UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DA
COMPUTAÇÃO

Um Algoritmo de Decisão de *Handover* baseado em QoS e
Autonomia Energética

Sávio Roberto Amorim Aragão Silva

SÃO CRISTÓVÃO/ SE

2015

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DA
COMPUTAÇÃO

Sávio Roberto Amorim Aragão Silva

Um Algoritmo de Decisão de *Handover* baseado em QoS e
Autonomia Energética

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação (PROCC) da Universidade Federal de Sergipe (UFS) para obtenção do título de Mestre em Ciência da Computação.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo José Paiva de Britto Salgueiro

Co-orientadora: Profa. Dra. Edilayne Meneses Salgueiro

SÃO CRISTÓVÃO/ SE

2015

**FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE**

Silva, Sávio Roberto Amorim Aragão
S586a Um algoritmo de decisão de Handover baseado em QoS e autonomia energética / Sávio Roberto Amorim Aragão Silva; orientador Ricardo José Paiva de Britto Salgueiro. – São Cristóvão, 2015.
74 f.: il.

Dissertação (mestrado em Ciência da Computação)–
Universidade Federal de Sergipe, 2015.

1. Redes de computação. 2. Sistemas de comunicação móvel.
3. Algoritmos. I. Salgueiro, Ricardo José Paiva de Britto, orient. II.
Título.

CDU 004:519.254

Sávio Roberto Amorim Aragão Silva

Um Algoritmo de Decisão de *Handover* baseado em QoS e Autonomia Energética

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação (PROCC) da Universidade Federal de Sergipe (UFS) para obtenção do título de Mestre em Ciência da Computação.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Ricardo José Paiva de Britto Salgueiro, Presidente

Universidade Federal de Sergipe (UFS)

Profa. Dra. Edilayne Meneses Salgueiro, Co-Orientadora

Universidade Federal de Sergipe (UFS)

Prof. Dr. Tarcísio da Rocha, Membro

Universidade Federal de Sergipe (UFS)

Prof. Dr. William Ferreira Giozza, Membro

Universidade de Brasília (UNB)

Um Algoritmo de Decisão de *Handover* baseado em QoS e Autonomia Energética

Este exemplar corresponde à redação da Dissertação de Mestrado, sendo a Defesa da Dissertação do mestrando **Sávio Roberto Amorim Aragão Silva** para ser aprovada pela Banca examinadora.

São Cristóvão - SE, 27 de Maio de 2015

Prof. Dr. Ricardo José Paiva de Britto Salgueiro
Orientador

Profa. Dra. Edilayne Meneses Salgueiro
Co-Orientadora

Prof. Dr. Tarcísio da Rocha
Membro

Prof. Dr. William Ferreira Giozza
Membro

Dedicatória

Dedico esta dissertação à toda minha família, em especial a meus pais Silvio e Sonia e meus irmãos Saulo e Swellen que foram meus maiores incentivadores e pontos de referência, e a todos meus colegas e amigos que de alguma forma torceram por mim.

Agradecimentos

A trajetória do Mestrado não foi fácil. Diversas horas de estudo, várias noites perdidas, mas digo com toda a certeza que tudo isso valeu à pena. Primeiramente, só tenho a agradecer a Deus por ter me dado perseverança para não sucumbir diante do primeiro obstáculo, além de ter me concedido saúde e fé para continuar na busca do título de Mestre.

A meus pais, Silvio e Sonia, que sempre investiram na minha educação e me deram todo o apoio possível. Aos meus irmãos, Saulo e Swellen, por me incentivarem e serem meus companheiros em todos os momentos. A todos meus tios e primos pela torcida.

Ao Prof. Dr. Ricardo Salgueiro, meu orientador e amigo, por sempre ter acreditado no meu potencial, agradeço também pela sua paciência, bom humor e pela orientação de qualidade que contribuiu para o desenvolvimento deste trabalho. À Profa. Dra. Edilayne Salgueiro, minha co-orientadora e amiga, pela ajuda na escrita desta dissertação e auxílio na busca otimizada das referências bibliográficas.

A todos os meus colegas de turma do mestrado, que foram muito importantes nessa caminhada: Hallan, Eric, Robert, Leonardo, Franklin, Marco, Juli, Otavio, Nayara, Elisalvo, Lucas e Bruno. Agradeço a todos pela amizade, pelos momentos de descontração na sala de aula e também pelos conhecimentos compartilhados, em especial a Hallan (também teve papel fundamental na descoberta de erros no código-fonte do algoritmo, escrito na linguagem C++), Eric, Robert, Leonardo, Marco e Franklin, pelas constantes reuniões até em finais de semana a fim de realizar as atividades exigidas nas matérias. A meu colega Anderson, que me auxiliou nas simulações no NS-2 e na composição de ideias para elaboração do método proposto neste trabalho.

Aos caros Prof. Dr. Tarcisio, que também fez parte da minha trajetória no mestrado e também ajudou no meu crescimento pessoal, e Prof. Dr. Giozza por aceitarem o convite para participação da minha Banca de Defesa de Mestrado e pelas sugestões realizadas na etapa de Qualificação que contribuíram para a finalização da escrita dessa dissertação.

À FAPITEC (Fundação de Apoio à Pesquisa e Inovação Tecnológica do Estado de Sergipe) pelo apoio financeiro durante esse período.

A todos os demais colegas de Mestrado e a todos os professores do PROCC (Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação) que contribuíram para a construção do conhecimento adquirido ao longo da vida acadêmica. Meu muito obrigado a todos!

Resumo

Uma etapa fundamental no processo de *handover* corresponde à fase de decisão, na qual é selecionada a rede candidata para a qual o dispositivo móvel irá se transferir. O critério normalmente utilizado na etapa de decisão é a potência de sinal da rede que se encontra disponível. Além da potência de sinal, outros critérios também necessitam ser explorados em ambientes heterogêneos para a tomada de decisão de *handover*, uma vez que as tecnologias de rede divergem quanto aos tipos de serviços, protocolos, níveis de qualidade, faixas de frequência e custos monetários. Este trabalho propõe um algoritmo de decisão de *handover* baseado em função de custo que leva em consideração, além da potência de sinal recebida, alguns critérios de Qualidade de Serviço, tais como taxa de perda de pacotes, atraso e *jitter*, bem como o consumo de energia da interface de rede da estação móvel. A fim de avaliar o desempenho do algoritmo foram considerados dois cenários, um no qual a bateria do terminal móvel está com carga suficiente e outro onde a mesma se encontra com a carga baixa, sendo realizadas simulações no NS-2 em um ambiente composto pelas redes Wi-Fi e WiMAX. Os resultados obtidos mostraram que o algoritmo proposto contribuiu para reduzir o número de decisões erradas de *handovers*, de modo que não houvesse uma degradação da Qualidade de Serviço que viesse a afetar o desempenho da rede na qual o terminal móvel se encontra conectado.

Palavras-chave: *Handover*, Dispositivo móvel, Algoritmo de Decisão, Bateria

Abstract

A key step in the handover process corresponds to the decision phase in which the mobile device selects the candidate network that it will be attached to. The criterion generally used in the decision step is the signal strength of the available network. In addition to the signal power, other criteria also need to be explored in heterogeneous environments for taking handover decision, since the network technologies differ in the types of services, protocols, quality standards, frequency bands and monetary costs. This paper proposes a handover decision algorithm based on cost function that takes into account both the received signal power, some quality of service criteria such as packet loss rate, delay and jitter, as well as the energy consumption of network interface of the mobile station. In order to evaluate the performance of the algorithm were considered two scenarios, one in which the battery of device mobile is sufficiently charged and another where it meets the low load. Simulations in NS-2 were performed in an environment compound by the Wi-Fi and WiMAX networks. The results showed that the proposed algorithm helped to reduce the number of wrong handovers decisions, so that there was no deterioration in the quality of service that would affect the performance of the network in which the mobile device is currently connected.

Keywords: Handover, Mobile Device, Decision Algorithm, Battery.

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Motivação, Problemática e Hipótese	2
1.2	Objetivos da Dissertação	5
1.3	Organização da Dissertação	5
2	<i>Handover</i> em Redes Heterogêneas	7
2.1	Gerenciamento de <i>Handovers</i>	7
2.2	Classificação dos Algoritmos de Handover Vertical	9
2.3	Padrão IEEE 802.21 - <i>Media Independent Handover</i>	11
2.3.1	Visão Geral	11
2.3.2	Arquitetura	11
2.3.3	Serviços de <i>Handover</i>	14
2.3.3.1	Serviço de Eventos	15
2.3.3.2	Serviço de Comandos	16
2.3.3.3	Serviço de Informação	16
2.4	<i>Handovers</i> Heterogêneos no NS-2	16
2.4.1	Implementação de Nós com Múltiplas Interfaces	20
2.4.2	Suporte para Descoberta de Sub-rede e Mudança de Endereço	20

2.4.3	Classe <i>Energy Model</i>	21
2.5	Discussão	22
3	Trabalhos Relacionados	23
3.1	Algoritmos Baseados em Potência de Sinal Recebida	23
3.2	Algoritmos Baseados em Largura de Banda	24
3.3	Algoritmos Baseados em Função de Custo	25
3.4	Algoritmos Baseados em Inteligência Artificial	26
3.5	Discussão	27
4	Método de Decisão de <i>Handover</i>	29
4.1	Algoritmo de Decisão Proposto	29
4.1.1	Avaliação de RSS	30
4.1.2	Avaliação de QoS	30
4.1.3	Avaliação de Consumo de Energia	34
4.1.4	Descrição do Algoritmo	35
4.2	Discussão	36
5	Avaliação de Desempenho	37
5.1	Cenário de Simulação	37
5.2	Resultados e Discussão	39
5.2.1	Cenários: bateria suficiente x bateria crítica	40
5.2.2	Análise comparativa	45
5.3	Discussão	52
6	Conclusão	53

6.1	Considerações Finais	53
6.2	Contribuições	54
6.3	Trabalhos Futuros	54
	Referências	54

Lista de Figuras

2.1	Conceitos relacionados ao gerenciamento de <i>handover</i> . Fonte: Kassar, Kervella e Pujolle (2008)	8
2.2	Comunicação entre entidades MIH locais e remotas. Fonte: Silva (2011) . .	13
2.3	Arquitetura do Padrão IEEE 802.21. Fonte: Silva, Silva e Salgueiro (2012)	14
2.4	Visão Geral do NS-2. Fonte: Adaptada de Chung, Claypool et al. (2002) . .	17
2.5	Implementação MIH no NS-2. Fonte: Silva (2011)	18
2.6	Hierarquia de classes do Usuário MIH. Fonte: Silva, Silva e Salgueiro (2012)	19
2.7	Visão geral de um nó multi-interface. Fonte: Silva (2011)	20
4.1	Função de densidade de probabilidade condicional de ΔF	32
4.2	Aproximação linear da função de densidade de probabilidade condicional de ΔF	32
4.3	Probabilidade de decisão errada para o caso $f^* > 0$	33
4.4	Fluxograma do algoritmo proposto	35
5.1	Cenário de simulação	38
5.2	Número de <i>handovers</i> executados com bateria suficiente x bateria crítica	41
5.3	Número de <i>handovers</i> desnecessários com bateria suficiente x bateria crítica . . .	42
5.4	Número de <i>handovers</i> perdidos com bateria suficiente x bateria crítica	43

5.5	Atraso médio com bateria suficiente x bateria crítica	43
5.6	Vazão média com bateria suficiente x bateria crítica	44
5.7	Taxa de perda de pacotes com bateria suficiente x bateria crítica	44
5.8	<i>Handovers</i> executados	46
5.9	<i>Handovers</i> desnecessários	47
5.10	<i>Handovers</i> perdidos	48
5.11	Atraso	49
5.12	Vazão	50
5.13	Perda de pacotes	51

Lista de Tabelas

5.1	Parâmetros de simulação	40
-----	-----------------------------------	----

Lista de Siglas

3G - *Terceira Geração da Telefonia Celular*

4G - *Quarta Geração de Redes Sem Fio*

CBR - *Constant Bit Rate*

GPRCOM - *Grupo de Pesquisa em Redes e Computação Distribuída*

IP - *Internet Protocol*

IEEE - *Institute of Electrical and Electronics Engineers*

MAHO - *Mobiles-Assisted Handover*

MCHO - *Mobile-Controlled Handover*

MIH - *Media Independent Handover*

NAHO - *Network-Assisted Handover*

NAM - *Network Animator*

NCHO - *Network-Controlled Handover*

QoS - *Quality of Service*

OTcl - *Object-oriented Tool Command Language*

RSS - *Received Signal Strength*

SIP - *Session Initiation Protocol*

TCL - *Tool Command Language*

VoIP - *Voice over Internet Protocol*

Wi-Fi - *Wireless Fidelity*

WiMAX - *Worldwide Interoperability for Microwave Access*

WLAN - *Wireless Local Area Network*

WMAN - *Wireless Metropolitan Area Network*

Lista de Códigos Fonte

2.1	Configurando os parâmetros de energia no nó	21
-----	---	----

Capítulo 1

Introdução

Atualmente, observa-se uma grande diversidade de tecnologias de redes sem fio. A visão da quarta geração (4G) de redes celulares inclui a coexistência das tecnologias de rede sem fio atuais, tais como *Bluetooth*, *ZigBee*, *Wi-Fi*, *WiMAX* (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*) e as redes celulares 3G. Vários dispositivos como *notebooks*, *tablets* e *smartphones* já vêm equipados com mais de uma interface de rede para disponibilizar mais de um tipo de rede sem fio. Usuários altamente móveis, isto é, que constantemente estão mudando de localização, desejam estar sempre conectados a uma rede e manter suas aplicações funcionando enquanto eles estão se deslocando entre vários lugares (KHATTAB; ALANI, 2013).

O *handover* ou *handoff* constitui-se no procedimento empregado em redes sem fio para tratar a transição de uma unidade móvel de uma célula para outra de forma transparente ao utilizador. Existem duas modalidades de *handover*: horizontal e vertical (SILVA, 2011). O *handover* horizontal é aquele que envolve as mesmas tecnologias de rede, enquanto que o *handover* vertical abrange diferentes tecnologias de rede. Esse mecanismo pode ocorrer devido a uma série de fatores. Geralmente, a migração para uma determinada rede ocorre quando a potência do sinal (*Received Signal Strength* - **RSS**) do ponto de acesso sofre uma degradação. Entretanto, o *handover* também pode ser iniciado por conveniência, levando em consideração outros critérios, tais como preferências do usuário, parâmetros de QoS (*Quality of Service* - Qualidade de Serviço) da rede alvo, consumo de bateria do dispositivo móvel,

dentre outros.

1.1 Motivação, Problemática e Hipótese

Um dos maiores desafios no gerenciamento de *handover* em ambientes heterogêneos, ou seja, que abrangem mais de uma tecnologia de rede, é a de fazer com que o *handover* seja realizado de forma imperceptível ao usuário. O padrão IEEE 802.21 (*Media Independent Handover* - **MIH**) define mecanismos que auxiliam esse gerenciamento, sendo capaz de realizar ambos os tipos de *handover*, horizontal e vertical (COSKUN et al., 2014).

Uma das etapas do *handover* vertical, explicada com mais detalhes no Capítulo 2, corresponde à fase de decisão de *handover*, na qual é selecionada a rede candidata para a qual o dispositivo móvel irá se transferir. O critério normalmente utilizado na etapa de decisão é a potência de sinal da rede que se encontra disponível. Essa questão vem sendo tratada no âmbito do Grupo de Pesquisa em Redes e Computação Distribuída - **GPRCom**, através do qual foram produzidos os trabalhos descritos a seguir:

- Silva et al. (2012) avaliaram o desempenho de aplicações de voz submetidas a *handover* entre as redes Wi-Fi e WiMAX. São utilizados até 50 nós móveis com movimento retilíneo à velocidade constante de 50 Km/h. É utilizado um tráfego exponencial do tipo *ON/OFF* onde durante os períodos inativos nenhum quadro é enviado, com o objetivo de simular as chamadas de voz sobre IP (*Voice over Internet Protocol* - **VoIP**). A análise de desempenho realizada faz uso do simulador de redes **NS-2** (*Network Simulator* - versão 2) e leva em consideração o tempo de *handover* (corresponde ao tempo gasto para o nó móvel se desassociar da rede corrente e se conectar à rede alvo) e a perda de pacotes. Além disso, também é aferido o valor médio dos *handovers* que foram realizados com sucesso, assim como os que falharam, relativos a cada nó. Os resultados de simulação mostraram que o atraso de *handover* para ambas as redes e a perda de pacotes não ultrapassaram o limite aceitável para aplicações VoIP, sendo que a média de sucesso de *handover* foi bastante superior à falha;
- No trabalho apresentado por Silva, Silva e Salgueiro (2012), é realizada uma análise

de desempenho de *handover* vertical fazendo uso do padrão IEEE 802.21, utilizando um algoritmo de decisão de *handover* que avalia a potência de sinal das redes Wi-Fi e WiMAX, por meio de simulação no NS-2. A análise de desempenho utiliza como métricas a perda de pacotes gerada pelo tráfego CBR (*Constant Bit Rate*) e o atraso de *handover* para ambas as redes. Os resultados de simulação mostraram que, mesmo em situações de sobrecarga, o atraso de *handover* para a rede Wi-Fi não foi afetado significativamente. Já no caso do WiMAX, o valor do atraso atendeu aos requisitos de aplicações sensíveis ao atraso, como as de voz e vídeo, considerando um limite de sobrecarga;

- Silva, Salgueiro e Salgueiro (2011) propõem um arcabouço de testes para algoritmos de decisão de *handover* em redes heterogêneas, combinando recursos de simulação, emulação e testes reais. Os autores utilizam o NS-2 e o *Dummysnet* como simulador e emulador de redes, respectivamente, realizando simulações das redes Wi-Fi e WiMAX, e análise do atraso de propagação e perda de pacotes para ambas as redes envolvidas. Após a avaliação de desempenho constatou-se que o WiMAX lidou com o tráfego das aplicações de vídeo e de VoIP de forma mais eficiente que o Wi-Fi. Os parâmetros de QoS apresentados pelo WiMAX nas simulações foram suficientes para atender as exigências das aplicações analisadas. Com o arcabouço de testes proposto foi possível verificar o funcionamento de algoritmos de decisão de *handover* e, por meio da emulação de redes, reproduzir as características de QoS das redes envolvidas no processo de escolha. O trabalho visou produzir um ambiente realista, onde mecanismos da fase de descoberta de rede, como medições de QoS, pudessem atuar.

Os trabalhos citados anteriormente utilizam a potência de sinal, porém outros critérios também necessitam ser explorados em ambientes heterogêneos para a tomada de decisão de *handover*. Isto pode ser explicado pelo fato de que as tecnologias de rede divergem quanto aos tipos de serviços, protocolos, níveis de qualidade, faixas de frequência e custos monetários. Esses critérios, utilizados na fase de decisão, podem ser definidos em função das preferências do usuário, aplicações em execução e características das redes. Silva et al. (2013) apresentam um algoritmo de decisão de *handover* vertical que considera métricas de QoS em uma função de utilidade e uma avaliação probabilística para evitar decisões de *han-*

dover erradas. Para avaliar o algoritmo foram utilizadas simulações no NS-2 em um cenário composto pelas redes Wi-Fi e WiMAX com dispositivos móveis realizando chamadas de voz sobre IP. O trabalho em questão, porém, não leva em consideração o consumo de energia do terminal móvel.

Em serviços de multimídia é de fundamental importância que ocorra uma garantia de Qualidade de Serviço para o usuário final, mantendo, em paralelo, uma autonomia energética da bateria do dispositivo móvel, de forma a manter as aplicações que estão em execução. O número de *handovers* realizados pelo terminal móvel é uma questão importante a ser considerada pelos algoritmos de decisão. Denotando a rede corrente por R_c e a rede alvo por R_a , há casos em que o nó móvel decide migrar da rede R_c para a rede R_a no tempo t_1 , no qual a largura de banda de R_a (b_a) é superior à de R_c (b_c); porém, no instante seguinte, denotado por t_2 (sendo que $t_2 > t_1$), a rede antiga (R_c) apresenta largura de banda superior à rede atual, $b_c > b_a$. A esse fenômeno dá-se o nome de *handover* desnecessário que corresponde a uma decisão errada de *handover*. A realização de vários *handovers* de forma desnecessária pode causar sobrecarga nas redes de acesso, além de ocasionar no aumento do consumo de energia da bateria do terminal móvel. A probabilidade de decisão errada de *handover*, a qual é tratada com mais detalhes no capítulo 4, corresponde a uma estimativa de ocorrer um *handover* desnecessário, constituindo-se em um fator relevante no processo de decisão de *handover*.

Outro fator de suma importância para o processo de decisão de *handover* é o tempo restante da aplicação. Isso pode ser explicado pelo seguinte fato: suponha que temos duas redes, A e B , com tecnologias diferentes e que o usuário assiste um vídeo em seu terminal móvel que se encontra conectado à rede B . Suponha que a rede B apresenta, em um determinado momento, uma QoS superior à rede A e o dispositivo móvel se encontra com a sua bateria em nível crítico. Suponha ainda que o consumo de energia na rede B é superior ao da rede A . Nessas condições o *handover* para a rede A seria, talvez, a melhor escolha, pois iria proporcionar um maior tempo de autonomia da bateria do dispositivo. Mas caso a exibição do vídeo esteja próxima do final, então a permanência na rede B com QoS satisfatória talvez se constitua na melhor opção. Portanto, uma solução que envolva a combinação destes fatores apresenta grande relevância.

Problema Selecionar uma rede dentre um conjunto de redes candidatas disponíveis que satisfaça da melhor forma as necessidades do usuário em termos de Qualidade de Serviço e de autonomia energética.

Hipótese

É possível implementar uma solução de decisão de *handover* baseada em critérios de qualidade de serviço e no consumo de energia de cada interface de rede da estação móvel.

1.2 Objetivos da Dissertação

O presente trabalho apresenta como principal objetivo propor um método de Decisão de *Handover* Vertical que leva em consideração medidas de Qualidade de Serviço e de consumo de energia.

Objetivos Específicos

A fim de alcançar o objetivo geral, alguns objetivos específicos são necessários:

- Definição de algoritmo de Decisão de *Handover* Vertical baseado na potência de sinal recebida, a taxa de perda de pacotes, no atraso, *jitter*, consumo de energia da interface de rede da estação móvel e no tempo restante da aplicação;
- Acréscimo de funcionalidades para consumo de energia no pacote de mobilidade de *handover* para o NS-2;
- Avaliação de desempenho que represente as topologias das redes envolvidas no processo de *handover* a fim de verificar a eficiência do método proposto;
- Análise comparativa da solução proposta com os métodos já existentes na literatura.

1.3 Organização da Dissertação

A dissertação está organizada da seguinte forma:

-
- O Capítulo 2 apresenta o referencial teórico concernente ao problema de decisão de *handover*;
 - O Capítulo 3 apresenta os trabalhos que estão relacionados à dissertação;
 - O Capítulo 4 aborda o algoritmo para decisão de *handover*;
 - O Capítulo 5 apresenta o cenário de simulação e a avaliação de desempenho do algoritmo;
 - Por fim, o Capítulo 6 diz respeito às conclusões obtidas com a realização do presente trabalho.

Capítulo 2

Handover em Redes Heterogêneas

Este capítulo descreve os conceitos relacionados ao processo de *handover* em ambientes heterogêneos (Seção 2.1), traz a classificação dos algoritmos de *handover* vertical (Seção 2.2), apresenta o padrão que propicia uma melhoria no gerenciamento de *handover* (Seção 2.3), e explicita como está a implementação do referido padrão no simulador de redes NS-2 (Seção 2.4).

2.1 Gerenciamento de *Handovers*

O gerenciamento de *handover* é um aspecto indispensável na elaboração de soluções nas quais envolvam cenários de mobilidade. Segundo Kassar, Kervella e Pujolle (2008), o processo de gerenciamento de *handover* é definido em três fases:

1. Obtenção de Informações
2. Decisão de *Handover*
3. Execução de *Handover*

Na Fase de *Obtenção de Informações*, também conhecida como Fase Inicial de *Handover* ou Descoberta de Sistema, são coletadas todas as informações requeridas para identificar a necessidade de troca de conexão entre redes. Nessa fase, são obtidas algumas informações

como parâmetros de QoS, custo monetário, pontos de acesso alcançáveis e potência de sinal das redes candidatas, sendo que a obtenção de tais dados advém dos critérios definidos pelos usuários, baseados na satisfação das suas necessidades.

A Etapa de *Decisão de Handover*, também denominada como *Seleção de Sistema* ou *Seleção de Rede*, é a responsável pela tomada de decisão da realização ou não do mesmo. Caso haja esta necessidade, será selecionada a rede mais adequada levando em consideração as informações provenientes da fase anterior.

Por fim, na *Execução de Handover* é realizada a mudança para a rede de acesso escolhida no passo anterior. Essa fase é responsável pela manutenção das sessões do usuário iniciadas no período anterior ao *handover*. A Figura 2.1 exibe os conceitos relacionados ao processo de gerenciamento de *handover* ao centro. Essa Figura representa à esquerda os cenários de mobilidade, os tipos de *handover*, controle e desempenho do *handover*. Além disso apresenta à direita os critérios e estratégias de decisão de *handover*. A parte mais escura, em destaque na figura, representa as características mais intimamente relacionadas ao problema de decisão de *handover*.

Figura 2.1: Conceitos relacionados ao gerenciamento de *handover*. Fonte: Kassar, Kervella e Pujolle (2008)

Em cenários de *handover* vertical um aspecto bastante relevante é que o processo de transição para uma nova rede de acesso seja *seamless*, ou seja, imperceptível ao usuário, de modo que não ocorra uma degradação do serviço oferecido ao mesmo e haja a preservação das aplicações que estavam em execução. Dessa forma, o *handover* deve ser rápido, ou seja, com mínimo atraso, e suave, para que se tenha mínima perda de pacotes.

Quanto aos tipos de *handover*, o controle ou a decisão para realização do mesmo pode estar situado na própria rede ou no terminal móvel. Quando somente a rede detém o controle de execução do *handover*, temos um *handover* controlado pela rede (*Network-Controlled HandOver* - **NCHO**). Já no caso em que tal controle é realizado pelo nó móvel, temos o chamado *handover* controlado pelo nó móvel (*Mobile-Controlled HandOver* - **MCHO**). Quando as informações e medições são providas pelo terminal móvel e o controle de decisão está localizado na rede, o *handover* é referenciado como assistido pelo terminal móvel (*Mobile-Assisted Handover* - **MAHO**). Quando a rede fornece as informações e a decisão reside no terminal móvel, temos o chamado *handover* assistido pela rede (*Network-Assisted Handover* - **NAHO**) (KASSAR; KERVILLA; PUJOLLE, 2008).

No gerenciamento de *handovers* verticais um aspecto bastante relevante diz respeito à escolha dos critérios para a tomada de decisão. Os critérios utilizados estão relacionados às necessidades do usuário ou do terminal móvel, bem como a aspectos de rede. Critérios como custo das redes, potência de sinal, atraso, carga da bateria e velocidade do terminal móvel, parâmetros de QoS, preferências dos usuários, são alguns dos utilizados no processo de decisão. Alguns critérios utilizados para análise de desempenho de *handover* são a latência, que diz respeito ao tempo de realização do *handover*, bem como a taxa de perda de pacotes e a vazão.

2.2 Classificação dos Algoritmos de Handover Vertical

Os algoritmos de *handover*, de acordo com Silva (2012), são classificados em quatro grupos baseados no critério de decisão utilizado e nos métodos utilizados para processá-los :

- Algoritmos baseados na Potência de Sinal Recebida

- Algoritmos baseados em Largura de Banda
- Algoritmos baseados em Função de Custo
- Algoritmos baseados em Inteligência Artificial

O primeiro grupo de algoritmos consideram a potência de sinal recebida como o principal critério de decisão. Eles selecionam a rede candidata que apresenta a melhor qualidade de sinal. Este tipo de estratégia não funciona bem no âmbito de *handovers* verticais, uma vez que o RSS de tipos diferentes de rede não podem ser comparados diretamente devido à disparidade das tecnologias envolvidas.

A categoria de algoritmos baseados em largura de banda avalia a taxa de *bits* disponível para um terminal móvel como seu principal critério. Em alguns algoritmos, tanto a largura de banda, como o RSS podem ser utilizados para o processo de decisão. Dependendo de qual seja considerado o principal critério, o algoritmo pode ser classificado como baseado em RSS ou em largura de banda.

A classe de algoritmos baseada em função de custo combina métricas, tais como custo monetário, segurança, largura de banda e consumo de energia em uma função de custo. A decisão de *handover* é feita através da comparação dos resultados desta função para as redes candidatas. Pesos diferentes são atribuídos para métricas diferentes dependendo das condições da rede e das preferências do usuário.

O grupo de algoritmos baseados em inteligência artificial tenta utilizar um conjunto mais rico de entrada do que os demais para a tomada de decisão. Quando o número de entradas usado é muito grande, torna-se muito difícil ou quase impossível desenvolver formulações analíticas de processo de decisão de *handover*. Para contornar esse problema, têm-se empregado técnicas de aprendizado de máquinas para formular o processo. As principais técnicas utilizadas neste grupo são baseadas em Redes Neurais e em Lógica Difusa.

2.3 Padrão IEEE 802.21 - *Media Independent Handover*

2.3.1 Visão Geral

O Padrão IEEE 802.21 (IEEE 802.21, 2008) define um arcabouço que pode melhorar significativamente o *handover* entre tecnologias de redes heterogêneas, o chamado *Media Independent Handover* (MIH). Ele contém as ferramentas necessárias para troca de informações, eventos e comandos para facilitar o início e a preparação do *handover* (SILVA, 2011).

O padrão 802.21 é o único dentre os padrões IEEE que provê inter-funcionamento em sistemas IEEE 802 (IEEE 802.11, 802.16e) e entre sistemas 802 e não 802 (redes de celulares). A necessidade de serviços que abrangem múltiplas redes externas levou à criação do grupo de trabalho IEEE 802.21 com um projeto para criar um padrão que defina mecanismos 802 extensíveis de acesso independente ao meio, que permita a otimização de *handover* entre sistemas 802 heterogêneos e possa facilitar *handover* entre sistemas 802 e de celulares.

O propósito básico do referido padrão é facilitar o *handover* entre redes heterogêneas para proporcionar uma mobilidade que seja imperceptível ao usuário, mantendo as aplicações que estavam em execução.

2.3.2 Arquitetura

O IEEE 802.21 também visa aprimorar a experiência do usuário provendo uma funcionalidade MIH que facilita tanto os *handovers* iniciados pelos nós móveis quanto pela rede. O padrão é composto pelos seguintes elementos:

- Função MIH (*MIH Function* - **MIH**): engloba os três tipos de serviços de *handover* independentes ao meio (*Media Independent Handover Services* ou *MIH Services*):
 - Serviço de Eventos (*Media Independent Event Service* - **MIES**): detecta mudanças nas propriedades da camada de enlace e relata eventos apropriados provenientes das interfaces locais e remotas;
 - Serviço de Comandos (*Media Independent Command Service* - **MICS**): fornece

- um conjunto de comandos para usuários MIH locais e remotos a fim de controlar o estado do enlace;
- Serviço de Informação (*Media Independent Information Service* - **MIIS**): provê informações sobre redes vizinhas incluindo sua localização, propriedades e serviços relacionados.
 - Pontos de Acesso de Serviço (*Service Access Points* - **SAPs**): oferecem uma interface comum para as funções da camada de enlace e são independentes das especificidades da tecnologia. Eles incluem:
 - MIH_SAP: um SAP independente ao meio que fornece uma interface uniforme para que as camadas superiores possam controlar e monitorar os diferentes enlaces independentemente da tecnologia de acesso;
 - MIH_LINK_SAP: um SAP específico ao meio que provê uma interface para a MIHF a fim de controlar e monitorar os enlaces específicos ao meio. Para que a MIHF ofereça MIES e MICS para uma camada de enlace específica, ela necessita implementar o MIH_LINK_SAP para aquela camada de enlace;
 - MIH_NET_SAP: um SAP dependente do meio que oferece serviços de transporte sobre os planos de dados no nó local, suportando a troca de informações e mensagens MIH com a função MIH remota.
 - Usuários MIH (*MIH Users*): são entidades funcionais que utilizam serviços MIH.

A função MIH constitui-se em uma entidade lógica que fornece serviços abstratos para as camadas superiores através de uma interface independente ao meio e obtém informações das camadas inferiores por meio de interfaces específicas ao meio. Atua como uma camada intermediária entre as camadas superior e inferior, cuja principal função é coordenar a troca de informações e comandos entre os diferentes dispositivos envolvidos na tomada de decisão e execução de *handovers* (DE LA OLIVA et al., 2008).

Os serviços MIH podem ser locais ou remotos, com a operação local ocorrendo no interior de uma pilha de protocolos e a operação remota ocorrendo entre duas entidades MIHF,

como podemos observar na Figura 2.2 (SILVA, 2011). Nesta figura, é assumido que os eventos, comandos e consultas de serviço de informações são iniciados somente pela entidade local e são propagadas como eventos remotos, comandos e serviço de informação de pedido-resposta para a entidade remota. A entidade local (*local entity*) pode ser assumida como um nó móvel, enquanto que a entidade remota (*remote entity*) pode ser vista como um ponto de acesso, tal como pode ser observado na Figura 2.5 representada na seção 2.4.

Figura 2.2: Comunicação entre entidades MIH locais e remotas. Fonte: Silva (2011)

Os MIH SAPs são definidos em termos de primitivas na especificação IEEE 802.21 que oferecem informações sobre suas funcionalidades e parâmetros. O IEEE 802.21 não oferece uma linguagem de programação específica para representar as primitivas e requer que os implementadores da MIHF definam as interfaces de programação de aplicativos (*Application Programming Interfaces* - API) em termos de sua linguagem de programação escolhida. Usuários MIH são abstrações das entidades funcionais que empregam serviços MIH, isto é, fazem uso de serviços MIH. Um típico usuário de tais serviços pode ser uma aplicação de gerenciamento de mobilidade que utilizará estes serviços para otimizar *handovers*. A arquitetura geral do 802.21 pode ser observada na Figura 2.3.

Figura 2.3: Arquitetura do Padrão IEEE 802.21. Fonte: Silva, Silva e Salgueiro (2012)

2.3.3 Serviços de *Handover*

Como foi citado anteriormente, o IEEE 802.21 define três principais serviços que facilitam o *handover* entre redes heterogêneas: MIES, MICS e MIIS. Estes três serviços primários são gerenciados e configurados por um quarto serviço chamado de *Management Service* (Serviço de Gerenciamento), o qual consiste em: *MIH capability discovery* (descoberta de capacidade), *MIH registration* (registro) e *MIH event subscription* (assinatura de evento).

O mecanismo de descoberta de capacidade é usado por um nó móvel para descobrir as potencialidades dos pares da função MIH em termos de serviços MIH (serviços de eventos, comandos e informação).

O processo de registro MIH provê um mecanismo para que dois pares de funções MIH estabeleçam uma sessão, fazendo com que duas funções MIH possam comunicar-se corretamente.

O mecanismo de assinatura de evento permite que um usuário MIH utilize um determinado conjunto de eventos que podem ser originados de um par de funções MIH (KIM et al., 2006).

Fornecendo um padrão SAP e primitivas de serviço para as camadas superiores, a MIHF permite que as aplicações obtenham uma visão comum sobre diferentes camadas específicas ao meio. SAPs específicos ao meio (LINK_SAPs) e suas extensões possibilitam à MIHF obter informações específicas ao meio que podem ser propagadas pelos usuários MIH utilizando uma simples interface independente do meio (MIH_SAP).

2.3.3.1 Serviço de Eventos

Define eventos que podem indicar mudanças no comportamento do estado e da transmissão das camadas física, de enlace e lógica, ou prever mudanças de estado destas camadas. Existem duas categorias principais de eventos: eventos de enlace que se originam de camadas inferiores e propagam-se de forma ascendente e eventos MIH oriundos da MIHF. Os eventos também podem ser classificados em locais ou remotos. Os primeiros são assinados pela MIHF local e estão contidos em um simples nó. Já os remotos são assinados por um nó remoto e são entregues sobre a rede pelas mensagens de protocolo MIH. Eventos de notificação podem ser enviados pela MIHF ou por qualquer entidade de camada superior que pode estar localizada em um nó local ou remoto. Dentre os principais eventos existentes estão:

- *Link detected*: é gerado quando a interface de um nó móvel detecta a presença de uma rede de acesso para poder associar-se a ela;
- *Link up*: ocorre quando um terminal móvel se associa a um determinado ponto de acesso;
- *Link going down*: evento que indica que a iminência da perda de conexão da interface de rede corrente (YOO et al., 2007). A geração deste evento é feita utilizando o nível de potência dos pacotes recebidos (NIST, 2008);
- *Link down*: evento que sucede o *link going down*. Indica que o *link* foi quebrado, ou seja, que o nó móvel saiu da área de cobertura da rede à qual estava conectado.

2.3.3.2 Serviço de Comandos

Fornece comandos para controlar o estado do enlace. Comandos podem ser invocados localmente ou remotamente por usuários MIH ou pela própria função MIH. Por exemplo, um usuário MIH pode controlar a reconfiguração ou seleção de um enlace apropriado. Comandos locais propagam de usuários MIH para a função MIH e desta para as camadas inferiores. Comandos remotos são transportados por mensagens de protocolo MIH e podem se propagar da função MIH na pilha local de protocolo para a função MIH remota.

2.3.3.3 Serviço de Informação

Este tipo de serviço define um conjunto de elementos de informações (*Information Elements* - IEs), sua estrutura e representação da informação, e um mecanismo baseado em pergunta-resposta para transferência de informação. A MIIS provê um arcabouço para que entidades MIH possam descobrir informações úteis para realizar decisões de *handover*. Por exemplo, a MIIS pode ser utilizada para descobrir informações sobre as redes dentro de uma área geográfica específica para permitir uma decisão mais eficaz de realização e execução de *handover*.

2.4 Handovers Heterogêneos no NS-2

O NS-2 (*Network Simulator* versão 2) é um simulador de redes discreto baseado em eventos desenvolvido na Universidade de Berkeley. Constitui-se em uma ferramenta de código aberto e provê suporte a pilha de protocolos TCP/IP e simula os protocolos da camada de transporte TCP, UDP, e o comportamento de tráfego de determinadas aplicações como o FTP, *Web*, fluxos *CBR*, entre outros. Além disso, fornece mecanismos para simulações de redes sem fio e cabeadas e permite modelar e avaliar o desempenho de redes de computadores através de simulações, podendo também ser utilizado para fins educativos. **Tcl** (*Tool Command Language* - Linguagem de Comandos de Ferramentas) é uma linguagem de programação para *scripts*, projetada para ser flexível. O NS-2 é escrito nas linguagens **OTcl** (linguagem Tcl com extensões orientadas a objetos) e C++. A linguagem C++ é rápida para

executar, porém mais lenta para realizar mudanças, o que torna o NS-2 adequado para uma implementação detalhada de protocolos, uma vez que para isso é necessária uma linguagem de programação que tenha um rápido tempo de execução. Já a linguagem OTcl possui um tempo de execução muito mais lento, mas pode ser alterada de forma mais rápida (e de forma interativa), tornando-a ideal para a configuração da simulação (FALL; VARADHAN, 2002). A Figura 2.4 apresenta o funcionamento do NS-2:

Figura 2.4: Visão Geral do NS-2. Fonte: Adaptada de Chung, Claypool et al. (2002)

Para definir o comportamento das simulações o usuário deve escrever *scripts* em *Tcl* ou *OTcl* que inicia um escalonador de eventos. Em seguida, deve-se configurar a topologia da rede utilizando os objetos de rede e funções das bibliotecas, informar as fontes de tráfego delimitando o início e o fim da transmissão de pacotes, através do escalonador de eventos. Ao término da simulação, o NS produz um ou mais arquivos de saída baseados em texto (*traces*) que contêm dados detalhados da simulação. Os dados podem ser utilizados para análise de simulações ou como entrada para uma ferramenta de simulação gráfica chamada *Network Animator (NAM)*. Os arquivos de *trace* guardam informações, tais como o evento que ocorre com um pacote, o instante em que esse evento ocorre, os nós de origem e de destino do pacote, seu tipo, tamanho, seu identificador, entre outros. O simulador praticamente não fornece coleta de estatísticas, sendo que estas devem ser calculadas a partir de *traces* com o auxílio de outras ferramentas, como AWK, Python e Perl, por meio das quais o usuário pode extrair as informações que são relevantes para ele. Gráficos podem ser gerados com a ferramenta *Gnuplot*.

Por ser uma ferramenta de código aberto, popular e bastante utilizada pela academia e indústria, existe um contínuo desenvolvimento de inúmeros módulos e extensões para o NS-2. O suporte para cenários de *handover* vertical está disponível no NS-2 através da

utilização de módulos extras do **NIST** (*National Institute of Standards and Technology*), baseados no padrão IEEE 802.21. Estes módulos foram desenvolvidos para a versão 2.29 do NS-2. O NIST adicionou e modificou inúmeros arquivos na versão padrão do NS-2 a fim de possibilitar o suporte a cenários de mobilidade. Os novos módulos extras desenvolvidos estão descritos a seguir (MARQUES et al., 2010):

- Módulo IEEE 802.21, baseado no *draft 3* do IEEE 802.21;
- Módulo IEEE 802.16, baseado no padrão IEEE 802.16g-2004 e na extensão de mobilidade 802.16e-2005;
- Módulo *Neighbor Discovery* para IPV6 (funcionalidade limitada);
- Atualização da implementação existente do IEEE 802.11 MAC.

O módulo extra 802.21 contém uma implementação da função MIH baseada no *draft 3* da especificação IEEE 802.21. Uma visão geral da interação da função MIH com os diferentes componentes de um nó móvel é representada na Figura 2.5:

Figura 2.5: Implementação MIH no NS-2. Fonte: Silva (2011)

Como observado na Figura 2.5 (SILVA, 2011), o usuário MIH envia comandos para a função MIH e esta envia comandos para as camadas inferiores, $L2_1$ e $L2_2$. As interfaces $L2_1$ e $L2_2$ podem ser, por exemplo, uma interface Wi-Fi e WiMAX, respectivamente. Os eventos e comandos de enlace dependentes da tecnologia de rede são análogos aos

MIH_LINK_SAP's, já os comandos e eventos independentes à tecnologia têm correspondência com os MIH_SAP's.

A função MIH e Usuários MIH são implementadas como Agentes (FALL; VARADHAN, 2002). Um Agente é uma classe definida no NS-2, estendida pelo NIST, que permite comunicação com as camadas inferiores (MAC) e superiores (Usuários MIH), fornecendo o mapeamento entre o MIH SAP e o MIH LINK SAP. Por isso, a função MIH pode enviar pacotes de camada 3 para a função MIH remota e o Usuário MIH pode registrar-se com a função MIH para receber eventos de interfaces locais e remotas. A função MIH também é responsável por obter a lista e o estado das interfaces locais e controlar seu comportamento. A classe do Usuário MIH é hierarquicamente organizada de acordo com a Figura 2.6.

Figura 2.6: Hierarquia de classes do Usuário MIH. Fonte: Silva, Silva e Salgueiro (2012)

A classe *Interface Management (IFMNGMT)*, representada na Figura 2.6, oferece funções de gerenciamento de fluxo que facilitam que o módulo de *handover* encontre os fluxos que necessitam ser redirecionados. A IFMNGMT também recebe eventos do agente de descoberta de rede (*Neighbor Discovery - ND*) quando um novo prefixo (NIST, 2007) é detectado ou quando ele expira. O agente MIPv6 adiciona a capacidade de redirecionamento para o Usuário MIH. Quando um fluxo necessita ser redirecionado, uma mensagem pode ser enviada para o nó de origem para informá-lo a respeito do novo endereço ou interface que será utilizado (a). A classe *Handover* provê um modelo para módulos de *handover* e calcula o novo endereço após um *handover* bem sucedido.

2.4.1 Implementação de Nós com Múltiplas Interfaces

O suporte a nós com múltiplas interfaces não é padrão no NS-2, porque pacotes externos não seguem necessariamente a mesma estrutura de nó como a definida no modelo básico (ou seja, os algoritmos de roteamento são diferentes). Para resolver essa questão, o NIST criou um conceito de nó multi-interface, que corresponde a um nó que se conecta a outros nós. Os outros nós são considerados interfaces para o nó multi-interface, e este pode ser visto como um "super nó". Este conceito é ilustrado na Figura 2.7:

Figura 2.7: Visão geral de um nó multi-interface. Fonte: Silva (2011)

Os nós interface disparam eventos e os envia ao nó multi-interface. Os Usuários MIH no nó multi-interface podem cadastrar-se para receber estes eventos. Além disso, cada nó interface também pode executar uma instância do agente de descoberta de rede, a fim de detectar o movimento de camada 3.

2.4.2 Suporte para Descoberta de Sub-rede e Mudança de Endereço

Para suportar a descoberta de sub-rede e mudança de endereço ao se realizar um *handover*, o NS-2 utiliza mensagens de advertência (*Router Advertisement* - RA), de solicitação (*Router Solicitation* - RS) e de descoberta de rede. O primeiro tipo de mensagem é enviado em

broadcast periodicamente por APs ou BSs para informar aos nós móveis sobre o prefixo da rede. No NS-2 cada AP (Wi-Fi) ou BS (WiMAX) está em uma sub-rede diferente (domínio ou *cluster*, na nomenclatura do NS-2 (FALL; VARADHAN, 2002) e necessitará de um *handover* de camada 3, então o prefixo é o endereço do AP/BS que envia a mensagem de advertência.

O agente de descoberta de rede presente em cada nó móvel é responsável pelo recebimento de mensagens RA e determina se as mesmas contêm o mesmo prefixo. Em caso positivo, o agente de descoberta de rede informa ao gerenciador de interface; caso contrário, o temporizador associado ao prefixo corrente é atualizado. Se um terminal móvel perde a conexão com o seu atual ponto de conexão (*Point of Attachment* - PoA), podendo ser um AP ou uma BS, ele não receberá mais as mensagens RA daquele PoA; com isso, o prefixo corrente expira. Neste caso, uma notificação também é enviada ao gerenciador de interface. Mensagens de solicitação são utilizadas por dispositivos móveis para descoberta de novos APs ou BSs após um *handover*.

2.4.3 Classe *Energy Model*

No NS-2, a Classe *EnergyModel* representa um atributo de um terminal móvel, correspondendo nível de energia deste (FALL; VARADHAN, 2002). A referida classe possui quatro parâmetros principais que podem ser inicializados no *script* de simulação: *initialEnergy*, *txPower*, *rxPower* e *idlePower*. *InitialEnergy* corresponde ao nível de energia que o terminal móvel possui no início da simulação. Os demais parâmetros dizem respeito à utilização da energia da bateria do nó móvel quando este se encontra nos estados de transmissão, recepção ou ocioso, respectivamente.

A definição do *energy model* na interface OTcl é exibida abaixo:

Código Fonte 2.1: Configurando os parâmetros de energia no nó

```

1 $ns node-config
2 -energyModel $energymodel \
3 -rxPower $prx \
4 -txPower $ptx \
5 -initialEnergy $initialenergy

```

Na linha 1 a variável *energymodel* remete ao objeto da classe *EnergyModel*. O conteúdo dessa variável é retornado para o atributo *energyModel*. A linha 2 retorna o conteúdo da variável *prx* para o atributo *rxPower*. De forma semelhante, na linha 3, o atributo *txPower* recebe o conteúdo da variável *ptx* e, na linha 4, o atributo *initialEnergy* recebe o valor de *initialenergy*, que corresponde à energia em Joules.

2.5 Discussão

Este capítulo expôs os principais conceitos relacionados ao *handover* em redes heterogêneas e a classificação dos algoritmos de *handover* vertical. Além disso, foram apresentados a arquitetura e os serviços do padrão IEEE 802.21 e a sua implementação no simulador de redes NS-2. O próximo capítulo realiza um levantamento dos principais algoritmos de decisão presentes na literatura, organizados de acordo com a classificação utilizada na Seção 2.2.

Capítulo 3

Trabalhos Relacionados

Este capítulo apresenta os trabalhos presentes na literatura que abordam a questão do *handover* entre redes heterogêneas, mediante a proposição de algoritmos de decisão de *handover*. Como citado anteriormente na seção 2.2, os algoritmos podem ser classificados em quatro grupos: baseados em potência de sinal recebida, largura de banda, função de custo e inteligência artificial. A seguir são apresentados alguns trabalhos concernentes a estas divisões, levando em consideração o consumo de energia.

3.1 Algoritmos Baseados em Potência de Sinal Recebida

O método proposto por Rakovic, Atanasovski e Gavrilovska (2009) verifica a força do sinal recebido de acordo com a movimentação do dispositivo móvel. Foram implementados dois algoritmos, sendo um mais simples que consiste na estimativa da velocidade do terminal móvel através de uma equação (VAHA), e outro mais complexo que se baseia no ângulo de chegada do sinal como uma informação adicional a ser utilizada na tomada de decisão de *handover*. Para avaliação de desempenho foi utilizado um cenário com as redes Wi-Fi e WiMAX, aferindo métricas, tais como *jitter*, *overhead* de sinal e consumo de energia. Na análise dos resultados o algoritmo VAHA se mostrou mais adequado quando a bateria se encontra em nível crítico.

Chung, Chen e Hsu (2009) apresenta um método de detecção de movimento, MRSS

(*Momentum of Receive Signal Strength*), com o objetivo de auxiliar no processo de *handover*. A utilização desse mecanismo proporciona ao terminal móvel prever o seu estado de movimento e realizar o *handover* sem a necessidade da assistência de sistemas de posicionamento. A fim de prevenir consumo de energia desnecessário, também foi proposto um algoritmo MRSS dinâmico, chamado DMRSS, o qual utiliza um par de fatores de suavização para vários estados de movimentos de um nó móvel. As simulações avaliaram o desempenho dos algoritmos citados em termos de atraso de detecção de movimento, consumo de energia, número de total de *handovers* e número de *handovers* com falha. Os resultados se mostraram eficazes, pois reduziram a quantidade de *handovers* desnecessários e otimizaram o consumo de energia.

3.2 Algoritmos Baseados em Largura de Banda

Nam et al. (2004) propõem um algoritmo denominado WISE (*Wise Interface SElection*), que consiste em realizar a troca de conexão de rede, levando em consideração características da interface de rede que está sendo utilizada. O objetivo do algoritmo é reduzir o consumo de energia nos terminais móveis sem que comprometa a vazão. Foi introduzido o módulo VDC (*Virtual Domain Controller*) que é responsável pelo controle dos terminais móveis e balanceamento da carga da rede. Esse controle pode ser realizado nas redes 3G ou WLAN's através das estações base ou pontos de acesso, respectivamente. Uma das principais funções do VDC incluem o gerenciamento do *uplink* e *downlink* separadamente, proporcionando um balanceamento de carga mais eficiente na rede. A avaliação de desempenho, realizada no NS-2, utilizou o consumo de energia e a vazão na transmissão e recepção dos dados. Os resultados demonstraram que a utilização do WISE fez com que menos energia fosse consumida e a vazão não sofresse uma degradação considerável comparado ao caso em que apenas uma interface de rede (3G ou WLAN) fosse usada. Entretanto, o número de *handovers* e o atraso não são medidos, além de não haver uma preocupação com o efeito *ping pong*.

SANAP e SAMBARE (2013) definem um esquema de *handover* baseado em QoS entre as redes WLAN e WiMAX, incluindo um método eficiente para estimar a largura de banda disponível, custo de serviço da rede, módulo de economia de energia e segurança. Cada es-

tação é equipada com um apenas um IP e dois endereços MAC para cada uma das interfaces de rede. A interface que não está servindo o nó é desligada (*sleep mode*). Quando um nó está em movimento o *handover* pode ocorrer devido ao nó estar saindo da cobertura da rede WLAN ou por falta de largura de banda disponível que atenda aos requisitos de QoS na rede corrente. Caso contrário, se a estação estiver parada, o *handover* é iniciado quando a largura de banda é insuficiente. As principais funções do esquema de gerenciamento de *handover* inclui medição do tráfego, detecção do estado da rede, decisão de *handover* e transição da conexão. Antes de realizar o *handover*, primeiramente há uma pesquisa da lista de nós vizinhos para verificar a energia restante nos mesmos. Caso a energia esteja abaixo de um limite de 10% do total da bateria, um flag é definido para o valor um, caso contrário, ele é marcado para zero. Desta forma, se o flag no nó vizinho for zero, então é evitado o *handover* para essa rede particular; caso contrário, o *handover* é iniciado. Os pontos negativos deste trabalho é que não há uma avaliação de desempenho do método proposto e não há um detalhamento de como são obtidas a energia recebida e a transmitida, bem como do módulo de segurança.

3.3 Algoritmos Baseados em Função de Custo

Hong et al. (2009) propõem um algoritmo de decisão de *handover* vertical baseado em função de custo, abrangendo redes WLAN e WMAN. O módulo SGSN (*Serving General Support Node*) é responsável pela coleta de todas as informações requeridas para o cálculo da função de custo, como o consumo de energia, taxa de dados e custo monetário de cada bit para WWAN bem como os níveis disponíveis de modulação, taxa de erros de pacote de cada nível de modulação, consumo de energia esperado e custo monetário de cada bit para a rede WLAN. A função de custo utiliza como fatores a vazão, o consumo de energia e o custo monetário, tal como pode ser observador na Equação (3.1):

$$C(I) = \mu_t f_t(I) + \mu_p f_p(I) + \mu_m f_m(I) \quad (3.1)$$

Onde I pode ser uma rede WLAN ou WMAN, e μ_t , μ_p e μ_m , correspondem aos pesos da vazão, do consumo de energia e do custo monetário, respectivamente, sendo que os mesmos são baseados nas preferências do usuário. Paralelamente, f_t , f_p e f_m denotam as variáveis

normalizadas para os fatores mencionados anteriormente. A melhor rede é aquela em que apresenta o menor valor da referida função. Para avaliação de desempenho foi desenvolvido um simulador de redes baseado em C++, utilizando como métricas a vazão, consumo de energia e número de *handovers*. O método apresentado foi comparado com o algoritmo WFS (*WLAN- First-Scheme*) e obteve melhores resultados em termos de vazão e consumo de energia.

No trabalho desenvolvido por Freire (2012) há a investigação e implementação de um algoritmo de decisão de *handover* vertical baseado no consumo de energia, visando otimizar o uso da bateria, sem degradar a vazão e sem aumentar significativamente o custo monetário. A metodologia proposta considera como um dos aspectos mais importantes o tempo de utilização quando uma determinada aplicação está em execução. Para o processo de decisão, é criado um modelo probabilístico a fim de determinar o tempo de duração restante de uma aplicação, baseado no comportamento prévio do usuário e no histórico do tempo de utilização. São utilizados como critérios de decisão de *handover* o tempo restante da aplicação, a velocidade do terminal móvel e a posição atual do mesmo. Para analisar se o usuário está apto a manter a conectividade, o nível de bateria atual é avaliado. Se o dispositivo móvel está em um nível crítico enquanto está conectado na célula Wi-Fi e a WiMAX é detectada, o *handover* é realizado a fim de otimizar o tempo de vida do dispositivo. Para avaliação de desempenho são utilizadas as redes Wi-Fi e WiMAX fazendo uso do NS-2. As métricas adotadas são o consumo de energia médio, número de *handovers*, vazão e custo monetário. O algoritmo procura fazer um balanceamento entre custo monetário e consumo de energia quanto à escolha da rede candidata.

3.4 Algoritmos Baseados em Inteligência Artificial

BOUSSEN et al. (2014) apresentam um algoritmo de decisão de *handover* vertical sensível ao contexto baseado em lógica difusa. Na fase de obtenção de informações eles definem o contexto como qualquer informação que pode ser usada para caracterizar a situação de uma entidade, onde esta pode ser uma pessoa, um lugar ou objeto que é considerado relevante para a interação entre um usuário e uma aplicação. A fase de decisão de *handover* é feita por um

sistema de lógica difusa, determinando o instante preciso para realizar o *handover*, baseado nos seguintes eventos de gatilho: mobilidade do terminal, potência de sinal e disponibilidade da rede de acesso. As entradas para o sistema de inferência de lógica difusa são o RSS, a velocidade do dispositivo móvel, a carga do ponto de acesso a fim de detectar a rede que minimiza a probabilidade de falha de *handover*, o status da bateria e parâmetros de QoS. A seleção da rede consiste em obter a melhor alternativa dentre as redes disponíveis a fim de garantir uma melhor qualidade de serviço, minimizar o atraso e a taxa de erros e maximizar a vazão. Além disso, há uma preocupação concernente ao consumo de energia com vistas a otimizar o tempo de vida da bateria do terminal móvel. Na última fase, execução de *handover*, a escolha do protocolo a ser utilizado depende da classe de serviço (tráfego de tempo real ou não real). O ponto fraco do trabalho é que não é realizada uma avaliação de desempenho para verificar a eficiência do algoritmo proposto.

O algoritmo de *handover* vertical definido por LIAO, TIE e DU (2006) leva em consideração para a decisão, além do nível de potência de sinal, o custo monetário e a largura de banda da rede de acesso. São determinadas funções de adesão para cada parâmetro de entrada do algoritmo citado anteriormente, para, em seguida, estabelecer os pesos de cada critério de decisão em um vetor. O modelo de simulação consiste em duas estações base separadas por dois quilômetros. O algoritmo apresentado provê um procedimento generalizado de decisão de *handover*, em que vários parâmetros de entrada são avaliados dinamicamente. Um ponto fraco no trabalho é que não há descrição da ferramenta utilizada na simulação.

3.5 Discussão

Este capítulo realizou um levantamento dos trabalhos que propõem algoritmos de decisão de *handover*, agrupando-os conforme quatro classificações: potência de sinal recebida, largura de banda, função de custo e inteligência artificial. Dentre as soluções apresentadas, algumas possuem desvantagens, tais como:

- Levar em consideração apenas um critério para a tomada de decisão de *handover*, nos casos dos algoritmos baseados em potência de sinal recebida e baseados em largura de banda;

- Não considerar métricas de qualidade de serviço;
- Não calcular o número de *handovers* e o atraso de propagação dos pacotes;
- Não descrever a ferramenta de simulação utilizada para os experimentos;
- Não realizar uma avaliação de desempenho do algoritmo proposto.

Em ambientes nos quais há a coexistência de mais de uma tecnologia de rede, a tomada de decisão de *handover* deve ser baseada em mais de um critério, além de ser de fundamental importância que se haja uma garantia de qualidade de serviço, principalmente em se tratando de serviços de multimídia, os quais são largamente utilizados atualmente. O quantitativo de *handovers* realizados constitui-se em uma métrica de suma importância para estimar a sobrecarga nas redes com vistas a diminuir a mesma, e para evitar que o dispositivo móvel fique alternando entre redes diferentes de forma repetitiva, o que afeta o nível de qualidade de serviço e diminui o tempo de vida útil da bateria do nó móvel. Por fim, uma avaliação de desempenho é essencial para que se possa avaliar se o método proposto atende às expectativas, sendo importante também a descrição da ferramenta ou metodologia utilizada para tal.

Diante disso, o presente trabalho propõe um algoritmo de *handover* vertical baseado em potência de sinal das redes, qualidade de serviço e consumo de energia da bateria do dispositivo móvel. Dentre as métricas utilizadas estão a quantidade de *handovers* executados, o atraso, vazão, dentre outras. O mesmo é apresentado com mais detalhes no próximo Capítulo e a sua avaliação de desempenho é exibida no Capítulo 5.

Capítulo 4

Método de Decisão de *Handover*

No presente capítulo é detalhado o algoritmo de decisão proposto. Ele utiliza como critérios de decisão a potência de sinal das redes envolvidas, além de métricas de Qualidade de Serviço (QoS) e de autonomia energética.

4.1 Algoritmo de Decisão Proposto

Considere situações onde é permitido a um nó móvel escolher uma dentre n redes candidatas. Existem diversos critérios para tomada de decisão, como foi apresentado no Capítulo 3, tais como potência de sinal recebida, largura de banda, dentre outros. Uma solução que avalie a probabilidade de decisão errada de *handover* considerando mais de um parâmetro de qualidade de serviço, além de requisitos de autonomia energética, torna-se relevante.

O efeito *ping-pong*, que ocorre quando o terminal móvel alterna repetidamente entre duas redes de acesso, pode afetar significativamente o nível de QoS das aplicações em execução, bem como o tempo de vida útil da bateria do terminal móvel. Do ponto de vista das redes de acesso, a realização de vários *handovers* de forma desnecessária pode causar sobrecarga nas mesmas (CHIEN et al., 2008). Essa sobrecarga afeta o desempenho das redes e ocorre devido à troca de mensagens necessárias para realização do *handover*, tais como, a troca de quadros para o estabelecimento de conexão na camada de enlace, de mensagens do protocolo IP Móvel para gerenciar a mobilidade na camada de rede, ou de mensagens do

protocolo SIP (*Session Initiation Protocol*) que pode ser utilizado para manter as sessões das aplicações do terminal móvel durante o *handover* (SILVA et al., 2013).

O algoritmo de *handover* proposto no presente trabalho faz uso do modelo sugerido por Silva et al. (2013) e se enquadra na categoria de algoritmos baseados em função de custo, definida na Seção 3.3. Ele apresenta como critérios de decisão: potência de sinal recebida (RSS), atraso, taxa de perda de pacotes, *jitter*, consumo de energia do dispositivo móvel e tempo restante da aplicação. A execução do algoritmo ocorre em três etapas, a saber:

1. Avaliação de RSS
2. Avaliação de QoS
3. Avaliação de Consumo de Energia

4.1.1 Avaliação de RSS

A avaliação de RSS é a etapa responsável por verificar se o nível de potência da rede atual na qual o dispositivo móvel encontra-se conectado está aceitável para que se possa receber pacotes sem erro. Caso essa condição seja atendida, passa-se para a fase de avaliação de QoS. Caso contrário, o algoritmo permanece na mesma fase.

4.1.2 Avaliação de QoS

Na fase de Avaliação de QoS, o terminal móvel coleta medições de atraso, taxa de perda de pacotes e *jitter* de ambas as redes. Para avaliar a qualidade das redes candidatas é definida uma função de custo, conforme a Equação (4.1) (SILVA et al., 2013):

$$F_n = W_A \cdot N(P_{n,A}) + W_P \cdot N(P_{n,P}) + W_J \cdot N(P_{n,J}) \quad (4.1)$$

De modo que, $P_{n,A}$, $P_{n,P}$ e $P_{n,J}$ são os valores das medições de atraso, perda de pacotes e *jitter* da rede n , e W_A , W_P e W_J são os pesos atribuídos a cada métrica de acordo com a sua importância, respectivamente. O algoritmo considera que a rede que possuir o maior

valor da função definida pela Equação (4.1) apresenta menor utilidade para o usuário. Isso significa que quanto maior o valor da função de utilidade de uma rede, pior é a qualidade de serviço apresentada por ela, já que para todas as métricas utilizadas, quanto maior o valor apresentado, maior será o impacto negativo para o usuário que está utilizando a rede.

Considere que o algoritmo esteja na fase de decisão de *handover* entre as redes A e B . Periodicamente são efetuadas medições dos parâmetros de QoS, em um intervalo de tempo Δt , e calculados os valores de F_n para ambas as redes. Seja k uma variável discreta que representa os instantes em que ocorrem as medições, onde os instantes consecutivos k e $k + 1$ ocorrem exatamente a cada Δt segundos. Consequentemente, a cada instante k estará disponível um novo cálculo de F_n para as redes A e B . Silva et al. (2013) definem um *processo estocástico* (Δ) para a função de custo F_n , representada pela Equação (4.2):

$$\Delta F[k] = F_A[k] - F_B[k] \quad (4.2)$$

De modo que, $F_A[k]$ e $F_B[k]$ são os valores da função de utilidade F_n para as redes A e B , obtidas a cada instante k , respectivamente. Um esquema simples de decisão de *handover* poderia ser feito da seguinte maneira: quando a variável $\Delta F[k]$ for negativa, a rede A deve ser selecionada pelo algoritmo de *handover*, já que ela possui menor valor da função de utilidade do que o valor para a rede B . Caso contrário ($\Delta F[k] > 0$), a rede B é selecionada. Segundo (SILVA et al., 2013), essa solução ocasiona alguns problemas de instabilidade nas medições de $\Delta F[k]$:

1. Rápidas mudanças de sinal da sequência $\Delta F[k]$, quando a carga em ambas as redes provocam situações onde $F_A[k] \approx F_B[k]$;
2. Baixa acurácia na medição de amostras de $\Delta F[k]$.

Esses problemas podem causar um efeito indesejado de ficar alternando constantemente entre as duas redes desnecessariamente, o chamado de efeito *ping-pong*. Tal efeito é causado por decisões erradas de *handover*, que são decisões tomadas em um instante k a favor de uma determinada rede e no instante posterior, $k + 1$, percebe-se que é mais vantajoso ir para a outra rede candidata. A sucessão desses eventos causa o efeito *ping-pong*.

Figura 4.1: Função de densidade de probabilidade condicional de ΔF

Para tratar do primeiro problema é utilizada uma função de densidade de probabilidade condicional de $\Delta F[k+1]$ dado $\Delta F[k]$, conforme a Figura 4.1, onde f^* é valor de ΔF no instante k . Este valor é o máximo da função, pois há uma probabilidade maior de que o valor de ΔF no instante $k+1$ seja próximo de f^* e, conseqüentemente, o valor da função decresce à medida em que os valores se distanciam de f^* . Vale observar que não há algum conhecimento prévio acerca do comportamento das funções F_A e F_B que dependem das medições de QoS das redes.

Por princípio de simplicidade, é assumida uma aproximação linear da função de densidade de probabilidade condicional, o que resulta na forma triangular da Figura 4.2.

Figura 4.2: Aproximação linear da função de densidade de probabilidade condicional de ΔF

É possível calcular a probabilidade condicional de $\Delta F[k+1] = f$, dado $\Delta F[k] = f^*$, pela semelhança entre os triângulos observados na Figura 4.2 e pela área total da função de densidade de probabilidade que deve ser igual a 1, o que resulta na função da Equação (4.3):

$$p(\Delta F[k+1] = f | \Delta F[k] = f^*) = \begin{cases} \frac{2(f - \Delta F_{min})}{(\Delta F_{max} - \Delta F_{min})(f^* - \Delta F_{min})}, & \text{se } \Delta F_{min} < f < f^*, \\ \frac{2(\Delta F_{max} - f)}{(\Delta F_{max} - \Delta F_{min})(\Delta F_{max} - f^*)}, & \text{se } f^* < f < \Delta F_{max}. \end{cases} \quad (4.3)$$

Uma decisão errada é tomada quando esta se baseia no sinal atual da função ΔF para realizar o *handover* e no instante posterior ΔF muda de sinal. A probabilidade de $\Delta F[k+1]$ ser menor que zero, dado que $\Delta F[k] = f^*$ e $f^* \geq 0$ é dada pela área destacada da Figura 4.3 e corresponde à probabilidade de decisão errada para este caso.

Figura 4.3: Probabilidade de decisão errada para o caso $f^* > 0$

Essa área pode ser calculada por integrar a Equação (4.3) no intervalo $\Delta F_{min} \leq f \leq 0$, o que resulta em:

$$p(\Delta F[k+1] < 0 | \Delta F[k] = f^*) = \frac{\Delta F_{min}^2}{(\Delta F_{max} - \Delta F_{min})(f^* - \Delta F_{min})} \quad (4.4)$$

Semelhantemente, a probabilidade de que $\Delta F[k+1]$ seja maior que zero, dado que $\Delta F[k] = f^*$ e $f^* \leq 0$, é dada por integrar a Equação (4.3) no intervalo $0 \leq f \leq \Delta F_{max}$:

$$p(\Delta F[k+1] > 0 | \Delta F[k] = f^*) = \frac{\Delta F_{max}^2}{(\Delta F_{max} - \Delta F_{min})(\Delta F_{max} - f^*)} \quad (4.5)$$

A probabilidade de decisão errada (PDE) é dada pelas equações (4.4) e (4.5) como segue:

$$PDE = \begin{cases} \frac{\Delta F_{min}^2}{(\Delta F_{max} - \Delta F_{min})(f^* - \Delta F_{min})}, & \text{se } f^* > 0, \\ \frac{\Delta F_{max}^2}{(\Delta F_{max} - \Delta F_{min})(\Delta F_{max} - f^*)}, & \text{se } f^* < 0. \end{cases} \quad (4.6)$$

Para prevenir a baixa precisão das medições de $\Delta F[k]$, é aplicada uma suavização exponencial de primeira ordem na sequência $\Delta F[k]$, obtida como:

$$\langle \Delta F[k] \rangle = \alpha \cdot \Delta F[k] + (1 - \alpha) \cdot \langle \Delta F[k-1] \rangle \quad (4.7)$$

$\langle \Delta F[k] \rangle$ é usado nas Equações (4.4) e (4.5) no lugar de $\Delta F[k]$ para obter uma medição mais precisa para calcular a probabilidade de decisão errada. O α , também denominado *constante de suavização*, corresponde a um parâmetro cujos valores se encontram no intervalo $[0, 1]$. Ele é utilizado no modelo de Suavização Exponencial que se constitui em uma classe de métodos quantitativos de previsão de demanda (JACOBS, 2012).

A probabilidade de decisão errada é utilizada como critério de decisão ao se estabelecer um valor de limite superior para ela (P_{Lim}). O algoritmo realiza *handover* somente quando o valor da PDE for inferior ao valor limite. Com essa medida evita-se a realização de decisões de *handover* erradas, já que o algoritmo toma a decisão pelo *handover* somente quando a probabilidade de decisão errada for baixa, tomando como parâmetro o P_{Lim} .

A qualquer momento pode ser detectada a queda, ou a proximidade de queda, nos valores de RSS da *rede A* para um valor abaixo do exigido para manter o terminal móvel conectado. Quando isto ocorre, o algoritmo retorna a fase de avaliação de RSS, e se o terminal móvel estiver na *rede A*, ele realizará um *handover* para a *rede B* para evitar a perda de pacotes.

4.1.3 Avaliação de Consumo de Energia

Nesta fase é definida uma função de utilidade embasada no modelo proposto por Freire (2012), mediante a Equação (4.8):

$$E_n = \langle P_{n(tx)} \cdot p_{(tx)} + P_{n(rx)} \cdot p_{(rx)} + P_{n(idle)} \cdot p_{(idle)} \rangle \cdot T_R \quad (4.8)$$

Onde $P_{n(tx)}$, $P_{n(rx)}$ e $P_{n(idle)}$ denotam, respectivamente, as taxas de consumo de energia para os estados de transmissão, recebimento e ociosidade para a rede n analisada. De forma semelhante, $p_{(tx)}$, $p_{(rx)}$ e $p_{(idle)}$, correspondem às probabilidades para cada estado. T_R representa o tempo restante da aplicação.

4.1.4 Descrição do Algoritmo

É importante ressaltar que o algoritmo aqui proposto pode ser aplicado para a tomada de decisão de *handover* considerando-se n redes candidatas. O fluxograma que descreve o funcionamento do mesmo é apresentado na Figura 4.4.

Figura 4.4: Fluxograma do algoritmo proposto

Considerando que o dispositivo móvel se encontra conectado a alguma rede de acesso e existem n redes disponíveis, para cada rede é calculado o valor da função de custo da mesma de acordo com a Equação (4.1) e escolhido o menor valor de F_n . Este valor corresponde à rede que apresenta maior utilidade para o usuário ($Rede_{min}$). Desta forma, serão iniciadas as três etapas do algoritmo descritas anteriormente, tomando como entrada a rede escolhida no passo anterior. Inicialmente é realizada a comparação do valor de RSS da $Rede_{min}$ com um valor de *threshold*, denotado por T_{sh} , que representa um valor de limite para receber pacotes sem erro. Caso esta condição não seja atendida, o nó móvel permanece na rede atual. Caso contrário, passa-se para a fase de Avaliação de QoS da $Rede_{min}$. Na Figura 4.4, considera-se a Equação (4.2) definida anteriormente:

$$\Delta F = F_{Rede_{atual}} - F_{Rede_{min}} \quad (4.9)$$

De acordo com a Equação (4.9), o $\Delta F > 0$ significa que a função de custo para a $Rede_{atual}$ é superior ao da $Rede_{min}$, ou seja, a $Rede_{min}$ apresenta maior utilidade para o usuário. Caso esta condição seja verdadeira e a probabilidade de decisão errada (PDE) seja inferior ao valor de limite superior P_{Lim} , é iniciada a última fase do algoritmo, que corresponde à Avaliação de Consumo de Energia da $Rede_{min}$. Nesta etapa, é verificado se o consumo de energia da $Rede_{min}$ é inferior ao tempo de limite da bateria do terminal móvel (T_{LB}). Em caso positivo, o algoritmo realiza o *handover* para a $Rede_{min}$; caso contrário, ele permanece na rede atual.

A complexidade computacional do algoritmo é $O(n)$, uma vez que o mesmo calcula o valor da função de custo (F_n) das n redes que estejam disponíveis (vide Figura 4.4), a fim de se escolher a rede que apresenta o menor valor de F_n para a tomada de decisão de *handover*.

4.2 Discussão

Este capítulo apresentou o algoritmo de decisão de *handover* vertical proposto neste trabalho. O algoritmo é dividido em três fases: Avaliação de RSS, Avaliação de QoS e Avaliação de Consumo de Energia. No próximo capítulo é apresentada a avaliação de desempenho do mesmo.

Capítulo 5

Avaliação de Desempenho

Este capítulo apresenta o cenário de simulação proposto, as métricas utilizadas, bem como os resultados e a discussão dos mesmos, comparando-se nossa proposta com o modelo sugerido por Silva et al. (2013).

A avaliação de desempenho foi realizada por meio do simulador NS-2. Como apresentado na seção 2.4, o NS-2 permite a adição de novas funcionalidades aos módulos pré-existentes em seu código fonte. O NIST disponibilizou recursos do padrão IEEE 802.21 através de um pacote de mobilidade compatível com a versão 2.29 do NS-2 (NIST, 2008). Entretanto, para fazer uso desse módulo foram necessárias diversas correções no código fonte da versão do NS-2 citada a fim de eliminar vários erros de compilação apresentados.

Foi necessário desenvolver novas funcionalidades para tratar da avaliação de consumo de energia do algoritmo proposto neste trabalho, que não foram disponibilizadas pelo pacote de mobilidade padrão. Para tal finalidade, foi utilizada a classe *EnergyModel* (vide subseção 2.4.3) que se encontra presente no módulo do NS-2 e estendida a classe *Handover* modificada por Silva (2012).

5.1 Cenário de Simulação

Para avaliação de desempenho é utilizado um cenário proposto em Silva et al. (2013) que abrange as tecnologias Wi-Fi e WiMAX, sendo utilizados três pontos de acesso Wi-Fi, uma

estação base WiMAX (BS) e um nó correspondente (CN) conectados a um roteador via enlaces cabeados Ethernet de 1 Gbps, como representado na Figura 5.1. O raio da área de cobertura das redes WiMAX e Wi-Fi são de 500 e 100 metros, respectivamente. Os nós móveis possuem interfaces de rede Wi-Fi e WiMAX e podem estar conectados a um dos APs ou à BS. Além disso, eles estabelecem um tráfego de uma aplicação de tempo real com o nó correspondente.

Figura 5.1: Cenário de simulação

As métricas utilizadas são:

- *Handovers* executados

- *Handovers* desnecessários
- *Handovers* perdidos
- Atraso médio
- Vazão média
- Taxa de perda de pacotes

Os *handovers* executados correspondem à quantidade de *handovers* efetuados pelos nós móveis, enquanto os *handovers* desnecessários correspondem às decisões onde o algoritmo decidiu migrar para uma rede candidata em um dado instante, e no instante posterior, ele decide retornar para a rede anterior. Já os *handovers* perdidos correspondem ao número de decisões onde o algoritmo decidiu permanecer na rede atual em um dado instante, devido ao fato da probabilidade de decisão errada ser superior ao valor limite P_{Lim} , embora a rede candidata apresente QoS melhor do que a rede atual, e no instante posterior, a rede candidata ainda apresenta melhor QoS.

Os parâmetros utilizados na avaliação de desempenho estão descritos na Tabela 5.1. Foram utilizados vinte nós móveis a fim de se analisar situações reais em que vários dispositivos móveis estão em processo de *handover*. Além disso, foi utilizado um tráfego UDP correspondente um fluxo de vídeo. O nível de confiança utilizado nas simulações foi de 95%, sendo realizadas 50 replicações para cada experimento utilizado (num total de 104 experimentos).

No presente trabalho foram considerados dois cenários a fim de se verificar o comportamento do algoritmo proposto: no primeiro panorama considera-se que a bateria do terminal móvel está com carga suficiente, já no segundo é o caso em que a bateria se encontra com carga baixa, em nível crítico. Vale ressaltar que a velocidade dos nós móveis influencia na medida de QoS.

5.2 Resultados e Discussão

Nesta seção são apresentados os resultados dos cenários utilizados no presente trabalho, como foi comentado anteriormente, além de ser realizada uma análise comparativa do al-

Tabela 5.1: Parâmetros de simulação

Parâmetro	Valor
Número de nós móveis	20
Velocidade dos nós móveis	50 Km/h
Cobertura WiMAX	500 m
Cobertura Wi-fi	100 m
Tráfego utilizado	Tráfego de vídeo (UDP)
α	0,1; 0,5; 0,9; 1,0
P_{Lim}	de 0,25 a 0,5 com incrementos de 0,01

goritmo proposto nesse trabalho, denotado no presente trabalho por algoritmo PQE (*Power-QoS-Energy*), com o algoritmo proposto por (SILVA et al., 2013), denotado por algoritmo PQ (*Power-QoS*). Tal nomenclatura se deve ao fato de o primeiro algoritmo adotar como critério para a tomada de decisão de *handover* a potência de sinal recebida (RSS) e métricas de Qualidade de Serviço (QoS), ao passo que o algoritmo PQE leva em consideração além de RSS e QoS, o nível de bateria do terminal móvel.

5.2.1 Cenários: bateria suficiente x bateria crítica

Aqui é realizada uma análise comparativa entre os cenários nos quais o dispositivo móvel se encontra com a bateria em níveis suficiente e crítico. As Figuras 5.2, 5.3 e 5.4 apresentam, respectivamente, a quantidade de *handovers* executados, *handovers* desnecessários e *handovers* perdidos em função dos valores de P_{Lim} e α .

A Figura 5.2 exibe a quantidade de *handovers* que foram executados ao longo das simulações. Pelo gráfico à esquerda, que correspondente ao cenário com bateria suficiente, pode ser observado que a quantidade de *handovers* executados cresce à medida que os valores de P_{Lim} aumenta; este aumento faz com que o algoritmo torne-se menos restritivo na avaliação de qualidade de serviço, uma vez que uma das condições é que o ΔF seja inferior ao P_{Lim}

(vide Figura 4.4). Além disso, como a bateria se encontra em um nível aceitável, o dispositivo móvel realiza o *handover*. Com valores mais altos de α , também há um aumento no número de *handovers*. O valor de α equivalente a 0,1 destaca-se por apresentar os valores mais baixos de *handovers* sendo realizados. Ainda na Figura 5.2, o gráfico à direita exibe a quantidade de *handovers* em função dos valores de P_{Lim} e α para o cenário no qual o terminal móvel se encontra com a bateria em nível crítico. Pode ser observado que o número de *handovers* realizados foi bastante inferior ao cenário no qual o dispositivo móvel estava com a bateria em nível suficiente. Este é o comportamento esperado, uma vez que o algoritmo torna-se mais rigoroso, preferindo economizar energia a fim de conservar a bateria do nó móvel.

Figura 5.2: Número de *handovers* executados com bateria suficiente x bateria crítica

A Figura 5.3 exibe o número de *handovers* desnecessários em função dos valores de P_{Lim} e α . Tomando como referência o gráfico à direita, referente ao cenário com bateria suficiente, o valor de α sendo 0,1 destaca-se por não apresentar *handovers* desnecessários. Para valores superiores de α o número de *handovers* desnecessários teve um leve aumento à medida que os valores de P_{Lim} foram sofrendo um acréscimo, porém a quantidade de *handovers* desnecessários foi baixa comparando-se com os *handovers* efetuados. Já para o cenário com bateria crítica, correspondente ao gráfico à direita, pode-se observar que o número de *handovers* desnecessários foi muito baixo, não chegando ao valor de 2 unidades. Para valores de P_{Lim} abaixo de 0,3 praticamente não houve *handover* desnecessário, o que significa que a decisão de realizar o *handover* foi acertada em 100% dos casos.

Figura 5.3: Número de *handovers* desnecessários com bateria suficiente x bateria crítica

A Figura 5.4 exibe a quantidade de *handovers* perdidos em função dos parâmetros selecionados para o experimento. Para o cenário com bateria suficiente, correspondente ao gráfico à esquerda, nota-se que à medida que os valores de P_{Lim} aumentam, uma menor quantidade de *handovers* é perdida. O valor de P_{Lim} 0,5 destaca-se por não apresentar *handovers* perdidos. Isto evidencia que valores mais baixos de P_{Lim} e α deixam o algoritmo bastante restritivo, o impedindo de realizar *handovers* mesmo quando eles são necessários. Os picos existentes no gráfico se dão devido à movimentação dos nós móveis. No cenário com bateria crítica, vide gráfico à direita, pode-se perceber que o número de *handovers* perdidos foi maior para menores valores de P_{Lim} e α , pois nesses casos o algoritmo torna-se mais rigoroso na tomada de decisão de *handover*, preferindo permanecer na rede atual. Nota-se que a quantidade de *handovers* perdidos para o cenário com bateria crítica foi inferior em relação ao cenário com bateria suficiente. Isto evidencia que o algoritmo foi mais rigoroso na tomada de decisão de *handover*, uma vez que ele levou em consideração não somente os parâmetros de QoS, mas também o *status* da bateria do terminal móvel, já que esta se encontra em nível crítico.

As Figuras 5.5, 5.6 e 5.7 apresentam, respectivamente, os valores do atraso, vazão e taxa de perda de pacotes em função dos valores de P_{Lim} e α .

A Figura 5.5 exibe o atraso médio de envio de pacotes em função dos parâmetros P_{Lim} e α . Os resultados de atraso para o cenário com bateria suficiente estão exibidos no gráfico à

Figura 5.4: Número de *handovers* perdidos com bateria suficiente x bateria crítica

esquerda, ao passo que o gráfico à direita apresenta os resultados para o cenário com bateria crítica. O atraso manteve-se, em média, entre 100 e 200 ms, abaixo da faixa de valores aceitáveis para tráfego de vídeo que corresponde ao intervalo entre 200 e 300 ms (PUC-RIO, 2013).

Figura 5.5: Atraso médio com bateria suficiente x bateria crítica

A Figura 5.6 exibe a vazão média para os cenários no qual o dispositivo móvel encontra-se com a bateria em nível suficiente e crítico, exibido no gráfico à esquerda e à direita, respectivamente. Como pode ser observado, a vazão se mantém próxima de 100 Kbps. De uma forma geral, a variação dos valores de P_{Lim} e α não ocasionou a degradação da vazão.

A taxa de perda de pacotes é apresentada na Figura 5.7. Tanto para o cenário com

Figura 5.6: Vazão média com bateria suficiente x bateria crítica

bateria suficiente, como para o que a bateria se encontra em nível crítico, cujos resultados estão representados, respectivamente, nos gráficos à esquerda e à direita da Figura 5.7, a perda de pacotes manteve-se no intervalo entre 50% e 60%. Esta taxa se deve tanto ao congestionamento da rede (pois em se tratando de rede sem fio a disputa pelo acesso ao meio é mais intensa) uma vez que são utilizados vinte nós móveis, quanto à utilização de transmissões de vídeo.

Figura 5.7: Taxa de perda de pacotes com bateria suficiente x bateria crítica

5.2.2 Análise comparativa

Nesta subseção é realizada uma análise comparativa entre o algoritmo proposto neste trabalho, algoritmo PQE, e o método proposto por (SILVA et al., 2013), algoritmo PQ. As Figuras 5.8, 5.9 e 5.10 apresentam, respectivamente, as taxas de *handovers* executados, *handovers* desnecessários e *handovers* perdidos em função dos valores de P_{Lim} e α .

A Figura 5.8 exibe o número de *handovers* executados em função dos valores de P_{Lim} e α . Para os valores de P_{Lim} e α equivalentes a 0,5 e 1,0, respectivamente, a quantidade de *handovers* realizados ao se utilizar o algoritmo PQE em relação ao algoritmo PQ é, aproximadamente, quatorze vezes menor para o cenário com bateria crítica e 2 vezes menor considerando o cenário com bateria suficiente. Isto justifica-se por conta do algoritmo PQE levar em consideração, além de requisitos de QoS, o nível de bateria do dispositivo móvel, tornando-se mais rigoroso na decisão de realizar o *handover*.

A Figura 5.9 exibe o número de *handovers* desnecessários para os cenários nos quais é utilizado o algoritmo PQE, bem como em relação ao algoritmo PQ. O número de *handovers* desnecessários aumenta com os valores de P_{Lim} , porque o algoritmo se torna menos rigoroso. De forma semelhante, para valores maiores de α o algoritmo de decisão efetua uma quantidade maior de *handovers* desnecessários.

Para verificar a eficiência do algoritmo proposto, foi realizado o seguinte cálculo de acordo com a Equação (5.1):

$$Desempenho = \langle 1 - (H_{desn}/H_{exec}) \rangle \cdot 100 \quad (5.1)$$

Onde *Desempenho* corresponde à taxa de desempenho do algoritmo analisado, H_{desn} equivale à média de *handovers* desnecessários e H_{exec} diz respeito à média de *handovers* que foram executados. Foi realizado o cálculo do desempenho baseado na Equação (5.1) para os algoritmos PQ e PQE em ambos os cenários. Considerando o estudo de caso exibido na Figura 5.1, o qual é composto pelas tecnologias Wi-Fi e WiMAX, e os parâmetros definidos na Tabela 5.1, o desempenho do algoritmo PQE para os cenários com bateria suficiente e crítica convergiu para o valor de, aproximadamente, 88% e 84%, respectivamente. Já para

Algoritmo PQ

Algoritmo PQE - Bateria Suficiente

Algoritmo PQE - Bateria Crítica

Figura 5.8: *Handovers* executados

o algoritmo PQ, o desempenho convergiu para o valor de, aproximadamente, 82%. Desta forma, não podemos considerar que o desempenho do algoritmo PQE foi equivalente ao do algoritmo PQ, ou seja, o desempenho do algoritmo PQE tendeu a superar o desempenho do algoritmo PQ no que se refere à decisão correta de realização do *handover*, contribuindo para reduzir o número de *handovers* desnecessários e, conseqüentemente, mitigar o efeito *ping-pong*.

Algoritmo PQ

Algoritmo PQE - Bateria Suficiente

Algoritmo PQE - Bateria Crítica

Figura 5.9: *Handovers* desnecessários

A Figura 5.10 exibe a quantidade de *handovers* perdidos. Nota-se que para ambos os algoritmos os menores valores de P_{Lim} e α fazem com que o número de *handovers* perdidos seja maior. Porém, à medida que os valores de P_{Lim} e α sofrem acréscimo, menos *handovers* são perdidos. Para o caso no qual a bateria do terminal móvel encontra-se em nível crítico,

o quantitativo de *handovers* perdidos foi um pouco inferior, uma vez que o algoritmo PQE torna-se mais rigoroso na decisão de realizar a transferência para a rede candidata.

Algoritmo PQ

Algoritmo PQE - Bateria Suficiente

Algoritmo PQE - Bateria Crítica

Figura 5.10: *Handovers* perdidos

As Figuras 5.11, 5.12 e 5.13 apresentam, respectivamente, os valores do atraso, vazão e taxa de perda de pacotes em função dos valores de P_{Lim} e α .

Como exibido na Figura 5.11, o atraso médio de envio de pacotes para os algoritmos PQ e PQE ficou na faixa de 100 a 200 ms, abaixo da faixa de valores aceitáveis para tráfego de vídeo, que corresponde ao intervalo entre 200 e 300 ms (PUC-RIO, 2013). É importante ressaltar que a realização de *handovers* não ocasionou o aumento do atraso.

Na Figura 5.12 observa-se que tanto para o algoritmo PQ quanto para o algoritmo PQE,

Algoritmo PQ

Algoritmo PQE - Bateria Suficiente

Algoritmo PQE - Bateria Crítica

Figura 5.11: Atraso

a vazão manteve-se próxima dos 100 Kbps. Isso mostra que, mesmo com a realização de *handovers* a vazão não sofreu degradação.

Algoritmo PQ

Algoritmo PQE - Bateria Suficiente

Algoritmo PQE - Bateria Crítica

Figura 5.12: Vazão

Como é apresentado na Figura 5.13, a taxa de perda de pacotes se encontra no intervalo entre 50% e 60%. O aumento dos valores de P_{Lim} e α não provocou a variação da perda. Desta forma, conclui-se que a realização de *handovers* não impactou no aumento da perda de pacotes.

Algoritmo PQ

Algoritmo PQE - Bateria Suficiente

Algoritmo PQE - Bateria Crítica

Figura 5.13: Perda de pacotes

5.3 Discussão

Este capítulo apresentou a avaliação de desempenho do algoritmo proposto neste trabalho, algoritmo PQ, que engloba o cenário no qual o dispositivo móvel se encontra com a bateria em nível aceitável e em nível crítico. Além disso, para fins de comparação, foi exibida a análise de desempenho do algoritmo proposto por (SILVA et al., 2013), algoritmo PQE.

As métricas de desempenho utilizadas foram os *handovers* executados, desnecessários e perdidos, bem como o atraso, vazão e taxa de perda de pacotes, uma vez que essas três últimas são geralmente utilizadas como medidas de QoS. Através dos resultados provenientes das simulações foi constatada a efetividade do algoritmo proposto pela redução do número de *handovers* desnecessários sem haver degradação na Qualidade de Serviço. A seguir, o Capítulo 6 apresenta as conclusões deste trabalho.

Capítulo 6

Conclusão

Este capítulo apresenta as considerações finais deste trabalho, além das contribuições advindas com a realização do mesmo e as perspectivas de trabalhos futuros.

6.1 Considerações Finais

Com a grande quantidade de tecnologias de rede sem fio e a disponibilidade delas em um mesmo ambiente, faz-se necessário desenvolver métodos que auxiliem no processo de decisão de *handovers* em redes sem fio heterogêneas. Critérios que não levem em consideração apenas a potência de sinal ou largura de banda, mas que também explorem outros, tais como qualidade de serviço, consumo de energia, são de suma importância nessa etapa de decisão.

O presente trabalho propôs um algoritmo de decisão de *handover* baseado em função de custo que considera os seguintes critérios de decisão de *handover*: RSS, atraso, perda de pacotes, *jitter* e consumo de energia da bateria do dispositivo móvel e que utiliza uma abordagem probabilística para evitar o efeito *ping-pong*. O cenário de estudo foi composto pelas redes Wi-Fi e WiMAX, sendo analisados o número de *handovers* executados, desnecessários e perdidos, bem como as métricas de QoS comumente utilizadas que correspondem ao atraso médio, vazão média e taxa de perda de pacotes.

Os resultados obtidos mostraram que o algoritmo proposto contribuiu para reduzir o número de decisões erradas de *handovers*, de modo que não houvesse uma degradação da

Qualidade de Serviço que viesse a afetar o desempenho da rede na qual o terminal móvel se encontra conectado.

6.2 Contribuições

Dentre as contribuições oriundas dessa dissertação estão a proposição de um algoritmo que considera além de parâmetros de QoS, requisitos de consumo de energia. Acrescente-se a isso a adição de funcionalidades no módulo do Padrão IEEE 802.21 realizado pelo NIST para o NS-2, dando continuidade às implementações desenvolvidas por (SILVA et al., 2013), o que possibilitou o desenvolvimento do algoritmo de decisão proposto.

6.3 Trabalhos Futuros

Como trabalhos futuros pretende-se realizar mais experimentos, utilizando como fatores a quantidade de nós móveis, bem como a velocidade dos mesmos.

REFERÊNCIAS

BOUSSEN, S. et al. A context aware vertical handover decision approach based on fuzzy logic. *Communications and Networking (ComNet)*, p. 5, 2014.

CHIEN, S. F. et al. Smart predictive trigger for effective handover in wireless networks. In: IEEE. *Communications, 2008. ICC'08. IEEE International Conference on*. [S.l.], 2008. p. 2175–2181.

CHUNG, J.; CLAYPOOL, M. et al. NS by Example. *Disponível na Internet via URL: <http://nile.wpi.edu/NS>*, v. 20, 2002. Acesso em: 09/03/2015.

CHUNG, T.-Y.; CHEN, Y.-M.; HSU, C.-H. Adaptive momentum-based motion detection approach and its application on handoff in wireless networks. *Sensors*, Molecular Diversity Preservation International, v. 9, n. 7, p. 5715–5739, 2009.

COSKUN, G.; HOKELEK, I.; CIRPAN, H. A. Energy efficient handover in hetnets using ieee 802.21. In: IEEE. *Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS), 2014 IEEE International Conference on*. [S.l.], 2014. p. 349–353.

FALL, K.; VARADHAN, K. The ns Manual (formerly ns Notes and Documentation). *Disponível na Internet via URL: http://www.isi.edu/nsnam/ns/doc/ns_doc.pdf*, v. 1, 2002.

FREIRE, S. B. *Energy-Cost aware vertical handover decision algorithm based on probabilistic time estimation model for video streaming sessions*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Pernambuco - Centro de Informática, 2012.

HONG, K. et al. Cost-based vertical handover decision algorithm for wwan/wlan integrated networks. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, Hindawi Publishing Corp., v. 2009, p. 15, 2009.

IEEE 802.21. IEEE Standard for Local and metropolitan area networks – Part 21: Media Independent Handover Services. *IEEE Std. 802.21-2008*, 2008.

JACOBS, W. *Modelos de suavização exponencial, arima e redes neurais artificiais: um estudo comparativo para a previsão de demanda de produtos*. Monografia (Graduação) — Centro Universitário UNIVATES, 2012.

KASSAR, M.; KERVELLA, B.; PUJOLLE, G. An overview of vertical handover decision strategies in heterogeneous wireless networks. *Computer Communications*, Elsevier, 2008.

KHATTAB, O.; ALANI, O. A survey on media independent handover (mih) and ip multimedia subsystem (ims) in heterogeneous wireless networks. *Wireless Inf Networks*, p. 215–228, 2013.

KIM, R.; LEE, J.; NJEDJOU, E. Mih protocol section update. *IEEE 802.21 Media Independent Handover Services*, p. 1–5, 2006.

LIAO, H.; TIE, L.; DU, Z. A vertical handover decision algorithm based on fuzzy control theory. *Computer and Computational Sciences (IMSCCS'06)*, p. 309–313, 2006.

MARQUES, H. et al. Simulation of 802.21 handovers using ns-2. *Journal of Computer Systems, Networks, and Communications*, Hindawi Publishing Corp., v. 2010, p. 3, 2010.

NAM, M. et al. Wise: energy-efficient interface selection on vertical handoff between 3g networks and wlans. In: IEEE. *Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2004. PIMRC 2004. 15th IEEE International Symposium on*. [S.l.], 2004. v. 1, p. 692–698.

NIST. The Network Simulator NS-2 NIST add-on IEEE 802.21 model (based on IEEE P802.21/D03.00). *Disponível na Internet via URL: http://www.nist.gov/itl/antd/emntg/upload/MIH_module.pdf*, 2007. Acesso em: 18/04/2015.

NIST. Seamless and Secure Mobility Project. *Disponível na Internet via URL: http://www.nist.gov/itl/antd/emntg/ssm_seamlessandsecure.cfm*, 2008. Acesso em: 17/04/2015.

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

- PUC-RIO. Qualidade de serviço na internet. *Disponível na Internet via URL: http://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/5751/5751_4.PDF*, 2013. Acesso em: 18/04/2015.
- RAKOVIC, V.; ATANASOVSKI, V.; GAVRILOVSKA, L. Velocity aware vertical handovers. In: IEEE. *Applied Sciences in Biomedical and Communication Technologies, 2009. ISABEL 2009. 2nd International Symposium on*. [S.l.], 2009. p. 1–6.
- SANAP, R. C.; SAMBARE, S. S. An improved qos - based vertical handoff scheme for next generation of wireless network. *International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT)*, v. 2, 2013.
- SILVA, A. S. da et al. Avaliação de desempenho de aplicações de voz submetidas a handover entre redes wi-fi e wimax. *Revista de Sistemas e Computação-RSC*, v. 2, n. 2, 2012.
- SILVA, A. S. F. *Algoritmo de Handover Vertical Baseado em Função de Utilidade com Prevenção Probabilística de Decisões Erradas*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Sergipe - Departamento de Computação, 2012.
- SILVA, A. S. F.; SALGUEIRO, R. J. P. B.; SALGUEIRO, E. M. Framework de testes para algoritmos de decisão de handover vertical em redes heterogêneas. *Congreso Internacional de Computación y Telecomunicaciones (COMTEL)*, 2011.
- SILVA, A. S. F.; SILVA, S. R. A. A.; SALGUEIRO, R. J. P. B. Análise de desempenho de handover em redes heterogêneas utilizando o padrão ieee 802.21. *XII ERBASE - Escola Regional de Computação Bahia, Alagoas e Sergipe, Juazeiro*, p. 10, 2012.
- SILVA, A. S. F. et al. Algoritmo de handover vertical baseado em função de utilidade com prevenção de decisão errada. *Workshop de Redes de Acesso em Banda Larga (WRA), Brasília*, v. 1, p. 74–87, 2013.
- SILVA, S. R. A. A. *Análise de Desempenho de Handover Vertical em Redes Heterogêneas Utilizando o Padrão IEEE 802.21*. Monografia (Graduação) — Universidade Federal de Sergipe - Departamento de Computação, 2011.
- YOO, S.-J.; CYPHER, D.; GOLMIE, N. Lms predictive link triggering for seamless handovers in heterogeneous wireless networks. In: IEEE. *Military Communications Conference, 2007. MILCOM 2007. IEEE*. [S.l.], 2007. p. 1–7.