

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS  
INSTITUTO DE COMPUTAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INFORMÁTICA

# **Gerenciamento de Mobilidade de Fluxos IP em Dispositivos com Múltiplas Interfaces**

Flávio Augusto Carvalho Montenegro Filho

Manaus, AM  
Março de 2015

Flávio Augusto Carvalho Montenegro Filho

# **Gerenciamento de Mobilidade de Fluxos IP em Dispositivos com Múltiplas Interfaces**

Proposta de dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Informática da Universidade Federal do Amazonas como requisito para obtenção do grau de Mestre em Informática.

Área de Concentração: Redes de Computadores.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo James Pereira Souto

## Ficha Catalográfica

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

M777g Montenegro Filho, Flávio Augusto Carvalho  
Gerenciamento de Mobilidade de Fluxos IP em Dispositivos com Múltiplas Interfaces / Flávio Augusto Carvalho Montenegro Filho. 2015  
87 f.: il. color; 31 cm.

Orientador: Eduardo James Pereira Souto  
Dissertação (Mestrado em Informática) - Universidade Federal do Amazonas.

1. gerenciamento de fluxo. 2. mobilidade. 3. ip. 4. múltiplas interfaces. I. Souto, Eduardo James Pereira II. Universidade Federal do Amazonas III. Título



PODER EXECUTIVO  
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
INSTITUTO DE COMPUTAÇÃO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INFORMÁTICA



UFAM

## FOLHA DE APROVAÇÃO

**"Gerenciamento de Mobilidade de Fluxos IP em Dispositivos com Múltiplas Interfaces"**

**FLÁVIO AUGUSTO CARVALHO MONTENEGRO FILHO**

DiSSERTAÇÃO DE Mestrado defendida e aprovada pela banca examinadora contida pelos Professores:

Prof. Eduardo James Pereira Souto - PRESIDENTE

Prof. César Augusto Viana Melo - MEMBRO INTERNO

Prof. Michele Nogueira Lima - MEMBRO EXTERNO

Manaus, 27 de Março de 2015



# Agradecimentos

Obrigado Senhor Deus pela saúde, força e determinação que me concedeu e me permitiu realizar este trabalho e nunca desistir de alcançar o objetivo de finalizá-lo.

Agradeço aos meus pais Flávio Augusto Carvalho Montenegro e Núbia Maria Furtado Montenegro pela paciência, pelo apoio e por toda a força que me deram, sempre me acompanhando em todos os passos desta minha caminhada. Obrigado Larissa Pinto de Souza, minha namorada, companheira e amiga que também me apoiou e me incentivou durante todo este processo.

Obrigado ao Professor Eduardo James Pereira Souto que sempre acreditou em mim e, com paciência, dedicação e sabedoria, pode sempre me ensinar e orientar a tomar as melhores decisões.

Obrigado aos meus amigos de turma e aos meus colegas de laboratório de pesquisa pelos momentos vividos e o conhecimento compartilhado. Também agradeço aos meus colegas de trabalho do Instituto Nokia de Tecnologia e da FUCAPI, que colaboraram e permitiram que eu pudesse realizar este programa de pós-graduação.

Por fim, agradeço a todos que contribuíram de forma direta ou indireta no desenvolvimento deste trabalho e estiveram presentes em algum momento deste período de aprendizagem. Portanto, espero retribuir de alguma forma a comunidade com todo o conhecimento adquirido.

“O período de maior ganho em conhecimento e experiência  
é o período mais difícil da vida de alguém.”

*Dalai Lama*

*Flávio Augusto Carvalho Montenegro Filho*

# Resumo

Com diferentes tecnologias de rede sem fio como Bluetooth, Wi-Fi e 3G sendo implantadas para prover ubiquidade de acesso, é natural que área de cobertura dessas redes se sobreponha em determinados lugares. Essa sobreposição permite que os usuários possam escolher como se conectar à Internet por meio das múltiplas interfaces de acesso disponíveis nos atuais dispositivos móveis. Além disso, a disponibilidade de múltiplas interfaces de rádio pode ser mais benéfica se todas essas interfaces forem usadas de forma colaborativa. Isto requer um serviço que seja capaz de prover o roteamento de tráfego entre as diferentes interfaces do dispositivo de acordo com os requisitos de cada fluxo que está sendo transmitido.

Neste contexto, as soluções como Mobile IP e Proxy Mobile IP foram projetadas para garantir a transparência e a seletividade da movimentação dos fluxos de dados entre as diferentes interfaces. Isto é normalmente alcançado através da introdução de um agente na arquitetura da rede ou do dispositivo que funciona como ponto de redirecionamento de pacotes. Fluxos de pacote de entrada são encaminhados para as diferentes interfaces do dispositivo móvel de acordo com os tipos de tráfego de cada fluxo de pacotes.

Este trabalho estende essa abordagem analisando as preferências do usuário, o contexto em que o dispositivo está inserido e os requisitos de cada fluxo que está sendo transmitido antes de decidir se será necessário executar uma mudança de interface, evitando assim, reconfigurações desnecessárias. Testes realizados em um ambiente real demonstraram a importância em considerar os requisitos de cada fluxo para determinar a execução de mudança de interface e assim, diminuir os custos de sinalização de *handover* e as reconfigurações de interface desnecessárias que podem gerar uma degradação na comunicação.

Palavras-chave: Gerenciamento de fluxo; mobilidade; IP; múltiplas interfaces.

# Abstract

With different wireless technologies such as Bluetooth, Wi-Fi and 3G being deployed to provide ubiquitous access, it is natural that coverage area of these networks overlap in certain areas. This overlap allows users to choose how to connect to Internet through multiple access interfaces available in today's mobile devices. Furthermore, the availability of multiple radio interfaces may be most beneficial if all of these interfaces are used in a collaborative manner. This requires a service that is capable of providing routing traffic between different interfaces of the device according to the requirements of each stream being transmitted.

In this context, solutions such as Mobile IP and Proxy Mobile IP are designed to ensure transparency and the selectivity of the movement of data flows between the different interfaces. This is usually achieved by introducing an agent in the network architecture or device, which acts as packet forwarding point. Incoming packet flows are directed to different interfaces of the mobile device according to the types of packets of each traffic flow.

This work extends this approach by analyzing the user's preferences, the context in which the device is inserted and the requirements of each stream being transmitted before deciding whether to perform a change of interface, thus avoiding unnecessary reconfigurations. Tests performed in a real environment demonstrated the importance of considering the requirements of each flow to determine the execution of interface change and thus decrease the handover signaling costs and unnecessary reconfigurations of interface which can generate a low quality communication.

Keywords: Flow Management; mobility; IP; multiple interfaces.

# Sumário

Capítulo 1 .....	17
Introdução .....	17
<b>1.1. Motivação e Desafios</b> .....	19
<b>1.2. Objetivos</b> .....	21
<b>1.3. Contribuições</b> .....	22
<b>1.4. Organização da Dissertação</b> .....	22
Capítulo 2 .....	24
<b>2.1. Internet Protocol (IP)</b> .....	24
<b>2.2. Mobile IP</b> .....	Erro! Indicador não definido.
<b>2.2.1. Operação Básica</b> .....	26
<b>2.2.2. Comparação entre Mobile IPv4 e Mobile IPv6</b> .....	28
<b>2.2.3. Mobilidade de Fluxo para o MIPv6</b> .....	29
<b>2.3. Proxy Mobile IPv6</b> .....	30
<b>2.3.1. Operação Básica</b> .....	30
<b>2.3.2. Mobilidade de Fluxo para o PMIPv6</b> .....	32
<b>2.4. Considerações Finais</b> .....	33
Capítulo 3 .....	35
<b>3.1. Tecnologias de Baixo Consumo e Mobilidade IP</b> .....	35
<b>3.1.1. Bluetooth e Mobilidade IP</b> .....	35
<b>3.1.1. Operação Básica</b> .....	36
<b>3.1.2. Zigbee e Mobilidade IP</b> .....	37
<b>Operação Básica</b> .....	38
<b>3.2. Estratégias para Gerenciamento da Mobilidade</b> .....	39
<b>3.3. Considerações Finais</b> .....	45
Capítulo 4 .....	49
<b>4.1. Mobilidade de Fluxo</b> .....	49
<b>4.2. Visão Geral da Solução</b> .....	51
<b>4.3. Mecanismo para Gerenciamento de Mobilidade</b> .....	53
<b>4.3.1. Operação Básica</b> .....	55
<b>4.3.2. Algoritmo de Gerenciamento da Mobilidade dos Fluxos</b> .....	58
<b>4.4. Considerações Finais</b> .....	63
Capítulo 5 .....	65

<b>5.1. Ambiente de Experimentação</b> .....	65
<b>5.2. Cenários de Experimentação</b> .....	66
<b>5.2.1. Ubiquidade de Acesso</b> .....	66
<b>5.2.2. Reconfiguração Dinâmica</b> .....	67
<b>5.3. Métricas</b> .....	68
<b>5.4. Resultados</b> .....	69
<b>5.4.1. Ubiquidade de Acesso</b> .....	69
<b>5.4.2. Reconfiguração Dinâmica</b> .....	73
<b>5.5. Considerações Finais</b> .....	79
Capítulo 6 .....	80
<b>6.1. Trabalhos Futuros</b> .....	81
Referências.....	83

# Lista de Figuras

Figura 2.1 - Processo de Handshake entre o MN e o HA em uma rede visitante. ....	26
Figura 2.2 - Operação Básica de Tunelamento Reverso usando MIPv6.....	28
Figura 2.3 - Mobilidade de Fluxo em MIPv6. ....	29
Figura 2.4 - Arquitetura PMIPv6.....	31
Figura 2.5 - Diagrama de Sequência do PMIPv6. ....	32
Figura 2.6 - Mobilidade de Fluxo em PMIPv6. ....	33
Figura 3.1 - Arquitetura do Protocolo Bluetooth com Mobile IP. ....	36
Figura 4.1 - Exemplo de um dispositivo Multihoming trafegando dados por múltiplas interfaces. .....	50
Figura 4.2 - Visão geral da arquitetura.....	52
Figura 4.3 - Classificação das Interfaces.....	54
Figura 4.4 - Análise de contexto de energia.....	56
Figura 4.5 - Análise de contexto do nível de sinal.....	56
Figura 4.6 - Seleção dos Fluxos.....	57
Figura 5.1 - Cenário Base.....	65
Figura 5.2 - Cenário que representa a movimentação do dispositivo. ....	66
Figura 5.3 - Cenário com duas ou mais interfaces ativas e um baixo nível de bateria. ....	67
Figura 5.4 - Cenário de transferência de um arquivo em uma rede com menor nível de sinal..	68
Figura 5.5 – Representação da única sinalização TCP SYN.....	70
Figura 5.6 – Representação do número de sequência crescente após a mudança de interface entre redes WLAN. ....	70
Figura 5.7 - Ampliação do gráfico do número de sequência detalhando as linhas do gráfico. .....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
Figura 5.8 – Representação da vazão pelo tempo durante o <i>handover</i> entre redes WLAN para WLAN.....	71
Figura 5.9 – Número de sequência durante o <i>handover</i> entre uma rede WPAN para uma rede WLAN.....	72
Figura 5.10 - Representação da vazão pelo tempo durante o <i>handover</i> entre redes WPAN para WLAN.....	73
Figura 5.12 - Representação da vazão pelo tempo durante o <i>handover</i> entre redes WPAN para WLAN com um fluxo VoIP. ....	74
Figura 5.13- Relação do atraso pelo número de sequência durante a mudança de interface utilizando um fluxo VoIP. ....	75
Figura 5.14 – Comparação do consumo de energia utilizando Wi-Fi e Bluetooth.....	76
Figura 5.15 - Captura da Transferência de Arquivo utilizando FTP.....	77
Figura 5.16 – Representação da vazão pelo tempo durante a transferência de um arquivo usando FTP. ....	77
Figura 5.17 – Representação do número de sequência pelo tempo durante o <i>handover</i> entre redes WLAN utilizando um fluxo FTP para transferir um arquivo. ....	78

Figura 5.18 - Representação da vazão pelo tempo durante a transferência de um arquivo usando FTP sem realizar a mudança de interface..... 78

# Lista de Acrônimos

AR	<i>Access Router</i>
BA	<i>Binding Acknowledgement</i>
BC	<i>Binding Cache</i>
BU	<i>Binding Update</i>
BSSID	<i>Basic Service Set Identification</i>
CN	<i>Correspondent Node</i>
CoA	<i>Care-of-Address</i>
DSMIPv6	<i>Dual Stack Mobile IPv6</i>
DHCP	<i>Dynamic Host Configuration Protocol</i>
FA	<i>Foreign Agent</i>
FID	<i>Flow Identifier</i>
FTP	<i>File Transfer Protocol</i>
GPRS	<i>General Packet Radio System</i>
HA	<i>Home Agent</i>
HNP	<i>Home Network Prefix</i>
HoA	<i>Home Address</i>
HTTP	<i>Hypertext Transfer Protocol</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IETF	<i>Internet Engineering Task Force</i>
IP	<i>Internet Protocol</i>
IPv4	<i>Internet Protocol version 4</i>
IPv6	<i>Internet Protocol version 6</i>
LMD	<i>Localized Mobility Domain</i>
LMA	<i>Local Mobility Anchor</i>
LTE	<i>Long Term Evolution</i>
MAG	<i>Mobile Access Gateway</i>

MN	Mobile Node
MIPv4	<i>Mobile IPv4</i>
MIPv6	<i>Mobile IPv6</i>
NAT	<i>Network Address Translation</i>
OAI PMIPv6	<i>Open Air Interface Proxy Mobile IPv6</i>
PBA	<i>Proxy Binding Acknowledgement</i>
PBU	<i>Proxy Binding Update</i>
PMIPv6	<i>Proxy Mobile IPv6</i>
QoE	<i>Quality of Experience</i>
QoS	<i>Quality of Service</i>
RSS	<i>Received Signal Strength</i>
TCP	<i>Transmission Control Protocol</i>
UMIP	<i>USAGI-patched Mobile IPv6 for Linux</i>
UMTS	<i>Universal Mobile Telecommunications System</i>
VoIP	<i>Voice over IP</i>
WLAN	<i>Wireless Local Area Networks</i>
WPAN	<i>Wireless Personal Area Networks</i>
WWAN	<i>Wireless Wide Area Network</i>

# Capítulo 1

## Introdução

Nos últimos anos, múltiplos dispositivos e tecnologias de acesso sem fio têm sido desenvolvidos para satisfazer os diferentes requisitos dos usuários e das aplicações. A maioria dos dispositivos móveis atuais como *notebooks*, *smartphones* e *tablets* têm sido fabricados com múltiplas interfaces de acesso, possibilitando aos usuários o acesso a diferentes redes sem fio.

Essa coexistência de diferentes redes sem fio tem sido vista como uma tendência para o desenvolvimento das redes de dados da próxima geração [29]. Um dos principais objetivos é proporcionar uma melhor experiência aos usuários, tornando os serviços sempre disponíveis em qualquer lugar e a qualquer momento. Contudo, o projeto inicial do protocolo IP (*Internet Protocol*) não foi construído para suportar, de forma transparente, a mobilidade de usuários. A aquisição e utilização de um endereço IP por um *terminal*<sup>1</sup> dependem de seu ponto de acesso. Se o *terminal* muda seu ponto de acesso à Internet, é preciso adquirir um novo endereço. Assim, as aplicações dependem de endereços e, geralmente, quando ocorre uma mudança de endereço, os aplicativos precisam ser iniciados novamente com o novo endereço. Por exemplo, imagine um cenário onde um usuário que está em casa utilizando uma aplicação VoIP por meio de uma rede Wi-Fi e precisa sair de casa para ir ao seu trabalho, este será obrigado a interromper a ligação e recomeçar a conexão, pois a área de cobertura de sua rede doméstica não é capaz de mantê-lo conectado durante o seu deslocamento. Como alternativa, o usuário poderia se conectar a uma rede 3G que possui uma área de cobertura mais ampla.

Para lidar com esse problema e fornecer transparência de mobilidade, algumas soluções foram propostas no decorrer dos últimos anos. Por exemplo, o IP móvel tem sido projetado pela IETF (*Internet Engineering Task Force*) para permitir que um

---

<sup>1</sup> O termo *terminal* será usado de modo intercambiável com computadores ou qualquer outro dispositivo móvel.

computador mantenha o mesmo endereço IP quando se move a partir de uma sub-rede para outra independente da tecnologia de camada de enlace utilizada. Entretanto, essa transparência de mobilidade ocorre somente para a camada IP, pois as conexões de transporte não podem ser mantidas durante o procedimento de mudança de rede, também conhecido como *handoff* ou *handover* [32]. Esse procedimento pode ser categorizado como [36]: i) *Handover horizontal*: quando um terminal se movimenta de uma estação base para outra dentro da mesma rede de acesso; ou ii) *Handover vertical*: quando as conexões do terminal móvel mudam de uma rede para outra, ou seja, passam a utilizar outra tecnologia de rede.

Para ambos os procedimentos de *handover*, o IP móvel (ou o *Mobile IP*) é capaz de manter as conexões ativas aproveitando o fato da existência de redes IP sobrepostas. Neste contexto, a integração de sistemas sem fio heterogêneos tem sido vista como a chave para se obter mobilidade contínua. Contudo, isso não garante que o usuário esteja conectado por meio da melhor interface de rede. Diferentes tecnologias de acesso podem ser requeridas para atender aos requisitos da aplicação, do terminal, ou mesmo do contexto em que o usuário está inserido. A concepção atual não é somente estar sempre conectado, mas também estar conectado da melhor maneira possível, combinando tecnologias de acesso diferentes para se obter uma melhor experiência para o usuário (do inglês, QoE – *Quality of Experience*). Tal abordagem é também conhecida como ABC (Always Best Connected) [6].

Para alcançar esse objetivo, deve-se melhorar o desempenho de uma ou mais fases que compõe um processo de *handover*, tais como [33]:

- 1) Fase de descoberta de sistema: intervalo de tempo em que o dispositivo móvel identifica e determina as redes disponíveis que podem ser usadas;
- 2) Fase de decisão do *handover*: instante em que é determinado se a conexão estabelecida deve continuar por meio da interface já selecionada ou deve mudar para outra rede de acordo com os parâmetros pré-definidos;
- 3) Fase de execução do *handover*: momento em que, de fato, ocorre o procedimento de redirecionamento das conexões de uma interface para outra.

Como citado, o MIP (*Mobile IP*) é um exemplo de protocolo que foi projetado para a execução do *handover*, garantindo a movimentação do terminal entre as diferentes redes. Entretanto, este protocolo não garante a distribuição dinâmica dos fluxos de

dados de uma interface para outra, ou seja, não existe um gerenciamento da mobilidade dos fluxos. A mobilidade dos fluxos é um conceito que refere-se à movimentação de um fluxo IP de uma tecnologia de acesso para outra, minimizando o impacto sobre o QoE do usuário [7]. Logo, é interessante desenvolver mecanismos que permitam a mobilidade do tráfego IP (por exemplo, tráfego HTTP) entre diferentes interfaces de acesso disponível em um dispositivo móvel.

O processo de como é realizado o gerenciamento da mobilidade dos fluxos IP não é um tópico novo na literatura. A maioria das soluções existentes é baseada sobre os esquemas de gerenciamento de mobilidade de dispositivos existentes. Por exemplo, o protocolo PMIPv6 (*Proxy Mobile IPv6*) [3], uma solução padronizada para gerenciamento de mobilidade baseado nas políticas da rede, está sendo estendido pelo IETF e pelo 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*) para permitir a mobilidade de fluxo [48]. Entretanto, para a sua efetiva implantação, é necessário que operadoras adequem suas infraestruturas para implementar as políticas de mobilidade na rede propostas pelo protocolo PMIPv6.

Essas iniciativas recentes mostram que a padronização de uma solução que explore as diferentes tecnologias de acesso dos dispositivos *multihoming* para o gerenciamento da mobilidade dos fluxos ainda continua em aberto.

Neste contexto, esse trabalho apresenta um mecanismo de gerenciamento da mobilidade dos fluxos IP em redes sem fio heterogêneas. O mecanismo proposto possibilita a reconfiguração dinâmica dos fluxos de dados entre diferentes tecnologias de rede considerando as preferências do usuário e as informações disponíveis no terminal.

## 1.1. Motivação e Desafios

Além do protocolo *Mobile IP*, outras soluções para a execução do *handover* também estão sendo discutidas atualmente. Como mencionado na seção anterior, o IETF padronizou o protocolo PMIPv6 (*Proxy Mobile IPv6*) [3] como solução de mobilidade transparente de dispositivo entre diferentes redes. No PMIPv6, a gerência de mobilidade não é delegada ao terminal, como ocorre com o IP Móvel, mas sim, a entidades pertencentes à rede do provedor. Portanto, o dispositivo móvel não se envolve na gestão da mobilidade e na sinalização IP, o uso do PMIPv6 introduz

necessariamente novas entidades na arquitetura da rede para realizar esses procedimentos.

Embora a especificação do PMIPv6 forneça o suporte a *multihoming*, ou seja, a capacidade de um *host* se comunicar com múltiplas redes, o protocolo não inclui a capacidade de mover fluxos selecionados de uma tecnologia de acesso para outra. Atualmente, o grupo de trabalho NETEXT<sup>2</sup> do IETF tem com uma das ações estender o PMIPv6 para possibilitar tal procedimento. Entretanto, a sua implantação ainda requer a atualização das infraestruturas de rede (*hardware* e *software*) existentes nas operadoras. Além disso, é possível determinar que os protocolos padronizados pelo IETF para gestão de mobilidade se preocupam apenas em realizar a fase de execução do *handover*, não lidando com problemas como: *i)* descoberta e seleção de redes; *ii)* gerenciamento do consumo de energia do terminal; e *iii)* avaliação de QoS (*Quality of Service*) para decisão de *handover*.

Outro órgão de padronização, o IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*), propõe o uso do padrão IEEE 802.21 [37] como solução para possibilitar o *handover* e a interoperabilidade entre diferentes tipos de rede. Esse padrão pretende desempenhar um papel importante para o futuro das comunicações provendo uma solução de *handover* entre tecnologias de acesso diferentes para a camada de enlace da pilha do protocolo TCP/IP e uma interface comum para protocolos de mobilidade da camada de rede, tal como o MIP ou PMIPv6.

Contudo, o IEEE 802.21 ainda não demonstra ser uma solução consolidada devido aos desafios em aberto como criar um *framework* comum para tantas tecnologias com particularidades distintas. Além disso, como no PMIPv6, a adoção por parte da indústria e das operadoras também requer investimentos altos.

As discussões sobre essas soluções demonstram como o problema de gerenciamento de mobilidade tanto do terminal quanto dos fluxos de dados ainda está em aberto, criando motivações para superar desafios como:

- Qual a melhor maneira de gerenciar a interferência ocasionada pelo uso de múltiplos rádios?

---

<sup>2</sup> <http://datatracker.ietf.org/wg/netext/charter/>

- Como garantir a reconfiguração dinâmica dos fluxos de dados de modo transparente para o usuário?
- Com a infraestrutura de rede atual e as tecnologias disponíveis, como garantir a implantação de um mecanismo de transparência de mobilidade sem ocasionar em grandes custos para operadoras e para usuários?

A integração de sistemas sem fio heterogêneos é vista como a chave para superar tais desafios [29] e pode trazer vários benefícios como os destacados a seguir [25]:

- Ubiquidade de acesso - Este recurso caracteriza a necessidade do uso de dispositivos com múltiplas interfaces para manter a comunicação em curso quando o usuário está se movimentando para uma área fora da cobertura de uma tecnologia específica. A sobreposição de diferentes redes garante a utilização deste recurso [32].
- Melhorar a confiabilidade da rede - A maior confiabilidade é dada pela habilidade do sistema em reagir a uma falha em um ponto de conexão. Outra conexão (provavelmente usando outra tecnologia) pode ser estabelecida para continuar o serviço, garantindo uma melhor conectividade ao usuário [34].
- Balanceamento de carga - O balanceamento de carga pode ser empregado para distribuição do tráfego por várias tecnologias de acesso [35]. Assim, o uso de diferentes redes com características distintas possibilita que o sistema possa compartilhar a carga de acordo com as particularidades das aplicações.
- Customização do usuário - O usuário pode definir as políticas de fluxo dos dados baseado em suas necessidades e características como é feito, por exemplo, com os planos e pacotes de dados junto à operadora de telefônica.
- Largura de banda agregada - O fato dos dispositivos possuírem mais de uma interface de acesso permite ao sistema agregar a largura de banda disponível para a transmissão de dados.

## 1.2. Objetivos

Dentre os vários desafios citados, este trabalho visa propor e avaliar uma extensão do mecanismo de gerência de mobilidade de fluxos em dispositivos com múltiplas interfaces de acesso. Tal mecanismo visa analisar as preferências do usuário, o contexto em que o dispositivo está inserido e os requisitos de cada fluxo que está

sendo transmitido antes de decidir se será necessário executar uma mudança de interface, evitando assim, reconfigurações desnecessárias.

Dessa forma, para as várias fases do processo de *handover*, a solução proposta nesse documento pertence a fase de execução, podendo utilizar os recursos existentes nas fases anteriores. A ideia é utilizar as abordagens de mobilidade de fluxo IP baseada no terminal (Mobile IP) para criar e avaliar uma nova arquitetura que seja capaz de gerenciar a mobilidade de fluxo entre as interfaces de acordo com o contexto do usuário.

### **1.3. Contribuições**

A partir dos objetivos definidos nesse trabalho, as principais contribuições são:

1. Um mecanismo de gerenciamento de mobilidade tanto do terminal móvel quanto dos seus fluxos de dados capaz de manter a transparência, determinando a melhor forma de comunicação em um dado instante baseado no contexto em que o usuário está inserido e os fluxos que estão sendo transmitidos.
2. Um protótipo do mecanismo proposto aplicado e validado em um ambiente real composto por dispositivos móveis com múltiplas interfaces de acesso que se comunicam com um servidor de mobilidade. O software foi desenvolvido para executar em ambientes Linux por meio do protocolo *Dual Stack Mobile IPv6*.

### **1.4. Organização da Dissertação**

O restante desta dissertação está organizado da seguinte forma:

- O Capítulo 2 apresenta as soluções de mobilidade propostas pelo IETF que tratam a fase de execução do *handover*. Dentre as soluções, são apresentadas as abordagens de gerenciamento de mobilidade baseadas tanto no terminal quanto na rede.
- O Capítulo 3 apresenta uma visão geral sobre os trabalhos relacionados encontrados na literatura sobre tecnologias de comunicação de baixo consumo que funcionam com protocolos de mobilidade. Além disso, são descritas estratégias usadas pela fase de decisão do *handover*, que visam determinar qual interface utilizar em um dado instante.

- O Capítulo 4 detalha o mecanismo de gerenciamento de mobilidade proposto apresentando a arquitetura e como se dá o seu funcionamento.
- O Capítulo 5 descreve o ambiente de experimentação, os cenários experimentais, as métricas utilizadas para a avaliação dos testes, os resultados e a análise do que foi obtido.
- O Capítulo 6, por fim, apresenta a conclusão a partir dos resultados alcançados com a utilização do mecanismo proposto e algumas direções para trabalhos futuros.

# Capítulo 2

## Conceitos

Este capítulo descreve os principais conceitos relacionados às abordagens de mobilidade de fluxos IP existentes [4]: *i)* abordagem baseada no cliente, onde o terminal gerencia a mobilidade com base em informações do dispositivo; e *ii)* abordagem baseada na rede, onde o gerenciamento da mobilidade é todo realizado por um componente da rede. O Capítulo inicia com uma discussão sobre a evolução do protocolo IP e uma descrição da arquitetura e do funcionamento dos protocolos de mobilidade padronizados pelo IETF. Esses conceitos servirão de base para o entendimento do mecanismo proposto no Capítulo 4 que utiliza a abordagem baseada no cliente.

Por fim, são realizadas algumas considerações sobre os protocolos de mobilidade descritos neste capítulo.

### 2.1. *Internet Protocol (IP)*

O número de usuários que utilizam a Internet tem crescido exponencialmente nos últimos anos. Por este motivo, o protocolo IP tem sido bastante discutido, principalmente com o esgotamento do protocolo IPv4 (*Internet Protocol version 4*). Uma das principais razões para não existirem mais endereços IPv4 disponíveis é que a Internet não foi projetada para o uso comercial. Como solução paliativa, algumas tecnologias têm sido criadas, como:

- NAT (*Network Address Translation*) [12] – protocolo que especifica endereços privados para redes corporativas, ou seja, vários endereços privados podem ter apenas um endereço válido, ou seja, um endereço *roteável na Internet*.
- DHCP (*Dynamic Host Configuration Protocol*) [13] – protocolo que permite os provedores reutilizarem endereços IP para conexões não permanentes.

Como forma de aumentar a capacidade de endereçamento e resolver outros problemas que surgiram no decorrer dos anos com o protocolo IPv4, foi criada uma nova versão do protocolo IP denominada de IPv6 (*Internet Protocol version 6*).

O desenvolvimento do protocolo IPv6 não foi norteado somente pela possibilidade de mais endereços, visto que isso está sendo resolvido com NAT, DHCP entre outras soluções. A concepção dessa nova versão do protocolo IP foi baseada no gerenciamento de endereços, na qualidade dos serviços e segurança. Com os dispositivos móveis ganhando cada vez mais mercado, é importante ter um protocolo capaz de gerenciar a mobilidade dos equipamentos e seus fluxos de dados [25].

O suporte a essa mobilidade pode ser dado em diferentes camadas da pilha TCP/IP. Porém, a escolha de usar a camada IP é dada por ser a única capaz de prover um *framework* comum para as camadas superiores e inferiores, com apenas um protocolo [7].

As seções seguintes discutem algumas soluções que têm sido padronizadas pelo IETF para lidar com a mobilidade IP, as quais se referem tanto a mobilidade do dispositivo quanto a mobilidade dos seus fluxos de dados.

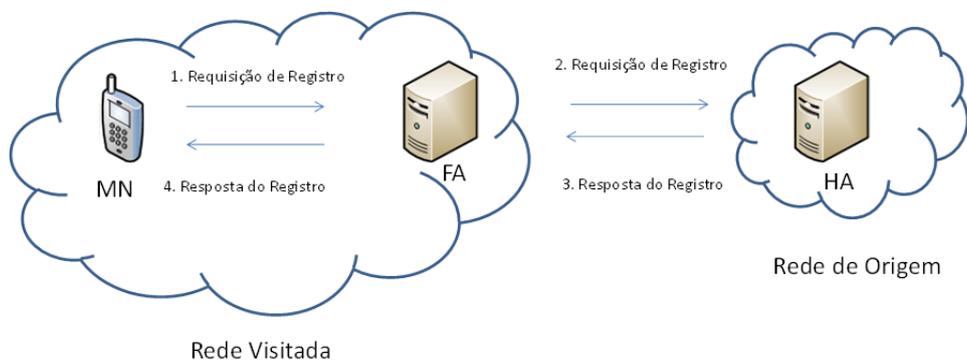
## 2.2. IP Móvel

O protocolo Mobile IPv4 (MIPv4) [14] foi padronizado em 2002 pela comunidade do IETF, visando prover mobilidade a versão do protocolo mais usada atualmente. Essa solução não possui nenhuma implementação comercial, mas é um marco importante para as propostas que a seguiram [7].

Para entender melhor o funcionamento do protocolo e de suas extensões, deve-se primeiro conhecer as entidades que pertencem à arquitetura (que são comuns para as demais):

- *Mobile Node* (MN) – Refere-se a qualquer dispositivo móvel capaz de mudar de ponto de acesso enquanto se move pela rede. O termo **terminal** também é usado para representar o MN. O mesmo pode configurar dois tipos de endereço:
  - *Home Address* (HoA) – Este é o endereço IP permanente e global, definido na rede de origem (*Home Network* - HN) do MN. As aplicações são capazes apenas de identificar o HoA, dado que por mais que o MN se movimente, este endereço, a princípio, irá permanecer inalterado.
  - *Care-of-Address* (CoA) – Este é o endereço IP temporário, ou seja, a medida que o MN se movimenta, o mesmo adquire um endereço válido na rede visitada (*Foreign Network* - FN).

- *Home Agent (HA)* – Esta é a entidade da arquitetura responsável pela associação entre o HoA e o CoA de cada MN. Para isso, o HA mantém uma tabela que possibilita, ao interceptar os pacotes, saber para qual endereço temporário do MN a mensagem deve ser enviada, pois o mesmo está registrado junto ao HA. Com isso, o pacote que possui como destino o HoA, é interceptado pelo HA que adiciona mais um cabeçalho IP, o chamado CoA ou o endereço temporário, para que a comunicação seja realizada com sucesso e o pacote chegue ao seu destino corretamente. Esse procedimento é denominado de tunelamento IP [15].
- *Correspondent Node (CN)* – É um nó (fixo ou móvel) na rede em que o *Mobile Node* se comunica.
- *Foreign Agent (FA)* – Esta entidade é introduzida ao MIPv4 pelas limitações de espaço dos endereços IPv4. A sua função é ser um roteador configurado como gateway padrão para o MN em uma rede estrangeira (FN). O FA permite configurar um endereço privado na sua rede de alcance. A Figura 2.1 demonstra como o processo de registro é feito pelo MN por meio do FA. Dessa forma, por mais que o MN use um endereço privado, o FA registra junto ao HA um endereço global (roteável na internet).



**Figura 2.1 - Processo de Handshake entre o MN e o HA em uma rede visitante.**

### 2.2.1. Operação Básica

Como o MIPv4 é uma solução mais didática, será focado neste tópico uma visão geral sobre o funcionamento do MIPv6. Um cenário típico para representar como funciona o protocolo ocorre quando um nó móvel não está em sua rede de origem e está se comunicando com um nó correspondente. O primeiro questionamento que se

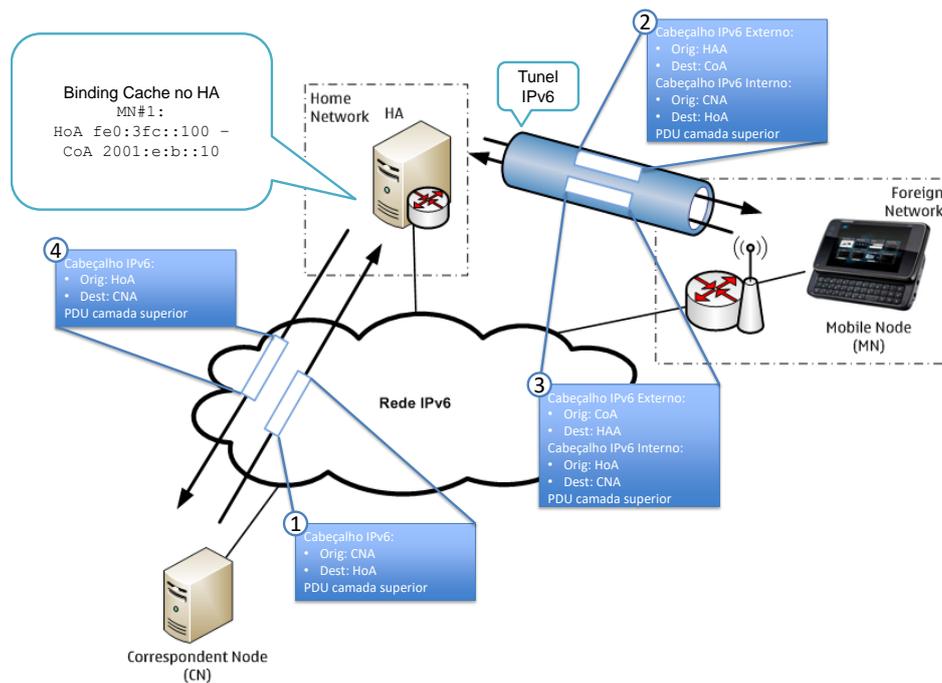
faz é: Como manter as conexões ativas enquanto o nó móvel muda seu ponto de conexão?

Para que isso aconteça, é necessário entender que as aplicações precisam de um endereço estável para as comunicações. Assim, um endereço HoA é atribuído ao MN em sua rede origem. Quando o MN se movimenta e entra na cobertura de outra rede (rede visitante), é atribuído ao MN um novo endereço IP, chamado de CoA. Contudo, as aplicações continuam utilizando o HoA para se comunicar, como exemplificado na Figura 2.2.

Para que a comunicação ocorra entre o MN e o CN é fundamental a existência do HA para gerenciar a mobilidade do MN e permitir que os pacotes sejam encaminhados para os seus destinos de forma correta. Caso o CN envie algum pacote para o MN (o pacote 1 da Figura 2), o endereço de origem desse pacote será o endereço IPv6 do CN e o endereço de destino será o HoA do MN. O HA terá então, a capacidade de interceptar esse pacote e inserir um cabeçalho IPv6 externo contendo como endereço de origem o endereço IP do HA e como endereço de destino o CoA do MN (o pacote 2 da Figura 2.2). Esta técnica é chamada de tunelamento reverso [16], pois dá a ideia de criar um túnel IPv6 entre o HA e o MN. O HA só é capaz de inserir esse cabeçalho por possuir uma tabela (*Binding Cache* - BC) de associação do HoA com o seu atual CoA. Assim, quando o MN receber esse pacote, ele será capaz de remover este cabeçalho que foi adicionado pelo HA e a aplicação irá receber o cabeçalho mais interno, aquele que contém o HoA e o endereço do CN.

Caso o MN deseje responder ao CN, o pacote é enviado com os cabeçalhos IPv6 interno e externo, o qual será novamente interceptado pelo HA (o pacote 3 da Figura 2). Esse, por sua vez, retira o cabeçalho externo que contém como origem o endereço CoA e como destino o endereço do HA, para manter somente o cabeçalho interno, com o endereço de destino o CN (o pacote 4 da Figura 2). Dessa forma, o CN também só irá utilizar o endereço HoA do MN para se comunicar.

Uma forma de otimizar essa comunicação, caso o CN também já tenha suporte ao protocolo IPV6, é realizar a comunicação sem a interceptação do HA. Essa técnica é denominada de roteamento direto (ou *Route Optimization*) e busca diminuir a latência e o tráfego na rede do HA, visto que o MN passa a se comunicar de forma direta com o CN.



**Figura 2.2 - Operação Básica de Tunelamento Reverso usando MIPv6.**

Dessa forma, é importante ressaltar que toda a mobilidade é baseada no terminal pelo fato do mesmo estar sempre informando o HA as suas mudanças de rede.

### 2.2.2. Comparação entre Mobile IPv4 e Mobile IPv6

De modo resumido, com a introdução do Mobile IPv6 (MIPv6), ocorreram algumas melhorias em relação ao MIPv4 que podem ser citadas:

- Com o surgimento do MIPv6, tornou-se desnecessária a existência do FA, tendo a sua funcionalidade incorporada no MN.
- Como no MIPv4 todos os pacotes do MN, ao visitar uma rede estrangeira, deveriam passar também pelo HA na sua *Home Network*, o MIPv6 introduziu uma otimização de rotas (*Route Optimization*) capaz de diminuir o tráfego entre o HA e o MN, permitindo a comunicação direta entre o CN e o MN.
- Diminuição do *overhead* comparado ao MIPv4, pois os pacotes que são enviados ao MN são enviados usando um cabeçalho de roteamento IPv6 ao invés do encapsulamento IP.
- O MIPv6 não usa mais ARP (*Address Resolution Protocol*). Em seu lugar, utiliza o IPv6 *Neighbor Discovery* para aumentar a robustez do protocolo.

- Mensagens broadcast usadas em redes MIPv4, retornam respostas de vários *Home Agents* para o MN ser capaz de associar o seu HA, ao contrário do mecanismo usado no MIPv6 chamado *Dynamic Home Agent Address Discovery*, que retorna apenas uma mensagem ao MN.

### 2.2.3. Mobilidade de Fluxo para o MIPv6

O protocolo MIPv6 por si só não possui todas as funcionalidades suficientes para prover por completo a mobilidade de fluxo de dados. Assim, foram propostas algumas soluções para garantir essa mobilidade. A primeira, padronizada pelo RFC 5648 [17], possibilita que MN registre múltiplos CoA e crie múltiplas entradas na *Binding Cache*, possibilitando que um mesmo dispositivo móvel registre mais de um endereço IP temporário junto ao HA. Dessa forma, o HA passa a ter mais de uma entrada do mesmo dispositivo em sua *Binding Cache*. Em seguida, o RFC 6088 [18] foi proposto com a possibilidade do MN associar um ou mais fluxos IP para um específico CoA. Dessa forma, o MN é capaz de instruir o HA (ou o CN) sobre como rotear os pacotes que chegam. A última extensão proposta para integrar essa solução foi o RFC 6089 [19], que basicamente define um formato binário de seletor de tráfego IP para ser usado em conjunto com as outras extensões para identificar um fluxo IP de acordo com diferentes critérios como os endereços de origem/destino, a classe de tráfego, porta de origem/destino, entre outros.

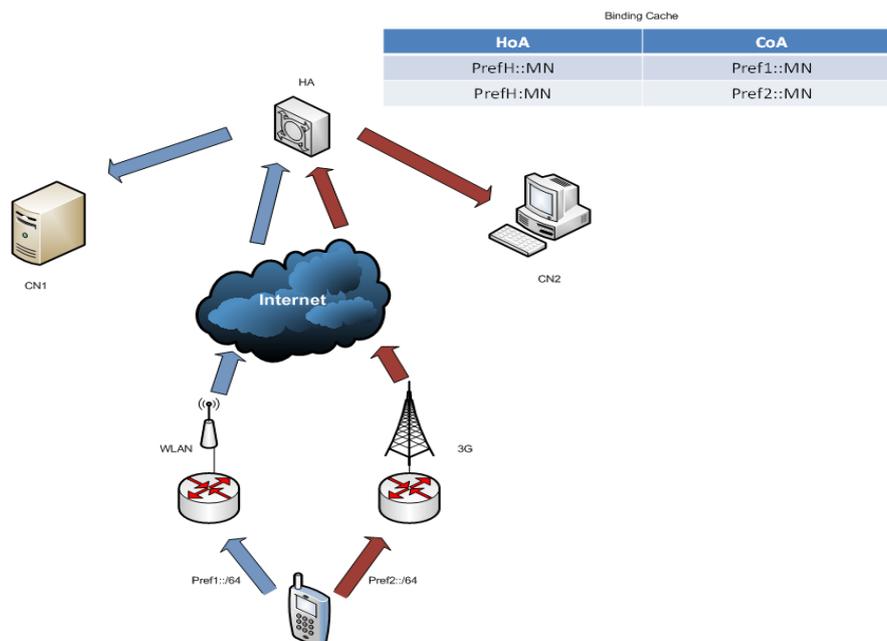


Figura 2.3 - Mobilidade de Fluxo em MIPv6.

A Figura 2.3 demonstra um cenário que caracteriza a mobilidade de fluxo baseado no terminal. Neste cenário, um dispositivo móvel que possui mais de uma interface de rede está conectado em duas redes diferentes ao mesmo tempo, se comunicando com CN's diferentes.

Com o passar do tempo, outra solução passou a ser discutida pelo IETF para evitar que o próprio terminal tenha a responsabilidade de gerenciar a mobilidade, deixando a cargo da rede realizar as sinalizações de movimentação e configurações dos fluxos IP [4]. Dessa forma, surgiu o *Proxy Mobile IPv6*, provendo uma solução com menor consumo de bateria do dispositivo (devido à menor quantidade de mensagens de sinalização) e com uma configuração de fluxos IP baseado nas condições das redes disponíveis (e não somente em configurações do usuário, por exemplo) [7].

### 2.3. Proxy Mobile IPv6

A solução de gerenciamento da mobilidade baseada na rede é definida pelo protocolo Proxy Mobile IPv6 (PMIPv6) [5]. Diferentemente das soluções de mobilidade apresentadas, o PMIPv6 introduz novos componentes à arquitetura, conforme descrito a seguir:

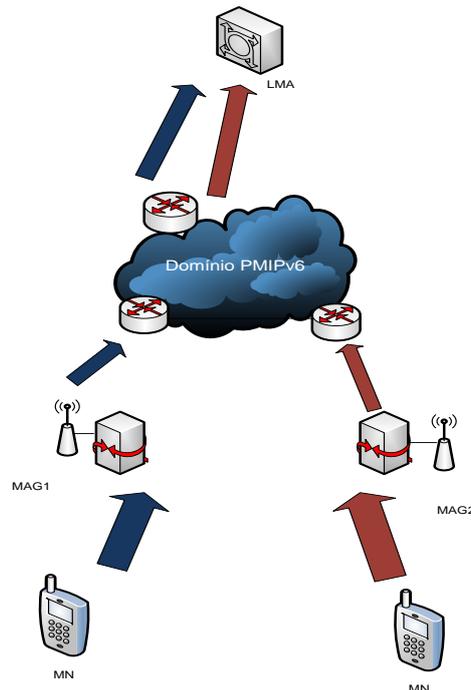
- *Mobile Access Gateway (MAG)* – A detecção da movimentação do MN e as operações de sinalização são executadas por essa entidade que, em geral, encontra-se no roteador de acesso (*Access Router – AR*) do MN.
- *Localized Mobility Domain (LMD)* – Representa a área em que a rede provê suporte à mobilidade, podendo possuir múltiplos MAG's.
- *Local Mobility Anchor (LMA)* – Executa o papel do HA local no LMD.

Dessa forma, o terminal não se envolve com o gerenciamento da mobilidade e a sinalização IP, dando essas responsabilidades aos novos componentes que formam o PMIPv6.

#### 2.3.1. Operação Básica

Como o MN não tem mais participação nas trocas de mensagem de sinalização de mobilidade, quando o MN entra em um domínio PMIPv6, o mesmo se comunica com

um AR (*Access Router*) que, em conjunto com um MAG, irá inicializar a comunicação com o LMA para estabelecer uma conexão, conforme exemplificado na Figura 2.4.



**Figura 2.4 - Arquitetura PMIPv6.**

Assim que um túnel bidirecional for criado entre o MAG e o LMA, o MAG envia uma mensagem chamada *Proxy Binding Update* (PBU) para que o LMA faça a alocação do prefixo da rede de origem (*Home Network Prefix – HNP*) do MN. De forma semelhante ao HA que guarda o *Binding Cache*, o LMA armazenará essa informação e enviará ao MAG outra mensagem chamada *Proxy Binding Acknowledgement* (PBA) por meio do túnel bidirecional. Dessa forma, o MAG encaminha ao MN por meio de uma mensagem chamada *Router Advertisement*, a configuração do endereço IP do MN. Agora, o MN é capaz de configurar um ou mais endereços atribuídos ao prefixo associado. A Figura 2.5 apresenta um diagrama de sequência, que representa a sequência de mensagens entre os componentes do protocolo PMIPv6.

O MN pode se mover e o novo MAG irá atualizar a localização do MN no LMA, realizando o mesmo procedimento. Vale ressaltar que o MN sempre irá manter o mesmo endereço IP configurado quando entrou pela primeira vez no LMD, mesmo mudando o seu ponto de acesso.

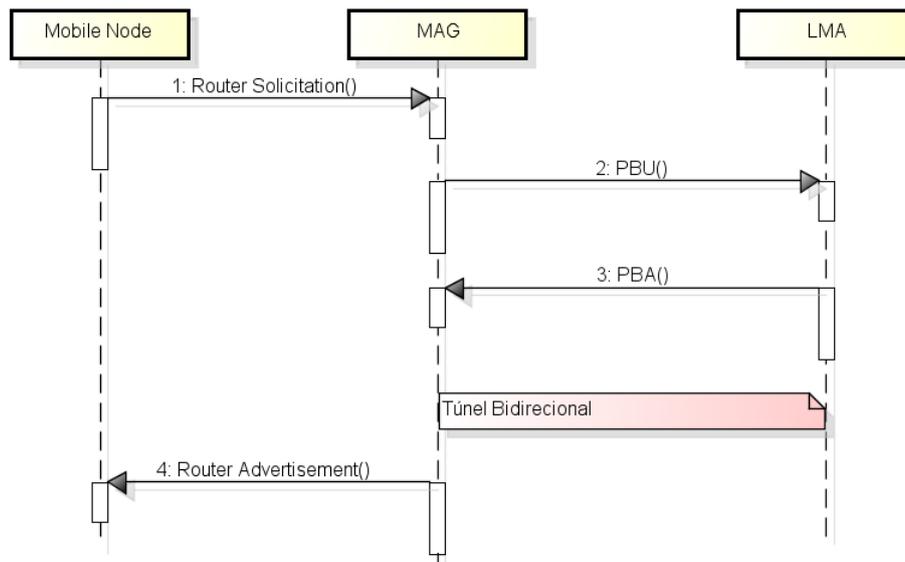


Figura 2.5 - Diagrama de Sequência do PMIPv6.

### 2.3.2. Mobilidade de Fluxo para o PMIPv6

O PMIPv6 não permite que o LMA movimente por completo um conjunto selecionado de fluxos de uma interface para outra. Para que essa mobilidade seja completa, é necessária alguma extensão do protocolo. Atualmente, está sendo discutido pelo grupo de trabalho NETEXT do IETF, algumas soluções que assumem simultaneamente a conexão do mesmo domínio PMIPv6 por meio de diferentes interfaces [20].

A ideia atual é adotar uma entidade lógica, implementada no MN, que esconda a interface física real da camada de rede do terminal. Assim, o MN é capaz de prover uma visualização simples e permanente para a camada IP e superiores.

Para o cenário a seguir, onde o MN possui dois fluxos (fluxos X e Y), os quais cada um é encaminhado por interfaces diferentes, o LMA guarda a tabela *Binding Cache* que armazena os prefixos e os fluxos do MN correspondente. Caso o fluxo Y tenha que mudar de rota (representado pela seta pontilhada na Figura 2.6), o MAG deve comunicar o LMA a mudança e atualizar a tabela BC para permitir a movimentação do fluxo para outra interface.

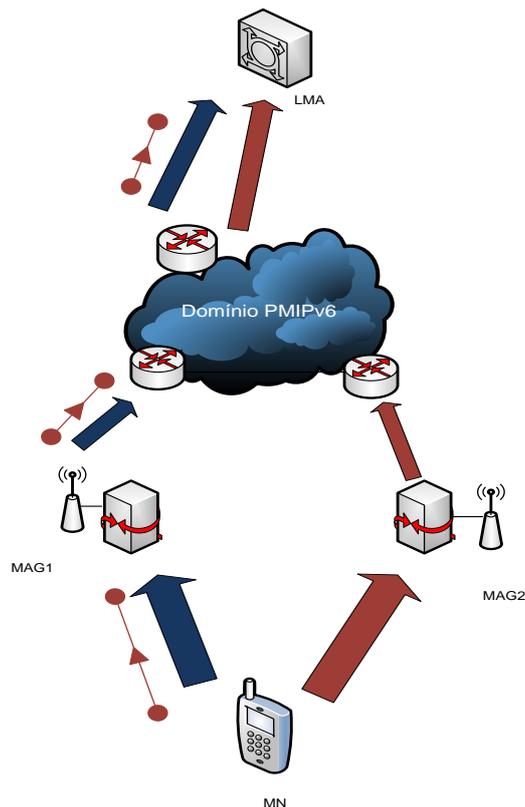


Figura 2.6 - Mobilidade de Fluxo em PMIPv6.

## 2.4. Considerações Finais

Os protocolos de mobilidade citados apresentam as principais soluções propostas pelo IETF para o problema de execução de *handover* entre diferentes tecnologias de rede. Apesar dessas soluções apresentarem abordagens distintas, em ambas é necessário que operadoras e fabricantes de dispositivos móveis realizem investimentos para a implantação de cenários de mobilidade transparente para os usuários.

Enquanto a abordagem baseada no cliente necessita de modificações na pilha do protocolo do *kernel* do terminal e um esforço para padronizar um gerenciador de conexões, a abordagem baseada na rede impõe modificações e melhorias na arquitetura da rede das operadoras e a padronização da mobilidade de fluxos para o PMIPv6 que ainda está sendo discutida pelo grupo de trabalho NETEXT do IETF.

Dessa forma, o uso desses tipos de arquitetura de rede exige um grande esforço para consolidar uma solução, criando outros novos desafios como a gestão de interferências entre diferentes redes, a reconfiguração dinâmica dos fluxos IP e a adaptação das tecnologias e dos cenários existentes atualmente para funcionarem com essas soluções.

Algumas implementações de código aberto desses protocolos de mobilidade foram realizadas e estão disponíveis para a comunidade científica, tal como o UMIP (*USAGI-patched mobile IPv6 for Linux*) [27] que implementa a solução baseada no terminal e o OAI PMIPv6 (*Open Air Interface Proxy Mobile IPv6*) [61], que implementa a solução baseada na rede.

A partir disso, têm sido propostos mecanismos para a adoção de tecnologias com baixo consumo de energia, como por exemplo, em Chakrabarti et al. [22] [23] e mecanismos para a reconfiguração dinâmica de fluxos IP, como em Alnas et al. [44], apresentando bons resultados para o avanço da tecnologia de gerência de mobilidade. Esses e outros trabalhos relacionados serão descritos com mais detalhes no próximo capítulo.

# Capítulo 3

## Trabalhos Relacionados

Com a padronização dos protocolos de mobilidade, alguns trabalhos foram surgindo na literatura com o intuito de aperfeiçoar as soluções de gerenciamento de mobilidade existentes e melhorar a experiência do usuário. A maioria deles busca complementar os protocolos de mobilidade citados no capítulo anterior, adicionando funcionalidades que não são definidas pelo padrão, com o intuito de atender alguma finalidade específica como, por exemplo, diminuir o consumo de energia em dispositivos móveis ou lidar com a qualidade do sinal em ambientes com níveis elevados de interferência (ambientes industriais, por exemplo).

Este Capítulo descreve alguns trabalhos relacionados às melhorias propostas para funcionarem juntamente com o protocolo Mobile IP. Primeiramente, serão descritos mecanismos que adaptam tecnologias de acesso de baixo consumo (que por padrão não especificam a camada de rede), para utilizarem o Mobile IP para gerenciar a mobilidade do dispositivo. Em seguida, são apresentadas estratégias para a decisão de reconfiguração dinâmica dos fluxos IP por meio de informações obtidas pelo dispositivo.

### **3.1. Tecnologias de Baixo Consumo e Mobilidade IP**

Muitos trabalhos propõem alguma adaptação nas camadas da pilha de protocolo de comunicação para permitir a transmissão eficiente de datagramas (geralmente IPv6) sobre as tecnologias WPAN como Bluetooth e ZigBee, visando garantir a Mobilidade IP em dispositivos móveis que possuem restrições recursos (pequenas baterias, restrições de memória e de processamento).

#### **3.1.1. Bluetooth e Mobilidade IP**

O Bluetooth, baseado no padrão IEEE 802.15.1, está entre as tecnologias de acesso mais usadas hoje em dia. Presente na maioria dos dispositivos móveis, seu

grande uso se dá pela compatibilidade com vários equipamentos e o consumo de energia menor do que outras tecnologias como Wi-Fi e 3G.

Por este motivo, algumas soluções têm sido apresentadas para integrar o Bluetooth com a pilha TCP/IP [21]. Por exemplo, Chakrabarti et al. [22] e Gimilio et al. [23] propõem uma modificação na pilha do IEEE 802.15.1 com a adição de uma nova camada para garantir mobilidade IP aos dispositivos que fazem uso desta tecnologia.

### 3.1.1. Operação Básica

Gimilio et al. [23] apresentam uma arquitetura básica para a integração do protocolo IP ao padrão IEEE 802.15.1, conforme mostrado na Figura 3.1. A pilha Bluetooth atua tanto como camada física quanto camada de enlace, enquanto a camada de rede está composta pelos protocolos IP e Mobile IP.

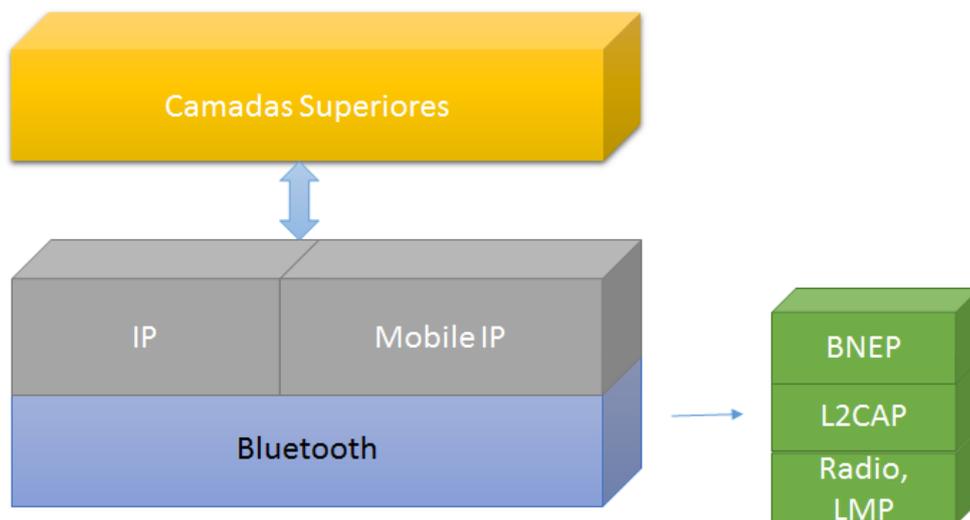


Figura 3.1 - Arquitetura do Protocolo Bluetooth com Mobile IP.

Na prática, os autores desenvolveram um *daemon*<sup>3</sup> para realizar uma análise periódica do ambiente, atualizando em memória o estado atual das redes disponíveis. Para cada nó encontrado na análise, o *daemon* armazena informações como o endereço IP e o nível de sinal recebido. Quando uma interrupção da conexão ocorre, uma seleção com base nas informações mantidas em memória é realizada para definir o melhor nó disponível. Como resultado, uma nova conexão deve ser iniciada com esse novo nó. A solução também visa reduzir a latência durante o procedimento de *handover*,

<sup>3</sup> O termo “daemon” é usado para designar um programa de computador que roda de forma independente em plano de fundo, ao invés de ser controlado diretamente por um usuário.

permitindo que o MN possua diversas conexões simultâneas para evitar que o dispositivo fique sem conectividade quando uma das conexões for encerrada.

Os testes realizados demonstraram não somente a viabilidade da solução como também a otimização no tempo de latência durante o processo de *handover* quando o MN possui mais de uma conexão simultânea.

Chakrabarti et al. [22] apresentam uma proposta semelhante ao proposto por Gimilio et al., mas realizam a validação da solução de integração (do Mobile IP com Bluetooth) em um cenário onde existem duas redes de acesso disponíveis ao dispositivo: uma rede GPRS (*General Packet Radio System*) e uma rede Bluetooth (IEEE 802.15.1). A solução de mobilidade utilizada é o Mobile IPv4 e tem o foco em aumentar a mobilidade do usuário permitindo que dispositivo esteja sempre conectado.

Em um cenário de teste, em um primeiro momento, o MN é apresentado usando a tecnologia Bluetooth em uma rede visitante para se comunicar com um CN. Quando o MN deseja usar o *link* GPRS, o mesmo informa o seu FA usando alguns bits de controle dentro de um *poll* de mensagens que são trocadas entre o dispositivo e o ponto de acesso (*Access Point – AP*) para informar a mudança. Essas mensagens são trocadas mesmo não havendo transferência de dados. Em seguida, o FA envia ao HA uma mensagem, por meio de uma WLAN, informando a troca de tecnologia de acesso. Quando o HA a recebe, todos os pacotes que chegam com destino a esse MN são colocados em um *buffer* (com tamanho variável a latência do *handover* entre as tecnologias) e só é esvaziado quando é criado um túnel entre o HA e o novo FA (do *link* GPRS).

Caso o MN queira voltar a usar a rede GPRS é enviada ao HA esta informação por meio do FA. O HA imediatamente para de enviar os pacotes e os coloca em um *buffer* até que seja possível a comunicação por meio da rede Bluetooth. Em seguida, o HA informa o novo FA, o qual envia pacotes de controle para o AP do Bluetooth que por sua vez inicia a paginação para um dispositivo usando aquele determinado endereço. Caso esse AP não encontre o dispositivo, após cerca de quatro tentativas de busca, outro AP fica responsável por buscar o MN.

### **3.1.2. Zigbee e Mobilidade IP**

Outra tecnologia de acesso muito pesquisada e utilizada em redes de sensores sem fio é a Zigbee, que tem como base o padrão 802.15.4, o qual especifica a camada física e o controle de acesso para redes sem fio pessoais com a característica de baixas taxas de transmissão aliada ao baixo consumo de energia. Uma solução chamada WiZi-Cloud [26] propõe adicionar a camada de rede (IP) e uma solução de mobilidade junto a pilha de protocolo do Zigbee para prover ubiquidade de acesso, alta eficiência energética e *handover* inter-AP em tempo real.

## Operação Básica

O sistema WiZi-Cloud realiza as suas operações por meio da adição de módulos de hardware e software que são capazes de encaminhar pacotes pelas redes Wi-Fi e Zigbee de forma transparente. Para isso, foi adicionada uma camada extra entre a camada de enlace e a camada de rede, capaz de modificar o pacote para realizar o roteamento de forma correta. Contudo, o módulo de software adicionado foi executado somente no espaço de programa do usuário (do inglês, *user space*), resultando em um consumo de energia extra.

O mecanismo de funcionamento do protocolo se divide em 4 etapas:

- Registro: Nessa fase é feito o registro do dispositivo em um AP WiZi-Cloud. O endereço IP é obtido por meio do protocolo DHCP. Para evitar quebra da conexão e permitir transparência durante o procedimento de *handover*, o endereço IP obtido é vinculado a uma interface virtual.
- Ubiquidade de acesso: Para garantir a ubiquidade de acesso, os dispositivos móveis devem informar ao sistema como eles podem ser alcançados. Isso se dá da seguinte forma:
  - Pontos de Acesso: Envia periodicamente *beacons broadcast* por meio do Zigbee.
  - Dispositivos Móveis: De tempos em tempos realiza o *wake up* para ouvir *beacons* que chegam. Também são mantidas informações sobre os APs que cobrem a sua localização atual. Isto possibilita que o dispositivo móvel se associe a outro AP quando a comunicação é perdida ou degradada.

- Mecanismo de *Paging*: O sistema WiZi-Cloud também implementa um mecanismo que informa quando o dispositivo móvel deve realizar o *wake up*. Isso é realizado por meio de *beacons* especiais.
- Handover: O processo de handover pode ocorrer em dois momentos:
  - Intra-dispositivos: ocorre sempre que o volume de dados excede o limite que a interface Zigbee pode suportar. Assim, os pacotes são transferidos para a interface WiFi.
  - Inter-AP: ocorre sempre que o dispositivo precisa mudar de ponto de acesso. Para isso é feito o registro no novo AP para que o tráfego possa ser roteado por uma nova rota. A quebra de conexão não é dada devido a interface virtual e o endereço IP atribuído ao equipamento.

O protótipo desenvolvido nesse trabalho possui algumas limitações como: o módulo que executa a comunicação Zigbee no dispositivo é capaz apenas de transmitir 50% da taxa de transmissão da tecnologia e o módulo foi executado dentro do espaço do usuário. Apesar dessas limitações, o protótipo conseguiu ser duas vezes mais eficiente energeticamente quando comparado com um dispositivo que utiliza apenas Wi-Fi, além de obter uma boa pontuação de 4.26 no MOS (*Mean Opinion Score*).

### 3.2. Estratégias para Gerenciamento da Mobilidade

Outros trabalhos visam otimizar o gerenciamento da mobilidade dos fluxos por meio de estratégias de decisão de *handover*, ou seja, melhorar a experiência do usuário alternando entre as interfaces disponíveis de acordo com o contexto em que o dispositivo está inserido em um determinado momento. Essas estratégias podem ser categorizadas como [36]:

- Estratégia Clássica: baseia-se na utilização de um critério definido como força do sinal (RSS - *Received Signal Strength*), relação sinal/ruído (SNR - *Signal to Noise Ratio*) ou taxa de erro (BER - *Bit Error Rate*). Em redes heterogêneas, pode-se levar em consideração também critérios como custo monetário, requisitos de serviço, condições da rede, preferências do usuário e características do dispositivo.

- Baseada em múltiplos critérios: consiste em escolher a rede de acesso mais adequada para um serviço específico entre um número limitado de redes candidatas de acordo com critérios diferentes. Contudo, não existe uma única solução ótima, sendo necessário utilizar parâmetros de preferência para diferenciar as possíveis melhores soluções. Algoritmos como AHP (do inglês, *Analytic Hierarchy Process*) [56] e GRA (do inglês, *Grey Relational Analysis*) [57] são exemplos de algoritmos onde os critérios, que possuem prioridades são usados para decidir entre as melhores soluções encontradas.
- Baseada em contexto: baseia-se no conhecimento de informações contextuais pertinentes sobre o terminal móvel, como as redes e serviços, e as preferências dos usuários, a fim de tomar decisões inteligentes e eficientes.

Alguns trabalhos utilizam a combinação de uma ou mais estratégias para alcançar melhores resultados para o problema de decisão de *handover*. Por exemplo, Maaloul et al. [40] propõem um algoritmo baseado na análise de métricas coletadas da rede e de métricas de QoS (*Quality of Service*) percebidas pelo usuário final. Para obter a seleção da melhor rede disponível, são definidos valores limites para os critérios de mudança de rede baseados em parâmetros de qualidade do enlace tais como RSSI (*Received signal strength indication*), SINR (*Signal Interference Noise Rate*) e largura de banda. Em seguida, antes de ser executada a mudança de interface, é realizada uma análise de desempenho da rede selecionada na primeira fase, tomando como base também na avaliação do usuário como critério de decisão. Por meio de simulação, os autores mostram que o algoritmo proposto é capaz de evitar decisões ineficientes na escolha das redes e que a análise de desempenho antes da execução do *handover* também evita múltiplas decisões de *handover* que poderiam gerar um efeito *ping pong*.

Para se obter resultados mais precisos, Ekiz et al. [41] apresentam um algoritmo de tomada de decisão baseado em múltiplos critérios. O algoritmo proposto visa satisfazer os diversos requisitos das aplicações levando em consideração múltiplos parâmetros de rede (parâmetros de rádio mensuráveis) e parâmetros estáticos como o custo financeiro do uso de uma determinada tecnologia de rede ou preferências do usuário. As informações cooperativas definidas pelos autores são baseadas em informações de carga da rede e em um mapa da experiência do usuário criado a partir da análise da vazão de conexões anteriores.

Para realizar a análise da solução proposta, duas avaliações foram realizadas. Na primeira, foi observado que ao utilizar informações cooperativas foi possível identificar células da rede que estão sobrecarregadas e com isso evitar a diminuição da taxa de transferência, resultando na melhoria do desempenho de QoS. Na segunda avaliação, foi analisada a redução dos custos financeiros ao utilizar uma tecnologia de rede para a transferência de um arquivo. Assim, os dados foram transferidos de uma rede celular para um ponto de acesso em uma rede WLAN, evitando maiores gastos.

Assim como Maaloul et al., Gupta [42] também modela uma solução para decisão de *handover* baseada nas informações sobre as redes disponíveis e nas preferências pré-estabelecidas pelo usuário. A técnica proposta possui como diferencial a utilização de um campo em cada *beacon* 802.11 que é enviado para transportar informações que irão auxiliar na seleção da melhor interface.

Algumas abordagens para decisão de *handover*, conhecidas como abordagens *cross layer*, são baseadas em informações coletadas nas diferentes camadas da pilha de protocolo.

Trabalhos como Alnas et al. [44] [47], Zhu et al. [45], Chowdhury et al. [46] consideram informações obtidas de diferentes camadas nos esquemas de gerenciamento de mobilidade IP para reduzir as perdas de pacotes e diminuir a latência do *handover*. Em geral, estes trabalhos utilizam informações colhidas da camada de enlace para prever a perda de conectividade mais rapidamente, pois o mecanismo tradicional usado pelo protocolo Mobile IPv4 ou IPv6 para detectar a movimentação do usuário é realizado somente identificando a mudança do prefixo de uma sub-rede [43]. Zhu et al. [45], por exemplo, propõem o uso de informações da camada 2 no processo de *handover* identificando parâmetros relevantes para mudanças de conexão como:

- (a) Parâmetros do enlace: parâmetros que descrevem o tipo de tecnologia utilizadas tais como taxa de erro de bits, taxa de erro de pacote, taxa de dados atual, etc.
- (b) Identificador de conexão: em redes WLAN, por exemplo, o identificador de conexão usado *Basic Service Set Identification* (BSSID) pode ser o endereço MAC do ponto de acesso.
- (c) Prefixos de sub-rede: a identificação da mudança do prefixo de uma sub-rede resulta em uma alteração no CoA.

(d) Identificador de velocidade e trajetória: informações que auxiliam na detecção de movimentação do terminal.

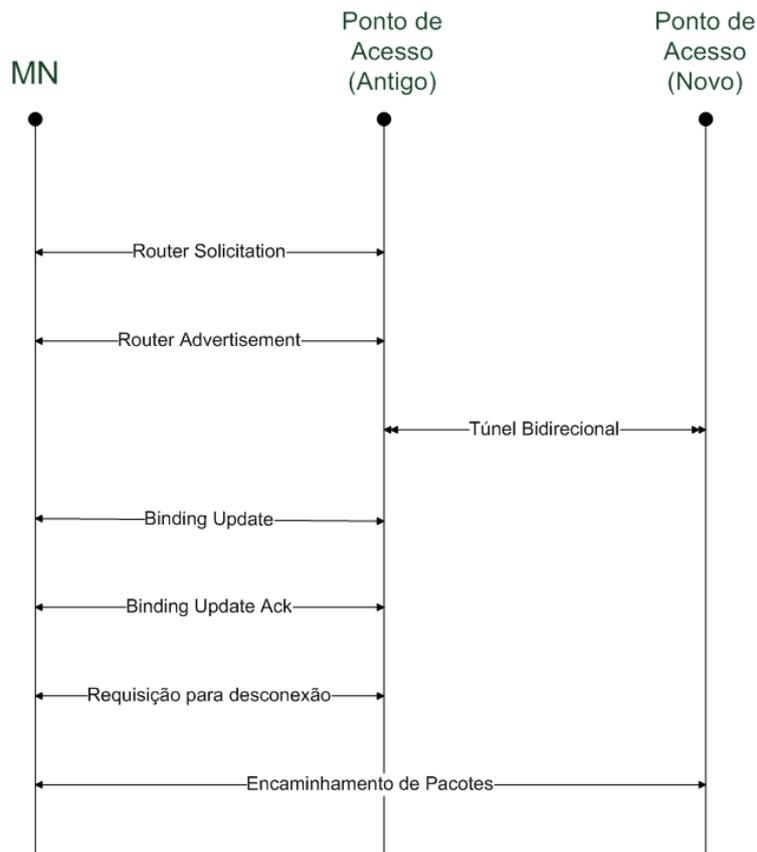
Essas informações auxiliaram o MN a evitar reconfigurações de rede desnecessárias e a diminuir o custo de sinalização, como demonstrado pelos autores por meio de análise matemática comparando o uso do Mobile IP sem e com o uso dessas informações (abordagem *cross layer*).

Alnas et al. [47] propõem um algoritmo que utiliza como critério para decisão de *handover* os seguintes parâmetros: intensidade do sinal, prefixo da rede, largura de banda e indicadores que informam se a conexão está continuamente disponível. O algoritmo proposto, denominado de E-Mobile IP, usa essas informações para prever a perda de conectividade mais rapidamente do que algoritmos usados na camada de rede. Experimentos realizados no simulador NS-2 mostraram que o E-Mobile IP é capaz de melhorar o desempenho do processo de *handover* em termos de latência e perda de pacotes.

Em um trabalho seguinte, Alnas et al. [44] demonstram a utilização do E-Mobile IP utilizando Mobile IPv6. Quando o MN percebe a movimentação para um novo ponto de acesso por meio da camada de enlace, o MN realiza o procedimento de *handover* com *Route Optimization*, executando as seguintes trocas de mensagens (representadas na Figura 3.2):

- MN envia uma mensagem de *Router Solicitation* para o novo ponto de acesso. Se a camada 2 receber uma mensagem de resposta desse ponto de acesso, o processo de *handover* é iniciado.
- Por meio da estratégia de *Route Optimization*, o ponto de acesso antigo envia uma mensagem para o possível novo ponto de acesso para estabelecer um túnel bidirecional, sem necessitar do *Home Agent* para esse processo.
- O novo ponto de acesso irá responder com uma mensagem ACK.
- Em seguida, o MN envia uma mensagem de *Binding Update* para o ponto de acesso antigo atualizar a *Binding Cache* com o seu novo CoA.
- Quando o MN recebe uma mensagem de *Router Advertisement* do ponto de acesso antigo, é enviado logo em seguida uma requisição de desconexão.

- Após o antigo ponto de acesso receber a requisição de desconexão e verificar que o novo ponto de acesso aceitou o processo de *handover*, o ponto de acesso antigo passa a encaminhar os pacotes para o novo ponto de acesso.



**Figura 3.2 – Troca de mensagens durante o *handover*.**

Além dessa forma para detectar a movimentação do terminal, o E-Mobile IP também utiliza informações dos vizinhos em cada domínio da rede. Isso permite o MN detectar mais rapidamente a movimentação para uma nova sub rede recebendo informações relacionadas da camada de enlace.

Outros trabalhos buscam melhorar ainda mais a experiência do usuário realizando o gerenciamento de fluxos IP de forma transparente. De modo geral, assim que a movimentação do usuário é detectada, a reconfiguração dos fluxos de dados é realizada de acordo com a interface mais adequada para um determinado fluxo.

Yim et al. [49] utilizam essa abordagem classificando os fluxos em 4 classes:

- Classe 1: tolerante a atraso e tolerante a perda;
- Classe 2: tolerante a atraso e intolerante a perda;
- Classe 3: intolerante a atraso e intolerante a perda;

- Classe 4: intolerante a atraso e tolerante a perda.

Serviços como e-mail e FTP (*File Transfer Protocol*), de acordo com os autores, se enquadram na classe 2, que são tolerantes a atrasos, mas não devem ter perda de pacotes durante o procedimento de *handover*. Enquanto serviços de transmissão de vídeo em alta definição pertencem à classe 3, onde o atraso deve ser inferior a 400 ms e as perdas de pacotes devem variar entre 0% a 2%.

Para realizar a análise do desempenho do mecanismo, os autores desenvolveram um modelo de custo analítico comparando esquemas convencionais com a solução proposta. O intuito do trabalho foi diminuir a carga de processamento no roteador para garantir a qualidade de serviço de acordo com os requisitos de cada fluxo.

Nguyen et al. [51] também propõe o uso de classificação dos fluxos para melhorar o gerenciamento da mobilidade por meio da análise de parâmetros de QoS. Dessa forma, três contextos são definidos para classificar os fluxos:

- Contexto de serviço: quando o serviço que está sendo executado no dispositivo é sensível a interrupção ou perda de pacotes, o tempo de interrupção deve ser minimizado. Por exemplo, serviços de tempo real devem ter um tempo de interrupção inferior a 300 ms.
- Contexto do dispositivo móvel: descrição que representa o nível de movimentação do dispositivo, categorizando-o de acordo com a quantidade de *handovers* a serem realizados.
- Contexto da rede: nesse tipo de contexto podem ser empregados diversos parâmetros de rede como o nível de carga, proximidade geográfica do terminal ao ponto de acesso ou políticas definidas pela operadora que está oferecendo o serviço.

Um modelo analítico é definido para analisar a solução proposta baseado nas métricas: interrupção de serviço e atraso fim-a-fim. Os autores definiram um cenário onde o dispositivo está se movendo e nunca retorna para o ponto de acesso anterior. A partir dessas considerações, comparações foram feitas com valores especificados por outros trabalhos. A análise dos resultados mostra que o mecanismo é capaz de satisfazer os requisitos para as duas métricas avaliadas.

Utilizando uma abordagem baseada na rede para o gerenciamento da mobilidade, o protocolo *OpenFlow*<sup>4</sup> [55] tem sido adaptado para funcionar em conjunto com o PMIPv6. S. Kim et al. [52] propõem um esquema que separa o gerenciamento da mobilidade dos componentes do PMIPv6, tomando proveito da arquitetura do *OpenFlow*. Esse esquema propõe a permanência de todas as funcionalidades e formatos das mensagens utilizadas no PMIPv6, entretanto, são separadas as funcionalidades do MAG e do LMA de seus roteadores visando minimizar a sobrecarga de tunelamento. Assim, LMA e MAG sempre irão transmitir os pacotes por meio de um túnel IP, enquanto os *switches* podem encaminhar pacotes sem o túnel IP, com base sua própria tabela de fluxo, configurada pelo controlador na arquitetura *OpenFlow*.

O desempenho da solução proposta é avaliado considerando os custos de sinalização e de tunelamento de pacotes. Os resultados apresentam ganhos consideráveis em desempenho quando comparados com a solução padrão do PMIPv6. Existem trabalhos como o de Lee et al. [50] que propõem soluções para o gerenciamento de fluxos de dados usando uma estratégia baseada no terminal. Lee et al. introduzem uma extensão do protocolo de seleção de tráfego IP para a gestão distribuída da mobilidade dos fluxos. O principal diferencial dessa proposta é a descentralização do nó que trata a mobilidade, que no caso do DSMIPv6 é o HA, com a criação de entidades chamadas de *Access Mobility Anchor (AMA)* para que o MN possa se conectar. Assim, o HA passa a não tratar todas as funcionalidades originalmente atribuídas a ele como sinalização de mobilidade, roteamento e o registro dos MNs.

Como ponto forte da solução, os autores reforçam a ideia de diminuir a possibilidade de falhas por ter mais de um nó na rede responsável por essas funções, distribuindo a carga entre AMAs, mas não apresenta resultados de como e quanto o seu funcionamento poderia ser melhor que a solução padrão.

### **3.3. Considerações Finais**

Com os trabalhos apresentados, é possível identificar que quanto maior o número de informações que auxiliam no gerenciamento da mobilidade, mais precisa será a seleção da interface e, como resultado, melhor será experiência do usuário.

---

<sup>4</sup> O protocolo OpenFlow foi desenvolvido para fornecer uma interface padrão e aberta entre switches ou roteadores heterogêneos.

Assim, combinação de estratégias para seleção de interface tem se tornado comum para aprimorar os resultados que, em sua maioria, são apresentados após realizarem experimentos em simuladores [41] [44] [47] ou por meio de modelos analíticos [49] [51] [52] ou até mesmo em ambientes reais.

Em trabalhos mais recentes [46] [49], para alcançar melhores resultados de QoS, as soluções têm levado em consideração requisitos de cada fluxo, criando estratégias que adequam cada vez mais as reais necessidades dos usuários em um dado instante. Por outro lado, alguns trabalhos tentam identificar qual o contexto em que o usuário está inserido ou utilizam valores pré-definidos para tomar decisões mais coerentes quando se faz necessário passar por um processo de *handover* [40] [51]. Dentre esses parâmetros é possível destacar custos financeiros, consumo de energia, velocidade de deslocamento, nível de sinal, interferência e outros. Outros trabalhos [45] [49] [42] focam em tentar minimizar os custos de sinalização e sobrecarga para alcançar um melhor desempenho durante o processo de *handover*, permitindo que as mudanças de rede aconteçam de forma mais eficiente e transparente para o usuário.

Contudo, todas essas soluções visam um mesmo objetivo que é o de melhorar a experiência do usuário e tirar proveito das múltiplas tecnologias de rede disponíveis atualmente na maioria dos dispositivos móveis. Para isso, alguns autores realizam testes em cenários reais para demonstrarem a viabilidade de suas soluções [26]. A tabela 3.1 sumariza as técnicas e estratégias discutidas nesta seção, aonde está organizada da seguinte forma:

- Abordagens de gerenciamento de mobilidade: representa as abordagens de gerenciamento, podendo ser baseadas tanto no terminal, aonde o próprio dispositivo é responsável pela sinalização da mobilidade, quanto pela rede, aonde a rede trata do gerenciamento de cada dispositivo.
- Estratégia de decisão de *handover*: estratégia utilizada na fase de decisão do *handover* para decidir qual a melhor interface a ser usada em um dado momento. As estratégias são categorizadas de acordo com a explicação dada na sub seção anterior.
- Tecnologia de comunicação: identifica as tecnologias de rede utilizadas nos testes realizados.

- Ambiente de teste: representa como foi realizado os testes das soluções propostas.

<b>Publicação</b>	<b>Abordagem de Gerenciamento de Mobilidade</b>	<b>Estratégia de Decisão de Handover</b>	<b>Tecnologia de Comunicação</b>	<b>Ambiente de Teste</b>
Gimilio et al. [23]	Terminal	Clássica	Bluetooth / Wi-Fi	Simulação
Chakrabarti et al. [22]	Terminal	Clássica	Bluetooth / Wi-Fi	Análise Analítica
T. Jin et al. [26]	Terminal	Múltiplos Critérios	Zigbee / Wi-Fi	Prático
Maaloul et al. [40]	-	Múltiplos Critérios / Contexto	Wi-Fi / UMTS / WiMAX / LTE	Simulação / Análise Analítica
Ekiz et al. [41]	-	Múltiplos Critérios	Wi-Fi / UMTS / LTE	Simulação
Alnas et al. [44] [47]	Terminal	Múltiplos Critérios	Wi-Fi	Simulação
Zhu et al. [45]	Terminal	Múltiplos Critérios	Wi-Fi / 3G (UMTS / GPRS)	Análise Analítica
Chowdhury et al. [46]	Terminal	Múltiplos Critérios / Contexto	Wi-Fi / UMTS	Análise Analítica
Yim et al. [49]	Rede	Contexto	MFAN (Mobile Flow-aware Access Network)	Análise Analítica
Nguyen et al. [51]	Rede	Múltiplos Critérios / Contexto	-	Análise Analítica
S. Kim et al. [52]	Rede	Múltiplos Critérios	-	Análise Analítica
Lee et al. [50]	Terminal	Clássica	Wi-Fi / LTE	-

Tabela 3.1 – Sumarização das abordagens e estratégias para o gerenciamento de mobilidade.



# Capítulo 4

## Gerenciamento da Mobilidade de Fluxos IP

Este Capítulo descreve o mecanismo proposto para lidar com o gerenciamento de múltiplos fluxos IP utilizando uma abordagem baseada no terminal. A Seção 4.1 define o conceito de um fluxo IP e como as múltiplas interfaces podem funcionar de forma paralela. A Seção 4.2 apresenta uma visão geral da solução proposta e quais os critérios considerados para gerenciar os fluxos. A Seção 4.3 detalha o mecanismo de gerenciamento dos fluxos. Por fim, a Seção 4.4 demonstra o funcionamento da solução de acordo com os tipos de serviços que estão sendo utilizados.

### 4.1. Mobilidade de Fluxo

A convergência de diferentes tecnologias de comunicação tem ampliado as opções de conectividade, tornando o desenvolvimento de soluções que explorem o uso das diferentes interfaces de acesso dos terminais móveis cada vez mais comum.

Neste contexto, as múltiplas interfaces de rede disponíveis nos dispositivos móveis atuais (dispositivos *multihoming*) têm sido usadas pelos usuários para obter acesso aos diferentes serviços disponibilizados na Internet. Essa conexão com múltiplos enlaces de dados pode ser realizada por meio de uma:

- Interface Lógica: como forma de abstrair as múltiplas interfaces físicas do dispositivo, uma interface lógica é criada permitindo o uso sequencial e simultâneo das interfaces físicas. Com isso, as aplicações enviam os seus dados para o endereço da interface lógica criada.
- Interface física: neste caso, cada interface é identificada por seu endereço IP atribuído. Assim, sempre que uma conexão é iniciada com um determinado nó, um endereço IP é obtido de acordo com as rotas configuradas, encaminhando os pacotes por uma dada interface.

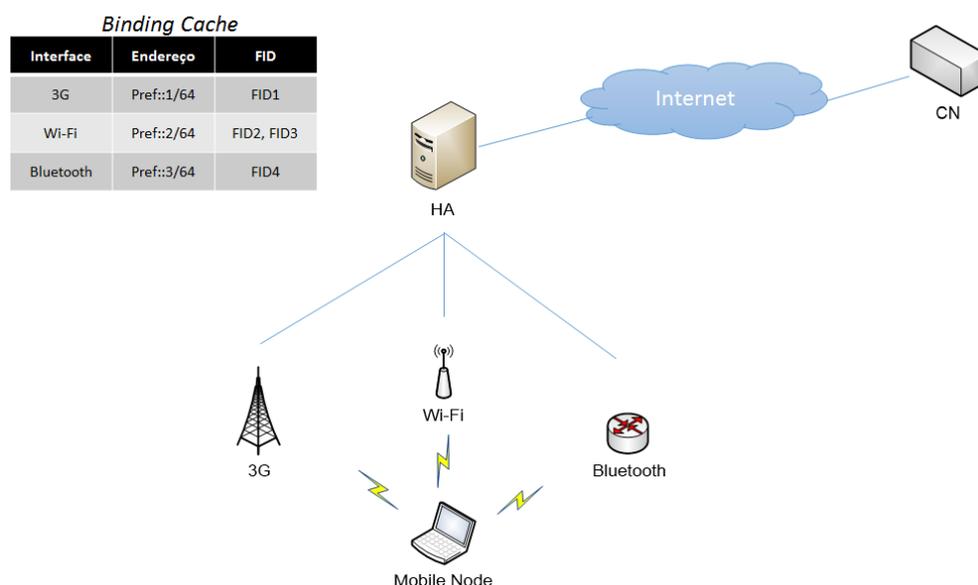
A partir da possibilidade de utilizar mais de uma interface de rede de forma simultânea no dispositivo, surge o interesse em movimentar os fluxos de dados que

estão sendo trafegados de uma interface para serem trafegados em outra. Este conceito é conhecido como mobilidade dos fluxos (do inglês, *flow mobility*) e a gerência dessa movimentação é essencial para proporcionar uma melhor experiência para o usuário.

Para discutir sobre a mobilidade dos fluxos, é importante primeiramente definir o que é um fluxo de dados. Pode-se entender como fluxo, um conjunto de pacotes que são trafegados entre o dispositivo móvel e o HA, independente de qual entidade iniciou a comunicação ou de qual protocolo de transporte está sendo usado [7]. A identificação de cada fluxo neste trabalho é dada pela tupla composta por:

1. Endereço IP de origem
2. Endereço IP de destino
3. Identificador de Fluxo
4. Próximo cabeçalho (do inglês, *Next Header*)
5. Porta de origem
6. Porta de destino

Com essas informações, é possível identificar e distinguir cada fluxo IP que é encaminhado pelo dispositivo. Para a solução que está sendo proposta e que utiliza o modo de operação com interfaces físicas em vez de uma interface lógica, a Figura 4.1 demonstra o funcionamento do *multihoming*.



**Figura 4.1 - Exemplo de um dispositivo Multihoming trafegando dados por múltiplas interfaces.**

Como mostrado na Figura 4.1, o *Mobile Node* possui três interfaces ativas (3G, Wi-Fi e Bluetooth). Pela interface Wi-Fi, o MN está trafegando dois fluxos (FID2 e FID3),

os quais são identificados pela 6-tupla mencionada, enquanto que na interface 3G trafega o fluxo FD1 e na interface Bluetooth o fluxo FD4. Essas informações das interfaces ativas e quais os seus respectivos fluxos são armazenados pelo HA para encaminhar corretamente os pacotes para os nós correspondentes. Assim, a imagem representa um cenário de *multihoming*, onde o dispositivo está conectado a mais de uma rede. A possibilidade em movimentar um fluxo de uma interface para outra de forma transparente caracteriza o conceito de mobilidade dos fluxos.

Nesse procedimento, padronizado pelo IETF como mobilidade de fluxo baseada no terminal, o dispositivo móvel é responsável por todo o gerenciamento da mobilidade. Contudo, esse gerenciamento não se preocupa com as reconfigurações dinâmicas dos fluxos, sendo realizado de maneira pré-estabelecida, com critérios já definidos independente do contexto em que o usuário está inserido. Logo, por mais que a seleção e a movimentação dos fluxos sejam realizadas de maneira transparente, nem sempre essa ação poderá atender aos requisitos do usuário ou de cada aplicação.

## **4.2. Visão Geral da Solução**

Os mecanismos definidos pelo IETF discutidos no Capítulo 2 para tratar a mobilidade, tanto do dispositivo quanto dos seus fluxos de dados, se concentram na fase de execução do *handover*, que tem o propósito apenas de executar uma ação definida na fase de decisão. Em geral, essa ação é tomada com base em informações obtidas da rede e do dispositivo e tem como objetivo decidir qual a melhor interface a ser usada em um dado instante. Cabe ao algoritmo de decisão apenas repassar essa informação para que algum componente da arquitetura seja capaz de executar essa mudança.

Contudo, algumas aplicações apresentam características importantes que não são levadas em consideração por mecanismos que obtêm informações apenas de camadas mais baixas da pilha TCP/IP. Por exemplo, caso um fluxo VoIP esteja trafegando por uma interface de rede que tem um alto consumo energético e o dispositivo entre em um contexto de conservação de energia, é bem provável que o mecanismo de decisão envie uma solicitação de mudança de interface para o mecanismo de execução realizar a alteração para uma interface disponível com menor consumo energético.

Porém, essa mudança pode ter um impacto negativo para o usuário se a interface escolhida não atender aos requisitos necessários da aplicação.

Outro problema de mobilidade de fluxo bastante comum ocorre quando um usuário está no final da transferência de um fluxo de dados (um arquivo, por exemplo). Caso, por alguma razão, o mecanismo de decisão solicite a mudança de interface do fluxo, o custo dessa mudança (em tempo e em pacotes de sinalização) pode resultar em uma degradação na experiência do usuário.

Este trabalho propõe a criação de regras e classificações com base não somente em informações coletadas de camadas mais baixas da pilha TCP/IP, mas também observando os critérios de acordo com os requisitos de cada fluxo de dados. Isto possibilita melhorar o processo de tomada de decisões dos gerenciadores de fluxo e, como resultado, melhorar a experiência do usuário. A Figura 4.2 apresenta uma proposta de inserir uma lógica de análise para auxiliar a tomada de decisões de *handover* também durante a fase de execução.

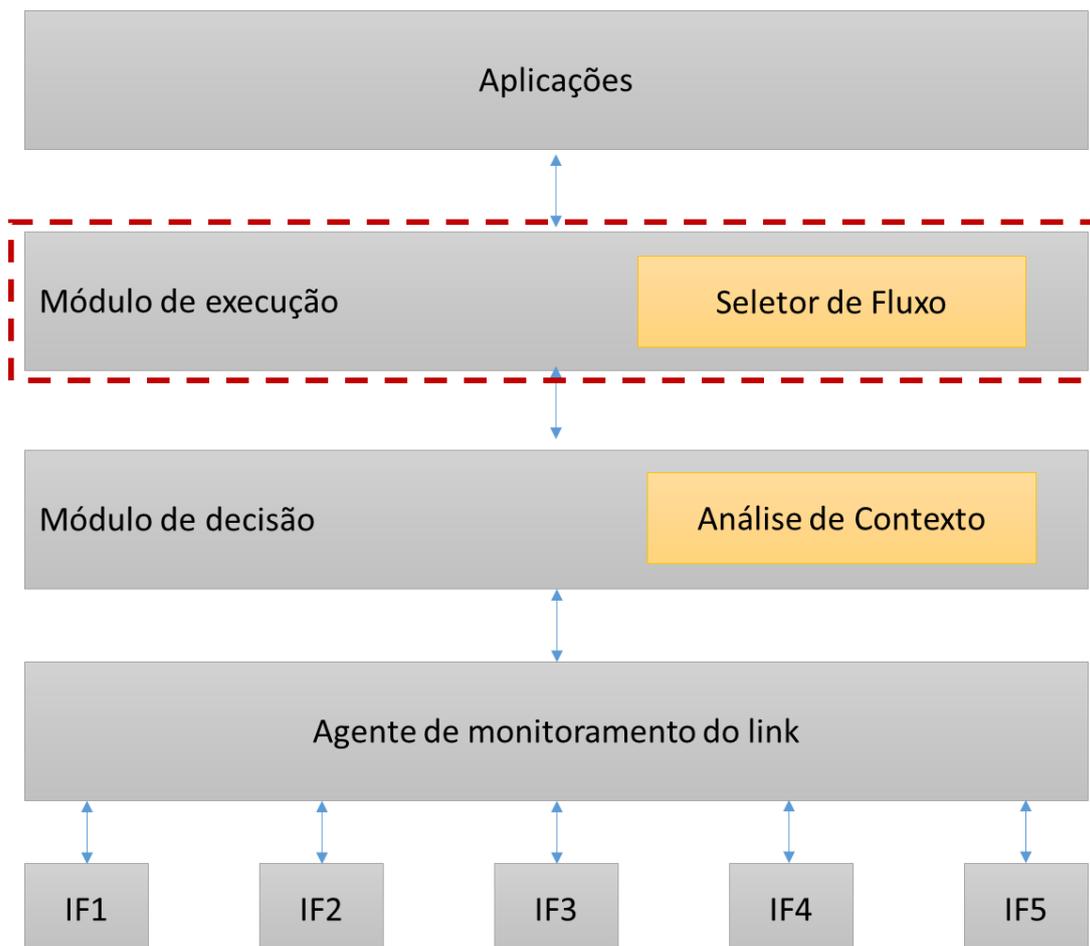


Figura 4.2 - Visão geral da arquitetura.

Na Figura 4.2, é possível notar a existência de mais de uma interface (IF) disponível, além de um agente de monitoramento, o qual é responsável por obter informações dessas interfaces e levar até os mecanismos de decisão e/ou de execução. É importante ressaltar que a partir do momento em que o mecanismo de execução é capaz também de tomar decisões, torna-se facultativo ter um mecanismo isolado para avaliar e decidir as mudanças de interface. Com isso, este trabalho estende a função da fase de decisão e a compartilha com a fase de execução, a área tracejada da Figura 4.2. Ou seja, a fase de execução do *handover* passa a ter também a responsabilidade de decidir e ainda executar a mudança de interface de acordo com a seleção e classificação dos fluxos.

Para tratar do gerenciamento de mobilidade desses fluxos, o mecanismo se baseia nos dois critérios retratados: (i) análise de contexto e (ii) seletor de fluxo. Assim, é possível ter mais informações para auxiliar nas decisões de *handover* e apenas executar a troca de interface quando realmente necessário.

### **4.3. Mecanismo para Gerenciamento de Mobilidade**

O mecanismo para o gerenciamento da mobilidade possui algumas regras e classificações pré-definidas para que seja capaz de tomar melhores decisões com o intuito de manter o usuário sempre conectado da melhor forma possível, se preocupando com os requisitos de cada fluxo. A análise de contexto da fase de decisão, por sua vez, se preocupa com dois dados importantes para determinar em qual contexto o usuário está inserido:

- **Nível de bateria:** dado importante para definir se o terminal deve conservar energia ou pode utilizar a máxima de sua eficiência para se comunicar e trocar dados. Assim, um limiar de nível de bateria, que pode ser definido até mesmo pelo usuário, é utilizado para que identifique se o dispositivo está em um contexto de conservação de energia ou não.
- **Nível de sinal:** dado que pode ser obtido por meio do agente de monitoramento para determinar se o valor RSSI pode ser considerado um valor (em dBm - decibel miliwatt) que represente baixa qualidade do sinal ou não. De forma semelhante, esse limiar pode ser definido pelo usuário.

A fase de decisão também pode conter outros critérios para determinar a escolha da interface, como os citados na seção 3.2. Contudo, como o mecanismo proposto realiza a decisão levando em consideração principalmente os requisitos de cada fluxo de dados que está sendo transmitido, apenas os critérios de nível de bateria e nível de sinal são usados na combinação da decisão a ser tomada.

Além disso, é importante também classificar as interfaces de rede de acordo com o seu consumo de energia e capacidade de transmissão de dados. Na Figura 4.3 são classificadas as interfaces de acordo com dados analisados por Kalic et al. [53].

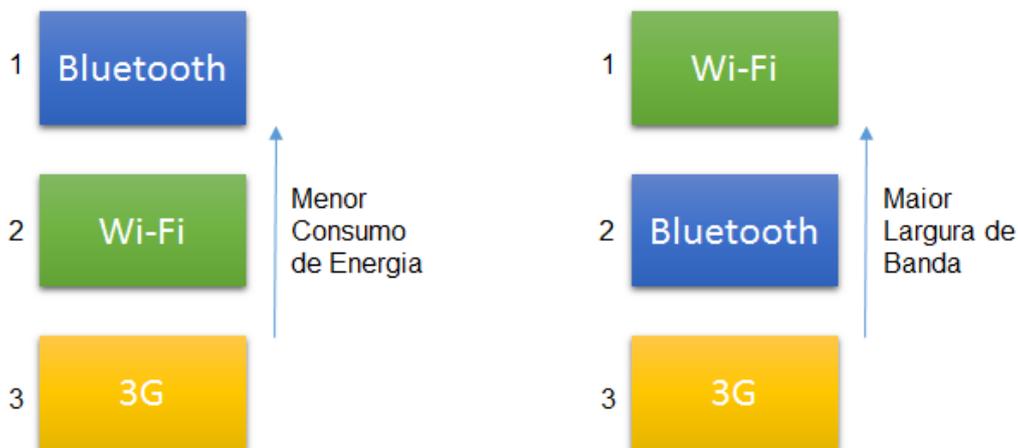


Figura 4.3 - Classificação das Interfaces.

O analisador de contexto deverá selecionar uma interface de acordo com a ordem representada na Figura 4.3. Logo, em um cenário de conservação de energia, a ordem à esquerda da Figura deverá ser respeitada. Para um cenário em que se busca um maior desempenho, a ordem à direita da Figura deverá ser seguida.

Além da análise de contexto e da classificação das interfaces, um seletor de fluxo auxilia as decisões para a reconfiguração dinâmica com base uma classificação pré-definida em Yim et al. [49] que estabelece classes de fluxos de acordo com os seguintes critérios:

- Classe 1: tolerante a atraso e tolerante a perda
- Classe 2: tolerante a atraso e intolerante a perda
- Classe 3: intolerante a atraso e tolerante a perda
- Classe 4: intolerante a atraso e intolerante a perda

Assim, exemplos de fluxos da classe 1 são todos aqueles serviços de melhor esforço, ou seja, tolerantes a atrasos e perdas durante a comunicação. Para a classe 2, os serviços

como FTP, e-mail e Web são exemplos de fluxos. Os fluxos da classe 3 podem ser representados por serviços VoIP ou *streaming* de vídeos. Por fim, serviços como jogos interativos de tempo real ou videoconferências em alta definição são exemplos de fluxos da classe 4.

Com os critérios definidos para a análise de contexto e para o seletor de fluxo, resta agora descrever o funcionamento de ambos durante a fase de decisão e execução, conforme detalhado na seção seguinte.

### 4.3.1. Operação Básica

Com o protocolo Mobile IP já é possível garantir que um nó móvel deixe a sua sub-rede de origem e se movimente para outras sub-redes enquanto é realizado o *handover* de forma transparente. Extensões como *Multiple Care-of Addresses Registration* [17] e *Traffic Selectors for Flow Bindings* [18] proporcionam um melhor gerenciamento dos fluxos que passam pelo MN. Contudo, este trabalho propõe não somente utilizar o protocolo de mobilidade e suas extensões, mas também utilizar em conjunto um mecanismo de atribuição dinâmica dos fluxos de dados que estão sendo trafegados, com o intuito de evitar reconfigurações desnecessárias ou que causem uma degradação na experiência do usuário.

Para isso, foi adotado o uso de uma abordagem baseada no terminal com o protocolo *Dual Stack Mobile IPv6* [2], evitando a necessidade de modificações nas redes (o que seria necessário para protocolos com abordagem baseada na rede), além de ser um protocolo mais bem estabelecido, com as políticas de gerenciamento dos fluxos de dados consolidadas. O funcionamento para a gerência de mobilidade é semelhante ao que foi explicado no capítulo 2, porém para a solução proposta, os fluxos são encaminhados de acordo com os critérios definidos pelo mecanismo de gerenciamento de mobilidade.

Para explicar o funcionamento do mecanismo, será necessário primeiramente identificar o contexto em que o dispositivo está inserido: (i) conservação de energia; ou (ii) desempenho. Para isso, basta verificar se o nível de bateria do equipamento esteja abaixo ou acima do limiar estabelecido como mostra a Figura 4.4. Em paralelo, é realizada também a análise do nível de sinal das interfaces ativas, comparando se está

maior ou menor do que o limiar definido. A Figura 4.5 representa o fluxograma dessa atividade.

Essas duas análises de identificação de contexto resultam na solicitação da mudança de interface para a fase de execução ou na permanência do estado atual. Com isso, os valores de seus limiares foram definidos visando maximizar a experiência do usuário, mas que podem ser alterados de acordo com suas preferências. Assim, o valor do limiar definido para o nível de bateria foi de 30%, ou seja, quando o dispositivo móvel alcançar um nível de bateria menor que 30%, muda-se o contexto de desempenho para conservação de energia. Por sua vez, o valor do nível de sinal considerado como adequado é até -70 dBm, ou seja, valores menores geram solicitações de mudança de interface.

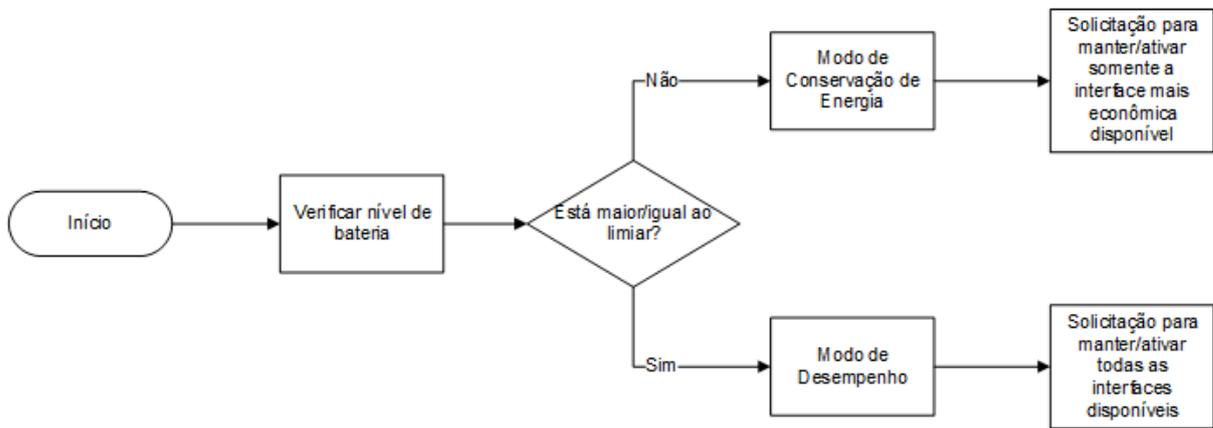


Figura 4.4 - Análise de contexto de energia.

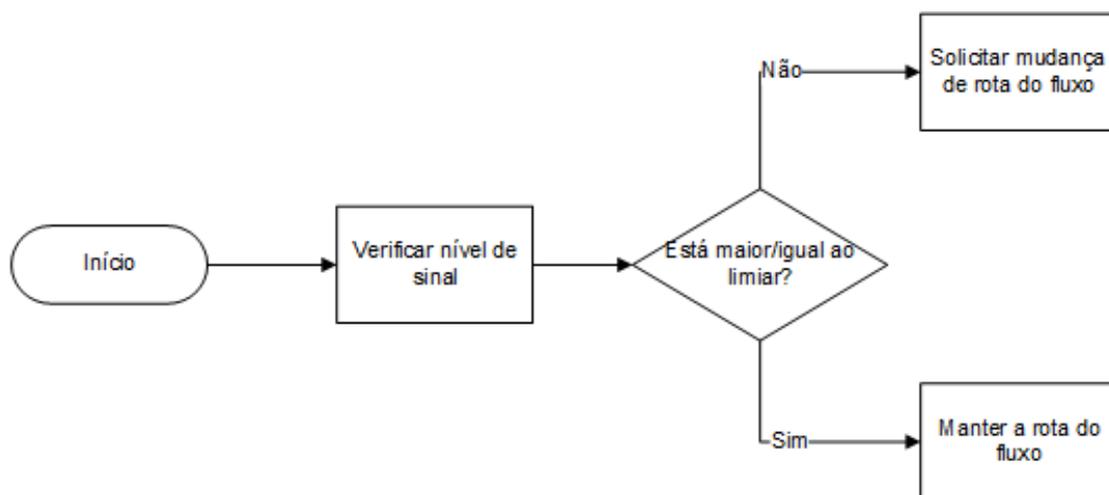


Figura 4.5 - Análise de contexto do nível de sinal.

Como o mecanismo proposto é utilizado em dispositivos móveis e o contexto pode variar de tempos em tempos, é necessário realizar essas análises de forma constante. Essa constância é dada a cada 120 segundos para identificar o nível de bateria e a cada 30 segundos para identificar o nível de sinal de cada rede.

Após a fase de decisão enviar alguma solicitação, a fase de execução deverá realizar a seleção dos fluxos para então executar ou não a mudança de interface. Como citado na seção anterior, uma classificação dos fluxos foi definida e deverá respeitar o fluxo de ação representado na Figura 4.6.

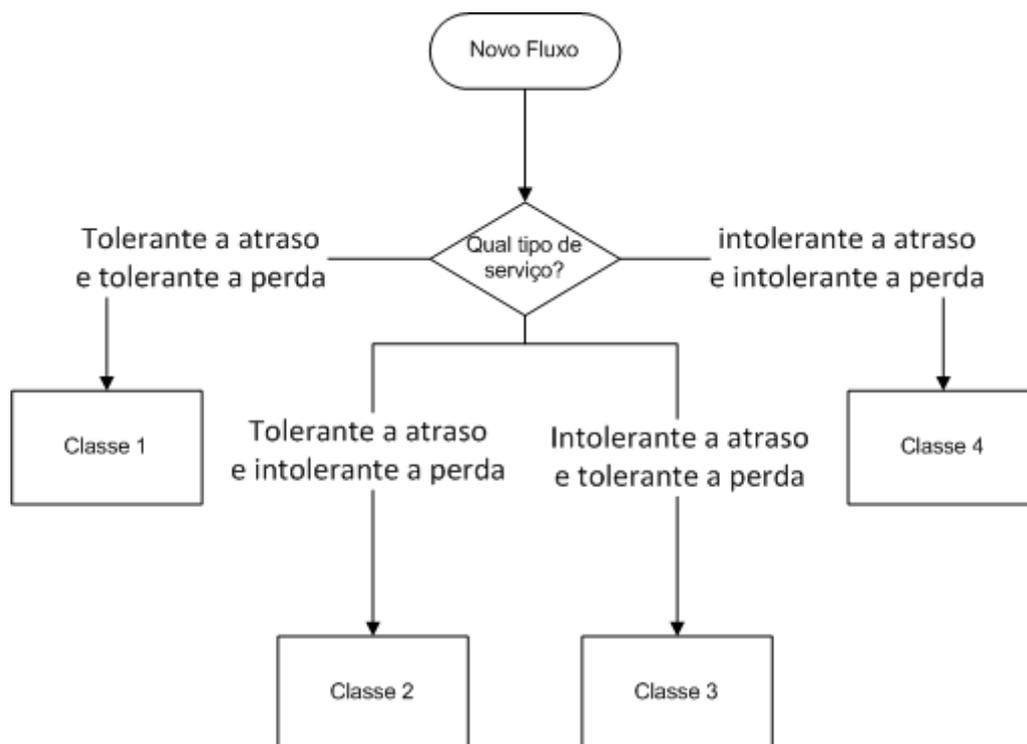


Figura 4.6 - Seleção dos Fluxos.

Em seguida, deverá ser realizada a atribuição da interface de acordo com a classe de cada fluxo. Para realizar essa atribuição, as seguintes regras foram definidas, buscando sempre atribuir a interface com a maior largura de banda para as maiores classes:

- 1) Fluxos das classes 3 e 4 só alteram a interface se o nível de sinal estiver abaixo do limiar após cerca de 4 análises do valor do RSSI, por mais que o contexto seja de desempenho ou de conservação de energia. Isso evita que seja realizada a mudança de interface para uma rede de menor qualidade (degradando a comunicação) ou gere múltiplos *handovers* seguidos devido a movimentação e oscilação do valor do RSSI. Esse valor de 4 análises pode ser alterado de acordo

com a intensidade de movimentação do usuário, necessitando para isso a utilização de mais um critério para avaliar o contexto, que seria a velocidade de deslocamento. Para o mecanismo proposta, está sendo considerado que o usuário apenas se movimenta ao caminhar.

- 2) Fluxos da classe 1 ou 2 são atribuídos a interfaces com maior largura de banda e que não estão sendo utilizadas por fluxos da classe 3 ou 4 no contexto de desempenho. Essa regra proporciona um maior balanço de carga no terminal, podendo distribuir os fluxos pelas várias interfaces ativas.
- 3) Em um contexto de conservação de energia, se só existirem fluxos da classe 1 e 2, somente uma interface de menor consumo energético deverá ser utilizada com o intuito de economizar a bateria do dispositivo. Assim, como os fluxos dessas classes não necessitam de uma largura de banda tão grande para trafegarem, o impacto não será tão grande para o usuário caso seja necessário realizar o *handover* de todos os fluxos para uma única interface.

Com essas regras, as características de cada fluxo representam um papel importante para a tomada de decisão, não levando em consideração apenas informações do estado da rede ou das preferências do usuário, buscando sempre manter o dispositivo conectado da melhor maneira possível.

#### **4.3.2. Algoritmo de Gerenciamento da Mobilidade dos Fluxos**

A Figura 4.7 apresenta o algoritmo da solução proposta detalhando as funções de análise de contexto, classificação e movimentação dos fluxos de acordo com os critérios de prioridade definidos. Entretanto, valores de limiar podem ser alterados de acordo com as preferências do usuário.

É importante ressaltar que uma função de controle deve ser capaz de realizar a chamada das demais funções descritas de tempos em tempos com o intuito de manter o usuário sempre conectado da melhor maneira possível. Para isso, as classes de cada fluxo são definidas previamente também, onde se descreve o protocolo, bem como o número da porta que será utilizada para a comunicação. Assim, o seletor de fluxo identifica e seleciona a classe pela porta de comunicação, atribuindo as regras de acordo com cada classe como mostra o algoritmo da Figura 4.7.

<b>Linhas</b>	Pseudocódigo do algoritmo de gerenciamento da mobilidade dos Fluxos
---------------	---

```

1  int LIMIAR_ENERGIA = 30; //Nível de energia
2  int LIMIAR_RSSI = -70;    //Nível de sinal
3  int LB_WIFI = 2, LB_BLUETOOTH = 1, LB_3G = 0; //Prioridade das interfaces quanto à largura de
4  banda(quanto maior o valor, maior prioridade)
5  int CE_BLUETOOTH = 2; LB_WIFI = 1; CE_3G = 0; // Prioridade das interfaces quanto ao consumo
6  energético (quanto maior o valor, maior prioridade)
7
8      function obterContextoEnergia(){
9          int nivel_bateria = obterNivelEnergia();
10         if (nivel_bateria >= LIMIAR_ENERGIA){
11             return MODO_DESEMPENHO;
12         else
13             return MODO_CONSERVACAO ;
14         }
15     }
16     /* FAZER para cada interface ativa */
17     function obterContextoSinal(){
18         int nivel_sinal = obterNivelSinalRede();
19         if(nivel_sinal >= LIMIAR_RSSI){
20             return MANTER_ROTA;
21         else
22             return MUDAR_ROTA;
23         }
24     }
25
26     /* Para cada interface ativa, realizar ordenação de acordo com a largura de banda: quanto
27     maior a largura, maior o seu ID */
28     function classificarInterface(){
29         for(interface = 0; interface < TOTAL_INTERFACES; interface++){
30             ordenarInterfacesAtivas(interface);
31         }
32     }
33     /* Para cada novo fluxo ou para cada nova interface com diferente prioridade, realiza-se o
34     seguinte procedimento */
35     function executarMovimentacaoFluxo(fid){
36         int classe = obterClasseFluxo(fid);
37         if(MODO_DESEMPENHO){
38             if(classe == 3 || classe == 4){

```

```

39         atribuirInterfaceMaiorLarguraBanda(fid);
40     } else if (classe == 1 | classe == 2){
41         if (EXISTE_FLUXO_CLASSE == 3 || EIXTE FLUXO _CLASSE == 4){
42             /*Atribui a interface com maior largura de banda que
43             não está sendo utilizada pelos fluxos da classe 3 ou 4*/
44             atribuirInterfaceMaiorLarguraBandaDisponivel(fid);
45         } else {
46             atribuirInterfaceMaiorLarguraBanda(fid);
47         }
48     }
49     } else if (MODO_CONSERVACAO){
50         if (NAO_EXISTE_FLUXO_CLASSE == 3 && NAO_EIXTE FLUXO _CLASSE ==
55         4){
56             atribuirInterfaceMenorConsumoEnergetico(fid);
57         } else {
58             // Atribui todos os fluxos 60mu ma só interface
59             atribuirInterfaceMaiorLarguraBanda(fid);
60         }
61     }
62 }
63
64

```

Figura 4.7 – Pseudocódigo do algoritmo de gerenciamento da mobilidade dos Fluxos

### 4.3.3. Procedimentos de Execução

Após definição das regras de funcionamento, a solução possui procedimentos para iniciar e disponibilizar ao usuário as funções de transparência e seletividade dos fluxos de dados entre as diferentes interfaces do dispositivo. Dessa forma, a solução proposta executa por meio de um *daemon* diversas validações e operações que necessitam de um *kernel* Linux como mostra as especificações da Figura 4.8 com base no UMIP [27]:

1	General setup
2	--> Prompt for development and/or incomplete code/drivers
3	[CONFIG_EXPERIMENTAL]
4	--> System V IPC [CONFIG_SYSVIPC]

5	
6	Networking support [CONFIG_NET]
7	--> Networking options
8	--> Transformation user configuration interface [CONFIG_XFRM_USER]
9	--> Transformation sub policy support [CONFIG_XFRM_SUB_POLICY]
10	--> Transformation migrate database [CONFIG_XFRM_MIGRATE]
11	--> PF_KEY sockets [CONFIG_NET_KEY]
12	--> PF_KEY MIGRATE [CONFIG_NET_KEY_MIGRATE]
13	--> TCP/IP networking [CONFIG_INET]
14	--> The IPv6 protocol [CONFIG_IPV6]
15	--> IPv6: AH transformation [CONFIG_INET6_AH]
16	--> IPv6: ESP transformation [CONFIG_INET6_ESP]
17	--> IPv6: IPComp transformation [CONFIG_INET6_IPCOMP]
18	--> IPv6: Mobility [CONFIG_IPV6_MIP6]
19	--> IPv6: IPsec transport mode [CONFIG_INET6_XFRM_MODE_TRANSPORT]
20	--> IPv6: IPsec tunnel mode [CONFIG_INET6_XFRM_MODE_TUNNEL]
21	--> IPv6: MIPv6 route optimization mode
22	[CONFIG_INET6_XFRM_MODE_ROUTEOPTIMIZATION]
23	--> IPv6: IP-in-IPv6 tunnel (RFC2473) [CONFIG_IPV6_TUNNEL]
24	--> IPv6: Multiple Routing Tables [CONFIG_IPV6_MULTIPLE_TABLES]
25	--> IPv6: source address based routing [CONFIG_IPV6_SUBTREES]
26	
27	File systems
28	--> Pseudo filesystems
29	--> /proc file system support [CONFIG_PROC_FS]

Figura 4.8 – Especificações do *kernel* Linux para executar a solução

Ao atender essas especificações de ambiente do *kernel* Linux, é possível compilar e executar o *daemon*. Mas para que o seu funcionamento seja realizado com sucesso, é necessário primeiramente definir um arquivo de configuração que deve ser previamente descrito pelo usuário com as políticas dos fluxos de dados e com as interfaces disponíveis no dispositivo. Esse arquivo deve conter a prioridade dos fluxos de dados como também a definição da interface padrão, a qual receberá os fluxos que não

possuem prioridade. Por fim, deve-se definir o endereço do HA e intervalo de tempo entre as mensagens BU. A Figura 4.9 exemplifica um arquivo de configuração de um MN.

```
1  # Arquivo de configuração do MN
2  NodeConfig MN;
3
4  # Lifetime
5  MnMaxHaBindingLife 60;
6
7  # Desabilitar Route Optimization
8  DoRouteOptimizationCN disabled;
9  DoRouteOptimizationMN disabled;
10 UseCnBuAck disabled;
11 MnDiscardHaParamProb enabled;
12
13 # Habilitar DSMIPv6
14 MnUseDsmip6 enabled;
15
16 # Lista de interfaces disponíveis
17 Interface "wlan0" {
18     # Ordem de prioridade
19     MnIfPreference 1;
20     # BID of the interface
21     Bid 10;
22 }
23 Interface "bnep0" {
24     # Ordem de prioridade
25     MnIfPreference 2;
26     # BID da interface
27     Bid 20;
28 }
29
```

```

30 # Interface padrão
31 MnHomeLink "wlan0" {
32     IsMobRtr enabled;
33     HomeAgentAddress 2001:480:f000:16::21;
34     HomeAddress 2001:480:f000:16::20/64;
35
36     # Interfaces disponíveis
37     MCoAReg enabled;
38     MCoAiface "wlan0", "bnep0";
39 }
40
41 # Desabilitar IPsec
42 UseMnHaIPsec disabled;
43 KeyMngMobCapability disabled;
44
45 #Habilitar Mobile Flow
46 MnFlowMobility enabled;

```

Figura 4.9 – Exemplo de arquivo de configuração do MN

O HA, de forma semelhante, deve conter também um arquivo de configuração que define as interfaces e os seus endereços para comunicação entre o MN e o HA, bem como entre o CN e o HA.

Após essas definições, basta iniciar o *daemon* em segundo plano por meio de linha de comando no *console* que qualquer aplicação que realizar comunicação com outro nó na rede irá ter os pacotes interceptados pelo seletor de fluxo antes de enviar os dados.

#### 4.4. Considerações Finais

O mecanismo proposto apresenta critérios para gerenciar a mobilidade dos fluxos levando em consideração informações tanto do contexto em que o usuário está inserido como também dos requisitos de cada fluxo que está sendo trafegado. Dessa forma, este mecanismo necessita estar presente tanto na fase decisão, permitindo obter

informações de mais baixo nível do terminal e da rede, quanto na fase de execução, permitindo analisar informações dos fluxos e suas aplicações, pois são critérios importantes para a qualidade da comunicação tendo um impacto direto na experiência do usuário.

Assim, o próximo capítulo apresenta cenários e resultados que demonstram tanto a viabilidade do mecanismo proposto quanto à importância da utilização da identificação dos fluxos para determinar as melhores rotas disponíveis de acordo com as mudanças de contexto que vão surgindo durante a movimentação do usuário.

# Capítulo 5

## Experimentos e Análise dos Resultados

Para demonstrar a viabilidade da solução proposta foram realizados experimentos em um ambiente real. Este capítulo apresenta os detalhes do ambiente de experimentação, os cenários de experimentação e as métricas de avaliação utilizadas. Em seguida, são apresentados os resultados obtidos e uma análise a respeito.

### 5.1. Ambiente de Experimentação

A infraestrutura utilizada para a realização dos experimentos é apresentada na Figura 5.1. Neste ambiente, foi utilizada somente a tecnologia IPv6 devido a limitações do protótipo desenvolvido, que utilizou como base uma implementação de código aberto do protocolo Dual Stack Mobile IPv6 com suporte ao registro de múltiplos *care-of-address* chamada UMIP [27]. Assim, essa implementação foi alterada para permitir a utilização do mecanismo proposto de reconfiguração dinâmica dos fluxos.

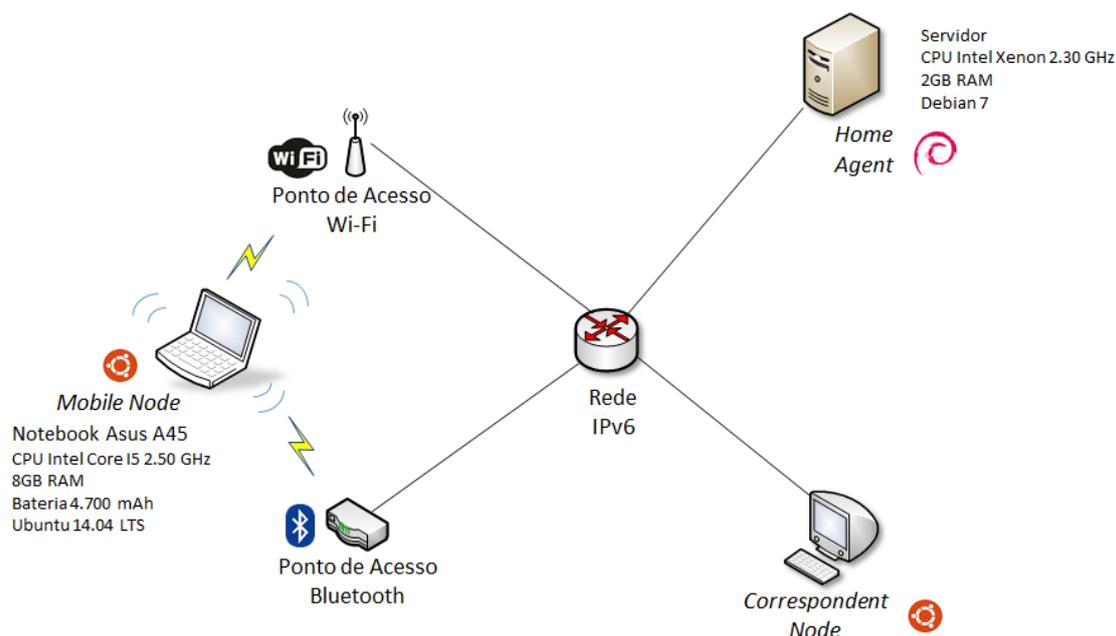


Figura 5.1 - Cenário Base.

O *mobile node* possui as seguintes interfaces de acesso:

- Bluetooth (bnep0): *Broadcom* BCM2046 2.1 EDR

- Wi-Fi (wlan0): Qualcomm Atheros AR9485 *Wireless Network Adapter*
- Wi-Fi (wlan1/wlan2): RT73 USB *Wireless LAN Card*

Devido à falta de uma infraestrutura de rede IPv6 das operadoras de telefonia móvel no Brasil e a necessidade de se utilizar o protocolo IP na versão 6 com o protótipo desenvolvido, não foi possível realizar nenhum experimento com tecnologias de redes móveis como 3G.

## 5.2. Cenários de Experimentação

Os cenários criados para a realização dos experimentos foram escolhidos para demonstrar dois conceitos: (i) ubiquidade de acesso - demonstrando a continuidade dos fluxos; (ii) reconfiguração dinâmica dos fluxos de dados - demonstrando a movimentação dos fluxos de acordo com as suas classificações, com o intuito de melhorar a qualidade da comunicação.

### 5.2.1. Ubiquidade de Acesso

Para realizar os experimentos que demonstrem a ubiquidade de acesso, foi criado um cenário onde o *mobile node* está conectado em duas redes Wi-Fi no primeiro momento. Em seguida, o dispositivo passa a se movimentar e entra em uma área onde um dos pontos de acesso não possui cobertura, como demonstra a Figura 5.2.

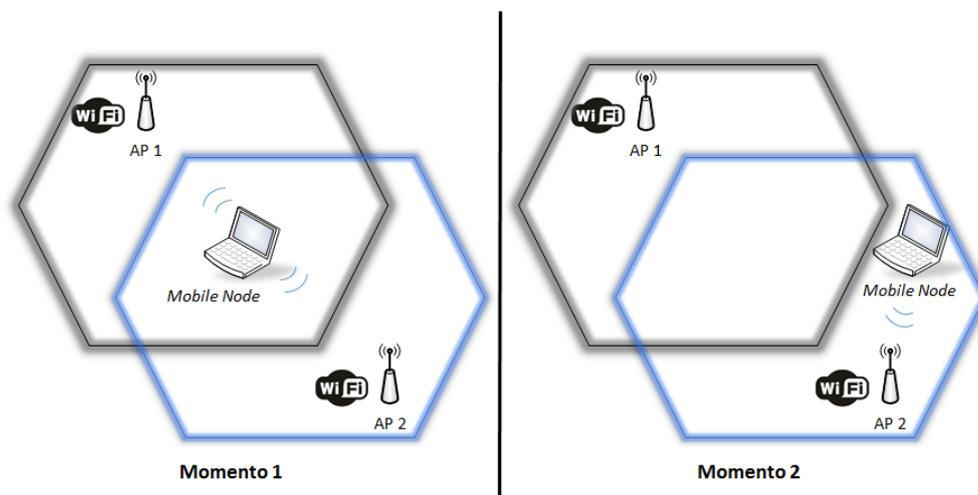


Figura 5.2 - Cenário que representa a movimentação do dispositivo.

O fluxo de dados que estava sendo transmitido na primeira interface não pode ser interrompido, tendo que ser movimentado para alguma outra interface que também

esteja registrada no *home agent*. Esse *handover* pode ser tanto entre redes que utilizam a mesma tecnologia (*handover* horizontal) quanto entre redes que utilizam tecnologias diferentes (*handover* vertical). É importante ressaltar que durante a movimentação entre as redes, é necessário ter ao menos uma interface de maior confiabilidade, ou seja, que esteja em uma rede de maior cobertura para que a mesma possa manter todos os fluxos ativos, sem ter que reiniciar nenhuma conexão.

### 5.2.2. Reconfiguração Dinâmica

A reconfiguração dinâmica é dada de acordo com a seleção dos fluxos explicada no capítulo anterior. Assim, foram criados cenários que demonstram ser não somente necessário ter informações obtidas a partir da camada 2 da pilha TCP/IP, mas também levar em consideração os fluxos que estão sendo transmitidos.

O primeiro cenário supõe que o usuário está em sua casa ou em um escritório e tem disponível uma rede Wi-Fi e Bluetooth, mas está com um baixo nível de bateria (valor que pode ser selecionado pelo usuário), como representado na Figura 5.3. Caso fosse considerado somente as informações de nível de bateria e as redes disponíveis, teremos que seria melhor movimentar todos os fluxos da rede Wi-Fi para a rede Bluetooth, devido a menor consumo energético da interface.

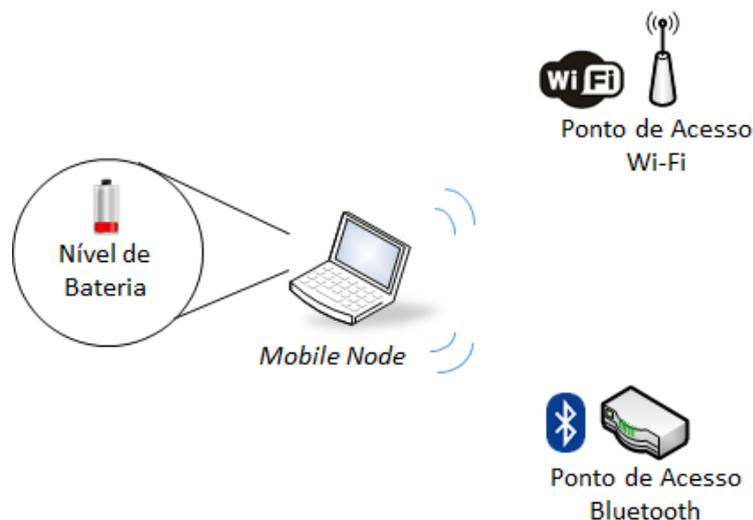


Figura 5.3 - Cenário com duas ou mais interfaces ativas e um baixo nível de bateria.

Entretanto, caso o fluxo (que está usando a interface Wi-Fi) for da classe 3 ou 4, seguindo os critérios da solução proposta, esse fluxo deverá permanecer na interface

Wi-Fi para manter a qualidade da comunicação. Para representar este cenário foi gerado um tráfego VoIP por meio da ferramenta SIPP [60].

No segundo cenário o dispositivo móvel está realizando um *download* de um arquivo por meio do protocolo FTP e devido à movimentação do dispositivo, o nível de sinal da rede em que o *download* está sendo realizado diminui, como é representado na Figura 5.4.

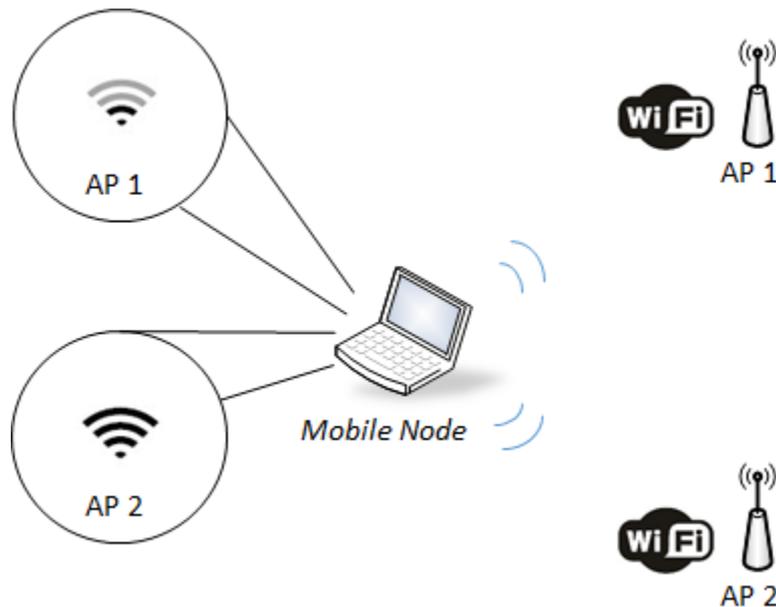


Figura 5.4 - Cenário de transferência de um arquivo em uma rede com menor nível de sinal.

Levando em consideração apenas a informação de nível de sinal, seria natural movimentar esse fluxo para outra rede com maior nível de sinal. Contudo, a transferência do arquivo está próximo do término, e portanto será menos custoso (em termos de pacotes de sinalização, tempo de transferência e perdas de pacotes) manter a mesma interface realizando o *download*.

### 5.3. Métricas

Foram selecionadas as seguintes métricas para demonstrar o funcionamento e comparar com a solução padrão de mobilidade: vazão, número de sequência, atraso e eficiência energética.

A vazão dos dados é uma das métricas mais utilizada para avaliar a qualidade de uma interface em relação à outra. A ideia é movimentar os fluxos de acordo com os critérios estabelecidos. A vazão compreende valores em *bytes* por segundo.

O número de sequência é utilizado para demonstrar a continuidade dos fluxos mesmo após a realização dos *handovers*. Esse número reflete o fluxo de *bytes* do segmento enviado pelo transmissor de dados.

O atraso é usado para avaliar a qualidade de uma rede, principalmente para determinados serviços (classe 3 e 4) que possuem um valor limite aceitável (300 ms) para ser ter uma comunicação considerada de qualidade.

Por último, a eficiência energética, medida em mAh (miliampere/hora), é utilizada para analisar o ganho de autonomia de bateria ao mudar os fluxos para uma interface com menor consumo de energia.

## 5.4. Resultados

### 5.4.1. Ubiquidade de Acesso

Esta seção apresenta os resultados obtidos para o cenário representado na Figura 5.2, onde o dispositivo móvel equipado com duas interfaces Wi-Fi se movimenta e necessita alterar o caminho de um fluxo de dados de uma interface para outra (que ainda está na área de cobertura), pois o nível de sinal da primeira interface diminui e está abaixo do limiar estabelecido. Assim, ao mover o fluxo para a outra interface, a conexão não deve ser reestabelecida, mantendo o conceito de ubiquidade de acesso.

O tráfego TCP gerado pela ferramenta IPerf [58] durante este cenário representa a comunicação de um serviço Web entre o dispositivo móvel e o nó correspondente. Este tráfego foi monitorado por meio da ferramenta chamada *wireshark* [61] que permite analisar os pacotes transmitidos. Assim, a primeira análise a ser feita de uma comunicação que utiliza o protocolo TCP para garantir que não houve reconexão, é identificar se os pacotes de sinalização utilizados para estabelecer uma conexão (SYN, SYN-ACK e ACK) foram transmitidos somente uma vez.

A Figura 5.5 representa a captura realizada do primeiro pacote de sinalização TCP entre o *correspondente node* e o *mobile node*. É possível notar que somente um pacote foi encontrado ao inserir o filtro no *wireshark*.

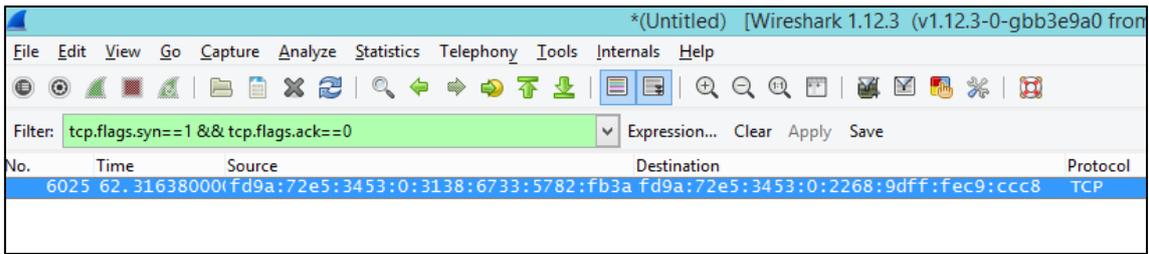


Figura 5.5 – Representação da única sinalização TCP SYN.

Ao constatar que somente uma conexão foi estabelecida mesmo após a mudança de interface, é importante também analisar o número de sequência que demonstra a continuidade do fluxo TCP. A Figura 5.6 representa a relação número de sequência pelo tempo, ou seja, a medida que o tempo vai passando e os pacotes são transmitidos, o número de sequência deve aumentar. Contudo, durante o *handover*, por alguns segundos esse número não aumentou, pois foi o tempo em que o *mobile node* movimentou o fluxo e registrou essa mudança no *home agent*. No gráfico da Figura 5.6 é possível observar que o *handover* foi iniciado por volta do segundo 31 e voltou a continuar a comunicação pela nova interface por volta do segundo 39.

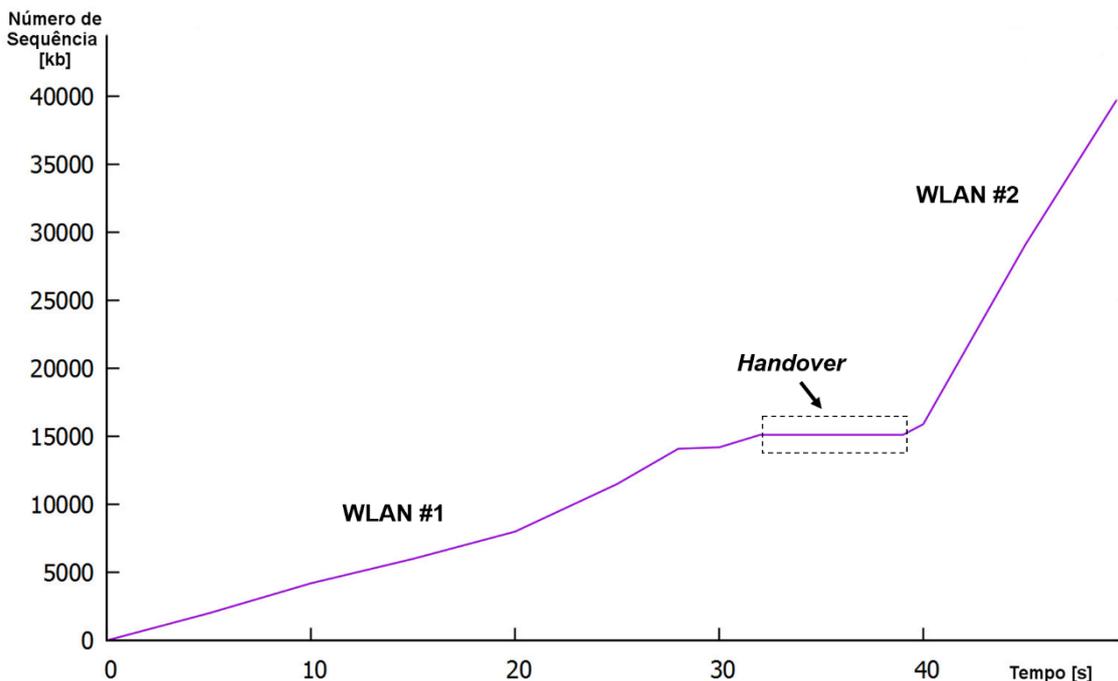


Figura 5.6 – Representação do número de sequência crescente após a mudança de interface entre redes WLAN.

A Figura 5.7 exibe as taxas de vazão obtidas durante a transferência de dados. Como mostrado na Figura 5.7, no instante em que o número de sequência permaneceu

constante, não há registro de vazão (dos pacotes transmitidos entre o *correspondente node* e o *mobile node*), pois até que o fluxo seja movido por completo para a outra interface, não ocorre transmissão dos dados. Uma observação interessante é o aumento da vazão ao mudar de rede, obtido pela melhor qualidade de sinal da nova interface.

Para avaliar a movimentação de fluxo entre redes de acesso diferentes (*handover* vertical) foi realizada a movimentação de um fluxo TCP gerado pelo IPerf de uma interface Bluetooth para uma interface Wi-Fi.

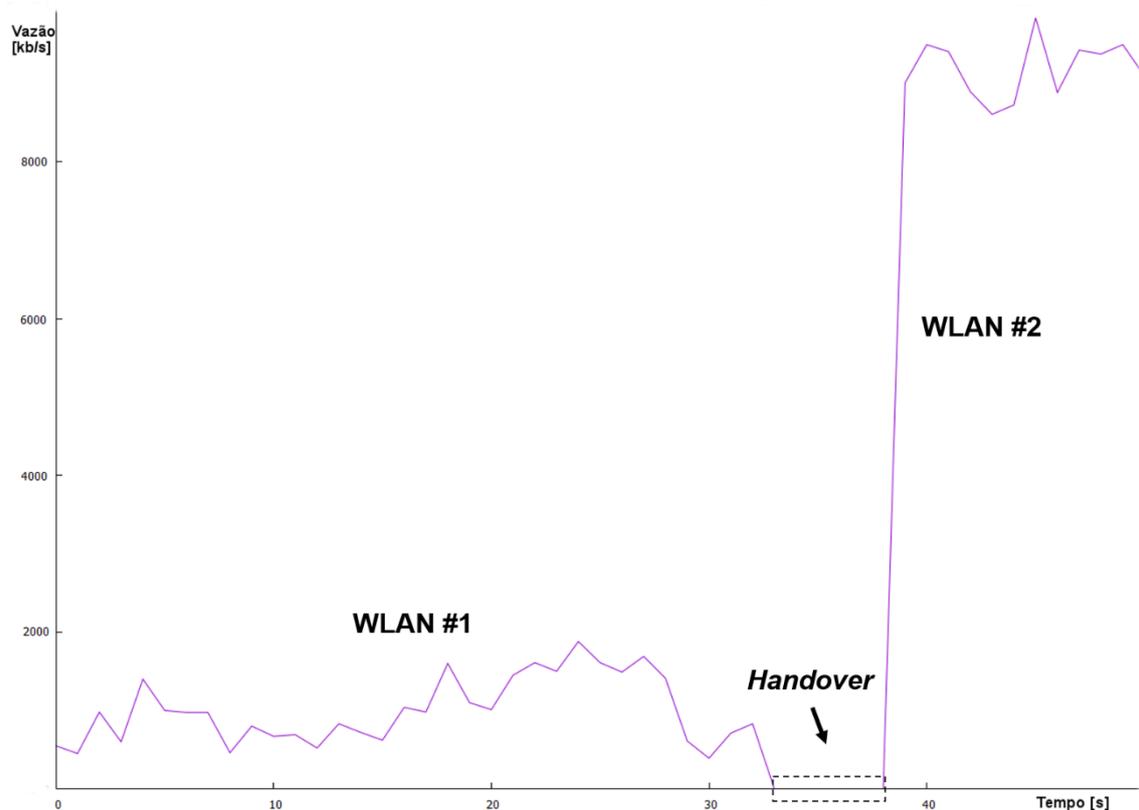


Figura 5.7 – Representação da vazão pelo tempo durante o *handover* entre redes WLAN para WLAN.

De forma semelhante, foi analisado o número de sequência que aumenta ao decorrer da transmissão dos pacotes. Contudo, como as tecnologias são diferentes, é possível observar na Figura 5.8 uma diferença grande ao iniciar a comunicação com Bluetooth e posteriormente alterar para uma interface Wi-Fi devido as suas características.

Como mostrando na Figura 5.8, o número de sequência cresce em um ritmo muito menor do que quando a interface Wi-Fi é iniciada. Isso pode ser explicado com a Figura 5.9, que demonstra a diferença de vazão de uma interface para outra. O maior valor de

largura de banda em que o Bluetooth alcançou foi 1.07Mbits/s, enquanto que o Wi-Fi alcançou uma largura de banda de até 38.6 Mbits/s. Outro ponto interessante a se observar é o tempo que necessário para movimentar o fluxo. Por volta do segundo 43, o *handover* foi iniciado e a comunicação só foi iniciada novamente pela interface Wi-Fi no segundo 73, ou seja, uma diferença de 30 segundos. Isso pode ser explicado devido ao fato da interface Bluetooth ter uma largura de banda menor e alcançar uma taxa de transferência conceitual de no máximo 750kbps, levando um tempo maior para sinalizar o *home agent* a mudança.

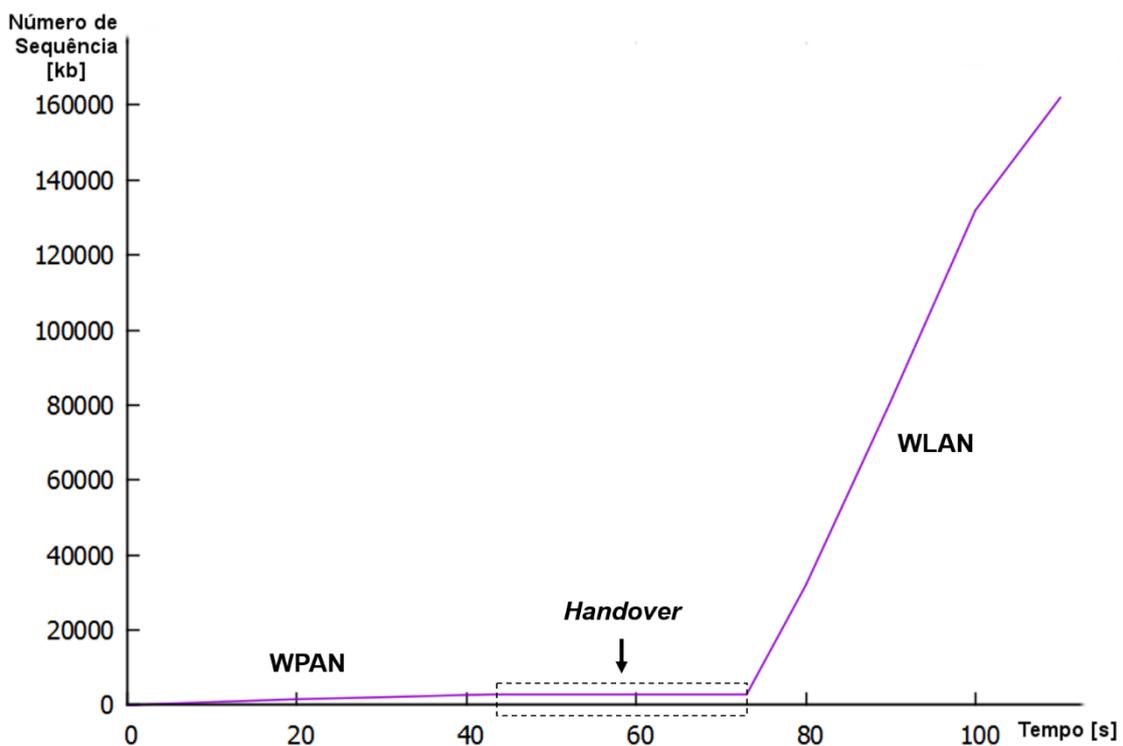


Figura 5.8 – Número de sequência durante o *handover* entre uma rede WPAN para uma rede WLAN.

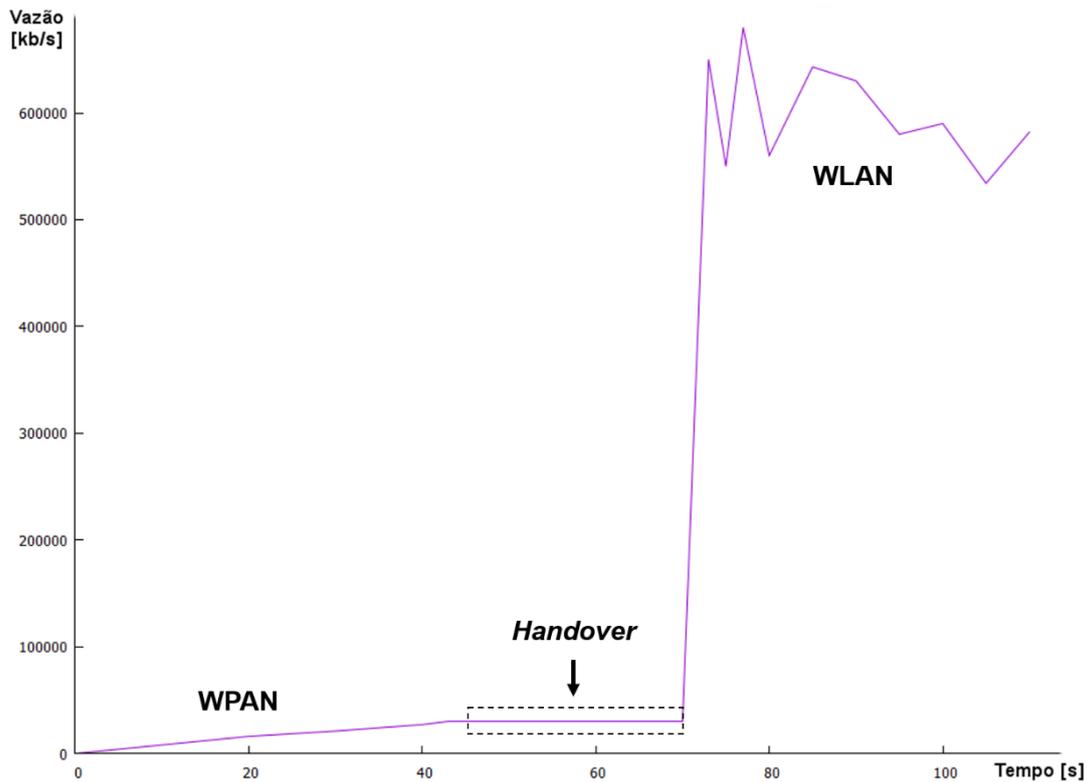


Figura 5.9 - Representação da vazão pelo tempo durante o *handover* entre redes WPAN para WLAN.

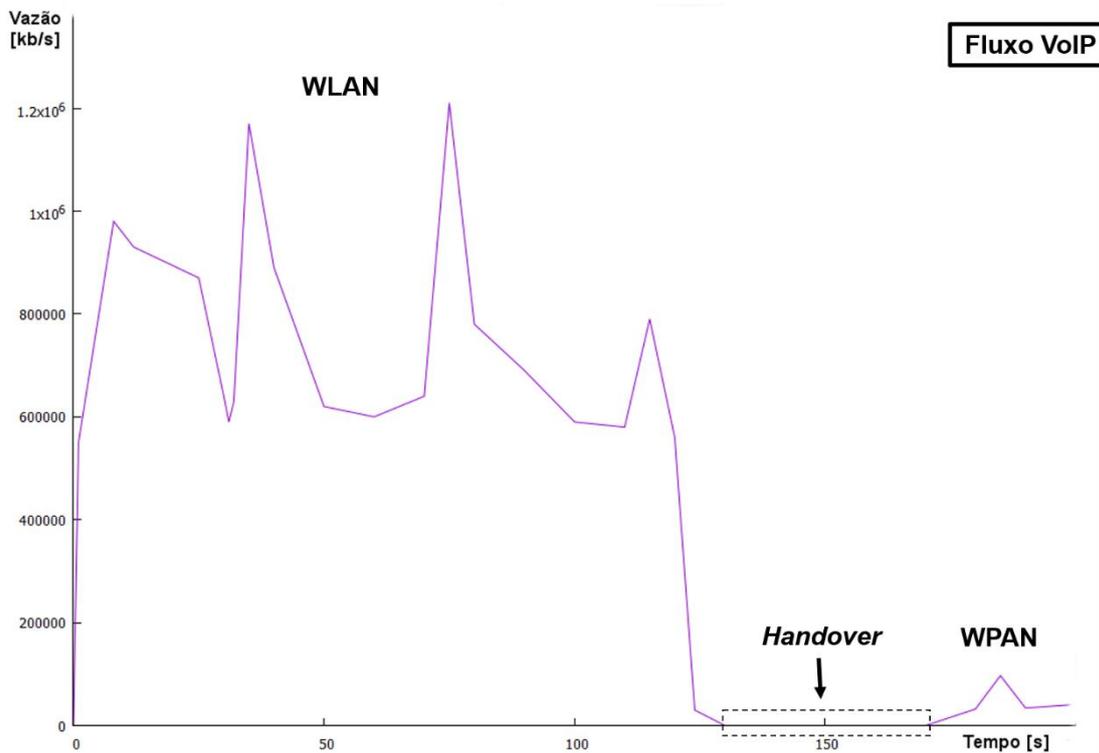
#### 5.4.2. Reconfiguração Dinâmica

Esta seção apresenta os resultados de avaliação obtidos a partir dos cenários descritos na seção 5.2.2. A solução proposta é comparada com uma solução de mobilidade padrão que utiliza um mecanismo de decisão que não leva em consideração os requisitos de cada serviço.

No primeiro cenário um tráfego VoIP é gerado usando a ferramenta SIPP [60]. Além disso, o dispositivo móvel se encontrava em um contexto em que o nível de bateria é considerado baixo.

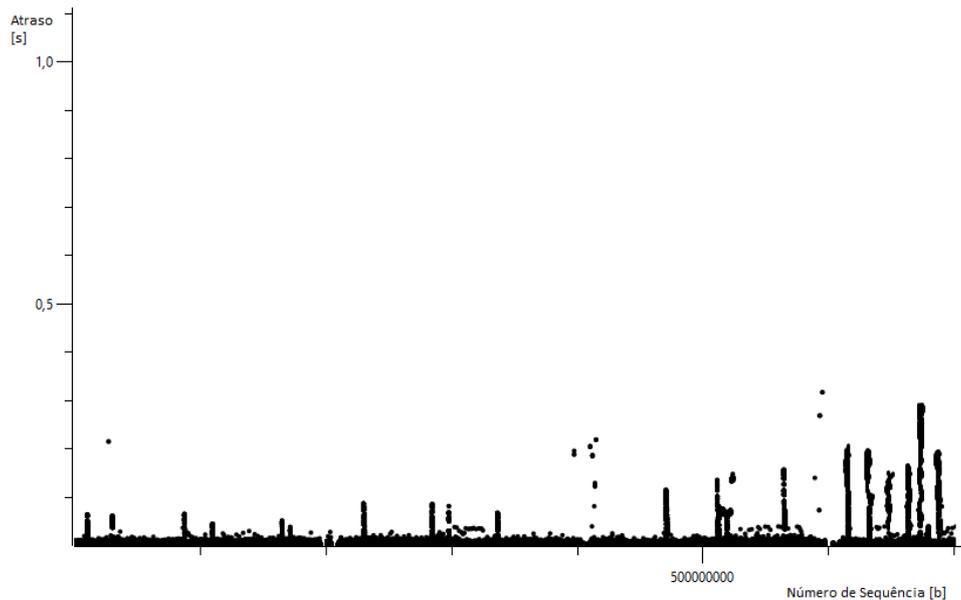
A Figura 5.10 apresenta a vazão dos dados e o tempo necessário para realizar a movimentação do fluxo VoIP (cerca de 56 segundos), maior do que no cenário anterior (WLAN-WPAN) devido ao tipo de serviço que está sendo utilizado. Esse tempo é devido a mudança de interface para uma tecnologia com menor largura de banda e devido ao tipo de serviço que está sendo transmitido. É importante ressaltar que melhorias no tempo do *handover* também podem ser empregadas (por exemplo, *Route Optimization*), mas como não são o foco deste trabalho, essas melhorias não foram

implementadas no protótipo. Por essa razão, em alguns cenários, o tempo de *handover* chega a ser quase de 1 minuto.



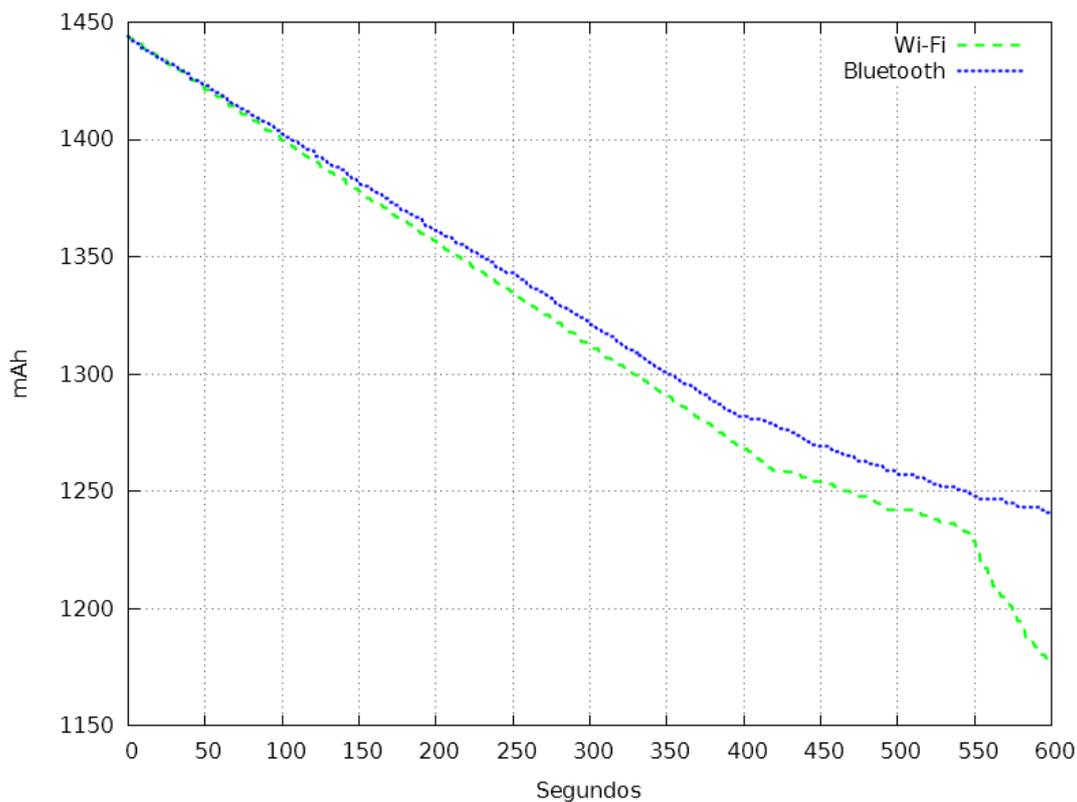
**Figura 5.7 - Representação da vazão pelo tempo durante o *handover* entre redes WLAN para WPAN com um fluxo VoIP.**

A Figura 5.11 mostra o atraso na comunicação entre o *mobile node* e o *correspondente node*. É recomendado para uma comunicação fim-a-fim um atraso de até 300 ms de acordo com especificações de protocolos utilizados em comunicações VoIP. No experimento realizado, é possível notar que por volta do número de sequência 500000000, momento em que é realizado o *handover*, o valor do atraso começa a ser maior do que antes. Isso se dá devido à mudança de tecnologia de Wi-Fi para Bluetooth, demonstrando a redução da qualidade da comunicação em relação ao atraso.



**Figura 5.8- Relação do atraso pelo número de sequência durante a mudança de interface utilizando um fluxo VoIP.**

Contudo, a mudança de interface pode representar um ganho na conservação de energia do dispositivo, o que pode aumentar o tempo de duração da comunicação. Mas é importante avaliar se realmente a conservação de energia pode trazer um benefício para o usuário no seu dia-a-dia, pois como mostra o gráfico da Figura 5.12, para pequenos intervalos de tempo, como os cerca de 500 segundos analisados no gráfico, a diferença de consumo não é tão grande. Ou seja, o mecanismo proposto ao analisar que o fluxo necessita de certos requisitos da rede, identifica que pode não valer a pena conservar energia se a comunicação for degradada. Logo, por mais que o dispositivo tenha entrado no contexto de conservação de energia, ou seja, o nível de bateria presente um valor de 30% do total disponível, a ligação VoIP não deve ser transferida para outra interface para garantir que a qualidade da comunicação permaneça igual .



**Figura 5.9 – Comparação do consumo de energia utilizando Wi-Fi e Bluetooth.**

O segundo cenário descrito na seção 5.2.2 considera que o dispositivo móvel realiza o *download* de um arquivo via FTP e, ao se movimentar, o nível de sinal da rede começa a diminuir. Por meio dessa informação de nível de sinal e não levando em consideração o fluxo ou a quantidade de dados que faltam ser enviados para completar a transferência do arquivo, um mecanismo de decisão enviaria uma solicitação de mudança de interface. Ao realizar essa mudança, por alguns segundos, o recebimento do arquivo irá parar para que aconteça a sinalização com o *home agente*. A Figura 5.13 demonstra a transferência do arquivo sendo realizada por meio do protocolo FTP utilizando IPv6. A Figura 5.14 e 5.15, respectivamente, demonstram a vazão e o número de sequência durante a transferência do arquivo, realizando a mudança de interface no instante 40 e retornando o envio cerca do segundo 62.

Com o intuito de comparar com a solução proposta, o mesmo arquivo foi transferido para o dispositivo móvel que se manteve no mesmo ponto de acesso, ou seja, não realizou o *handover* buscando transferir todo o arquivo na mesma rede e diminuir o custo de sinalização e o tempo de transferência. Assim, ao se obter as

informações sobre o fluxo e o tempo estimado para finalizar a transferência, a solução proposta manteve o fluxo na mesma interface.

Na Figura 5.16 é possível visualizar que mantendo uma única interface ativa, o mesmo arquivo sendo transferido levou em torno de 62 segundos, significando um ganho de quase 30 segundos em relação ao experimento em que foi realizado o *handover*. Ou seja, devido ao tempo de sinalização e a transferência estar próxima do fim, não foi interessante alterar a interface do fluxo.

No.	Time	Source	Destination	Protocol
28050	33.34158300	fd9a:72e5:3453:0:fab1:56ff:febf:d295	fd9a:72e5:3453:0:2268:9dff:fec9:ccc8	FTP-DATA
28051	33.34159200	fd9a:72e5:3453:0:fab1:56ff:febf:d295	fd9a:72e5:3453:0:2268:9dff:fec9:ccc8	FTP-DATA
28052	33.34160300	fd9a:72e5:3453:0:fab1:56ff:febf:d295	fd9a:72e5:3453:0:2268:9dff:fec9:ccc8	FTP-DATA
28053	33.34161000	fd9a:72e5:3453:0:2268:9dff:fec9:ccc8	fd9a:72e5:3453:0:fab1:56ff:febf:d295	TCP
28054	33.34162900	fd9a:72e5:3453:0:2268:9dff:fec9:ccc8	fd9a:72e5:3453:0:fab1:56ff:febf:d295	TCP
28055	33.34164200	fd9a:72e5:3453:0:2268:9dff:fec9:ccc8	fd9a:72e5:3453:0:fab1:56ff:febf:d295	TCP
28056	33.34165100	fd9a:72e5:3453:0:2268:9dff:fec9:ccc8	fd9a:72e5:3453:0:fab1:56ff:febf:d295	TCP
28057	33.34273200	fd9a:72e5:3453:0:fab1:56ff:febf:d295	fd9a:72e5:3453:0:2268:9dff:fec9:ccc8	FTP-DATA
28058	33.34276300	fd9a:72e5:3453:0:fab1:56ff:febf:d295	fd9a:72e5:3453:0:2268:9dff:fec9:ccc8	FTP-DATA

Figura 5.10 - Captura da Transferência de Arquivo utilizando FTP.



Figura 5.11 – Representação da vazão pelo tempo durante a transferência de um arquivo usando FTP.

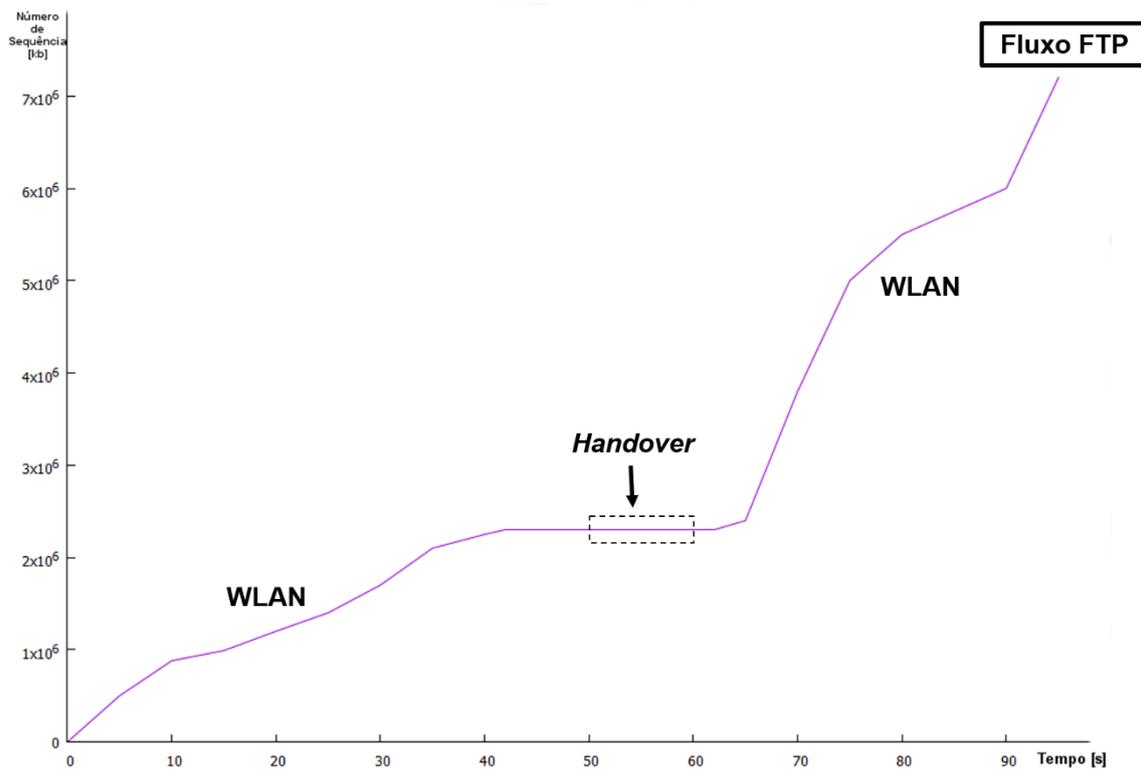


Figura 5.12 – Representação do número de sequência pelo tempo durante o *handover* entre redes WLAN utilizando um fluxo FTP para transferir um arquivo.

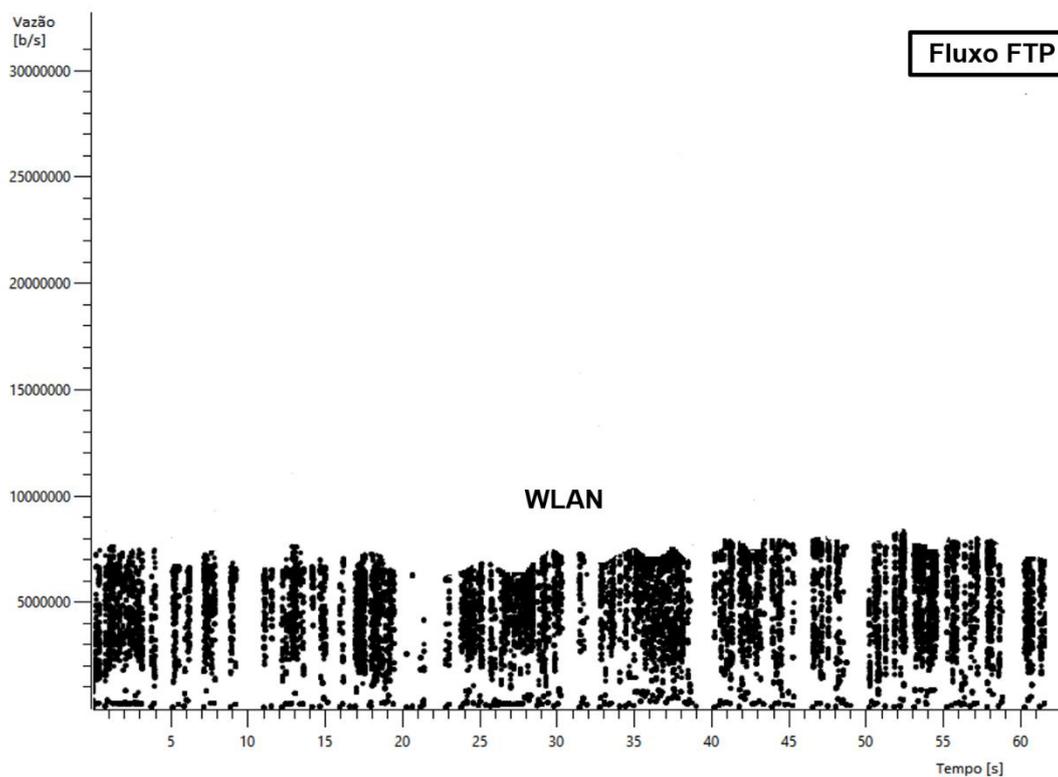


Figura 5.13 - Representação da vazão pelo tempo durante a transferência de um arquivo usando FTP sem realizar a mudança de interface.

## 5.5. Considerações Finais

Os resultados apresentaram a viabilidade do mecanismo e uma comparação com um mecanismo que leva em consideração apenas as informações da fase de decisão. Assim, foi possível demonstrar a necessidade, em alguns casos, de informações das características dos fluxos para que seja possível não degradar a qualidade da comunicação. Ou seja, por mais que a fase de decisão solicite a mudança de interface, a fase de execução não necessariamente irá realizar o *handover* devido a classificação do fluxo que está sendo transmitido.

Como nenhum dos trabalhos relacionados apresentou mecanismos semelhantes que levem em consideração tanto informações da fase de decisão quanto informações da fase de execução, não foi possível realizar comparações com um *baseline*. Contudo, ao comparar com os trabalhos relacionados citados no Capítulo 3, é possível considerar um avanço interessante devido ao fato dos experimentos deste trabalho terem sido realizados em um ambiente real, apesar das restrições existentes, como por exemplo, a dificuldade em utilizar uma interface 3G devido as operadoras no Brasil não oferecerem uma comunicação sobre o protocolo IPv6. Assim, algumas considerações serão realizadas no próximo capítulo sobre possíveis trabalhos futuros na área.

# Capítulo 6

## Conclusão e Trabalhos Futuros

Este trabalho apresentou um mecanismo para gerenciar a mobilidade dos fluxos que surgem durante a movimentação do dispositivo e não possuem uma rota de acordo com o contexto em que o dispositivo está inserido ou o serviço que está sendo transmitido. Assim, neste trabalho, os fluxos são gerenciados de acordo com as suas características com o intuito de tirar proveito das múltiplas interfaces disponíveis e melhorar a experiência do usuário, ou seja, a fase de execução passa também a tomar decisões de acordo com os serviços que estão sendo executados no dispositivo móvel.

Portanto, por mais que um mecanismo de decisão realize uma solicitação de mudança de rede, a fase de execução, por meio de um seletor de fluxo, também será capaz de influenciar na escolha da interface de acordo com os critérios definidos das classes. Para cada tipo de serviço, como FTP ou VoIP, deve-se atribuir a classe que o fluxo pertence.

Para demonstrar o funcionamento da estratégia proposta, alguns cenários comuns ao dia-a-dia da maioria dos usuários foram criados para demonstrar o funcionamento da solução e dos possíveis ganhos ao utilizar da camada de execução para identificar as características dos fluxos que estão sendo transmitidos.

Os resultados mostraram então que, de acordo com os tipos de serviços que estão sendo utilizados, nem sempre a mudança de interface para aumentar a autonomia da bateria ou para se obter maior velocidade de acesso é a melhor decisão a se tomar, pois podem influenciar diretamente na experiência do usuário de forma negativa por aumentarem o custo de sinalização e aumentarem o tempo de transmissão de dados ou até mesmo diminuírem a qualidade da comunicação. Ao diminuir a quantidade de *handovers* com reconfigurações de fluxos desnecessárias, também se diminui a sobrecarga no *Home Agent*, permitindo aumentar a sua disponibilidade e a eficiência.

Na implementação da solução proposta, foi possível identificar os desafios em implantar tais soluções de mobilidade devido à necessidade em se ter uma infraestrutura capaz de prover tal característica. Isso é identificado também nas várias soluções propostas na literatura que, em sua grande maioria, não apresentam nenhuma

implementação prática, apenas simulações ou análises analíticas que representam o conceito proposto.

Além da falta de investimentos das operadoras, que poderiam proporcionar este tipo de solução para usuários finais, também o uso de IPv6 tem crescido pouco, em grande parte devido a migração mais lenta de grandes empresas e operadoras para a nova versão do IP. Contudo, já é possível identificar que cada vez mais será necessário ter mecanismos que possibilitem o gerenciamento da mobilidade com endereços IPv6, principalmente devido ao fim da disponibilidade de endereços IPv4, forçando com que empresas e operadoras se adaptem a esse novo cenário.

Apesar dos ganhos analisados a partir da solução proposta, outros pontos merecem ser observados e comparados para que cada vez mais a reconfiguração dinâmica dos fluxos resulte em uma melhor experiência para o usuário que cada vez mais necessita estar sempre conectado da melhor forma possível.

## 6.1. Trabalhos Futuros

Como citado anteriormente, devido à falta de uma melhor infraestrutura de rede disponível, não foi possível realizar outros experimentos que possam ser interessantes para avaliar outros cenários. Assim, com trabalhos futuros pretende-se:

- Testar e avaliar a estratégia proposta com a utilização de interfaces que usam tecnologias de redes móveis, como por exemplo 3G e também redes WMAN (*Wireless Metropolitan Area Network*), como LTE (*Long Term Evolution*) ou WiMax (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*).
- Medir e analisar o uso de IPv4 com a solução proposta para identificar se haverá maior custo de sinalização e de tempo durante a troca de interface.
- Empregar técnicas de reconhecimento de padrões para aperfeiçoar o funcionamento do seletor de fluxo junto com um mecanismo de decisão.
- Desenvolver um sistema de avaliação para que o usuário também possa expressar a sua satisfação com a qualidade da interface selecionada, permitindo-lhe interagir e ter um peso nas decisões tomadas de mudança de rede.

- Acrescentar entidades na arquitetura que possam interagir e trocar informações capazes de aperfeiçoar o mecanismo de reconfiguração dinâmica de acordo com as redes disponíveis próximas ao dispositivo móvel.

# Referências

- [1] C. Perkins, Ed., D. Johnson, J. Arkko, "Mobility Support in IPv6," RFC 6275, Internet Engineering Task Force, Julho 2011. [Online]. Disponível: <http://www.ietf.org/rfc/rfc6275.txt>
- [2] H. Soliman, "Mobile IPv6 Support for Dual Stack Hosts and Routers," RFC 5555, Internet Engineering Task Force, Junho 2009. [Online]. Disponível: <http://www.ietf.org/rfc/rfc5555.txt>
- [3] S. Gundavelli, K. Leung, V. Devarapalli, K. Chowdhury, and B. Patil, "Proxy Mobile IPv6," RFC 5213, Internet Engineering Task Force, Agosto 2008. [Online]. Disponível: <http://www.ietf.org/rfc/rfc5213.txt>
- [4] A. de la Oliva, C. J. Bernardos, M. Calderon, T. Melia, J. C. Zuniga, "IP Flow Mobility: Smart Traffic Offload for Future Wireless Networks", Communications Magazine, IEEE, vol.49, n.10, p.124-132, Outubro 2011.
- [5] S. Gundavelli, "Extensions to Proxy Mobile IPv6 – Motivation", Internet Draft v.00, Internet Engineering Task Force, Maio 2009. [Online]. Disponível: <http://tools.ietf.org/html/draft-gundavelli-netext-extensions-motivation-00>
- [6] E. Gustafsson, A. Jonsson, "Always best connected," Wireless Communications, IEEE, vol.10, n.1, p. 49- 55, Fevereiro 2003.
- [7] F. Giust, "IP Flow Mobility support for Proxy Mobile IPv6 based networks", Università Degli Studi di Padova, 2011.
- [8] J. Arkko, V. Devarapalli, and F. Dupont, "Using IPsec to Protect Mobile IPv6 Signaling Between Mobile Nodes and Home Agents," RFC 3776, Internet Engineering Task Force, Junho 2004, atualizado pelo RFC 4877. [Online]. Disponível: <http://www.ietf.org/rfc/rfc3776.txt>
- [9] V. Devarapalli and F. Dupont, "Mobile IPv6 Operation with IKEv2 and the Revised IPsec Architecture," RFC 4877, Internet Engineering Task Force, Abril 2007. [Online]. Disponível: <http://www.ietf.org/rfc/rfc4877.txt>
- [10] S. Kent, "IP Encapsulating Security Payload (ESP)," RFC 4303, Internet Engineering Task Force, Dezembro 2005. [Online]. Disponível: <http://www.ietf.org/rfc/rfc4303.txt>
- [11] V. Manral, "Cryptographic Algorithm Implementation Requirements for Encapsulating Security Payload (ESP) and Authentication Header (AH)," RFC 4835, Internet Engineering Task Force, Abril 2007. [Online]. Disponível: <http://www.ietf.org/rfc/rfc4835.txt>

- [12] Y. Rekhter, B. Moskowitz, D. Karrenberg, G. J. de Groot, E. Lear, "Address Allocation for Private Internets", RFC 1918, Internet Engineering Task Force, Fevereiro de 1996. [Online]. Disponível: <http://tools.ietf.org/rfc/rfc1918.txt>
- [13] R. Droms, "Dynamic Host Configuration Protocol", RFC 2131, Internet Engineering Task Force, Março de 1997. [Online]. Disponível: <http://tools.ietf.org/rfc/rfc2131.txt>
- [14] C. Perkins, "IP Mobility Support for IPv4," RFC 3344, Internet Engineering Task Force, Agosto 2002, obsolete pelo RFC 5944, atualizado pelo RFC 4721. [Online]. Disponível: <http://www.ietf.org/rfc/rfc3344.txt>
- [15] C. Perkins, "IP Encapsulation within IP," RFC 2003, Internet Engineering Task Force, Outubro 1996, atualizado pelo RFC 3168. [Online]. Disponível: <http://www.ietf.org/rfc/rfc2003.txt>
- [16] G. Montenegro, "Reverse Tunneling for Mobile IP", RFC 3024, Internet Engineering Task Force, Janeiro 2001. [Online]. Disponível: <http://tools.ietf.org/rfc/rfc3024.txt>
- [17] R. Wakikawa *et al.*, "Multiple Care-of Addresses Registration," RFC 5648, Internet Engineering Task Force, Outubro 2009. [Online]. Disponível: <https://tools.ietf.org/rfc/rfc5648.txt>
- [18] G. Tsirtsis *et al.*, "Traffic Selectors for Flow Bindings," RFC 6088, Internet Engineering Task Force, Janeiro 2011. [Online]. Disponível: <http://tools.ietf.org/rfc/rfc6088.txt>
- [19] G. Tsirtsis *et al.*, "Flow Bindings in Mobile IPv6 and Network Mobility (NEMO) Basic Support," RFC 6089, Internet Engineering Task Force, Janeiro 2011. [Online]. Disponível: <http://tools.ietf.org/rfc/rfc6089.txt>
- [20] C. J. Bernardos, "Proxy Mobile IPv6 Extensions to Support Flow Mobility", draft-ietf-netext-pmipv6-flowmob-06, Internet Engineering Task Force, Trabalho em Progresso, Fevereiro 2013. [Online]. Disponível: <http://tools.ietf.org/id/draft-ietf-netext-pmipv6-flowmob-06.txt>
- [21] S. Chakrabarti, S. Vuong, A. Sinha, R. Paul, "Convergence in Bluetooth and 802.11 Networks", International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM), 2004.
- [22] Chakrabarti, S.; Vuong, S.T. Sinha, A.; Paul, R.; , "BlueMobile - a mobile IP based handoff system for Bluetooth, 802.11 and GPRS links," Consumer Communications and Networking Conference, 2005. CCNC. 2005 Second IEEE, Janeiro 2005.
- [23] Gimilio, L.F.; Poncela, J., "Extending Bluetooth Capabilities with Mobile IP Support," Computer as a Tool, 2005. EUROCON 2005. The International Conference, Novembro 2005.
- [24] Jean-Marie Bonnin, Imed Lassoued, Zied BenHamouda, "Automatic Multi-Interface Management Through Profile Handling", Mobile Networks and Applications, Fevereiro 2009.

- [25] T. Ernst, N. Montavont, R. Wakikawa, C. Ng, K. Kuladinithi, "Motivations and Scenarios for Using Multiple Interfaces and Global Addresses", Internet Engineering Task Force, Maio 2013. [Online]. Disponível: <http://tools.ietf.org/id/draft-ietf-monami6-multihoming-motivation-scenario-03.txt>
- [26] T. Jin, G. Noubir, B. Sheng, "WiZi-Cloud: Application-transparent Dual ZigBee-WiFi Radios for Low Power Internet Access", IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM), Abril 2011.
- [27] "UMIP: USAGI-patched mobile IPv6 for Linux", disponível em: <http://umip.linux-ipv6.org/>. Acessado em fevereiro de 2014.
- [28] A. Monteiro, "Um mecanismo de atribuição de interfaces baseada em análise de contexto para dispositivos com múltiplas interfaces", Universidade Federal do Amazonas, 2014.
- [29] W. Chen, Y. Shu, "Active Application Oriented Vertical Handoff in Next-Generation Wireless Networks", Wireless Communications and Networking Conference, Março de 2005.
- [30] E. Stevens-Navarro, V. Wong, Y. Lin, "A Vertical Handoff Decision Algorithm for Heterogeneous Wireless Networks", Wireless Communications and Networking Conference, Março de 2007.
- [31] P. Dini, J. Guerreiro, N. Baldo, "An overlay and distributed approach to node mobility in multi-access wireless networks", Wireless Network, Dezembro de 2013.
- [32] W. Chen, Y. Shu, "Active Application Oriented Vertical Handoff in Next-Generation Wireless Networks", IEEE Communications Society, Março de 2014.
- [33] E. Stevens-Navarro, Y. Lin, V. Wong, "An MDP-Based Vertical Handoff Decision Algorithm for Heterogeneous Wireless Networks", IEEE Transactions on Vehicular Technology, Março de 2008.
- [34] J. Tomici, P. Chitrapu, "Multi-RAT Traffic Offloading Solutions for the Bandwidth Crunch Problem", IEEE Systems, Applications and Technology Conference, Maio de 2011.
- [35] A. Aijaz, H. Aghvami, M. Amani, "A Survey on Mobile Data Offloading: Technical and Business Perspectives", IEEE Wireless Communications, Abril de 2013.
- [36] S. Boussen, N. Tabbane, S. Tabbane, F. Krief, "A context aware vertical handover decision approach based on fuzzy logic", IEEE Communications and Networking (ComNet), Março de 2014.
- [37] A. de la Oliva, T. Melia, A. Banchs, I. Soto, A. Vidal, "An overview of IEEE 802.21: media-independent handover services", Wireless Communications, IEEE, Agosto de 2008.

- [38] S. McCann, W. Gröting, A. Pandolfi, E. Hepworth, "Next Generation Multimode Terminals", 3G Mobile Communication Technologies, Fifth IEE International Conference on, 2004.
- [39] J. McNair, F. Zhu, "Vertical Handoffs in Fourth-Generation Multinetwork Environments", Wireless Communications, IEEE, Junho de 2004.
- [40] S. Maaloul, M. Afif, S. Tabbane, "An Efficient Handover Decision Making for Heterogeneous Wireless Connectivity Management", Software, Telecommunications and Computer Networks, Setembro de 2013.
- [41] L. Ekiz, C. Lottermann, D. Ohmann, T. Tran, O. Klemp, C. Wietfeld, C. Mecklenbräuer, "Potential of cooperative information for vertical handover decision algorithms", Intelligent Transportation Systems - (ITSC), 2013 16th International IEEE Conference, Outubro de 2013.
- [42] V. Gupta, "Network discovery and user preferences for network selection in 3G-WLAN interworking environment", Communication Systems and Networks (COMSNETS), 2013 Fifth International Conference, Janeiro de 2013.
- [43] J. McNair, T. Tugcu, W. Wang, J. Xie, "A survey of cross-layer performance enhancements for Mobile IP networks", Journal Computer Networks: The International Journal of Computer and Telecommunications Networking, Outubro de 2005.
- [44] M. Alnas, I. Awan, D. Holton, "A Cross-Layer Decision for Mobile IP Handover", 24th IEEE International Conference on Advanced Information Networking and Applications, Abril de 2010.
- [45] F. Zhu, J. McNair, "Cross Layer Design for Mobile IP Handoff", IEEE 61st Vehicular Technology Conference, Junho de 2005.
- [46] M. Chowdhury, Y. Jang, "Priority based Interface Selection for Overlaying Heterogeneous Networks", The Journal of Korea Information and Communications Society, Julho de 2010.
- [47] M. Alnas, I. Awan, D. Holton, "Enhanced Mobile IP handoff using link layer information", iiWAS '09 Proceedings of the 11th International Conference on Information Integration and Web-based Applications & Services, Dezembro de 2009.
- [48] CJ. Bernardos, "Proxy Mobile IPv6 Extensions to Support Flow Mobility", *Internet Draft (Netext WG)*, Julho de 2014. [Online]. Disponível: <http://datatracker.ietf.org/doc/draft-ietf-netext-pmipv6-flowmob/>
- [49] T. Yim, T. Nguyen, K. Hong, Y. Kyung, J. Park, "Mobile Flow-Aware Management for Mobility and QoS Support in Mobile Networks", Communications (APCC), 2013 19th Asia-Pacific Conference, Agosto de 2013.
- [50] J. Lee, J. Bonnin, X. Lagrange, "Host-based Distributed Mobility Management: Example of Traffic Offloading", IEEE Consumer Communications and Networking Conference (CCNC), Janeiro 2013.

- [51] T. Nguyen, C. Bonnet, "On the Efficiency of Dynamic Multicast Mobility Anchor Selection in DMM: Use Cases and Analysis", IEEE International Conference on Communications (ICC), Junho de 2014.
- [52] S. Kim, H. Choi, P. Park, S. Min, Y. Han, "OpenFlow-based Proxy Mobile IPv6 over Software Defined Network (SDN)", IEEE Consumer Communications and Networking Conference (CCNC), Janeiro de 2014.
- [53] G. Kalic, I. Bojic, M. Kusek, "Energy consumption in android phones when using wireless communication technologies", IEEE 2012 Proceedings of the 35th International Convention, Maio de 2012.
- [54] A. Sabbagh, P. Papatwibul, A. Banjar, R. Braun, "Optimization of the OpenFlow Controller in Wireless Environments for Enhancing Mobility", 13th Annual IEEE Workshop on Wireless Local Networks, Outubro de 2013.
- [55] *Open Networking Foundation*, "OpenFlow Switch Specification Version 1.4.0", Outubro de 2013.
- [56] T. Saaty, "How to make a decision: The Analytic Hierarchy Process", European Journal of Operational Research, Setembro de 1990.
- [57] Q. Song, A. Jamalipour, "Network selection in an integrated wireless LAN and UMTS environment using mathematical modeling and computing techniques", IEEE Wireless Communications, Junho de 2005.
- [58] IPERF, disponível em: <https://iperf.fr/>. Acessado em janeiro de 2015.
- [59] SIPP, disponível em: <http://sipp.sourceforge.net/>. Acessado em janeiro de 2015.
- [60] Wireshark, disponível em: <https://www.wireshark.org/>. Acessado em janeiro de 2015.
- [61] "OAI PMIPv6: Open Air Interface Proxy Mobile IPv6" <http://www.openairinterface.org/openairinterface-proxy-mobile-ipv6-oai-pmipv6>. Acessado em fevereiro de 2015.