidade de 0,8 não significa perda de 80% dos pacotes e sim que há 80% de probabilidade de haver retransmissões na camada de enlace. O CPMIPv6 mostra o melhor rendimento considerando os dois cenários. Ele mantém a mesma quantidade de túneis do PMIPv6, evitando o *overhead* de encapsulamento de cabeçalhos IP, enviando assim mais tráfego útil. O EIPMH apresenta o pior *goodput*, pois requer a criação de dois túneis extras além do túnel preexistente.

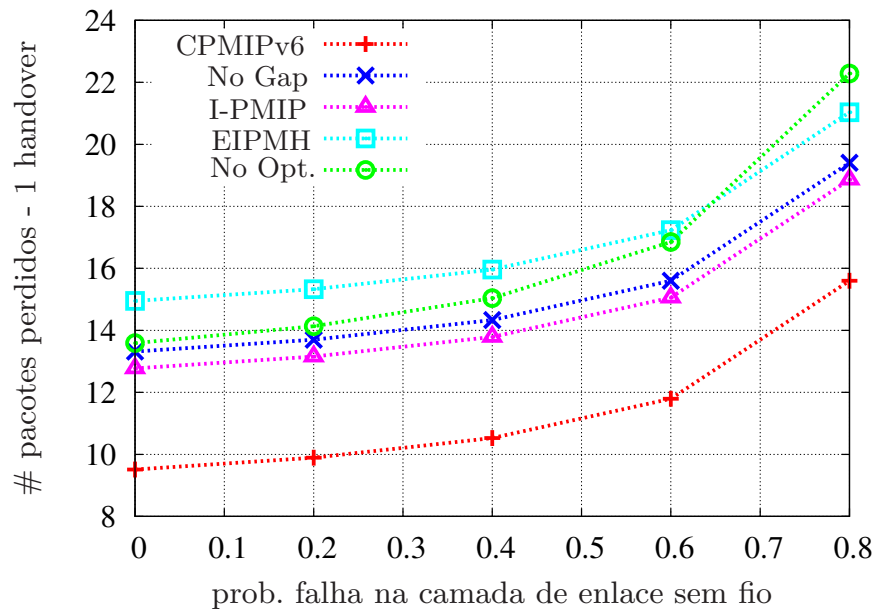


Figura 6.11. Perda de pacotes *versus* probabilidade de falha no meio sem fio.

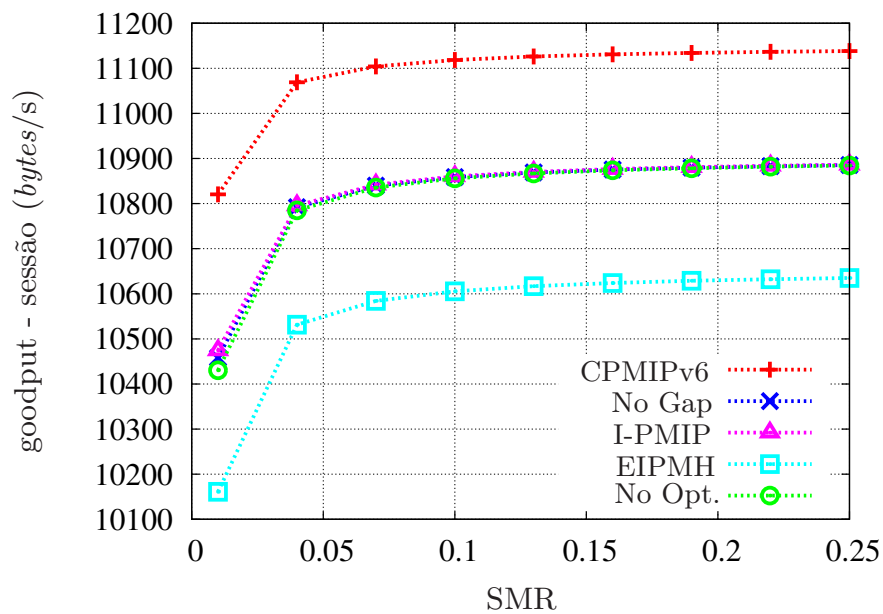


Figura 6.12. Goodput *versus* SMR.

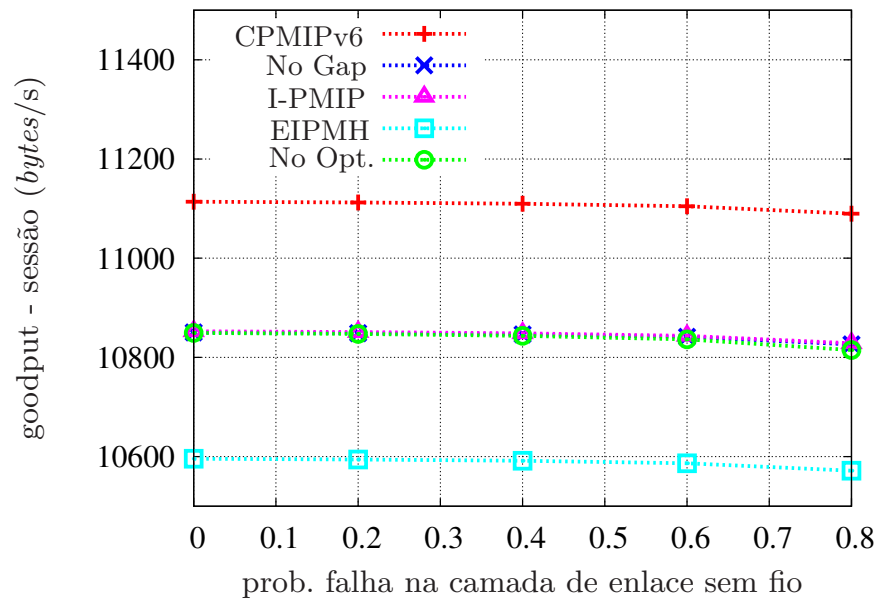


Figura 6.13. Goodput *versus* probabilidade de falha no meio sem fio.

Por fim, os resultados de experimentos realizados por meio de modelagem indicaram que no cenário estudado, o CPMIPv6 apresenta de fato uma abordagem para *handover* interdomínio e intradomínio com custo de sinalização, latência e perda de pacotes reduzidos em comparação com as demais abordagens do Estado da Arte. Especificamente, o CPMIPv6 reduziu em pelo menos 20% o custo de sinalização, em no mínimo 16% a latência e em no mínimo 16% a perda de pacotes em comparação a outras abordagens da literatura, além de manter um *goodput* superior.

## 6.4 Conclusão

Apesar de serem metodologias de níveis de abstração distintas, tanto no cenário básico com a simulação quanto no cenário amplo com a modelagem, é possível observar que os resultados apontam para uma tendência semelhante. A de que as características de simplicidade e distribuição do CPMIPv6 contribuem para um menor custo e latência de *handover* e um melhor aproveitamento dos recursos da rede, com um *goodput* maior que aquele obtido nas demais propostas.

## 7 Conclusões e Trabalhos Futuros

O CPMIPv6 é um salto importante na evolução dos sistemas distribuídos e das soluções para mobilidade IP. Sua arquitetura planejada para atender requisitos de desempenho como baixo custo e latência permite a proposta de novas extensões e assim agregar mais qualidade de experiência nas redes IP. Neste capítulo são apresentadas as conclusões da tese e sugestões para trabalhos futuros.

### 7.1 Contexto da Tese e Contribuições

As redes de acesso metropolitanas, desde a sua origem nos sistemas de telefonia cabeados têm passado por um contínuo e acelerado processo de evolução, culminando no advento e expansão da telefonia sem fio. Paralelamente, o meio universitário viu surgir as primeiras redes locais cabeadas seguindo o padrão TCP/IP, para posteriormente testemunharem a evolução na camada de enlace de modo a suportar comunicação sem fio. Avanços na indústria de eletrônicos permitiram a fabricação de dispositivos móveis, cuja popularidade tem aumentado devido à variedade de preços e de tecnologias suportadas. Assim, a partir dos anos 2000 a convergência digital entre as tecnologias celulares e a Internet nas redes de acesso metropolitanas tornou-se uma realidade tendo como maiores expoentes as tecnologias LTE, IEEE 802.16, e IEEE 802.11 em suas versões MIMO. Essas tecnologias, por sua vez têm se tornado cada vez mais velozes e ubíquas, incentivando o surgimento de novos aplicativos móveis e a produção de *gadgets* para diferentes usos, como computação vestível, sensoriamento, transmissão/recepção de *streaming* multimídia, entre outros, em um ciclo virtuoso. O fator mobilidade merece destaque nesse âmbito, com as recentes pesquisas em *handover* que atualmente buscam ir além da mera transferência de uma chamada de um ponto de acesso a outro. As tecnologias veiculares permitem a transmissão e recepção por meio de equipamentos embarcados em automóveis. A alta mobilidade e variedade de tecnologias suportadas torna a questão do *handover* ainda mais relevante, destacando-se as pesquisas em *handover* vertical. Cenários de uso em transporte coletivo inspiram pesquisas relacionadas a *handover* vertical em grupo.

Na esfera de gerenciamento de mobilidade, não só a mudança entre tecnologias precisa ser levada em consideração, mas também a mudança entre domínios diferentes. O suporte a *handover* interdomínio permite que dispositivos móveis possam ter suas referências de roteamento atualizadas à medida que avançam por áreas de coberturas de diferentes domínios, o que pode ser frequente em cenários veiculares devido à velocidade de deslocamento. Por outro lado, é necessário que a comunicação entre domínios não degrade o desempenho da sinalização quando a comunicação se dá no âmbito local.



A presente tese procurou discutir a heterogeneidade das redes metropolitanas sem fio em duas dimensões: na camada de enlace e na camada de rede. Em ambos os casos ressaltou-se a importância de se utilizar soluções descentralizadas, onde a responsabilidade do gerenciamento da rede é coletiva e não limitada a uma entidade que pode tornar-se ponto único de falha. Não menos importante é a questão da interoperabilidade com soluções legadas, que permite que soluções sejam implantadas de forma viável.

Para a camada de enlace foi proposta uma estratégia de tentativas de *handover* vertical em grupo a partir da solução de Lee e Cho (LEE; CHO, 2011), que propunha uma descentralização do processo de decisão de *handover*. A estratégia proposta permitiu redução da latência entre 17% e 51,5% nos cenários avaliados. Sugere-se em trabalhos futuros aplicar a proposta em outras soluções e analisar os benefícios obtidos. Adicionalmente, pretende-se aprofundar na questão da reserva de recursos (HU; WANG; WANG, 2015) para o *handover* vertical na camada de enlace com o auxílio do MIH bem como o emprego de técnicas de *cross-layering* na obtenção de informação de largura de banda disponível entre outras informações dependentes das tecnologias de enlace envolvidas. Nesse caso, recomenda-se o uso de ferramentas de simulação de redes de modo que se possa analisar mais detalhadamente esses processos. Além disso, sugere-se avaliar o impacto do processamento com a solução proposta no consumo de energia pelos nós móveis.

A presente tese tem como contribuição principal o *Clustered* PMIPv6 (CPMIPv6), destinado à camada de rede. O CPMIPv6 é a abordagem para *handover* intradomínio e interdomínio distribuída e de baixo custo e latência, compatível com sistemas PMIPv6. Sendo uma solução baseada em mobilidade IP, a interoperabilidade com redes heterogêneas é garantida. A gerência de mobilidade é distribuída por meio de uma estrutura denominada *cluster* formada por entidades-âncora de cada domínio, conhecidas por *Local Mobility Anchors* (LMAs). A comunicação no *cluster* se dá por meio de protocolo P2P baseado na DHT Kademlia. As informações difundidas no cluster durante um *handover* não impõem custo adicional a este processo, por serem assíncronas e ocorrerem em um enlace que não envolve as entidades locais do domínio. Essas informações são utilizadas em um *handover* interdomínio futuro, quando os LMAs já detêm a informação dos nós móveis da qual necessita. Essa arquitetura que não envolve novas sinalizações para os MAGs e não requer entidades centralizadoras evita a criação de gargalos no núcleo da rede, onde o tráfego de pacotes de dados e controle já é suficientemente intenso. Desta forma, a antecipação das informações, aliada ao uso de mensagens assíncronas e um gerenciamento de mobilidade distribuído contribuem para um custo e latência de *handover* reduzidos com relação às abordagens do Estado da Arte.

Assim, a hipótese de que o uso de uma rede DHT para a obtenção antecipada de informações de nós móveis é decisivo para que se tenha gerenciamento de mobilidade intradomínio e interdomínio de baixo custo e latência foi confirmada. Em síntese, o CPMIPv6

atende aos requisitos a seguir:

- requer mudanças mínimas na sinalização do PMIPv6 - o gerenciamento interdomínio fica restrito ao *cluster* de LMAs, de modo que a sinalização intradomínio é minimamente alterada;
- provê gerenciamento de mobilidade distribuído - não introduz pontos únicos de falha e replica facilmente as informações de perfis dos nós móveis entre os pares do *cluster*;
- não requer tunelamento extra - o LMA do domínio de origem mantém comunicação com o MAG do novo domínio enquanto durar a sessão, sem que o LMA do novo domínio torne-se mais um salto no caminho de dados;
- mantém a infraestrutura de *hardware* original - não requer a adição de novas entidades;
- possui compatibilidade com sistemas legados - pode conviver com implementações originais do protocolo PMIPv6.

O CPMIPv6 foi comparado a diversas abordagens do Estado da Arte por meio de modelagem e simulação. As avaliações verificaram o comportamento das abordagens em um cenário amplo, de alta densidade e um cenário reduzido. Os resultados mostraram que, para os cenários estudados:

- Obteve-se menor custo de sinalização, com redução de no mínimo 20% no cenário amplo e de pelo menos 12% no cenário básico;
- A latência pôde ser reduzida em no mínimo 16% no cenário amplo e em 25% no cenário básico;
- A perda de pacotes mostrou-se ao menos 16% inferior no cenário amplo; no cenário básico foi desconsiderada na análise por ser desprezível;
- O *goodput* alcançou taxas superiores às abordagens do Estado da Arte;
- A compatibilidade com a infraestrutura legada do PMIPv6 foi mantida.

## 7.2 Publicações

A tese resultou até o momento nas seguintes publicações em conferências e periódicos:

- QUENTAL, N.; GONÇALVES, P. Uma Estratégia de Tentativas de Handover Vertical em Grupo. In: Proc. do 31o. Simpósio Brasileiro de redes de Computadores e Sistemas Distribuídos. Brasília: [s.n.], 2013. p. 411–424.
- QUENTAL, N. C.; GONÇALVES, P. A. S. A Policy for Group Vertical Handover Attempts. In: Proc. of the 13th International Conference on Networks. Nice: [s.n.], 2014. p. 154–159. Premiado entre as cinco melhores publicações da edição ([http://www.iaria.org/conferences2014/awardsICN14/icn2014\\_a5.pdf](http://www.iaria.org/conferences2014/awardsICN14/icn2014_a5.pdf))
- QUENTAL, N. C.; GONÇALVES, P. A. S. Policy for Group Handover Attempts over Heterogeneous Networks. The International Journal on Advances in Networks and Services, v. 7, n. 34, p. 183–193, 2014.
- QUENTAL, N. C.; GONÇALVES, P. A. S. CPMIPv6 : Uma Abordagem para Handover Interdomínio em Redes Móveis In: Proc. do 34o. Simpósio Brasileiro de redes de Computadores e Sistemas Distribuídos. Salvador: [s.n.], 2016. p. 1–14.
- Submissão do artigo “CI-PMIPv6: An Approach for Inter-domain Network-based Mobility Management” ao “The Sixteenth International Conference on Networks (ICN 2017)”.

### 7.3 Trabalhos Futuros

Para o desenvolvimento de trabalhos futuros, recomenda-se adicionar ao CPMIPv6 o suporte ao FPMIPv6 (YOKOTA et al., 2011). Deve-se levar em consideração que no FPMIPv6 os MAGs de domínios diferentes precisariam se comunicar e obter a informação do novo MAG por meio do *cluster*. O desafio consiste em manter o *cluster* abstraído para os MAGs.

Uma possibilidade interessante para ampliar a pesquisa sobre o CPMIPv6 seria a adição de suporte a *localized routing* (RASEM; MAKAYA; ST-HILAIRE, 2012). O conteúdo compartilhado no *cluster* precisaria refletir a conservação das rotas otimizadas. O *Localized Routing* permitiria otimizar ainda mais o desempenho em cenários de alta mobilidade.

Para avaliação de desempenho do CPMIPv6 sugere-se realizar um estudo aprofundado da escalabilidade do *handover* interdomínio. A realização de experimentos com um maior número de MAGs, pontos de acesso e LMAs seriam uma oportunidade de avaliar o potencial da DHT Kademia em se adaptar a cenários de maior escala. Testes de robustez poderiam avaliar a resiliência do sistema mediante a perda de um LMA no *cluster* para as redes fora de seu domínio de origem. Sugere-se adicionalmente avaliar em profundidade as consequências do efeito *ping-pong* para o custo total da sinalização.

Aspectos de segurança também podem ser considerados de modo a permitir a entrada e saída dinâmicas de um *cluster* (LEE et al., 2012). Nesse cenário também se faz necessária a avaliação da consistência das informações compartilhadas no *cluster* com mecanismos de invalidação de *cache*.

Sugere-se também em trabalhos futuros a adição de suporte a QoS em uma rede CPMIPv6 por meio de adaptações na lógica do *cluster*. Para tal, a adição de suporte a mobilidade de fluxo (*flow mobility*) é fundamental para permitir a distinção entre os diversos tipos de serviço que o usuário estiver consumindo em um dado momento (TRUNG et al., 2011).

## Referências

- AHLERS, D. Local Web Search Examined. In: LEWANDOWSKI, D. (Ed.). *Web Search Engine Research (Library and Information Science)*. 1. ed. [S.l.]: Emerald Group Publishing Limited, 2012. v. 4, cap. 3, p. 47–78. Citado na página 80.
- AKYILDIZ, I.; WANG, X. A survey on wireless mesh networks. *IEEE Communications Magazine*, v. 43, n. 9, p. S23–S30, 2005. Citado na página 23.
- ALCATEL-LUCENT. *The LTE Network Architecture - A comprehensive tutorial*, Alcatel-Lucent Strategic White Paper, 2009. Citado na página 27.
- ALEKSICA, S. et al. Energy Efficiency of Femtocell Deployment in Combined Wireless/Optical Access Networks. *Computer Networks*, v. 57, n. 5, p. 1217–1233, 2013. Citado na página 87.
- ANDERSSON, K.; FORTE, A.; SCHULZRINNE, H. Enhanced Mobility Support for Roaming Users: Extending the IEEE 802.21 Information Service. In: *Proc. of the 8th International Conference on Wired/Wireless Internet Communications*. Berlin: [s.n.], 2010. p. 52–63. Citado na página 18.
- ANGOMA, B. et al. HaVe-2W3G: A vertical handoff solution between WLAN, WiMAX and 3G networks. In: *Proc. of the 7th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference*. Istanbul: [s.n.], 2011. p. 101 – 106. Citado 2 vezes nas páginas 66 e 67.
- ARUBA. *802.11ac In-Depth - White paper*. [S.l.], 2013. Citado na página 30.
- BAE, S. J.; CHUNG, M. Y.; SO, J. Handover Triggering Mechanism Based on IEEE 802.21 in Heterogeneous Networks with LTE and WLAN. In: *Proc. of the International Conference on Information Networking (ICOIN)*. Barcelona: [s.n.], 2011. p. 399–403. Citado 2 vezes nas páginas 29 e 41.
- BAIK, J.-W. et al. Inter-Domain Mobility Support Scheme Using Multicast in Proxy Mobile IPv6. In: *Proc. of the 6th IEEE Consumer Communications and Networking Conference*. Las Vegas: [s.n.], 2009. p. 1–2. Citado na página 69.
- BALTZIS, K. B. Hexagonal vs Circular Cell Shape: A Comparative Analysis and Evaluation of the Two Popular Modeling Approximations. In: MELIKOV, A. (Ed.). *Cellular Networks - Positioning, Performance Analysis, Reliability*. 1. ed. [S.l.]: Intech, 2011. u, cap. 4, p. 103–124. Citado na página 21.
- BANERJEE, N.; DAS, S.; ACHARYA, A. SIP-Based Mobility Architecture for Next Generation Wireless Networks. In: *Proc. of the 3rd IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications*. Kauai Island: [s.n.], 2005. p. 181 – 190. Citado 2 vezes nas páginas 66 e 67.
- BATABYAL, S.; BHAUMIK, P. Mobility Models, Traces and Impact of Mobility on Opportunistic Routing Algorithms: A Survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, v. 17, n. 3, p. 1679–1707, 2015. Citado na página 89.

- BUZZI, S. et al. A Survey of Energy-Efficient Techniques for 5G Networks and Challenges Ahead. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, PP, n. 90, p. 1–14, 2016. Citado na página 23.
- CAI, X.; LIU, F. Network Selection for Group Handover in Multi-access Networks. In: *Proc. of the IEEE International Conference on Communications*. Beijing: [s.n.], 2008. p. 2164–2168. Citado 4 vezes nas páginas 18, 39, 43 e 59.
- CAMPBELL, A. T.; GOMEZ, J.; VALKO, A. An overview of cellular IP. In: *Proceedings of the IEEE Wireless Communications and Networking Conf.* New Orleans: [s.n.], 1999. p. 606–611. Citado na página 66.
- CASEY, T.; VESELINOVIC, N.; JANTTI, R. Base station controlled load balancing with handovers in mobile WiMAX. In: *Proc. of the IEEE 19th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*. Cannes: [s.n.], 2008. p. 1–5. Citado na página 34.
- CHEKURI, C. et al. Blocking Probability Estimates in a Partitioned Sector TDMA System. In: *Proc. of the 4th International Workshop on Discrete Algorithms and Methods for Mobile Computing and Communications (DIAL-M)*. Boston, USA: [s.n.], 2000. p. 28–34. Citado na página 49.
- CHINNAPPAN, A.; BALASUBRAMANIAN, R. Complexity-consistency Trade-off in Multi-attribute Decision Making for Vertical Handover in Heterogeneous Wireless Networks. *IET Networks*, v. 5, n. 1, p. 13–21, 2016. Citado 3 vezes nas páginas 39, 43 e 58.
- CHOI, H. An optimal handover decision for throughput enhancement. *IEEE Communications Letters*, IEEE, v. 14, n. 9, p. 851–853, 2010. Citado 2 vezes nas páginas 35 e 57.
- CHOI, H.-Y. et al. Implementation and Evaluation of Proxy Mobile IPv6 in NS-3 Network Simulator. In: *Proc. of the 5th International Conference on Ubiquitous Information Technologies and Applications*. Sanya: [s.n.], 2010. p. 1–6. Citado 2 vezes nas páginas 89 e 121.
- CHOWDHURY, M.; CHAE, S. H.; JANG, Y. M. Group Handover Management in Mobile Femtocellular Network Deployment. In: *Proc. of the 4th International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN)*. Phuket: [s.n.], 2012. p. 162 – 165. Citado 3 vezes nas páginas 23, 36 e 57.
- CHU, C. et al. *End-to-End Performance and Reliability Estimation of PacketCable VoIP Services*. 2005. Telcordia Tech. Report. Citado 3 vezes nas páginas 87, 88 e 97.
- CHUNG, J.-M. et al. Enhancements to FPMIPv6 for Improved Seamless Vertical Handover Between LTE and Heterogeneous Access Networks. *IEEE Wireless Communications*, v. 20, n. 3, p. 112 – 119, 2013. Citado 3 vezes nas páginas 65, 68 e 69.
- CICCONETTI, C.; GALEASSI, F.; MAMBRINI, R. Network-assisted Handover for Heterogeneous Wireless Networks. In: *Proc. of the IEEE GLOBECOM Workshops*. Miami: [s.n.], 2010. p. 1–5. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 24.

CISCO, M. *802.11 Association process explained*. 2016. Acessado: 12-04-2016. Disponível em: <[https://documentation.meraki.com/MR/WiFi\\_Basics\\_and\\_Best\\_Practices/802.11\\_Association\\_process\\_explained](https://documentation.meraki.com/MR/WiFi_Basics_and_Best_Practices/802.11_Association_process_explained)>. Citado na página 30.

ERICSSON. *5G Radio Access - Reseach and Vision*. 2013. Ericsson White Paper. Citado na página 23.

ETSI/3GPP. *ETSI/3GPP Technical Specification 36.300 version 8.9.0 Release 8*, LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); Overall description; Stage 2, 2009. Citado na página 27.

ETSI/3GPP. *ETSI/3GPP Technical Specification 36.331 version 10.7.0 Release 10*, LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Radio Resource Control (RRC); Protocol specification, 2012. Citado na página 29.

FIGUEIREDO, F.; PEREIRA, L. Tecnologia WiMAX: Uma visão geral. *Cadernos CPqD Tecnologia*, v. 4, n. 2, p. 7–26, 2008. Citado 3 vezes nas páginas 22, 26 e 32.

FU, A. et al. A Novel Group-Based Handover Authentication Scheme with Privacy Preservation for Mobile WiMAX Networks. *IEEE Communications Letters*, v. 16, n. 11, p. 1744–1747, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 36 e 57.

GONDI, V.; AGOULMINE, N. Low Latency Handover and Roaming Using Security Context Transfer for Heterogeneous Wireless and Cellular Networks. In: *Proc. of the IEEE Asia-Pacific Services Computing Conference (APSCC)*. Hangzhou, China: [s.n.], 2010. p. 548–554. Citado 2 vezes nas páginas 42 e 58.

GUHA, S.; DASWANI, N.; JAIN, R. *An Experimental Study of the Skype Peer-to-Peer VoIP System*. 2006. Microsoft Research. Disponível em: <<http://research.microsoft.com/en-us/um/people/saikat/paper-iptps06-guha-skype.html>>. Citado na página 88.

GUNDAVELLI, S. et al. *Proxy Mobile IPv6*. IETF, 2008. RFC 5213. (Request for Comments, 1). Disponível em: <<http://tools.ietf.org/html/rfc5213>>. Citado 3 vezes nas páginas 18, 62 e 63.

HASSAN, H.; GARCIA, J.-M.; BRUN, O. Generic Modeling of Multimedia Traffic Sources. In: *Proceedings of the 3rd International Working Conference on Performance Modelling and Evaluation of Heterogeneous Networks (HET-NET's)*. Ilkley: [s.n.], 2005. p. P14-1 – P14-10. Citado na página 94.

HU, C.-W.; WANG, Y.-C.; WANG, J.-S. Load Balancing Early Handoff Scheme for Multimedia Service in Wireless Cellular Networks. In: *Proceedings of the Seventh International Conference on Advanced Computational Intelligence (ICACI)*. Wuyi: [s.n.], 2015. p. 17–22. Citado na página 104.

HU, Y. C.; DAS, S. M.; PUCHA, H. Peer-to-Peer Overlay Abstractions in MANETs. In: WU, J. (Ed.). *Theoretical and Algorithmic Aspects of Sensor, Ad Hoc Wireless, and Peer-to-Peer Networks*. 1. ed. [S.l.]: CRC Press, 2005. v. 1, cap. 47, p. 857–874. Citado na página 77.

- HUNUKUMBURE, M.; AGARWAL, R.; VADGAMA, S. Handover Mechanisms for Planned Cell Outage in Twin State Green Wireless Networks. In: *Proc. of the IEEE 73rd Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*. Budapest: [s.n.], 2011. p. 1–5. Citado 2 vezes nas páginas 35 e 57.
- IEEE-802. *IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks: Overview and Architecture*, IEEE Std 802-2002, 2002. Citado na página 21.
- IEEE-802.11. *IEEE Standard for Information technology–Telecommunications and information exchange between systems Local and metropolitan area networks*, IEEE Std 802.11-2012, 2012. Citado na página 30.
- IEEE-802.16-2012. *IEEE Standard for Air Interface for Broadband Wireless Access Systems*, IEEE Standard 802.16-2012, 2012. Citado na página 34.
- IEEE-802.21. *IEEE Standard for Local and metropolitan area networks - Part 21: Media Independent Handover Services*, IEEE Standard 802.21, 2008. Citado na página 17.
- IOANNOU, K. et al. Optimizing the Handover Call Blocking Probability in Cellular Networks With High Speed Moving Terminals. *IEEE Communications Letters*, v. 6, n. 10, p. 422–424, 2002. Citado na página 26.
- JABIR, A. J. et al. A Low Cost Route Optimization Scheme for Cluster-Based Proxy MIPv6 Protocol. *Wireless Personal Communications*, v. 74, n. 2, p. 499–517, 2014. Citado na página 66.
- JELASSI, S. et al. Quality of Experience of VoIP Service: A Survey of Assessment Approaches and Open Issues. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, v. 14, n. 2, p. 491–513, 2012. Citado na página 17.
- JEONG, H. et al. An Efficient Group-Based Channel Scanning Scheme for Handover with IEEE 802.16e. In: *Proc. of the 26th IEEE International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops*. Fukuoka: [s.n.], 2012. p. 639–644. Citado 3 vezes nas páginas 18, 36 e 57.
- JIA, W.-K. PMIPv6 Route Optimization for Inter and Intra-domain Roaming Using Signaling Reduction Approach in LTE Networks. In: *Proceedings of the*. Dubrovnik: [s.n.], 2015. p. 508–513. Citado na página 69.
- JOE, I.; LEE, H. An efficient inter-domain handover scheme with minimized latency for PMIPv6. In: *Proc. of the International Conference on Computing, Networking and Communications*. Maui: [s.n.], 2012. p. 332 – 336. Citado 6 vezes nas páginas 19, 69, 72, 75, 86 e 128.
- JOHNSON, D.; PERKINS, C.; ARKKO, J. *Mobility Support in IPv6*. IETF, 2004. RFC 3775. (Request for Comments, 1). Disponível em: <<http://tools.ietf.org/html/rfc3775>>. Citado 3 vezes nas páginas 18, 61 e 82.
- KANWAL, K.; SAFDAR, G. A. Reduced Early Handover for Energy Saving in LTE Networks. *IEEE Communications Letters*, v. 20, n. 1, p. 153–156, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 36 e 57.



- KARRAY, M. K. Evaluation of the Blocking Probability and the Throughput in the Uplink of Wireless Cellular Networks. In: *Proc. of the International Conference on Communications and Networking (ComNet)*. Tozeur, Tunisia: [s.n.], 2010. p. 1–8. Citado na página 49.
- KHAN, M. et al. Enabling Vertical Handover Management Based on Decision Making in Heterogeneous Wireless Networks. In: *Proceedings of the International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC)*. Dubrovnik: [s.n.], 2015. p. 952–957. Citado na página 41.
- KHAN, M. Q.; ANDRESEN, S. H. PoA Selection in 802.11 Networks Using Media Independent Information Server (MIIS). In: *Proc. of the 26th International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops (WAINA)*. Fukuoka, Japan: [s.n.], 2012. p. 454–459. Citado na página 41.
- KHEDHER, H.; VALOIS, F.; TABBANE, S. Channel Holding Time Characterization in Real GSM Network. In: *Proc. of the 14th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communication (PIMRC)*. Beijing: [s.n.], 2003. p. 46–49. Citado na página 50.
- KIM, D.; SHIN, H.; SHIN, D. A network-based handover scheme for hierarchical mobile IPv6 over IEEE 802.16 e. In: *Proc. of the 10th International Conference on Advanced Communication Technology, 2008. ICAC T 2008*. Pyeongchang, Korea: [s.n.], 2008. v. 1, p. 468–472. Citado na página 67.
- KIM, I.; KIM, Y. Performance Evaluation and Improvement of TCP Throughput over PFMIPv6 with MIH. In: *Proc. of the 12th IFIP/IEEE International Symposium on Integrated Network Management*. Dublin: [s.n.], 2011. p. 997–1004. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 68.
- KIM, R. Y. et al. Advanced Handover Schemes in IMT-Advanced Systems. *IEEE Communications Magazine*, IEEE, v. 48, n. 8, p. 78–85, 2010. Citado 3 vezes nas páginas 24, 26 e 35.
- KIM, T.-S. et al. Cell selection and trigger point decision for next generation heterogeneous wireless networking environment: Algorithm & evaluation. In: *Proc. of the 5th International Conference on New Trends in Information Science and Service Science (NISS)*. Macao: [s.n.], 2011. p. 247–254. Citado 2 vezes nas páginas 42 e 58.
- KOODLI, E. R. *Mobile IPv6 Fast Handovers*. IETF, 2009. RFC 5568. (Request for Comments, 1). Disponível em: <<http://tools.ietf.org/html/rfc5568>>. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 62.
- KULADINITHI, K. et al. 802.11 Handover optimization to improve communications of mobile workers. In: *Proceedings of the 5th International Conference on Information and Automation for Sustainability*. Colombo: [s.n.], 2010. p. 156–162. Citado na página 30.
- KUNARAK, S. Vertical Handover Decision Based on RBF Approach for Ubiquitous Wireless Networks. In: *Proceedings of the International Conference on Platform Technology and Service (PlatCon)*. Jeju: [s.n.], 2016. p. 1–4. Citado 3 vezes nas páginas 39, 42 e 58.

- KWAK, B.; SONG, N.; MILLER, L. Performance Analysis of Exponential Backoff. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, v. 13, n. 2, p. 343–355, 2005. Citado na página 48.
- LAMPROPOULOS, G.; SALKINTZIS, A. K.; PASSAS, N. Media-Independent Handover for Seamless Service Provision in Heterogeneous Networks. *IEEE Communications Magazine*, IEEE, v. 46, n. 1, p. 64–71, 2008. Citado na página 24.
- LEE, K.-W. et al. Inter-Domain Handover Scheme Using an Intermediate Mobile Access Gateway for Seamless Service in Vehicular Networks. *International Journal of Communication Systems*, v. 23, n. 9–10, p. 1127–1144, 2009. Citado na página 74.
- LEE, S. et al. Vertical Handoff Decision Algorithms for Providing Optimized Performance in Heterogeneous Wireless Networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, v. 58, n. 2, p. 865–881, 2009. Citado na página 18.
- LEE, W.; CHO, D. Enhanced Group Handover Scheme in Multi-Access Networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, v. 60, n. 5, p. 2389–2395, 2011. Citado 12 vezes nas páginas 18, 24, 39, 41, 43, 44, 45, 49, 50, 56, 59 e 104.
- LEE, Y. et al. Advanced Node Insertion Attack with Availability Falsification in Kademlia-based P2P Networks. In: *Proceedings of the 14th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT)*. PyeongChang: [s.n.], 2012. p. 73–76. Citado na página 107.
- LEI, S.; HUI, T.; ZHENG, H. Group Vertical Handover in Heterogeneous Radio Access Networks. In: *Proc. of the 72nd IEEE Vehicular Technology Conference Fall*. Ottawa: [s.n.], 2010. p. 1–5. Citado 4 vezes nas páginas 18, 39, 44 e 59.
- LIANG, Y.-H.; CHANG, B.-J.; CHEN, C.-T. Media Independent Handover-based Competitive On-Line CAC for Seamless Mobile Wireless Networks. *Journal Wireless Personal Networks*, 2011. Citado na página 41.
- LIEBSCH, M.; MUHANNA, A.; BLUME, O. *Transient Binding for Proxy Mobile IPv6*. IETF, 2011. RFC 6058. (Request for Comments, 1). Disponível em: <<http://tools.ietf.org/html/rfc6058>>. Citado na página 64.
- LIU, Y.-J.; CHENG, S.-M.; HUANG, P.-Y. Cognitive vertical handover in heterogeneous networks. In: *Proceedings of 11th International Conference on the Heterogeneous Networking for Quality, Reliability, Security and Robustness (QSHINE)*. Taipei: [s.n.], 2015. p. 392–397. Citado na página 18.
- LUA, K. et al. A Survey and Comparison of Peer-to-Peer Overlay Network Schemes. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, p. 72–93, 2005. Disponível em: <[http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs/\\_all.jsp?arnumber=1528337](http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs/_all.jsp?arnumber=1528337)>. Citado 2 vezes nas páginas 76 e 77.
- MAGNANO, A. et al. A Novel Predictive Handover Protocol for Mobile IP in Vehicular Networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, PP, n. 99, p. 1–22, 2015. Citado na página 67.

- MAJEED, A. et al. Forensic Analysis of three Social Media Apps in Windows 10. In: *Proceedings of the 12th International Conference on High-capacity Optical Networks and Enabling/Emerging Technologies (HONET)*. Islamabad: [s.n.], 2015. p. 1–5. Citado na página 88.
- MAKAYA, C.; PIERRE, S. An Analytical Framework for Performance Evaluation of IPv6-Based Mobility Management Protocols. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, v. 7, n. 3, p. 7, 2008. Citado 3 vezes nas páginas 26, 87 e 90.
- MALKHI, D.; NAOR, M.; RATAJCZAK, D. Viceroy: a Scalable and Dynamic Emulation of the Butterfly. In: *Proceedings of the twenty-first annual symposium on Principles of distributed computing*. Monterey: [s.n.], 2002. p. 183–192. Citado na página 77.
- MAYMOUNKOV, P.; MAZIÈRES, D. Kademia: A Peer-to-Peer Information System Based on the XOR Metric. In: *Proc. of the First International Workshop on Peer-to-Peer Systems*. [S.l.: s.n.], 2002. p. 53–65. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 77.
- MCNAIR, J.; AKYILDIZ, I.; BENDER, M. D. Handoffs for Real-Time Traffic in Mobile IP Version 6 Networks . In: *Proc. of the First Global Telecommunications Conference*. San Antonio: [s.n.], 2001. p. 3463–3467. Citado 2 vezes nas páginas 26 e 90.
- MUNASINGHE, K.; JAMALIPOUR, A. Interworked WiMAX-3G cellular data networks: An architecture for mobility management and performance evaluation. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, v. 8, n. 4, p. 1847 – 1853, 2009. Citado 2 vezes nas páginas 66 e 67.
- MUNDY, J. *What is 5G? 5G vs 4G and the Future of Mobile Networks*. 2016. Acessado: 10–04–2016. Disponível em: <<http://www.trustedreviews.com/opinions/what-is-5g-a-rough-guide-to-the-next-generation-of-mobile-networks>>. Citado na página 23.
- MURPHY, S.; NAFAA, A.; SERAFINSKI, J. Advanced service delivery to the Connected Car. In: *Proceedings of the IEEE 9th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob)*. Lyon: [s.n.], 2013. p. 147–153. Citado na página 17.
- NAUMOV, V.; BAUMANN, R.; GROSS, T. An Evaluation of Inter-Vehicle Ad Hoc Networks Based on Realistic Vehicular Traces. In: *Proc. of the 7th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and computing*. Florence: [s.n.], 2006. p. 108–119. Citado 2 vezes nas páginas 89 e 94.
- NEUMANN, N. et al. I-PMIP: An Inter-Domain Mobility Extension for Proxy-Mobile IP. In: *Proc. of the 2009 International Conference on Wireless Communications and Mobile Computing: Connecting the World Wirelessly*. Leipzig: [s.n.], 2009. p. 994–999. Citado 6 vezes nas páginas 18, 19, 71, 74, 86 e 130.
- NING, L. et al. Fuzzy Clustering based Group Vertical Handover Decision for Heterogeneous Wireless Networks. In: *Proc. of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*. Changai: [s.n.], 2013. p. 1231–1336. Citado 4 vezes nas páginas 18, 38, 43 e 59.

- NIYATO, D.; HOSSAIN, E. Dynamics of Network Selection in Heterogeneous Wireless Networks: an Evolutionary Game Approach. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, v. 58, n. 4, p. 2008–2017, 2009. Citado 5 vezes nas páginas 18, 38, 39, 43 e 59.
- NOBREGA, O. de O. *Modelo para Transparência de Handover Vertical em Redes de Quarta Geração*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Pernambuco, 2011. Citado 3 vezes nas páginas 21, 42 e 58.
- NS-2. *The Network Simulator - ns-2*. 2015. Acessado: 24-02-2015. Disponível em: <[http://nslam.isi.edu/nslam/index.php/User\\_Information](http://nslam.isi.edu/nslam/index.php/User_Information)>. Citado 3 vezes nas páginas 68, 72 e 89.
- NS-3. *The Network Simulator - ns-3*. 2016. Acessado: 17-01-2016. Disponível em: <<https://www.nslam.org/>>. Citado na página 89.
- OBAYIUWANA, E.; FALOWO, O. A New Network Selection Algorithm for Group Calls over Heterogeneous Wireless Networks with Dynamic Multi-Criteria. In: *Proceedings of the 13th IEEE Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC)*. Las Vegas: [s.n.], 2016. p. 491–494. Citado 2 vezes nas páginas 44 e 59.
- OPNET. *OPNET*. 2015. Acessado: 24-02-2015. Disponível em: <<http://www.riverbed.com/products/performance-management-control/opnet.html>>. Citado na página 67.
- PARK E. LEE, F. Y. S.; NOH, S.; KIM, S.-H. Inter-domain Roaming Mechanism Transparent to IPv6-Node among PMIPv6 Networks. In: *Proc. of the*. Taipei: [s.n.], 2010. p. 1–5. Citado 5 vezes nas páginas 18, 19, 70, 74 e 86.
- PARK, J. et al. Context-Aware Mobility Management with Energy Efficiency for Multimedia Streaming Service in Wireless LAN. In: *Proc. of the 6th IEEE Consumer Communications and Networking Conference (CCNC)*. Las Vegas: [s.n.], 2009. p. 1–6. Citado 2 vezes nas páginas 36 e 57.
- PARK, S.; YU, J.; IHM, J. A Performance Evaluation of Vertical Handoff Scheme between Mobile-WiMax and Cellular Networks. In: *Proc. of 16th International Conference on Computer Communications and Networks (ICCCN)*. Honolulu: [s.n.], 2007. p. 894 – 899. Citado 2 vezes nas páginas 41 e 57.
- POLLINI, G. P. Trends in Handover Design. *IEEE Communications Magazine*, 1996. Citado 3 vezes nas páginas 23, 25 e 26.
- QUALNET. *QualNet - Scalable Network Technologies*. 2015. Acessado: 19-02-2015. Disponível em: <<http://web.scalable-networks.com/content/qualnet>>. Citado na página 70.
- QUENTAL, N. C.; GONÇALVES, P. A. S. Uma Estratégia de Tentativas de Handover Vertical em Grupo. In: *Proc. do 31o. Simpósio Brasileiro de redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*. Brasília: [s.n.], 2013. p. 411–424. Citado na página 44.
- QUENTAL, N. C.; GONÇALVES, P. A. S. A Policy for Group Vertical Handover Attempts. In: *Proc. of the 13th International Conference on Networks*. Nice: [s.n.], 2014. p. 154–159. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 44.

- QUENTAL, N. C.; GONÇALVES, P. A. S. Policy for Group Handover Attempts over Heterogeneous Networks. *The International Journal on Advances in Networks and Services*, v. 7, n. 34, p. 183–193, 2014. Citado 3 vezes nas páginas 18, 44 e 59.
- RAMJEE, R. et al. HAWAII: A Domain-Based Approach for Supporting Mobility in Wide-Area Wireless Networks. *IEEE/ACM TRANSACTIONS ON NETWORKING*, v. 10, n. 3, p. 396–410, 2002. Citado na página 66.
- RAPPAPORT, T. S. *Comunicações sem Fio - Princípios e Práticas*. [S.l.]: Pearson - Prentice Hall, 2008. Citado na página 17.
- RASEM, A.; MAKAYA, C.; ST-HILAIRE, M. O-PMIPv6: Efficient Handover with Route Optimization in Proxy Mobile IPv6 Domain. In: *Proc. of the IEEE 8th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications*. Barcelona: [s.n.], 2012. p. 47–54. Citado 3 vezes nas páginas 66, 68 e 106.
- RASEM, A.; ST-HILAIRE, M.; MAKAYA, C. A Comparative Analysis of Predictive and Reactive Mode of Optimized PMIPv6. In: *Proc. of the 8th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference*. Limassol: [s.n.], 2012. p. 722–727. Citado na página 68.
- ROWSTRON, A. I. T.; DRUSCHEL, P. Pastry: Scalable, Decentralized Object Location, and Routing for Large-Scale Peer-to-Peer Systems. In: *Proceedings of the IFIP/ACM International Conference on Distributed Systems Platforms Heidelberg (Middleware '01)*. London: Springer-Verlag, 2001. p. 329–350. ISBN 3-540-42800-3. Citado na página 77.
- SHAN, L. et al. Predictive Group Handover Scheme with Channel Borrowing for Mobile Relay Systems. In: *Proc. of the International Wireless Communications and Mobile Computing Conference*. Crete Island: [s.n.], 2008. p. 153–158. Citado 2 vezes nas páginas 43 e 59.
- SHEN, W.; ZENG, Q. Cost-function-based network selection strategy in integrated wireless and mobile networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, v. 57, n. 6, p. 3778–3788, 2008. Citado 3 vezes nas páginas 18, 42 e 58.
- SILVA, E. S. e. *Mobilidade e QoS fim-a-fim em Redes NGN: Elementos Arquiteturais e Estratégias de Caminhos Interdomínios de Seleção*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Santa Catarina, 2011. Citado na página 66.
- SILVA, R. et al. Heterogeneous Mobility in Next Generation Devices: An Android-Based Case Study. *Mobile Multimedia Communications*, Springer, v. 77, p. 316–330, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 41.
- SÁNCHEZ, B. B.; SÁNCHEZ-PICOT Álvaro; RIVERA, D. S. D. Using 5G technologies in the Internet of Things: Handovers, problems and challenges. In: *Proceedings of the 9th International Conference on Innovative Mobile and Internet Services in Ubiquitous Computing*. Blumenau: [s.n.], 2015. p. 364–369. Citado na página 36.
- SOLIMAN, H. et al. *Hierarchical Mobile IPv6 (HMIPv6) Mobility Management*. IETF, 2008. RFC 5380. (Request for Comments, 1). Disponível em: <<http://tools.ietf.org/html/rfc5380>>. Citado na página 62.

- STEVENS-NAVARRO, E.; LIN, Y.; WONG, V. An MDP-Based Vertical Handoff Decision Algorithm for Heterogeneous Wireless Networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, v. 57, n. 2, p. 1243–1254, 2008. Citado 3 vezes nas páginas 18, 42 e 58.
- STOICA, I. et al. Chord: A Scalable Peer-to-Peer Lookup Protocol for Internet Applications. *IEEE/ACM Transactions Networking*, ACM Press, v. 11, n. 1, p. 17–32, February 2003. ISSN 1063-6692. Disponível em: <<http://portal.acm.org/citation.cfm?id=638336>>. Citado na página 77.
- TAGHIZADEH, A. et al. A performance Evaluation Framework for Network-Based IP Mobility Solutions. *International Journal of Innovative, Computing, Information and Control*, v. 8, n. 10, p. 7263–7288, 2012. Citado 9 vezes nas páginas 18, 26, 61, 69, 87, 90, 91, 92 e 97.
- TANIUCHI, K. et al. IEEE 802.21: Media Independent Handover: Features, Applicability, and Realization. *IEEE Communications Magazine*, v. 47, n. 1, p. 112–120, 2009. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 40.
- TELECORDIA. *Transport Systems Generic Requirements (TSGR): Common Requirements. GR-499, Issue 2*, Telecordia Report 2009. Citado na página 49.
- TELESYSTEM. *LTE in a Nutshell: Protocol Architecture*, Telesystem Innovations White Paper, 2009. Citado na página 28.
- TRUNG, T. M. et al. A Design of Network-based Flow Mobility based on Proxy Mobile IPv6. In: *Proc. of the IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS)*. Shanghai: [s.n.], 2011. p. 373–378. Citado 3 vezes nas páginas 89, 107 e 121.
- WANG, Y.; BI, J. A Solution for IP Mobility Support in Software Defined Networks. In: *Proceedings of the 23rd International Conference on Computer Communication and Networks*. Shanghai: [s.n.], 2014. p. 1–8. Citado na página 68.
- YEH, J.; CHEN, J.; AGRAWAL, P. Fast intra-network and cross-layer handover (finch) for wimax and mobile internet. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, IEEE, v. 8, n. 4, p. 558–574, 2009. Citado na página 66.
- YOKOTA, H. et al. *Fast Handovers for Proxy Mobile IPv6*. IETF, 2011. RFC 5949. (Request for Comments, 1). Disponível em: <<http://tools.ietf.org/html/rfc5949>>. Citado 4 vezes nas páginas 18, 64, 66 e 106.
- ZEKRI, M.; JOUABER, B.; ZEGHLACHE, D. A Review on Mobility Management and Vertical Handover Solutions over Heterogeneous Wireless Networks. *Computer Communications*, v. 35, n. 17, p. 2055–2068, 2012. Citado 5 vezes nas páginas 18, 24, 25, 38 e 41.
- ZHANG, L. J.; PIERRE, S. Performance Analysis of Fast Handover for Hierarchical MIPv6 in Cellular Networks. In: *Proceedings of the IEEE Vehicular Technology Conference*. Singapore: [s.n.], 2008. p. 2374–2378. Citado na página 90.
- ZHANG, Y.; SOONG, B.-H. Channel Holding Time in Hierarchical Cellular Systems. *IEEE Communications Letters*, v. 8, n. 10, p. 614–616, 2004. Citado na página 50.

ZHAO, B. et al. Tapestry: a resilient global-scale overlay for service deployment. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, v. 22, n. 1, p. 41–53, 2004. Citado na página 77.

ZHONG, F. et al. Enabling Inter-PMIPv6-Domain Handover with Traffic Distributors. In: *Proc. of the 7th IEEE Consumer Communications and Networking Conference*. Las Vegas: [s.n.], 2010. p. 1–5. Citado 6 vezes nas páginas 18, 19, 69, 71, 75 e 86.

ZHOU, D. et al. Evaluation of Fast PMIPv6 and Transient Binding PMIPv6 in Vertical Handover Environment. In: *Proc. of the IEEE International Conference on Communications*. Cape Town: [s.n.], 2010. p. 1550–3607. Citado 3 vezes nas páginas 68, 69 e 70.

## Glossário

**cross-layering** Técnica que consiste em permitir que entidades de uma camada da pilha de protocolos obtenham dados ou executem comandos em outra camada.

**downlink** Direção do *link* do PoA até o nó móvel.

**e-NodeB** Terminologia da tecnologia LTE para designar um PoA.

**Kademlia** É uma Tabela Hash Distribuída para redes P2P descentralizadas que especifica a estrutura da rede e troca de informações por meio de buscas baseadas na métrica XOR.

**LTE** *Long-Term Evolution*, sistema definido pela *Third Generation Partnership Project* (3GPP) como pertencente à quarta geração de redes móveis.

**MIH** *Media Independent Handover*, ou handover independente de mídia, correspondente ao padrão IEEE 802.21.

**multihoming** Situação em que um dispositivo está conectado a mais de uma rede simultaneamente.

**multihop** Múltiplos saltos.

**PoA** *Point of Attachment*, ou ponto de acesso; entidade situada em uma das extremidades de um enlace.

**PoA candidato** PoA candidato a ser escolhido para *handover*.

**PoA de origem** PoA ao qual o nó móvel está inicialmente associado.

**PoA-alvo** PoA ao qual o nó móvel estará associado ao fim do *handover*.

**uplink** Direção do *link* do nó móvel até o PoA.

**Wi-Fi** *Wireless Fidelity*, sistema definido pela *Wi-Fi Alliance* que garante a compatibilidade entre dispositivos que adotam o padrão IEEE 802.11.

**WiMAX** *Worldwide Interoperability Microwave Access*, sistema definido pelo WiMAX Forum, que garante a compatibilidade entre dispositivos que adotam o padrão IEEE 802.16.

**XOR** Operação lógica de OU exclusivo.



# Apêndices

## APÊNDICE A – NS-3 - Arquitetura - módulo PMIPv6

O módulo PMIPv6 para o simulador NS-3 foi disponibilizado inicialmente para a versão 3.12 (CHOI et al., 2010) e posteriormente portado para a versão 3.19 (TRUNG et al., 2011). A Figura A.1 apresenta a relação entre as classes do módulo Pmipv6 e a arquitetura do simulador. As classes que aparecem hachuradas são aquelas que já pertencem à distribuição padrão do NS-3.

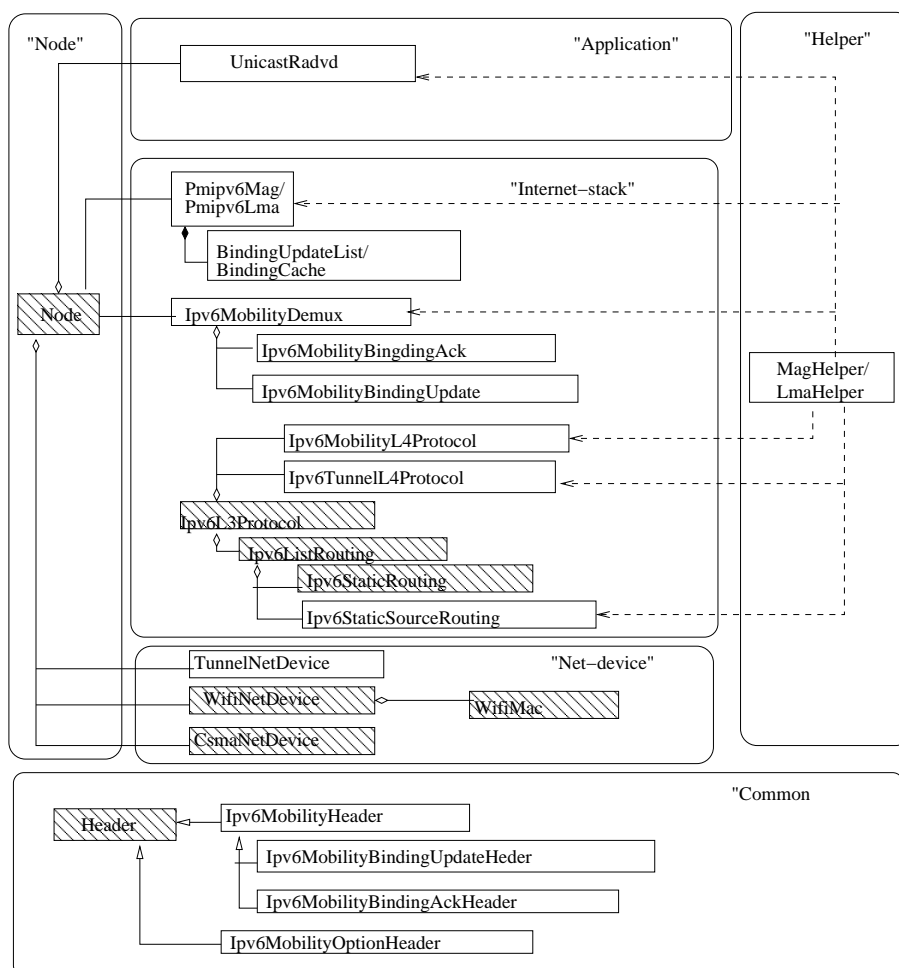


Figura A.1. Diagrama de classes do módulo PMIPv6.

As principais classes do módulo PMIPv6 são:

- `Ipv6MobilityL4Protocol` - Trata mensagens de PBU/PBA;
- `Ipv6TunnelL4Protocol` - Trata mensagens encapsuladas no túnel;

- `Ipv6MobilityDemux` - Detecta se a mensagem deve ser tratada pela classe `Ipv6MobilityBindingUpdate` ou pela classe `Ipv6MobilityBindingAck`;
- `Pmipv6Mag` - Agente instalado na MAG ; responsável por enviar mensagens de PBU e tratar o recebimento de mensagens PBA;
- `Pmipv6Lma` - Agente instalado no LMA; responsável por enviar mensagens de PBA e tratar o recebimento de mensagens PBU;
- `MagHelper` - Classe utilitária para configurar parâmetros e criar as classes correspondentes à MAG;
- `LMAHelper` - Classe utilitária para configurar parâmetros e criar as classes correspondentes à LMA;
- `Ipv6MobilityBindingUpdateHeader` e `Ipv6MobilityAcknowledgeHeader` - Classes que determinam o formato e a serialização das mensagens PBU e PBA.
- `Ipv6StaticSourceRoutingHelper` - Usada na configuração do túnel;
- `Ipv6MobilityHeader` e `Ipv6MobilityOptionsHeader` - Classes genéricas que implementam formatação de pacotes MIP.

É importante observar que o módulo PMIPv6 também introduziu classes para MIP, que não são suportadas pela distribuição padrão do NS-3. A integração com o protocolo ICMP para envio de mensagem de *Router Advertisement* após o envio da mensagem PBA também foi implementada nesse módulo.

A Figura A.2 apresenta o fluxo entre as classes do módulo PMIPv6 durante o envio/recebimento das mensagens de PBU e PBA. Os passos são :

- (1) Evento da L2 na placa de rede da MAG;
- (2) MAG inicializa a lista de binding update e envia pacote PBU;
- (3) `IPv6L3Protocol` monta o pacote IP e manda para a L2;
- (4) `NetDevice` (L2) do MAG envia quadros para o `NetDevice` do LMA;
- (5) O protocol handler repassa o pacote à L3 (`IPv6L3Protocol`);
- (6) `IPv6L3Protocol` trata o header IP do pacote e repassa à camada acima;
- (7),(8),(9) `Ipv6MobilityL4Protocol` detecta que é uma PBU e repassa a `Ipv6MobilityBindingUpdate`;
- (10) `Ipv6MobilityBindingUpdate` lê as flags e vendo a flag 'p' de Proxy, manda para o agente LMA (`Pmipv6Lma`);

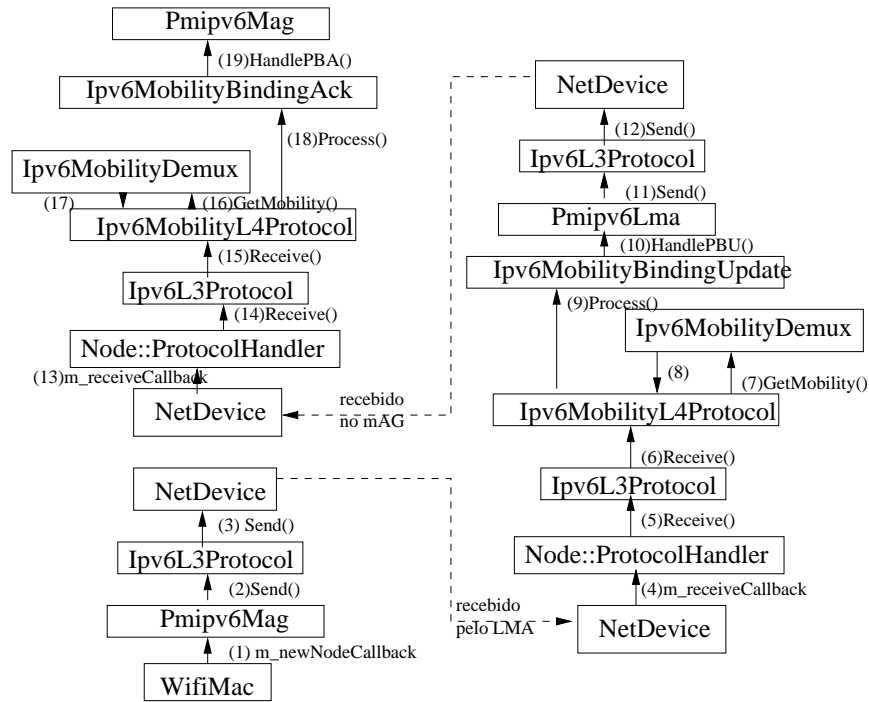


Figura A.2. Fluxo de envio/recebimento das mensagens de PBU e PBA.

- (11) Pmipv6Lma interpreta a mensagem e responde com PBA até chegar na L2 e assim por diante.

O tratamento de saída do nó do domínio PMIPv6 estava incompleto. O módulo previa o tratamento em caso da mensagem de PBU ser decorrente da saída do nó da rede, porém a detecção da saída na camada de enlace não era realizada. Foi necessário um ajuste no código para prever esse caso.

## APÊNDICE B – NS-3 - Arquitetura - módulo Kademia

O módulo Kademia para NS-3 foi implementado exclusivamente para a presente Tese. A Figura B.1 apresenta as classes do módulo Kademia.

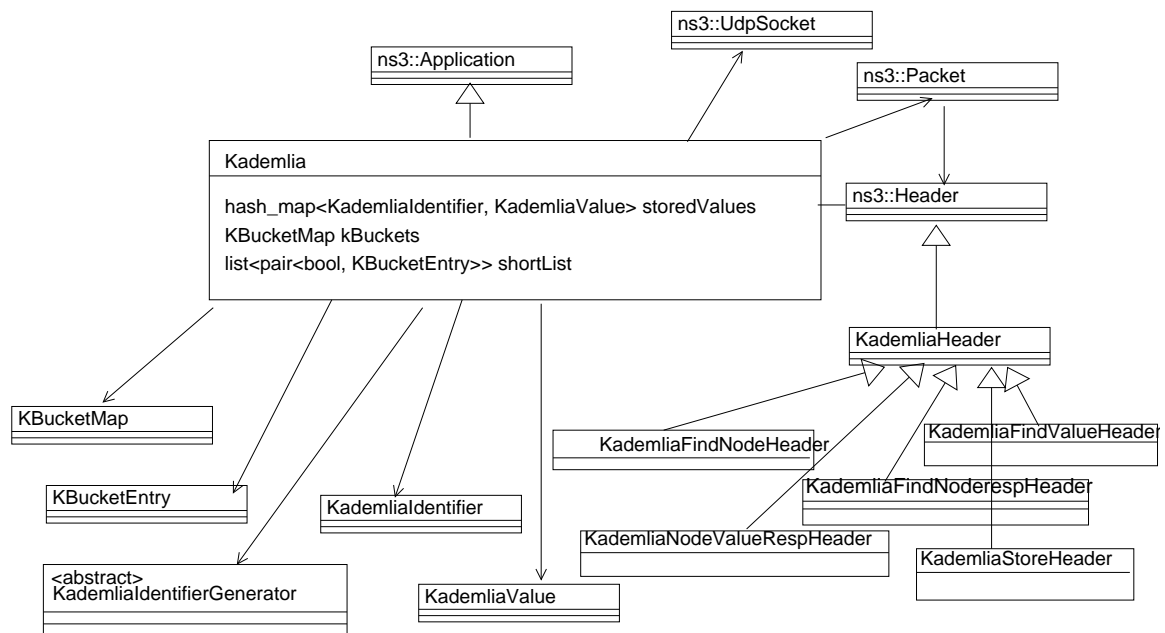


Figura B.1. Diagrama de classes do módulo Kademia.

A classe `Kademia` herda da classe `ns3::Application` provida na distribuição do NS-3 sendo um protocolo de camada de aplicação que roda sobre UDP. A classe representa uma instância da aplicação Kademia em um par. Ela armazena uma tabela `hash` que relaciona objetos do tipo `KademiaIdentifier` com objetos do tipo `KademiaValue`. A classe `KademiaIdentifier` representa tanto chaves como `nodeIDs`, provendo métodos para cálculo de distância baseado na operação binária XOR e de comparação, necessária para consultas na tabela `hash`. A classe `KademiaValue` dispõe apenas de um buffer permitindo que o usuário da classe defina o tamanho e formato da estrutura dos dados a serem armazenados. A classe `Kademia` também armazena uma lista de pares que já responderam suas requisições durante uma operação de `lookup`. Uma instância da classe `KBucketMap` ainda é mantida no par como tabela de roteamento onde os `k-buckets` são armazenados. As classes a seguir também fazem parte do módulo Kademia:

- `KBucketEntry` - representação de um `k-bucket`;
- `KademiaIdentifierGenerator` - interface para geração de `nodeIDs`;

- `KademiaHeader` - classe abstrata para definir o formato das mensagens Kademia;
- `KademiaFindNodeHeader` e `KademiaFindNodeRespHeader` - classes que definem o formato da requisição e resposta da primitiva `FIND_NODE`;
- `KademiaFindValueHeader` e `KademiaNodeValueRespHeader` - classes que definem o formato da requisição e resposta da primitiva `FIND_VALUE`;
- `KademiaStoreHeader` - classes que definem o formato da requisição da primitiva `STORE`.

O módulo Kademia foi desenvolvido de modo a atender as necessidades de uma simulação do protocolo CPMIPv6. Assim, alguns aspectos do padrão Kademia não foram implementados, como: geração randômica de *nodeIDs*, a primitiva `PING`, o envio periódico de `STORE`, os mecanismos de *magic cookie* para identificar as mensagens *refresh* periódico e rotinas de expiração de pares.



do tipo `CxPmipv6Lma`;

- `CxPmipv6MagHelper` - Classe utilitária para configurar parâmetros e criar objetos do tipo `CxPmipv6Mag`;
- `CxPmipv6PBUHeader` - Classe que determina o formato e a serialização da mensagem `PBUInterdomain`;
- `CxPmipv6PBUNoProfHeader` - Classe que determina o formato e a serialização da mensagem `PBUNoProf`;
- `CxPmipv6PBAHeader` - Classe que determina o formato e a serialização da mensagem `PBAInterdomain`;
- `CxPmipv6PBAProfHeader` - Classe que determina o formato e a serialização da mensagem `PBAProf`;
- `ClusterDeleteHeader` - Classe que determina o formato e a serialização da mensagem `DELETE` do *cluster*; o valor `INITIAL_BINDACK_TIMEOUT` é ajustado para 30 s para permitir que o nó tenha mais tempo para adentrar no novo domínio antes de ser considerado como nó desregistrado pelo domínio anterior;
- `ClusterUpdateHeader` - Classe que determina o formato e a serialização da mensagem `UPDATE` do *cluster*.
- `CxPmipv6IdentifierGenerator` - Classe responsável por gerar um *nodeID* para os pares no *cluster*; é gerado a partir do endereço do LMA; as chaves são geradas a partir do prefixo principal do nó móvel atribuído pelo seu LMA de origem.



## APÊNDICE D – NS-3 - Arquitetura - módulo No-Gap

O módulo No-Gap foi implementado exclusivamente para a presente Tese baseado no trabalho de Joe e Lee (JOE; LEE, 2012). A Figura D.1 apresenta as classes do módulo No-Gap. A maioria das classes herdam de classes do módulo Pmipv6. As classes mais importantes são apresentadas a seguir:

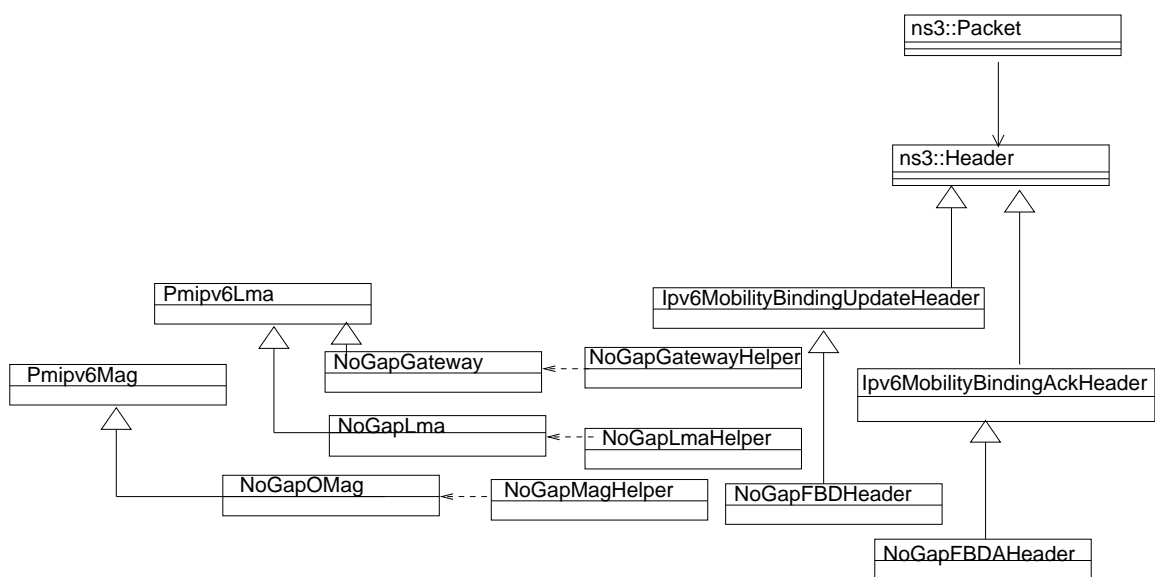


Figura D.1. Diagrama de classes do módulo No-Gap.

- NoGapGateway - Agente a ser instalado na entidade centralizadora *Gateway*;
- NoGapGatewayHelper - Classe utilitária para configurar parâmetros e criar objetos do tipo NoGapGateway ;
- NoGapLma - Agente a ser instalado no LMA;
- NoGapLmaHelper - Classe utilitária para configurar parâmetros e criar objetos do tipo NoGapLma;
- NoGapOMag - Agente a ser instalado no OMAG;
- NoGapMagHelper - Classe utilitária para configurar parâmetros e criar objetos do tipo NoGapOMag;
- NoGapFBDHeader - Classe que determina o formato e a serialização da mensagem FBD;

- `NoGapFBDAHeader` - Classe que determina o formato e a serialização da mensagem FBDA.

Durante a implementação observou-se que os autores não informaram que informações o *Gateway* envia ao novo LMA para que este atualize suas informações de perfil com o nó visitante. Assim, para que a implementação fosse viável, foi incluída a informação dos nós em um perfil universal, acessível por todo os MAGs e LMAs. O autores também consideram que o OMAG formaria túneis redundantes com o PLMA e o NLMA e que pacotes repetidos poderiam chegar ao nó móvel. Não foi possível reproduzir esse comportamento no simulador, uma vez que seria necessário configurar roteamento multipath, que não está disponível na classe `IPv6StaticRouting` do NS-3.

## APÊNDICE E – NS-3 - Arquitetura - módulo I-PMIP

O módulo I-PMIP foi implementado exclusivamente para a presente Tese baseado no trabalho de Neumann *et al.* (NEUMANN et al., 2009). A Figura E.1 apresenta as classes do módulo I-PMIP. A maioria das classes herdam de classes do módulo Pmipv6. As classes mais importantes são apresentadas a seguir:

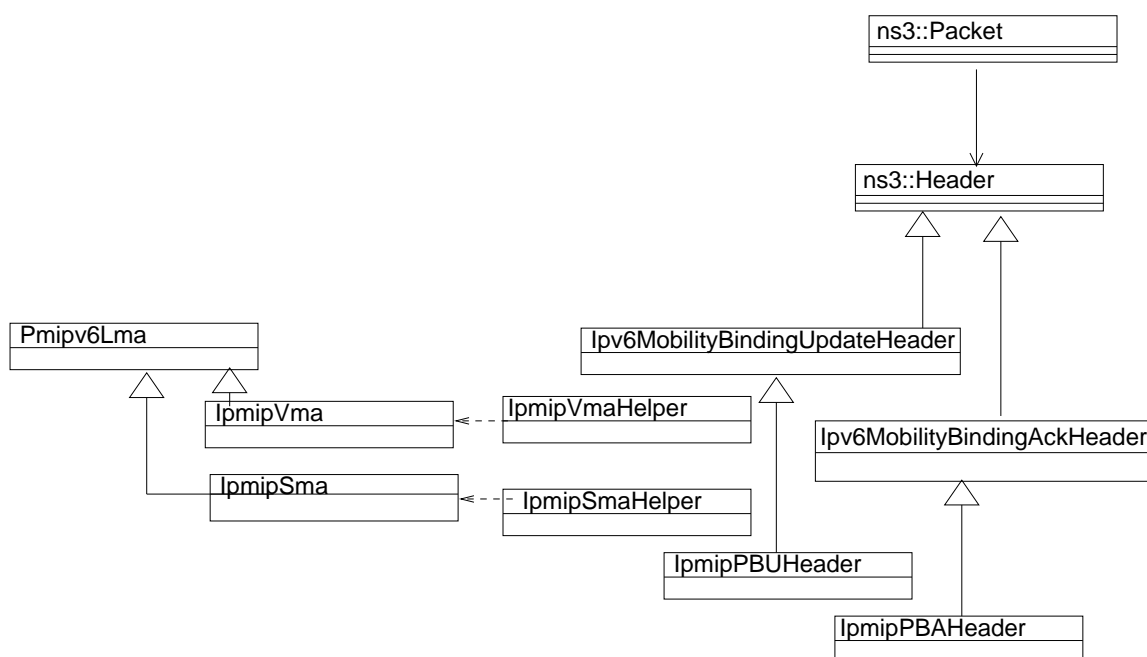


Figura E.1. Diagrama de classes do módulo I-PMIP.

- IpmipVma - Agente a ser instalado na entidade centralizadora VMA;
- IpmipVmaHelper - Classe utilitária para configurar parâmetros e criar objetos do tipo IpmipVma;
- IpmipSma - Agente a ser instalado na entidade SMA;
- IpmipSmaHelper - Classe utilitária para configurar parâmetros e criar objetos do tipo IpmipSma;
- IpmipPBUHeader - Classe que determina o formato e a serialização da mensagem IpmipPBU;
- IpmipPBAHeader - Classe que determina o formato e a serialização da mensagem IpmipPBA.

Os autores não deixam claro como é o mecanismo de registro e como o SMA diferencia um *handover* intradomínio do *handover* interdomínio. Assim, para esta simulação, inferiu-se que o fluxo de *handover* intradomínio é igual ao do *handover* interdomínio. Adicionalmente, os autores não consideram a possibilidade de desregistro de uma SMA para que entre em um novo domínio. Na simulação, o nó acessa o domínio novo sem ser removido do domínio anterior. Os autores também não deixaram claro como seria a comunicação entre SMAs vizinhos caso haja mais de um vizinho para um mesmo SMA. Uma vez que não foi informado como ocorre o compartilhamento das informações de perfil do nó, para que a implementação fosse viável, foi incluída a informação dos nós em um perfil universal, acessível por todo os MAGs e LMAs.