

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE

HELGA DOLORICO BALBI

**INSTABILIDADE DE ASSOCIAÇÃO EM REDES  
SEM FIO DENSAS**

NITERÓI

2018

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE

HELGA DOLORICO BALBI

# INSTABILIDADE DE ASSOCIAÇÃO EM REDES SEM FIO DENSAS

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Computação da Universidade Federal Fluminense como requisito parcial para a obtenção do Grau de Doutor em Computação. Área de concentração: SISTEMAS DE COMPUTAÇÃO.

Orientador:

CÉLIO VINICIUS NEVES DE ALBUQUERQUE

Coorientador:

LUIZ CLÁUDIO SCHARA MAGALHÃES

NITERÓI

2018

Ficha catalográfica automática - SDC/BEE  
Gerada com informações fornecidas pelo autor

B172i Balbi, Helga Dolorico  
INSTABILIDADE DE ASSOCIAÇÃO EM REDES SEM FIO DENSAS : /  
Helga Dolorico Balbi ; CÉLIO VINICIUS NEVES DE ALBUQUERQUE,  
orientador ; LUIZ CLÁUDIO SCHARA MAGALHÃES, coorientador.  
Niterói, 2018.  
119 f. : il.

Tese (doutorado)-Universidade Federal Fluminense, Niterói,  
2018.

DOI: <http://dx.doi.org/10.22409/PGC.2018.d.09599358783>

1. Rede sem fio. 2. Rede de computadores. 3. Rede de  
comunicação de computadores. 4. Comunicação de dados. 5.  
Produção intelectual. I. ALBUQUERQUE, CÉLIO VINICIUS NEVES  
DE, orientador. II. MAGALHÃES, LUIZ CLÁUDIO SCHARA,  
coorientador. III. Universidade Federal Fluminense. Escola de  
Engenharia. IV. Título.

CDD -

HELGA DOLORICO BALBI

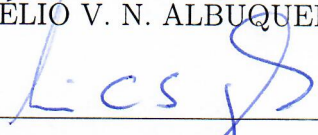
INSTABILIDADE DE ASSOCIAÇÃO EM REDES SEM FIO DENSAS

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Computação da Universidade Federal Fluminense como requisito parcial para a obtenção do Grau de Doutor em Computação. Área de concentração: SISTEMAS DE COMPUTAÇÃO.

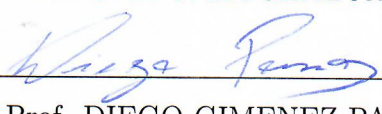
Aprovada em Dezembro de 2018.

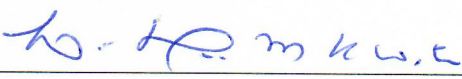
BANCA EXAMINADORA

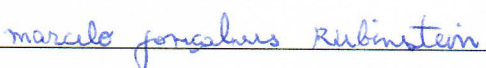
  
Prof. CÉLIO V. N. ALBUQUERQUE - Orientador, UFF

  
Prof. LUIZ C. S. MAGALHÃES - Coorientador, UFF

  
Prof. DÉBORA C. MUCHALUAT SAADE, UFF

  
Prof. DIEGO GIMENEZ PASSOS, UFF

  
Prof. LUÍS HENRIQUE M. KOSMALSKI COSTA, UFRJ

  
Prof. MARCELO GONÇALVES RUBINSTEIN, UERJ

Niterói

2018

*Dedico este trabalho aos meus pais Bruno e Neuza.*

# Agradecimentos

Agradeço aos meus professores e familiares por me acompanharem e me orientarem. Agradeço especialmente ao professor Diego Passos por me coorientar no decorrer do meu desenvolvimento acadêmico desde o final de minha graduação até o final de meu doutorado. Agradeço ao professor Célio Albuquerque pela orientação no desenvolvimento da minha pesquisa, e por ser sempre muito compreensivo e incentivador, buscando o bem de seus alunos. Ao professor Schara pelos ensinamentos e pela confiança, além da coorientação. À Marister, por tornar o ambiente de trabalho no laboratório Mídiacom agradável e divertido. À professora Débora Muchaluat Saade pelo exemplo de mulher de sucesso, forte e determinada que tento seguir em minha vida. Aos colegas de estudos que estiveram presentes no decorrer do desenvolvimento da minha tese, Igor, Yona, Cledson e Joacir. E, por fim, aos meus pais, por me apoiarem incondicionalmente no decorrer da minha vida.

# Resumo

A instabilidade de associação é um fenômeno comum em redes IEEE 802.11 densas. A decisão de realização de *handoff* entre pontos de acesso é uma prerrogativa exclusiva das estações cliente. Mesmo sem mobilidade, estes dispositivos podem decidir migrar para um novo ponto de acesso com o objetivo de obter melhor desempenho. Entretanto, os critérios utilizados para a realização do *handoff* não são definidos no padrão, ficando a cargo das implementações dos fabricantes. Nesta tese, resultados de uma análise baseada em dados obtidos a partir de uma rede de larga escala em produção na Universidade Federal Fluminense demonstram que tais implementações são comumente deficientes, resultando em grande instabilidade de associação. Após a análise do código fonte implementado em dispositivos comumente encontrados na rede e realização de testes experimentais em redes reais, conclui-se que esta instabilidade, conhecida por efeito “ping-pong”, ocorre devido ao uso direto de amostras de RSSI, que, conforme será mostrado, apresentam grande variabilidade no tempo. Após profunda análise de *traces* de RSSI coletados utilizando-se o *testbed* FIBRE em ambientes *indoor*, conclui-se que a série temporal do RSSI apresenta distribuição multimodal com modas locais referentes a RSSIs com valores baixos, ou seja, deslocadas à esquerda da moda global. Estas modas são referentes a vales de RSSI que ocorrem frequentemente em rajadas com pequenos tamanhos. Tendo este comportamento como motivação, um novo e simples mecanismo de filtragem denominado Máximo é proposto com o objetivo de eliminar os vales da série temporal do RSSI. Isto é alcançado através da escolha do valor máximo do RSSI a partir de uma janela deslizante contendo as últimas amostras recebidas. Por fim, emulações baseadas em *traces* reais de RSSI em cenários estáticos e móveis são realizadas para comparação do desempenho do filtro Máximo em relação a mecanismos comumente encontrados na literatura. Os resultados mostram que, dentre os mecanismos testados, o Máximo é capaz de oferecer melhor *tradeoff* em relação ao atraso e estabilidade em cenários móveis, além de efetivamente eliminar 100% dos ping-pongs na maioria dos cenários estáticos.

**Palavras-chave:** redes IEEE 802.11 densas, WLAN, *handoff*, efeito ping-pong, instabilidade de associação

# Abstract

Association instability is a common phenomenon in dense networks. The decision of whether or not to perform a handoff between Access Points (APs) in an infrastructured IEEE 802.11 network is taken exclusively by client stations. Even without mobility, devices may migrate to another AP to improve performance. However, the criteria to perform handoffs are not defined by the standard and, thus, are implementation specific. In this thesis, data obtained from a real large scale production network deployed at Universidade Federal Fluminense are used to run experiments to demonstrate that such implementations are commonly deficient, resulting in association instability in dense environments. By analyzing the implementation used by common devices and performing tests on real networks, we conclude that this instability, known as “ping-pong effect”, results from the direct usage of highly variable RSSI samples. After deep analysis of RSSI traces collected in indoor environments using the FIBRE testbed, we concluded that the RSSI time series presents a multimodal distribution with minor modes related to low RSSI values, *i.e.*, located to the left of the major mode. These modes refer to deep fast fades in RSSI time series that occur frequently in bursts of small sizes. Motivated by this behavior a new and simple filtering mechanism called Maximum is proposed with the objective of eliminating the valleys of the RSSI time series. This is achieved by choosing the maximum RSSI value from a sliding window containing the last few samples received. Finally, emulations based on real RSSI traces from static and mobile scenarios are performed for comparison of Maximum filter performance in relation to mechanisms commonly found in the literature. The results show that, among the tested mechanisms, Maximum is able to offer better tradeoff between delay and stability in mobile scenarios, besides having good performance in static scenarios, effectively avoiding ping-pong in most of them.

**Keywords:** dense IEEE 802.11, WLAN, handoff, ping-pong, association instability

# Lista de Figuras

|      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |    |
|------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.1  | Ilustração dos intervalos de tempo considerados na caracterização do ping-pong. . . . .                                                                                                                                                                                                                                              | 8  |
| 2.2  | Porcentagem de STAs que experimentaram ping-pong em cada dia. . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                | 9  |
| 2.3  | Distribuição do tempo total de conexão das STAs em dois dias distintos: (a) dia 5, que corresponde a um dia de final de semana; e (b) dia 6, que corresponde a um dia de semana. . . . .                                                                                                                                             | 10 |
| 2.4  | (a) Distribuição dos dispositivos pelos fabricantes mais populares encontrados na rede Wi-Fi UFF; (b) Porcentagem de dispositivos que experimentaram ping-pong para cada fabricante. . . . .                                                                                                                                         | 12 |
| 2.5  | (a) Distribuição de STAs por sistema operacional; (b) porcentagem de STAs afetadas pelo ping-pong para cada sistema operacional; (c) porcentagem de STAs estáticas e móveis encontrados na rede; (d) porcentagem de STAs estáticas e móveis afetadas pelo ping-pong. . . . .                                                         | 13 |
| 2.6  | Diagrama de fluxo da decisão de <i>handoff</i> do WPA Supplicant. . . . .                                                                                                                                                                                                                                                            | 15 |
| 2.7  | Rede de testes utilizada nos testes em cenários estáticos para validação das causas apontadas para o efeito ping-pong. . . . .                                                                                                                                                                                                       | 16 |
| 2.8  | Número de ping-pongs observados em função de $N_{min}$ e $X_{max}$ para: (a) algoritmo original; (b) algoritmo de margem fixa; (c) algoritmo EWMA com $\alpha = 0,2$ ; e (d) algoritmo EWMA com $\alpha = 0,4$ . Os demais algoritmos não estão representados porque não obtiveram ping-pongs para os parâmetros escolhidos. . . . . | 21 |
| 2.9  | Ilustração dos intervalos de tempo considerados nos testes de <i>tradeoff</i> . . . . .                                                                                                                                                                                                                                              | 23 |
| 2.10 | Número médio de <i>scans</i> requeridos para que o <i>handoff</i> ocorra nos testes (a) de AP1 para AP2 e (b) de AP2 para AP1. . . . .                                                                                                                                                                                               | 24 |
| 4.1  | Gráficos de dispersão da média <i>vs.</i> desvio padrão do RSSI para as interfaces (a) TP-Link e (b) Aircap-NX. . . . .                                                                                                                                                                                                              | 40 |

|     |                                                                                                                                                                                                                                                              |    |
|-----|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.2 | Série temporal do RSSI para um AP TL-WR740N v4.23 registrada pela interface (a) TP-Link e (b) Airpcap-NX. . . . .                                                                                                                                            | 41 |
| 4.3 | Série temporal do RSSI para um AP TL-WR740N v4.23 registrada pela interface (a) TP-Link interface e (b) Airpcap-NX no ponto de medição 30. . . . .                                                                                                           | 42 |
| 4.4 | RSSI de <i>beacons</i> distinguidos pelos números de sequência, capturados pelas interfaces Airpcap-NX e TP-Link. As setas pretas apontam comportamentos diferenciados no registro do RSSI pelas interfaces. . . . .                                         | 43 |
| 4.5 | Distribuição do RSSI amostrado de um AP TL-WR740N pelas interfaces (a) TP-Link e (b) Airpcap-NX. . . . .                                                                                                                                                     | 43 |
| 4.6 | Distribuição da probabilidade do tamanho da rajada de vales de RSSI para a interface (a) TP-Link e (b) Airpcap-NX. . . . .                                                                                                                                   | 44 |
| 4.7 | Função de distribuição acumulada (CDF) do tamanho das rajadas de vales para as interfaces (a) TP-Link e (b) Airpcap-NX. . . . .                                                                                                                              | 45 |
| 4.8 | (a) Mediana do RSSI (dBm) com os valores mínimo e máximo e os primeiros e terceiros quartis. (b) Corte da série temporal do RSSI (dBm) para o ponto de medição A. . . . .                                                                                    | 45 |
| 4.9 | Exemplo de funcionamento do Máximo com janela deslizante $W_s$ com tamanhos 5 e 2. Os círculos vermelhos marcam o valor escolhido para a tomada de decisão do <i>handoff</i> . . . . .                                                                       | 47 |
| 5.1 | Diagrama de fluxo da decisão de <i>handoff</i> do Máximo. . . . .                                                                                                                                                                                            | 50 |
| 5.2 | Exemplo de <i>traces</i> utilizados nos testes, incluindo as curvas modeladas para a estimativa do momento ideal para o <i>handoff</i> (em preto) e as curvas dadas pelas margens de erro do modelo (em azul e vermelho). . . . .                            | 56 |
| 5.3 | Exemplo do espaço de critérios obtido para o Máximo em um dos cenários com mobilidade. Cada ponto cinza representa o resultado obtido por uma diferente janela. Os pontos em preto são os Paretos Ótimos e o ponto em vermelho é o melhor resultado. . . . . | 57 |
| 5.4 | Gráficos do Atraso médio <i>vs.</i> Número médio de Ping-Pongs incluindo Paretos Ótimos marcados em preto e resultado de menor distância ao ponto (0,0) em vermelho, para (a) MAX; (b) EWMA; (c) NDIST; (d) MEDIAN; (e) MODE; (f) HM; (g) WPA. . . . .       | 62 |

|      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |    |
|------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 5.5  | Box Plots com máximo e mínimo, mediana e primeiro e terceiro quartis das porcentagens de casos de: (a) não estabilização e; (b) estabilização precoce.                                                                                                                                                                                                                                        | 63 |
| 5.6  | Porcentagem de casos de estabilização precoce obtidos para os Pareto Ótimos do algoritmo MAX.                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 63 |
| 5.7  | Gráfico dos melhores resultados obtidos por cada algoritmo em termos do atraso médio <i>vs.</i> número médio de ping-pongs. As margens de erro são dadas pelo intervalo de confiança de 95%.                                                                                                                                                                                                  | 65 |
| 5.8  | Gráficos do Atraso médio <i>vs.</i> Número médio de Ping-Pongs incluindo Pareto Ótimos marcados em preto e resultado de menor distância ao ponto (0,0) em vermelho, para todos os algoritmos testados.                                                                                                                                                                                        | 65 |
| 5.9  | Exemplo de <i>traces</i> utilizados no teste com mobilidade, incluindo as curvas modeladas para a estimativa do momento ideal para o <i>handoff</i> (em preto) e as curvas dadas pelas margens de erro do modelo (em azul e vermelho).                                                                                                                                                        | 69 |
| 5.10 | Gráficos do Atraso médio <i>vs.</i> Número médio de Ping-Pongs incluindo Pareto Ótimos marcados em preto e resultado de menor distância ao ponto (0,0) em vermelho, para todos os algoritmos testados.                                                                                                                                                                                        | 70 |
| 5.11 | Gráfico dos melhores resultados obtidos por cada algoritmo em termos do atraso médio <i>vs.</i> número médio de ping-pongs. As margens de erro são dadas pelo intervalo de confiança de 95%.                                                                                                                                                                                                  | 71 |
| 5.12 | Box Plots com máximo e mínimo, mediana e primeiro e terceiro quartis das porcentagens de casos de: (a) não estabilização e; (b) estabilização precoce.                                                                                                                                                                                                                                        | 72 |
| 5.13 | Porcentagem de casos de estabilização precoce obtidos para os parâmetros do algoritmo MAX.                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 72 |
| 5.14 | Exemplo de instância de teste com mobilidade no qual o MAX $W_s = 7$ obteve estabilização precoce. Em (a) são apresentadas as amostras sem a aplicação da filtragem, incluindo as curvas modeladas para a estimativa do momento ideal do <i>handoff</i> . Em (b) é apresentado o resultado das amostras filtradas e as mesmas curvas de modelagem apresentadas em (a) para fins comparativos. | 74 |
| 5.15 | Exemplos de <i>traces</i> de AP1 e AP2 para os cenários estáticos testados com ocorrências de vales: (a) baixa; (b) moderada e; (c) alta.                                                                                                                                                                                                                                                     | 76 |

|      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                |    |
|------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 5.16 | Box Plots da média do número de ping-pongs obtida para cada algoritmo nos cenários estáticos: (a) fácil; (b) moderado e; (c) difícil. . . . .                                                                                                                                                  | 77 |
| 5.17 | Gráfico do número médio de ping-pongs obtido pelo algoritmo MAX no teste em cenário estático difícil. Os parâmetros que não obtiveram ping-pongs não foram apresentados neste gráfico. . . . .                                                                                                 | 78 |
| 5.18 | Exemplos de <i>traces</i> de AP1 e AP2 do cenários estático no qual o RSSI dos APs é muito próximo. . . . .                                                                                                                                                                                    | 79 |
| 5.19 | Box Plots da média do número de ping-pongs obtida para cada algoritmo no cenários estático Desafiador. . . . .                                                                                                                                                                                 | 79 |
| 5.20 | Gráfico do número médio de ping-pongs obtido pelo algoritmo MAX no teste em cenários estático desafiador. Os parâmetros que não obtiveram ping-pongs não foram apresentados neste gráfico. . . . .                                                                                             | 80 |
| A.1  | Plantas com localização dos nós Icarus e Mini ITX instalados no 3 <sup>o</sup> e 4 <sup>o</sup> andar do <i>testbed</i> FIBRE da UFF. . . . .                                                                                                                                                  | 92 |
| A.2  | Listagem dos APs presentes no ambiente do <i>testbed</i> FIBRE, incluindo seus modelos. . . . .                                                                                                                                                                                                | 93 |
| A.3  | Fotos do trem e do <i>laptop</i> que é acoplado a ele para a realização de testes com mobilidade: (a) <i>laptop</i> com interfaces IEEE 802.11 conectadas; (b) engrenagens do trem; (c) o trem visto por baixo, ao lado da estação ORG; (d) vista de trás do trem e corredor ao fundo. . . . . | 94 |
| A.4  | Planta com localização dos nós Icarus e outros APs localizados nas proximidades do <i>testbed</i> FIBRE da UFRJ marcados em amarelo. . . . .                                                                                                                                                   | 95 |
| A.5  | Exemplos de conteúdo do arquivo de log: (a) sentido de IDA; (b) sentido de VOLTA. . . . .                                                                                                                                                                                                      | 97 |
| A.6  | Gráficos RSSI x Tempo ( <i>Epoch Time</i> ) de amostras provenientes do AP MotorCtrl coletadas pela interface: (a) TP-Link no sentido de IDA; (b) Airpcap-NX no sentido de IDA; (c) TP-Link no sentido de VOLTA; (d) Airpcap-NX no sentido de VOLTA. . . . .                                   | 98 |
| A.7  | Gráficos RSSI x Tempo ( <i>Epoch Time</i> ) de amostras provenientes do AP FibreITX35, coletadas pela interface: (a) TP-Link no sentido de IDA; (b) Airpcap-NX no sentido de IDA; (c) TP-Link no sentido de VOLTA; (d) Airpcap-NX no sentido de VOLTA. . . . .                                 | 99 |

---

|      |                                                                                                                                                                                     |     |
|------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| A.8  | Gráficos RSSI x Tempo ( <i>Epoch Time</i> ) de amostras provenientes do AP MotorCtrl no ponto de medição N <sup>o</sup> 0 para as interfaces (a) Airpcap-NX e (b) TP-Link. . . . .  | 100 |
| A.9  | Gráficos RSSI x Tempo ( <i>Epoch Time</i> ) de amostras provenientes do AP MotorCtrl no ponto de medição N <sup>o</sup> 30 para as interfaces (a) Airpcap-NX e (b) TP-Link. . . . . | 101 |
| A.10 | Gráficos RSSI x Tempo ( <i>Epoch Time</i> ) de amostras provenientes dos APs Icarus 11 (a) e 28 (b), coletadas pelo nó Icarus 2. . . . .                                            | 101 |

# Lista de Tabelas

|     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |    |
|-----|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.1 | Descrição dos parâmetros de caracterização do ping-pong. . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 8  |
| 2.2 | Análise da ocorrência do ping-pong em um dia de semana <i>vs.</i> um dia de final de semana e sua relação com o tempo total de conexão. . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                      | 11 |
| 2.3 | Valor da margem de histerese de RSSI de acordo com a amostra do RSSI do AP corrente. . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 15 |
| 2.4 | Algoritmos de <i>handoff</i> utilizados nos testes. . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 17 |
| 2.5 | Distribuição do intervalo entre <i>handoffs</i> , com intervalos dados em número de <i>scans</i> . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 20 |
| 2.6 | Valores médio do RSSI em dBm recebidos pela STA dos APs. . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 23 |
| 5.1 | Algoritmos de <i>handoff</i> utilizados nos testes. . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 60 |
| 5.2 | Paretos Ótimos gerais ordenados pela distância ao ponto (0,0). Os erros do atraso médio e do número médio de ping-pongs são dados pelo intervalo de confiança de 95%. A coluna $\overline{Stab}$ informa a porcentagem de não estabilizações, enquanto a coluna Precoce informa a porcentagem de estabilizações precoces. Por fim, a coluna Dist. informa a distância ao ponto (0,0) do espaço de critérios. . . . . | 67 |
| 5.3 | Algoritmos de <i>handoff</i> e parâmetros selecionados para realização de testes em cenários estáticos e móveis. . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 68 |
| 5.4 | Paretos Ótimos gerais ordenados pela distância. As colunas $\overline{Stab}$ e Precoce informam respectivamente as porcentagens de não estabilizações e estabilizações precoces, e a coluna Dist. informa a distância ao ponto (0,0) do espaço de critérios. . . . .                                                                                                                                                 | 70 |

# Lista de Abreviaturas e Siglas

|       |                                                                                        |
|-------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| AP    | : Ponto de Acesso ( <i>Access Point</i> );                                             |
| BSS   | : Conjunto de Serviço Básico ( <i>Basic Service Set</i> );                             |
| CCA   | : Avaliação de canal livre ( <i>Clear Channel Assessment</i> );                        |
| DHCP  | : <i>Dynamic Host Configuration Protocol</i> ;                                         |
| DMG   | : <i>Directional multi-gigabit</i> ;                                                   |
| ESS   | : Conjunto de Serviço Estendido ( <i>Extended Service Set</i> );                       |
| EWMA  | : Média Móvel Exponencialmente Ponderada;                                              |
| FIBRE | : <i>Future Internet Brazilian Environment for Experimentation</i> ;                   |
| GNU   | : <i>Gnu's Not Unix</i> ;                                                              |
| HT    | : <i>High-Throughput</i> ;                                                             |
| IEEE  | : Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos;                                 |
| MAC   | : <i>Medium Access Control</i> , camada de enlace do modelo OSI;                       |
| MCDM  | : Decisão baseada em múltiplos critérios ( <i>Multiple-Criteria Decision-Making</i> ); |
| MIB   | : <i>Management Information Base</i> ;                                                 |
| MLME  | : <i>Medium Access Control Sublayer Management Entity</i> ;                            |
| MSGCF | : <i>MAC state generic convergence function</i> ;                                      |
| OS    | : Sistema Operacional ( <i>Operating System</i> );                                     |
| OSI   | : <i>Open Systems Interconnection</i> ;                                                |
| PHY   | : <i>Physical Layer</i> , camada física dos modelos OSI e IEEE;                        |
| PLME  | : <i>Physical Layer Management Entity</i> ;                                            |
| PPDU  | : <i>Physical Protocol Data Unit</i> ;                                                 |
| RSSI  | : Indicação do Nível de Sinal Recebido ( <i>Received Signal Strength Indication</i> ); |
| SAP   | : <i>Service Access Point</i> ;                                                        |
| SDN   | : Redes Definidas por <i>Software</i> ( <i>Software Defined Networks</i> );            |
| SME   | : <i>Station Management Entity</i> ;                                                   |
| SNMP  | : <i>Simple Network Management Protocol</i> ;                                          |
| SNR   | : Relação Sinal Ruído ( <i>Signal to Noise Ratio</i> );                                |
| SSID  | : Identificador do Conjunto de Serviço ( <i>Service Set Identifier</i> );              |
| STA   | : Estação Cliente ( <i>Client Station</i> );                                           |

|      |   |                                                            |
|------|---|------------------------------------------------------------|
| VHT  | : | <i>Very High Throughput</i> ;                              |
| TVHT | : | <i>Television Very High Throughput</i> ;                   |
| UFF  | : | Universidade Federal Fluminense;                           |
| UFRJ | : | Universidade Federal do Rio de Janeiro;                    |
| WLAN | : | Rede Local Sem Fio ( <i>Wireless Local Area Network</i> ). |

# Sumário

|          |                                                                                                   |           |
|----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>Introdução</b>                                                                                 | <b>1</b>  |
| <b>2</b> | <b>Um estudo de caso da instabilidade de associação em uma rede IEEE 802.11 densa em produção</b> | <b>6</b>  |
| 2.1      | Descrição da rede Wi-Fi UFF e definição dos parâmetros para caracterização do ping-pong . . . . . | 6         |
| 2.2      | Análise da ocorrência do ping-pong . . . . .                                                      | 9         |
| 2.3      | Análise das causas do ping-pong . . . . .                                                         | 14        |
| 2.4      | Testes preliminares em cenários estáticos . . . . .                                               | 16        |
| 2.4.1    | Testes de ocorrência de ping-pongs . . . . .                                                      | 18        |
| 2.4.2    | Testes de <i>Tradeoff</i> entre atraso e estabilidade . . . . .                                   | 22        |
| <b>3</b> | <b>Trabalhos Relacionados</b>                                                                     | <b>27</b> |
| 3.1      | Trabalhos relacionados ao problema da instabilidade de associação . . . . .                       | 27        |
| 3.2      | Indicador do nível de sinal recebido (RSSI) . . . . .                                             | 32        |
| 3.2.1    | Definição de RSSI de acordo com o padrão IEEE 802.11 . . . . .                                    | 32        |
| 3.2.2    | RSSI do ponto de vista dos fabricantes . . . . .                                                  | 34        |
| 3.2.3    | Distribuição de probabilidade do RSSI segundo a literatura . . . . .                              | 35        |
| <b>4</b> | <b>Proposta - Filtro Máximo</b>                                                                   | <b>39</b> |
| 4.1      | Análise Experimental do RSSI . . . . .                                                            | 39        |
| 4.2      | Proposta . . . . .                                                                                | 46        |
| <b>5</b> | <b>Análise de desempenho</b>                                                                      | <b>49</b> |

---

|          |                                                                                                                                     |           |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 5.1      | Descrição do emulador . . . . .                                                                                                     | 49        |
| 5.2      | Métricas e Cenários de Avaliação . . . . .                                                                                          | 54        |
| 5.3      | Descrição dos algoritmos testados . . . . .                                                                                         | 58        |
| 5.4      | Pré-seleção de parâmetros . . . . .                                                                                                 | 60        |
| 5.5      | Testes com mobilidade . . . . .                                                                                                     | 69        |
| 5.6      | Testes em cenários estáticos . . . . .                                                                                              | 75        |
| <b>6</b> | <b>Conclusões</b>                                                                                                                   | <b>81</b> |
|          | <b>Referências</b>                                                                                                                  | <b>85</b> |
|          | <b>Apêndice A – Coleta de amostras de RSSI para testes de handoff em cenários com e sem mobilidade utilizando-se testbeds FIBRE</b> | <b>90</b> |
| A.1      | Descrição dos cenários de experimentação . . . . .                                                                                  | 91        |
| A.2      | Descrição e resultados dos experimentos com mobilidade na UFF . . . . .                                                             | 96        |
| A.3      | Descrição e resultados dos experimentos sem mobilidade na UFF . . . . .                                                             | 97        |
| A.4      | Descrição e resultados dos experimentos sem mobilidade na UFRJ . . . . .                                                            | 100       |

# Capítulo 1

## Introdução

A tecnologia IEEE 802.11 [17] é amplamente utilizada em ambientes residenciais e corporativos para prover conectividade sem fio à rede de dados para dispositivos móveis. Com o passar dos anos, a tecnologia teve seus custos reduzidos, e sua aplicação em redes IEEE 802.11 infraestruturadas densas<sup>1</sup> se tornou comum. Tais redes são comumente compostas por milhares de Estações Cliente (STAs) e centenas de Pontos de Acesso (APs) para prover cobertura e capacidade aos usuários [28]. Desta forma, o desenvolvimento de métodos em busca de melhor desempenho para esta tecnologia em cenários densos, mantendo a retrocompatibilidade com dispositivos atuais, é desejada [4, 7].

Em uma rede IEEE 802.11 densa composta por muitos APs, comumente, em uma mesma posição física, uma STA pode se encontrar no alcance de diversos APs que compõem um único Conjunto de Serviço Estendido (ou, em inglês, *Extended Service Set - ESS*), tendo a possibilidade de se associar a qualquer um deles [48]. O padrão IEEE 802.11 define que a STA deve selecionar o AP ao qual irá se associar, mas não define como esta seleção deve ser realizada. O algoritmo utilizado para realizar a escolha do AP, que pode variar para diferentes fabricantes de dispositivos, baseia-se comumente no RSSI (Indicação de Nível de Sinal Recebido, ou, em inglês, *Received Signal Strength Indication*), de forma que o AP com o maior RSSI registrado será o preferido. A utilização desta métrica pode ser explicada por sua alta disponibilidade, já que o RSSI pode ser registrado para qualquer quadro recebido. Além disso, o RSSI pode refletir bem a movimentação de uma STA e a qualidade do canal de comunicação [25, 47], mas para isso é necessária a utilização de mecanismos para amenizar a grande variabilidade ocasionada por efeitos da propagação do sinal.

---

<sup>1</sup>Densidade refere-se ao número de estações em um ambiente(*i.e.*, estações cliente e/ou pontos de acesso da rede) que compartilham o uso do meio sem fio.

Outra função normalmente realizada pela STA é a migração entre APs de um mesmo ESS em busca de melhor qualidade de comunicação, um processo comumente conhecido por *handoff*<sup>2</sup>. Assim como na seleção inicial que define a qual AP a STA irá se associar, o critério para o *handoff* também não é definido no padrão e, sendo assim, sua implementação pode variar para diferentes dispositivos [48].

Conforme será demonstrado, estas implementações são comumente ineficientes, resultando em *handoffs* frequentes que podem ser inconvenientes para o usuário da rede. Idealmente, uma migração para um novo AP deveria ocorrer somente quando, de fato, observa-se um ganho de qualidade na comunicação. Um exemplo é um dispositivo móvel que gradualmente se move para longe de seu AP corrente, se aproximando de outro AP pertencente ao ESS. Entretanto, especialmente em ambientes densos, será mostrado que é comum que uma STA estática realize migrações para APs que proveem qualidade de comunicação similar, ou até pior em relação à atual. Em alguns casos, a STA realiza migrações sucessivas entre dois ou mais APs diversas vezes em um curto intervalo de tempo. Este comportamento, que foi previamente descrito em [34], pode prejudicar a qualidade da comunicação ao causar perdas de conectividade e quebra de conexões ativas. Além disso, aumenta o número de quadros de gerência na rede, ou seja, aumenta o *overhead* da comunicação. Esta instabilidade é comumente conhecida na literatura por efeito “ping-pong” [29, 36].

*Handoffs* excessivos são particularmente prejudiciais para as aplicações interativas ao causar interrupção na conectividade. Além disso, o processo de *handoff* requer a troca de quadros de gerência, o que ocasiona gastos energéticos adicionais, consequência não desejada em dispositivos móveis que carecem deste tipo de recurso. As desvantagens são mais críticas em casos nos quais o *handoff* é custoso em termos de tempo, como em redes que requerem uma nova autenticação IEEE 802.1X [16] do cliente para cada associação, ou quando uma nova autenticação do usuário via *Captive Portal* é requerida. Em alguns casos, *handoffs* frequentes podem desencorajar o uso da rede por parte dos usuários devido aos excessivos inconvenientes ocasionados [34].

Embora o processo de *handoff* já tenha sido estudado na literatura, como nos trabalhos de [14, 15, 26, 29–31, 36, 51], grande parte dos trabalhos existentes são focados na redução do tempo requerido para realizar a migração. Existem, também, propostas com o objetivo de otimizar a migração de dispositivos móveis com base em seus caminhos [22]. Entretanto, o ping-pong, que afeta inclusive estações estáticas, não é usualmente anali-

---

<sup>2</sup>Neste trabalho, os termos *handoff* e “migração entre APs” serão utilizados com o mesmo significado.

sado com profundidade nas soluções de *handoff* propostas. Trabalhos relacionados que consideram a análise do efeito ping-pong, como os de [15], [43], [14], [52] e [37], usualmente propõem o uso de limiares para prevenir o problema, de forma que o *handoff* seja realizado apenas se certas métricas estiverem acima destes limiares. Nestes trabalhos, o efeito ping-pong é avaliado apenas em poucos cenários e com limiares fixos, o que pode não refletir a grande variedade de cenários encontrados na realidade. De fato, conforme será mostrado, o uso de limiares pode não ser suficiente para prevenir o efeito ping-pong em casos práticos quando considera-se o RSSI como métrica. Isto se dá pelo comportamento da série temporal do RSSI, que apresenta grande variabilidade no tempo e ocorrência frequente de vales profundos, o que não é considerado por grande parte dos mecanismos propostos.

Alguns trabalhos também propõem o uso de limiares em conjunto com outras técnicas, como a filtragem [29,31]. Em [29] e [47], os autores propõem o uso de técnicas de predição com filtragem para a inicialização de *handoffs* de forma preventiva e estável. Entretanto, a utilização de filtragem pode aumentar o atraso no disparo de *handoffs* desejados. Tendo isto em vista, o objetivo deste trabalho é aprofundar a avaliação do efeito ping-pong em cenários estáticos e móveis, e propor um novo mecanismo de filtragem que seja capaz de mitigar o problema e ao mesmo tempo reduzir o atraso para a realização do *handoff* em relação a outros mecanismos encontrados na literatura.

Inicialmente, neste trabalho, estudos preliminares relativos ao problema do ping-pong foram realizados utilizando a rede Wi-Fi institucional da Universidade Federal Fluminense (UFF) como estudo de caso. Os resultados mostram a severidade do problema, que ocorre de forma recorrente para uma grande gama de dispositivos de diferentes fabricantes e sistemas operacionais. Uma análise profunda e detalhada do código-fonte que implementa o algoritmo de *handoff* utilizado pelos dispositivos mais populares na rede Wi-Fi UFF mostra que uma das raízes do problema está relacionada à utilização direta de amostras de RSSI na decisão de *handoff*, uma métrica que, conforme será mostrado, possui grande variabilidade no decorrer do tempo. Com base nesta análise, soluções para o problema do ping-pong encontradas comumente na literatura que aplicam margens de histerese e suavização das amostras temporais de RSSI foram implementadas no código analisado para a realização de testes preliminares em redes reais. A partir destes testes, conclui-se que o efeito ping-pong pode ser efetivamente evitado ao utilizar-se estas soluções, porém, em alguns casos, ocasionam atrasos adicionais ao processo, o que é indesejado.

A seguir, em busca de uma solução que possa prover menores atrasos e, ao mesmo

tempo, maior estabilidade, um estudo foi realizado acerca da distribuição temporal do RSSI, para que um filtro adequado para o comportamento deste tipo de sinal fosse elaborado. Este estudo mostrou que a distribuição do RSSI em ambientes *indoor* é multimodal, apresentando modas locais referentes a vales de RSSI que ocorrem com frequência e profundidades variadas, podendo alcançar até 50 dB em certos casos. Além disso, foi verificado que estes vales ocorrem comumente em rajadas de tamanhos pequenos. Tendo este comportamento em vista, o filtro Máximo foi proposto com o objetivo de filtrar estes vales, evitando disparos de *handoff* incorretos. O Máximo é um filtro simples que opera com uma janela deslizante que contém as  $W_s$  últimas amostras de RSSI recebidas pela estação. A partir desta janela, o RSSI máximo é escolhido.

Por fim, emulações baseadas em *traces* de RSSI coletados de redes reais foram realizadas para a comparação do desempenho do Máximo em relação a outros cinco mecanismos de prevenção de ping-pong utilizados comumente na literatura. Os resultados mostram que o Máximo é capaz de oferecer melhor *tradeoff* em relação ao atraso e estabilidade quando comparado com os demais mecanismos em cenários com mobilidade. Além disso, este algoritmo conseguiu evitar 100% dos ping-pongs na maioria dos cenários estáticos testados.

Desta forma, as principais contribuições desta pesquisa são:

- a caracterização e quantificação da ocorrência do efeito ping-pong em uma rede real densa de larga escala e em produção;
- a identificação de uma das raízes do problema com base no código-fonte implementado em grande parte dos dispositivos cliente;
- a realização de testes preliminares para a validação das causas propostas;
- a análise do comportamento da distribuição de probabilidade da série temporal do RSSI;
- a proposta de um mecanismo de filtragem baseado no comportamento da série temporal do RSSI, que pode ser considerada a principal contribuição original deste trabalho; e
- a demonstração de que a solução proposta é efetiva em ambientes reais e apresenta desempenho superior em relação ao mecanismo utilizado em dispositivos atuais e outros mecanismos encontrados na literatura;

O restante do texto está organizado da seguinte forma: para motivar a pesquisa acerca do efeito ping-pong e mostrar que o problema é real e recorrente, o Capítulo 2 apresenta um estudo de caso do problema da instabilidade de associação em uma rede real em produção. Além disso, uma análise do algoritmo de *handoff* utilizado pela maioria dos dispositivos cliente desta rede é realizada e possíveis causas para o problema são apontadas. Por fim, resultados de testes preliminares realizados em redes reais são apresentados, validando as causas apontadas.

Com o objetivo de apresentar propostas de soluções encontradas na literatura, o Capítulo 3 apresenta os trabalhos relacionados ao problema da instabilidade de associação. Além disso, apresenta trabalhos relacionados à métrica de qualidade RSSI, incluindo análises sobre como ela é calculada pelos dispositivos e sobre sua série temporal, facilitando o entendimento de como estas questões podem afetar mecanismos de *handoff*.

Em busca de uma solução que considere características específicas do comportamento da série temporal do RSSI, e seja capaz de proporcionar melhor *tradeoff* em termos de estabilidade e atraso para realização do *handoff*, o Capítulo 4 apresenta a proposta do filtro Máximo, incluindo uma análise do comportamento da série temporal do RSSI para motivar a proposta.

Para comparar o desempenho do Máximo com outras propostas encontradas na literatura, o Capítulo 5 apresenta resultados de testes realizados com base em *traces* de RSSI obtidos em redes reais, referentes a cenários com e sem mobilidade.

Por fim, o Capítulo 6 apresenta as considerações finais do trabalho e ideias para trabalhos futuros.

## Capítulo 2

# Um estudo de caso da instabilidade de associação em uma rede IEEE 802.11 densa em produção

Neste capítulo, a rede IEEE 802.11 institucional de produção da UFF, denominada Wi-Fi UFF, será utilizada como estudo de caso para demonstrar a severidade do efeito ping-pong, que, conforme será visto, é recorrente para uma ampla gama de dispositivos de diferentes fabricantes e sistemas operacionais.

A partir de uma profunda análise do código-fonte que implementa o algoritmo de *handoff* utilizado pelos dispositivos mais populares na rede Wi-Fi UFF, será mostrado que uma das causas do problema é o uso direto de amostras de RSSI para a tomada da decisão de *handoff*. Conforme será mostrado no Capítulo 4, a série temporal do RSSI apresenta alta variabilidade com o tempo em ambientes internos, apresentando desvanecimentos rápidos profundos (vales) frequentes, que devem ser considerados pelo mecanismo de *handoff* para que o efeito ping-pong seja mitigado.

### 2.1 Descrição da rede Wi-Fi UFF e definição dos parâmetros para caracterização do ping-pong

A rede Wi-Fi UFF engloba 420 APs instalados em vários *campi* da UFF em Niterói, Rio de Janeiro, Brasil [28]. Estes APs operam com o *firmware* OpenWrt<sup>1</sup> (um sistema operacional Linux embarcado), e utilizam o *daemon* Hostapd<sup>2</sup> para a realização das funções típicas de um AP IEEE 802.11, como o envio de *beacons*, e realização de autenticação

---

<sup>1</sup><https://openwrt.org>

<sup>2</sup><https://wireless.wiki.kernel.org/en/users/documentation/hostapd>

e associação dos dispositivos cliente. Este *daemon* gera *logs* para cada evento de autenticação, desautenticação, associação ou desassociação, que, por sua vez, são enviados a um servidor central de *logs* da rede. Através da análise destes *logs*, se torna possível a avaliação do momento no qual uma STA particular se conectou ou se desconectou de um AP.

Para a análise apresentada neste capítulo, *logs* correspondentes a um período de 26 dias foram coletados e analisados. As análises foram realizadas considerando-se os seguintes eventos que definem o ciclo de vida de conexão de uma STA a um AP: (1) autenticação da STA; (2) associação da STA; (3) autenticação WPA2 Enterprise [17] da STA; (4) desassociação ou desautenticação da STA. Neste trabalho, uma conexão<sup>3</sup> de uma STA a um AP ocorre se um dos eventos de autenticação ou associação é encontrado nos *logs*. De forma similar, uma desconexão da STA ocorre se um dos eventos de desassociação ou desautenticação é encontrado nos *logs*.

A Tabela 2.1 apresenta a descrição dos parâmetros utilizados para a caracterização do ping-pong realizada neste trabalho. Estes parâmetros também estão ilustrados na Figura 2.1 para facilitar o entendimento.

Para que um ping-pong ocorra, um determinado número sucessivo de *handoffs* deve ocorrer em um determinado período de tempo. Nesta análise, o *handoff* é definido como a desconexão espontânea de uma STA de um AP prévio prosseguida por uma conexão a um novo AP. Ou seja, caso uma STA se desassocie de um AP prévio e se associe à rede novamente no dia seguinte, este evento não será considerado um *handoff*.

O mecanismo de *handoff* varia de acordo com diferentes fabricantes e configurações de *software*. Estudos anteriores, como o de [30], mostram que diferentes dispositivos podem apresentar diferentes comportamentos ao realizar o processo, resultando em diferentes durações no intervalo de desconexão. Para levar em consideração esta variação, o parâmetro *Zmax* é empregado na caracterização do ping-pong. Este parâmetro define o intervalo de tempo máximo entre uma desconexão de um AP prévio e uma conexão subsequente a um novo AP que caracteriza um *handoff*. Em outras palavras, se este intervalo, denotado por *Z*, for maior do que *Zmax*, estes eventos não configuram um *handoff*, e, portanto, não poderão ser considerados em um ping-pong.

Para o ping-pong ocorrer, é necessário que a STA permaneça conectada por um “curto

---

<sup>3</sup>Como nos *logs* analisados um evento de associação pode se referir tanto a uma associação inicial da STA ao AP quanto a uma reassociação, neste trabalho o termo “conexão” será utilizado para denotar ambas.

Tabela 2.1: Descrição dos parâmetros de caracterização do ping-pong.

| Parâmetro | Descrição                                                                                                                                                       | Valor             |
|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|
| $X_{max}$ | Intervalo de tempo máximo entre o momento no qual a STA se conecta a um AP e o momento no qual ela se conecta ao próximo AP para a caracterização do ping-pong. | 35 segundos       |
| $Z_{max}$ | Intervalo de tempo máximo entre a desconexão de um AP prévio e a conexão a um novo AP que caracteriza um <i>handoff</i> .                                       | 2 segundos        |
| $N_{min}$ | Número mínimo de <i>handoffs</i> consecutivos que devem ocorrer, respeitando $X_{max}$ e $Z_{max}$ , para a caracterização do ping-pong.                        | 2 <i>handoffs</i> |

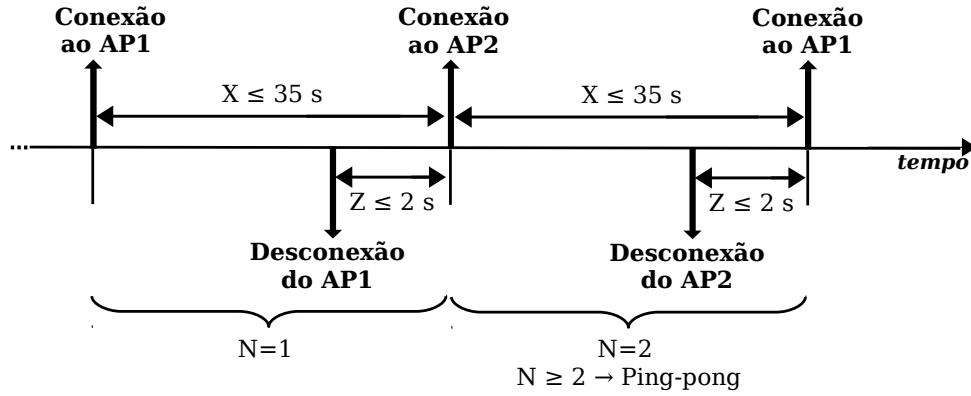


Figura 2.1: Ilustração dos intervalos de tempo considerados na caracterização do ping-pong.

intervalo de tempo” ao AP prévio. A definição do que seria “curto intervalo de tempo” é subjetiva e deve levar em consideração a degradação da qualidade do acesso à rede percebida pelo usuário. Nesta análise, este intervalo de tempo, denotado por  $X$ , é limitado por  $X_{max}$ , que define o intervalo de tempo máximo entre conexões consecutivas a diferentes APs que caracteriza a ocorrência de um ping-pong.

Além disso, o número  $N$  de *handoffs* consecutivos respeitando estes limiares de tempo deve ser, ao menos,  $N_{min}$  para que um ping-pong seja caracterizado. É importante notar que um ping-pong pode envolver um número variável de APs, tendo em vista que uma STA poderá estar no alcance de vários APs do mesmo ESS e realizar *handoffs* entre eles. Então, o número de APs diferentes envolvidos em eventos de ping-pongs não foi limitado.

Conforme apresentado na Tabela 2.1, neste trabalho, os valores utilizados para os parâmetros descritos anteriormente foram:  $X_{max} = 35$  segundos;  $Z_{max} = 2$  segundos,  $N_{min} = 2$  *handoffs*.  $Z_{max}$  foi escolhido tendo como base intervalos de *handoff* reportados em trabalhos anteriores, como em [8, 30]. Uma margem foi adicionada considerando-se variações no intervalo de *handoff* que podem ocorrer para diferentes dispositivos<sup>4</sup>. O valor

<sup>4</sup>Em [8], um intervalo  $Z_{max}$  médio de 0,78 segundos foi reportado para uma interface Intel PRO/Wireless 2200bg.

de  $X_{max}$  foi escolhido com base em um intervalo de varredura espectral (*scan*) extremo que pode ser observado em sistemas Linux, nos quais a varredura, que é seguida por uma decisão de *handoff*, é realizada a cada 30 segundos em casos nos quais a qualidade da conexão é considerada ruim. O valor de  $N_{min}$  foi escolhido considerando-se que, se um segundo *handoff* ocorreu em um intervalo de tempo curto em relação ao anterior, um destes *handoffs* não foi necessário.

Desta forma, um ping-pong é caracterizado se uma STA realiza  $N = 2$  ou mais *handoffs*, enquanto o intervalo entre conexões a APs subsequentes não exceda  $X = 35$  segundos e o tempo de desconexão entre APs não exceda  $Z = 2$  segundos.

## 2.2 Análise da ocorrência do ping-pong

Durante as análises da rede Wi-Fi UFF em produção, um total de 17.880 STAs com ao menos um ciclo de conexão e com credenciais de acesso à rede foram registradas. A Figura 2.2 mostra, para cada dia analisado, a porcentagem destas STAs que experimentaram ao menos um ping-pong. Os resultados mostram que ping-pongs ocorreram com menor frequência em finais de semana, que correspondem aos dias 4, 5, 11, 12, 18, 19, 25 e 26. Nos outros dias, exceto no dia 9, ping-pongs foram observados para mais de 50% das STAs.

Uma explicação para o maior número de ping-pongs observados nos dias de semana é o movimento de pessoas e objetos no ambiente analisado. Este movimento, que é mais frequente nos dias de semana em relação aos finais de semana, pode ocasionar variações momentâneas na qualidade dos enlaces entre STAs e APs, estimulando a ocorrência de ping-pongs.

Outra questão que pode influenciar a ocorrência de ping-pongs é o aumento no tempo

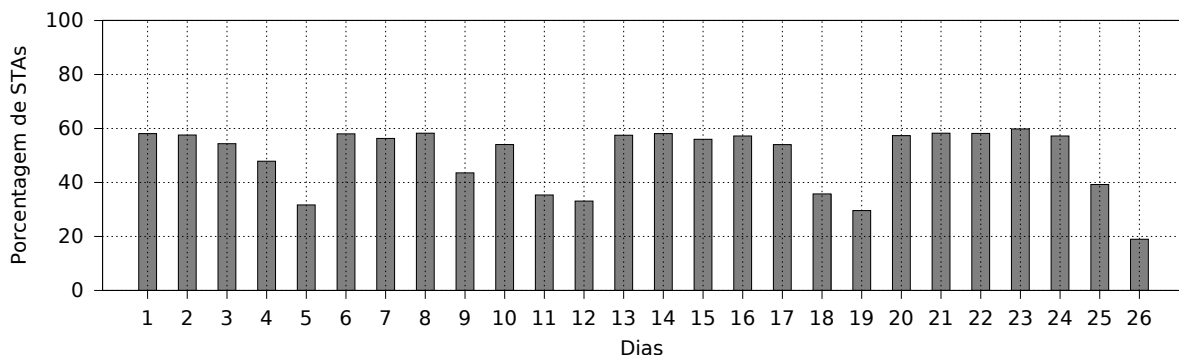
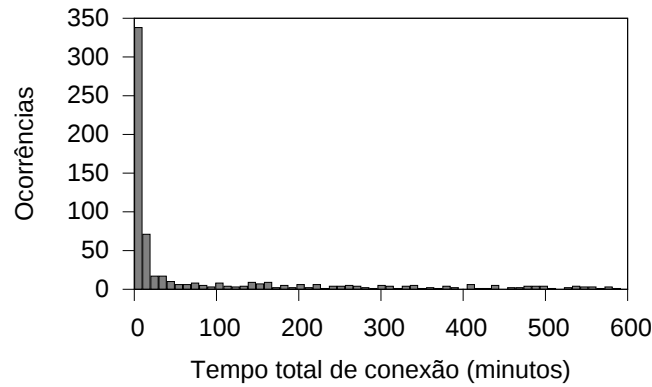
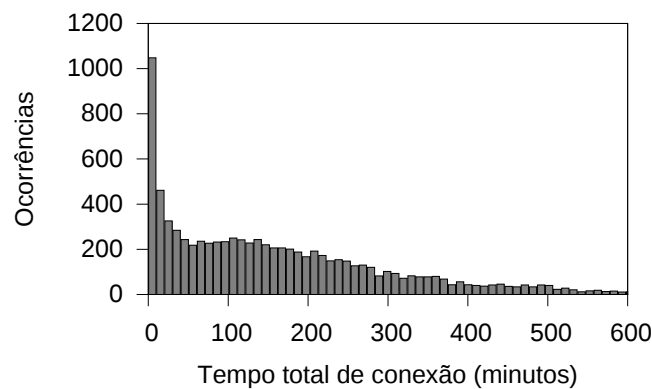


Figura 2.2: Porcentagem de STAs que experimentaram ping-pong em cada dia.



(a) Dia 5: final de semana.



(b) Dia 6: dia de semana.

Figura 2.3: Distribuição do tempo total de conexão das STAs em dois dias distintos: (a) dia 5, que corresponde a um dia de final de semana; e (b) dia 6, que corresponde a um dia de semana.

total de conexão observado para as STAs. O *tempo total de conexão* de uma STA em um dado dia é definido como a soma da duração de cada conexão desta STA com a rede durante este dia. Este aumento no tempo de permanência no ambiente aumenta a possibilidade de que a STA experimente um ping-pong. A Figura 2.3 mostra a distribuição do tempo total de conexão das STAs em dois dias diferentes: o dia 5 (Figura 2.3 (a)), que corresponde a um dia do final de semana; e dia 6 (Figura 2.3 (b)), que corresponde a um dia de semana. Comparando-se os resultados, pode-se notar que, no dia de semana, um número maior de STAs se conectou à rede e o tempo total de conexão foi maior para um número maior de STAs. Por outro lado, no dia de final de semana, um menor número de STAs se conectou à rede, e poucas delas utilizaram a rede por longos períodos de tempo. Esta tendência pode ser observada para os demais dias relativos aos fins de semana.

A Tabela 2.2 mostra dados relacionados à ocorrência de ping-pongs para STAs que permaneceram conectadas à rede por menos de 30 minutos e por mais de 30 minutos. Embora este valor de 30 minutos tenha sido escolhido arbitrariamente, ele ajuda a ilustrar

a correlação entre o tempo total de conexão e a ocorrência de ping-pong. Os resultados mostram que a ocorrência de ping-pongs é maior para STAs com tempo total de conexão acima de 30 minutos, e é menor para o caso oposto. Numericamente, no final de semana (dia 5), apenas 40,80% das STAs permaneceram conectadas por mais de 30 minutos. Destas, 51,86% experimentaram ping-pong. No dia de semana (dia 6), 78,48% das STAs permaneceram conectadas por mais de 30 minutos, e 66,54% delas experimentaram ping-pong. No dia do final de semana, 59,20% das STAs permaneceram conectadas por menos do que 30 minutos e apenas 17,75% destas experimentaram ping-pongs. No dia de semana, apenas 21,52% das STAs permaneceram conectadas por menos de 30 minutos, e somente 27,00% destas experimentaram ping-pongs.

Tabela 2.2: Análise da ocorrência do ping-pong em um dia de semana *vs.* um dia de final de semana e sua relação com o tempo total de conexão.

| Dia                     | Porcentagem de STAs afetadas | Tempo total de conexão > 30 min. | Tempo total de conexão > 30 min. com ping-pongs | Tempo total de conexão ≤ 30 min. com ping-pongs |
|-------------------------|------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| dia 5 (final de semana) | 31,67%                       | 40,80%                           | 51,86%                                          | 17,75%                                          |
| dia 6 (dia de semana)   | 58,03%                       | 78,48%                           | 66,54%                                          | 27,00%                                          |

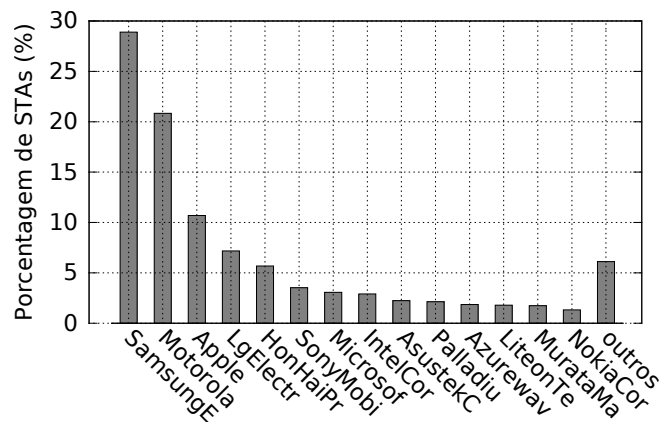
A Figura 2.4 apresenta estatísticas relacionadas aos fabricantes das STAs encontradas na rede Wi-Fi UFF. Nesta análise, a base de dados provida pelo Wireshark<sup>5</sup> em conjunto com um programa analisador<sup>6</sup> foram utilizados para identificar o fabricante de cada STA. Esta base de dados é baseada em registros do IEEE que relacionam o endereço MAC da STA com seu respectivo fabricante. Os gráficos mostram resultados para os fabricantes líderes. A Figura 2.4 (a) apresenta a distribuição de STAs por fabricantes. Dispositivos da Samsung, Motorola, Apple e LG são os mais frequentes, totalizando aproximadamente 70% das STAs. A Figura 2.4 (b) apresenta, para cada fabricante, a porcentagem de suas respectivas STAs que experimentaram ao menos um ping-pong. A ocorrência do ping-pong foi comum dentre os diferentes fabricantes, e ocorreu para mais de 70% das STAs dos principais fabricantes (Samsung, Motorola, Apple e LG).

Além da análise realizada utilizando-se os *logs* gerados pelo Hostapd, *logs* gerados pelos servidores DHCP (*Dynamic Host Configuration Protocol*) da rede foram analisados para o mesmo intervalo de dias. A informação avaliada destes *logs* contém os *hostnames* requeridos por cada STA. Tendo em vista que dispositivos móveis comumente utilizam *hostnames* que seguem determinados padrões, esta informação foi utilizada para inferir o sistema operacional (SO) das STAs e gerar estatísticas relacionadas a este parâmetro.

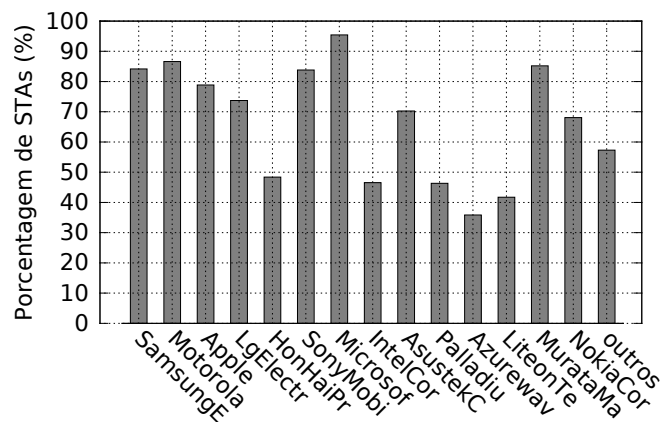
A Figura 2.5 (a) apresenta a distribuição das STAs de acordo com seus respectivos

<sup>5</sup><https://www.wireshark.org/tools/oui-lookup.html>

<sup>6</sup><https://github.com/coolbho3k/manuf.py>



(a) Distribuição dos dispositivos pelos fabricantes.



(b) Porcentagem de dispositivos que experimentaram ping-pong.

Figura 2.4: (a) Distribuição dos dispositivos pelos fabricantes mais populares encontrados na rede Wi-Fi UFF; (b) Porcentagem de dispositivos que experimentaram ping-pong para cada fabricante.

sistemas operacionais. Aproximadamente 65% das STAs utilizam o sistema Android. A coluna “Indefinidos” refere-se a STAs cujo *hostname* não segue um padrão conhecido. A Figura 2.5 (b) apresenta a porcentagem de STAs, para cada sistema operacional, que foi afetada por pelo menos um ping-pong durante o período analisado. Pode-se concluir que o ping-pong foi comum para todos os sistemas operacionais listados, e ocorreu para aproximadamente 80% dos dispositivos Android, que são os mais comumente encontrados na rede analisada.

A Figura 2.5 (c) apresenta a distribuição de STAs com respeito à mobilidade, enquanto a Figura 2.5 (d) apresenta a porcentagem de STAs estáticas e móveis que experimentaram ao menos um ping-pong durante o período avaliado. STAs com sistemas operacionais Apple OS X e indefinidos foram consideradas estáticas. Foi assumido que sistemas indefinidos correspondem a sistemas com *hostname* facilmente configurável pelo usuário, que são co-

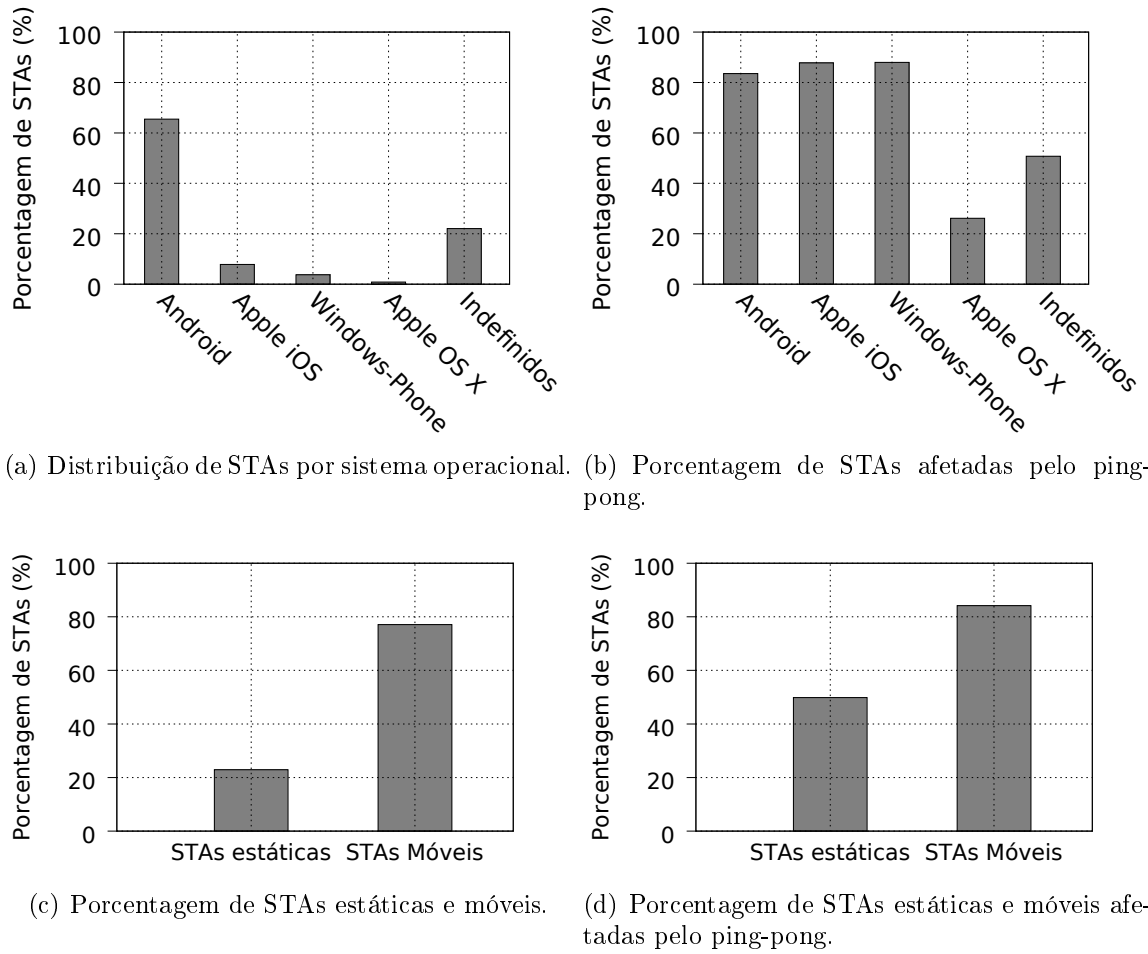


Figura 2.5: (a) Distribuição de STAs por sistema operacional; (b) porcentagem de STAs afetadas pelo ping-pong para cada sistema operacional; (c) porcentagem de STAs estáticas e móveis encontrados na rede; (d) porcentagem de STAs estáticas e móveis afetadas pelo ping-pong.

mumente sistemas operacionais Windows e Linux. As STAs com sistemas operacionais Windows-Phone, Apple iOS e Android foram consideradas móveis. Os resultados mostram que aproximadamente 79% das STAs são móveis. Destas STAs, 82% foram afetadas pelo ping-pong. Surpreendentemente, por volta de 50% de STAs estáticas também foram afetadas pelo ping-pong. Em outras palavras, o ping-pong ocorre também para STAs estáticas, porém a mobilidade desempenha um papel importante em sua ocorrência.

STAs que foram afetadas por ao menos um ping-pong são suscetíveis às desvantagens que podem ser ocasionadas por sucessivos *handoffs* em um ESS. Os resultados apresentados nesta seção mostram que a ocorrência do ping-pong é comum e recorrente na rede analisada.

## 2.3 Análise das causas do ping-pong

Tendo em vista que a decisão do *handoff* é tomada pelas STAs, é intuitivo que a análise do problema do ping-pong seja iniciada nestes dispositivos. Um bom ponto de partida é a avaliação do mecanismo de *handoff* implementado em dispositivos Android, considerando-se que este sistema é utilizado por aproximadamente 65% dos dispositivos da rede Wi-Fi UFF, conforme apresentado na Seção 2.2. Além disso, o código-fonte deste sistema é aberto e, com isto, mais acessível em comparação a outros sistemas operacionais como os da Apple e Microsoft. Entretanto, tendo em vista que estes outros sistemas também apresentaram o efeito ping-pong em condições similares, é possível especular que as causas podem ser as mesmas.

Assim como outras distribuições Linux, os sistemas Android comumente utilizam o WPA Supplicant<sup>7</sup> para a realização da autenticação do cliente na rede. Além da autenticação, o WPA Supplicant pode ser configurado para executar *scans* (ou varredura espectral) em busca de APs vizinhos. Após estes *scans*, o *software* decide se o *handoff* entre APs do mesmo ESS deve ocorrer. Em dispositivos móveis, esta configuração é comumente definida pelo fabricante do dispositivo, que pode optar por desabilitá-la. Neste caso, o dispositivo não irá realizar o *handoff* de forma automática, o que efetivamente evitaria o ping-pong. Entretanto, os resultados apresentados na Seção 2.2 sugerem que *handoffs* automáticos são comuns.

A Figura 2.6 apresenta o diagrama de fluxo da decisão de *handoff* do WPA Supplicant. Inicialmente, o WPA Supplicant requer ao *driver* da interface sem fio informações de *scan* para obter dados sobre os APs vizinhos. O *scan* pode ser requisitado diretamente pelo WPA Supplicant ou a partir de outros *softwares*. Quando o WPA Supplicant executa esta função, os *scans* ocorrem em intervalos que variam de acordo com a qualidade de conexão entre a STA e o AP, sendo mais frequentes quando a qualidade da comunicação se torna pior.

Após obter a informação de *scan*, o *software* atualiza sua base de dados local da seguinte forma: se um novo AP (*i.e.*, *Basic Service Set* - BSS) é encontrado, ele é adicionado à base de dados local; se o AP já estiver na base de dados, seus dados antigos, incluindo o valor do RSSI anterior, são sobrescritos pelos valores atuais. A seguir, o WPA Supplicant escolhe um AP candidato para *handoff* dentre os pertencentes ao mesmo ESS ao qual a STA está associada. A escolha é feita a partir de uma lista de prioridades, na qual a

---

<sup>7</sup>[https://wireless.wiki.kernel.org/en/users/documentation/wpa\\_supplicant](https://wireless.wiki.kernel.org/en/users/documentation/wpa_supplicant)

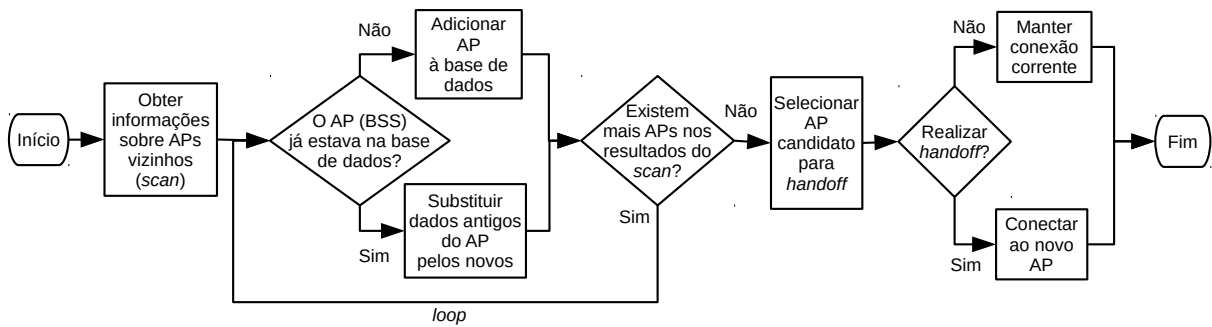


Figura 2.6: Diagrama de fluxo da decisão de *handoff* do WPA Supplicant.

Tabela 2.3: Valor da margem de histerese de RSSI de acordo com a amostra do RSSI do AP corrente.

| RSSI corrente $x$ (dBm) | Margem de histerese de RSSI (dB) |
|-------------------------|----------------------------------|
| $x < -85$               | 1                                |
| $-85 \leq x < -80$      | 2                                |
| $-80 \leq x < -75$      | 3                                |
| $-75 \leq x < -70$      | 4                                |
| $x \geq -70$            | 5                                |

ordenação dos APs é definida de acordo com parâmetros como a segurança suportada, vazão estimada e relação sinal ruído do AP, sendo que estes dois últimos são estimados a partir do RSSI.

Após a escolha do AP candidato, o *software* determina se o *handoff* deve ou não ser realizado. Embora alguns detalhes variem para diferentes versões, a decisão é tomada utilizando-se limiares para prevenir o ping-pong. Os RSSIs dos APs corrente e candidato são comparados de forma que o *handoff* é realizado se o AP candidato tiver RSSI maior do que o do AP corrente e se a diferença entre RSSIs é igual ou maior do que um determinado limiar. Para versões do Android entre 4.4 até 7.1.2, que estão operando atualmente em aproximadamente 83,8% de todos os dispositivos Android<sup>8</sup>, este limiar, que será chamado daqui em diante de *margem de histerese de RSSI*, varia de acordo com a amostra atual do RSSI do AP corrente conforme indicado na Tabela 2.3. Pode-se notar que o maior limiar utilizado pelo *software* é 5 dB para um RSSI corrente acima de -70 dBm, e o limiar diminui conforme o RSSI corrente diminui. Para novas versões do Android entre 8.0 e 9.0, a margem de histerese de RSSI pode alcançar um valor máximo de 15 dB dependendo da estimativa do valor da vazão que, por sua vez, é feita com base no RSSI.

Neste algoritmo, os seguintes fatores favorecem a ocorrência de ping-pongs:

1. Novas amostras de RSSI obtidas em cada *scan* são inseridas na base de dados sem

<sup>8</sup><https://www.bidouille.org/misc/androidcharts> (July 23, 2018)

considerar-se o histórico de RSSI de cada AP. Conforme apresentado no Capítulo 3.2, o RSSI pode variar amplamente, resultando em *handoffs* indesejados; e

2. O valor utilizado para a margem de histerese de RSSI não é suficiente para absorver esta grande variabilidade do RSSI.

## 2.4 Testes preliminares em cenários estáticos

Para verificar se as possíveis causas para o efeito ping-pong apresentadas na Seção 2.3 são verdadeiras, dois testes comparativos foram realizados em uma rede de testes real composta por dois APs e uma STA estática posicionada em uma localização intermediária aos APs, conforme ilustra a Figura 2.7. A STA operou com interface sem fio Broadcom BCM4313, utilizando *driver* *brcmsmac* e sistema operacional Ubuntu 14.04. A versão do WPA Supplicant utilizada nos testes foi a 2.1, que equivale à descrita na seção anterior. Os APs da rede de testes foram TP-LINKs com os seguintes modelos: AP1 - TL-WR740N; AP2 - TL-WR743ND. Ambos os APs operaram com o sistema OpenWrt 14.07.

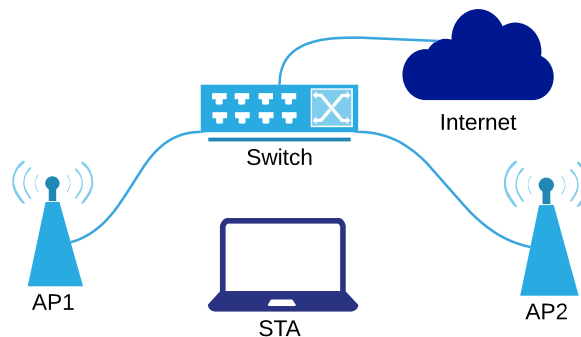


Figura 2.7: Rede de testes utilizada nos testes em cenários estáticos para validação das causas apontadas para o efeito ping-pong.

O primeiro teste buscou verificar a ocorrência de ping-pongs para o algoritmo de *handoff* do WPA Supplicant e duas variações dele. Considerando-se o possível aumento no atraso para realização do *handoff* que pode ser ocasionado pelos novos algoritmos implementados, o segundo teste buscou avaliar o *tradeoff* entre a redução do efeito ping-pong e aumento deste atraso para os mesmos algoritmos testados no primeiro teste.

A Tabela 2.4 sumariza os algoritmos de *handoff* testados. Além do algoritmo original, foram implementados dois algoritmos que abordam as duas premissas apontadas como causas do problema do ping-pong na Seção 2.3, ambos baseados no código original do WPA

Tabela 2.4: Algoritmos de *handoff* utilizados nos testes.

| Algoritmo   | Descrição                                                                                                                                |
|-------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Original    | Algoritmo Original do WPA Supplicant v 2.1.                                                                                              |
| EWMA        | Algoritmo do WPA Supplicant modificado para aplicar a EWMA às amostras de RSSI obtidas no <i>scan</i> com pesos de 0,2, 0,4, 0,6 ou 0,8. |
| Margem fixa | Algoritmo do WPA Supplicant modificado para operar com margem de histerese de RSSI fixa em 10 dB.                                        |

Supplicant. O primeiro algoritmo busca suavizar variações na série temporal do RSSI através do uso da Média Móvel Exponencialmente Ponderada (ou em inglês, *Exponentially Weighted Moving Average* - EWMA). Esta solução, que leva em consideração o histórico do RSSI e foi proposta anteriormente em [37, 47], age como um filtro passa baixa, removendo ruídos de alta frequência e suavizando mudanças abruptas na série temporal do RSSI.

$$s_t = \alpha.s_{t-1} + (1 - \alpha).x_t \quad (2.1)$$

A Equação 2.1 descreve matematicamente a EWMA. Aplicando-se esta técnica de filtragem ao problema da instabilidade de associação, a série temporal  $x$  representa valores de RSSI amostrados em *scans* e a série temporal  $s$  representa a EWMA destes valores, que será efetivamente armazenada na base de dados do WPA Supplicant e utilizada na tomada de decisão de *handoffs*. O momento  $t = 0$  representa a inserção inicial dos dados do AP na base de dados, incluindo o valor original do RSSI amostrado. Conforme indicado na equação, o parâmetro  $\alpha$  define o peso dado a amostras antigas do RSSI. Então, aumentando-se o valor de  $\alpha$ , menor peso será dado à nova amostra, o que aumenta a suavização dos dados. Ao reduzir-se o valor de  $\alpha$ , maior peso é dado a amostras novas do RSSI, aumentando-se a instabilidade da série temporal  $s$ . Para  $\alpha = 0$ , o algoritmo original do WPA Supplicant é obtido. Nos testes, os seguintes valores para  $\alpha$  foram utilizados: 0,2, 0,4, 0,6 e 0,8. A implementação incluiu o arredondamento do valor  $s_t$  para o valor inteiro mais próximo, buscando manter a representação do RSSI como um valor inteiro, assim como são os valores reportados pelo *scan*<sup>9</sup>. Além disso, a margem de histerese original do WPA Supplicant foi mantida nos testes com este algoritmo.

O segundo algoritmo implementado buscou evitar o ping-pong através da utilização de uma margem de histerese de RSSI maior em relação à margem utilizada originalmente pelo WPA Supplicant. Neste algoritmo, o valor fixo de 10 dB foi utilizado para este limiar. Desta forma, nesta versão o *handoff* é realizado se a diferença entre os RSSIs amostrados

<sup>9</sup>Testes em cenários com mobilidade mostraram que este arredondamento ocasiona maior estabilidade à série temporal do RSSI, porém com a desvantagem de gerar grandes atrasos no *handoff* devido à maior lentidão para a convergência do sinal filtrado para o valor do sinal amostrado.

para os APs atual e candidato é maior ou igual a 10. Este novo valor foi escolhido com base em resultados de análises da série temporal do RSSI que serão apresentados no Capítulo 4, mais precisamente na Figura 4.8, na qual, para o ponto de medição A, aproximadamente 50% das amostras de RSSI apresentaram valores entre -30 dBm e -20 dBm, ou seja, com uma amplitude de aproximadamente 10 dB.

Conforme descrito na Seção 2.3, a decisão de *handoff* é sempre feita após um *scan* e a frequência do *scan* varia de acordo com a qualidade da conexão corrente. Para se obter resultados independentes da frequência do *scan*, tendo em vista que este parâmetro não está sob avaliação neste momento, o número de *scans* foi utilizado como métrica nos testes apresentados neste capítulo. Caso o leitor queira converter o resultado obtido em termos do número de *scans* para um intervalo em segundos, basta que o número de *scans* seja multiplicado pelo intervalo entre *scans* dado em segundos.

A partir dos resultados obtidos nos testes que serão apresentados nas Seções 2.4.1 e 2.4.2, foi possível constatar que ambos os algoritmos de margem fixa e o baseado na EWMA foram capazes de reduzir o efeito ping-pong em relação ao algoritmo original. O algoritmo de margem fixa, embora tenha apresentado maior instabilidade em relação ao EWMA, não ocasionou aumento no atraso do *handoff* nos cenários testados. Já o EWMA, apresentou aumento deste atraso na maioria dos casos.

### 2.4.1 Testes de ocorrência de ping-pongs

No decorrer dos testes de ocorrência de ping-pongs, o valor médio das amostras de RSSI recebidas pela STA foi de -57,59 dBm com desvio padrão de 5,97 dB para o AP1 e -49,04 dBm com desvio padrão de 5,47 dB para o AP2. Inicialmente, a STA foi associada a um dos APs e informações sobre *handoffs* entre os dois APs foram coletadas. Estas informações incluem os momentos nos quais a STA realizou *scans* e *handoffs*. A duração total dos testes foi de 5000 *scans* para cada algoritmo testado.

Nesta avaliação, os parâmetros para caracterização do ping-pong definidos na Tabela 2.1 serão utilizados. Como o ping-pong pode ser avaliado para diferentes valores de  $X_{max}$  e  $N_{min}$ , seria interessante definir a percepção do cliente em relação à degradação da qualidade da conexão à rede com respeito a estes parâmetros. Dado que esta análise não é simples, ela não será conduzida aqui. Ao invés disso, valores escolhidos de arbitrariamente, e que representam cenários que podem ser considerados degradantes do ponto de vista da qualidade da conexão observada pelo usuário, serão utilizados. Desta forma, os valores escolhidos para os parâmetros  $X_{max}$  e  $N_{min}$  foram a faixa de valores entre 1 a 5 *scans*

e *handoffs*, respectivamente. A definição de  $Zmax$  não é necessária, tendo em vista que o *log* do WPA Supplicant reporta de forma precisa quando uma conexão a um AP foi de fato ocasionada por um *handoff*.

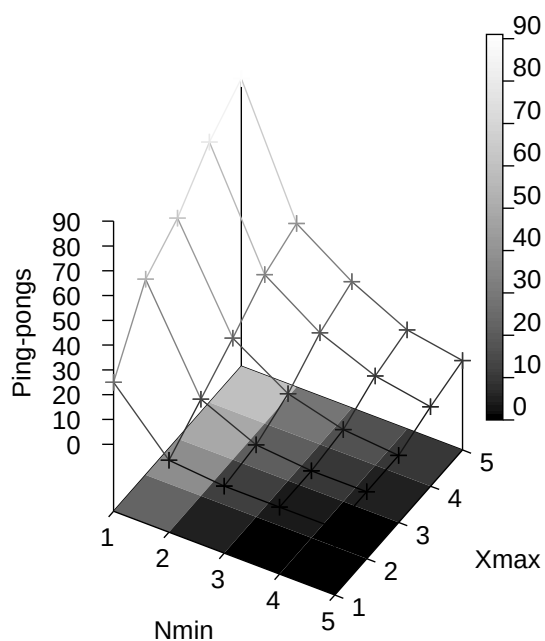
A Figura 2.8 mostra o número de ping-pongs obtido para os algoritmos original (Figura 2.8 (a)), de margem fixa (Figura 2.8 (b)) e EWMA com  $\alpha = 0,2$  (Figura 2.8 (c)) e  $\alpha = 0,4$  (Figura 2.8 (d)). Em todos os gráficos, pode-se observar que, quanto menor o valor de  $Nmin$  e maior o valor de  $Xmax$ , maior será o número de ping-pongs observado. Os algoritmos original (Figura 2.8 (a)) de margem fixa (Figura 2.8 (b)) apresentaram distribuição parecida de ping-pongs em relação aos parâmetros, porém o último apresenta menores números de ocorrências. O primeiro obteve valores entre 0 e 89, enquanto o último obteve valores entre 0 e 22.

Já os algoritmos baseados na EWMA obtiveram relativamente menores números de ping-pongs e todas as ocorrências de ping-pong foram sempre com valores de  $Nmin = 1$ , sugerindo maior estabilidade em relação aos algoritmos baseados puramente em margem de histerese. Este valor de  $Nmin$  representa o cenário clássico do ping-pong, no qual a STA realiza *handoff* após um longo período de estabilidade e, logo a seguir, dentro do intervalo  $Xmax$ , retorna ao AP inicial. O algoritmo EWMA com  $\alpha = 0,2$  (Figura 2.8 (c)) obteve valores de ping-pong entre 0 e 16. Já o EWMA com  $\alpha = 0,4$  (Figura 2.8 (d)) obteve valores entre 0 e 3. Os algoritmos EWMA para os demais valores de  $\alpha$  não apresentaram ping-pongs para os parâmetros avaliados.

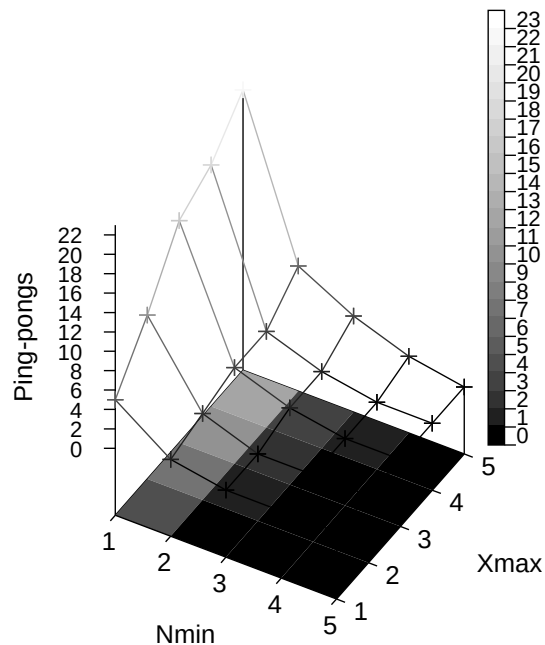
Apesar da redução da ocorrência de ping-pongs com o uso da EWMA, *handoffs* ainda podem ser observados para certos valores de  $\alpha$ . A Tabela 2.5 apresenta, para cada algoritmo, a distribuição do intervalo entre *handoffs* dado em número de *scans*. A última coluna apresenta o número total de *handoffs* observados, que decaiu conforme o valor de  $\alpha$  foi aumentado. Este resultado era esperado, tendo em vista que quanto maior o  $\alpha$ , menor o peso dado para amostras novas de RSSI, tornando mais efetiva a filtragem de variações abruptas momentâneas no RSSI.

As demais colunas da Tabela 2.5 apresentam o número de *handoffs* que ocorreram dentro de um determinado intervalo após a ocorrência anterior. Os resultados mostram que, para o algoritmo original, *handoffs* ocorrem mais frequentemente em curtos intervalos de tempo, isto é, em intervalos de 1 ou 2 *scans*. Isto pode ser explicado pela ocorrência de variações abruptas no RSSI amostrado tanto para o AP corrente, quanto para o AP candidato, que podem ocasionar ping-pongs. Os algoritmos original, de margem fixa e o baseado na EWMA com  $\alpha = 0,2$  apresentaram comportamento semelhante em relação às

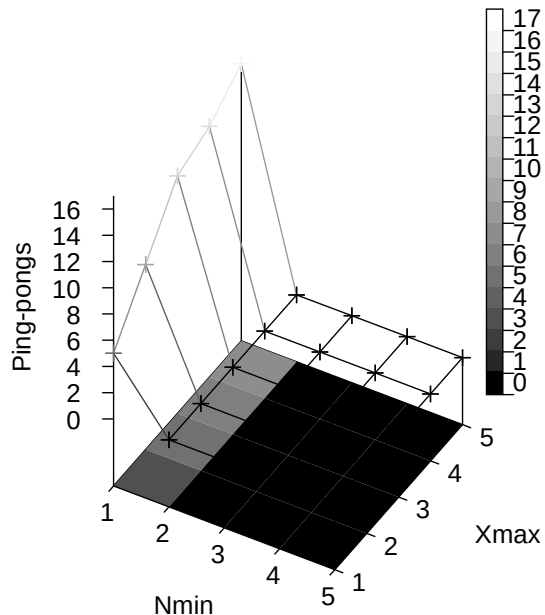




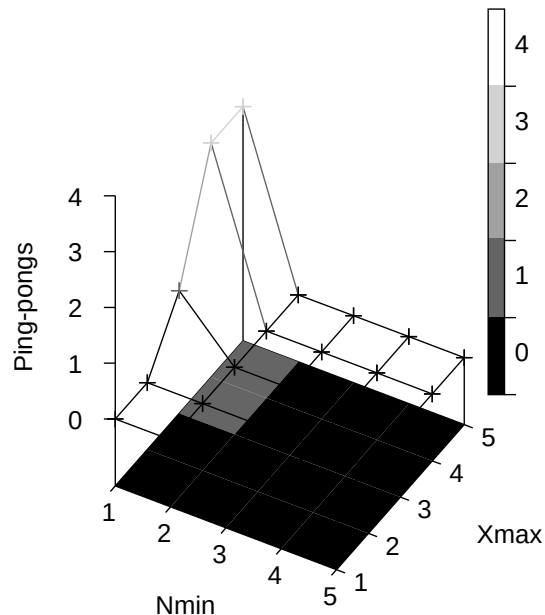
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 2.8: Número de ping-pongs observados em função de  $Nmin$  e  $Xmax$  para: (a) algoritmo original; (b) algoritmo de margem fixa; (c) algoritmo EWMA com  $\alpha = 0,2$ ; e (d) algoritmo EWMA com  $\alpha = 0,4$ . Os demais algoritmos não estão representados porque não obtiveram ping-pongs para os parâmetros escolhidos.

ocorrências de *handoff*. Ambos apresentaram ocorrências em uma larga faixa de intervalos, e de forma distribuída. Para valores maiores de  $\alpha$ , a EWMA apresentou um número menor de *handoffs*, resultando em zero *handoffs* para  $\alpha = 0,8$ .

Os *handoffs* ocorridos para  $\alpha = 0,6$  não caracterizaram ping-pongs para os valores de  $X_{max}$  avaliados anteriormente. Entretanto, caso valores  $X_{max} \geq 10$  fossem utilizados para caracterização, ping-pongs seriam observados. A ocorrência de ping-pongs para altos valores de  $X_{max}$  e altos valores de  $\alpha$  pode ser explicada pelo maior tempo necessário para a estabilização do sinal após uma grande variação do RSSI amostrado para um determinado AP. Como o filtro é lento, esta estabilização demora mais em relação aos filtros com valores de  $\alpha$  menores. Desta forma, filtros lentos apresentam a desvantagem de atrasar o retorno da STA ao seu AP original no caso da ocorrência de um ping-pong. Neste intervalo em que a STA que permanece associada a outro AP, ela pode experimentar um menor nível de RSSI em relação ao AP original, o que pode degradar momentaneamente a qualidade da conexão.

### 2.4.2 Testes de *Tradeoff* entre atraso e estabilidade

Embora a aplicação da EWMA ao algoritmo do WPA Supplicant tenha mitigado o efeito ping-pong no cenário de testes estático apresentado na Seção 2.4.1, sua implementação apresenta a desvantagem esperada de apresentar atraso na reação da STA em casos nos quais o *handoff* é, de fato, desejado. Alguns exemplos são cenários nos quais a STA está se movendo e o *handoff* é benéfico, ou nos quais o RSSI amostrado para o AP corrente decai devido a algum fator permanente, como uma falha ou a inserção de algum obstáculo ao sinal deste AP no ambiente.

Para quantificar o atraso  $\Delta t$  ocasionado pelo uso do EWMA, testes foram conduzidos na mesma rede de testes descrita na Seção 2.4.1, ilustrada na Figura 2.7. Entretanto, neste cenário, as potências de transmissão dos APs ( $P_{Tx}$ ) foram configuradas para serem alteradas automaticamente, conforme mostra a Figura 2.9.

No momento  $t_0$ , o AP1 foi configurado para operar com  $P_{Tx} = 16$  dBm, e o AP2 com  $P_{Tx} = 0$  dBm. Após um curto intervalo de tempo, no momento  $t_1$ , a STA se conectou pela primeira vez à rede. O AP escolhido neste caso foi AP1, por apresentar maior RSSI. Para simular a deterioração da qualidade de comunicação, no momento  $t_2$ , o AP1 foi configurado para operar com  $P_{Tx} = 0$  dBm e AP2 com  $P_{Tx} = 16$  dBm, ou seja, os níveis de potência dos APs foram invertidos. Com isto, após um certo intervalo de tempo  $\Delta t_1$ , a STA realizou o *handoff* do AP1 para o AP2 no momento  $t_3$ . A seguir, este processo

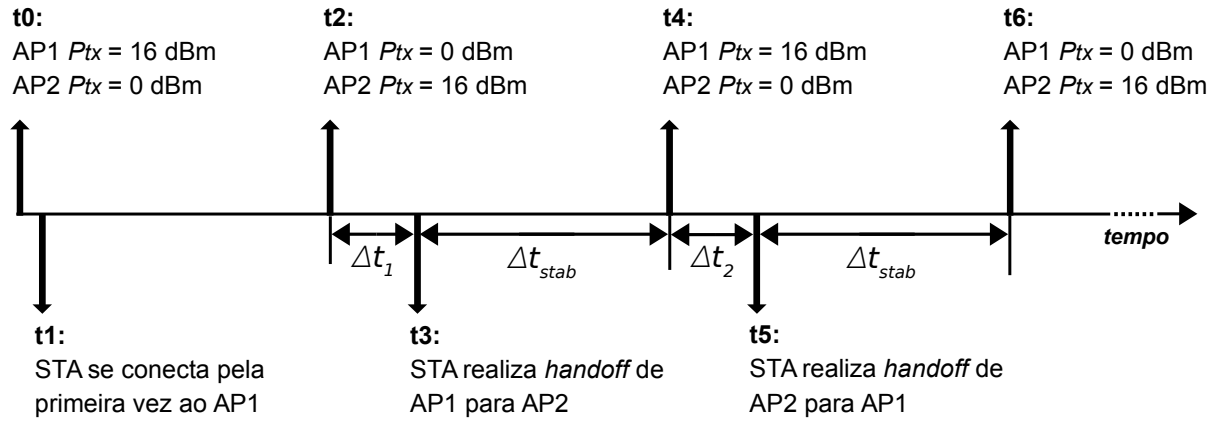


Figura 2.9: Ilustração dos intervalos de tempo considerados nos testes de *tradeoff*.

Tabela 2.6: Valores médio do RSSI em dBm recebidos pela STA dos APs.

| AP \ $P_{Tx}$ | 0 dBm             | 16 dBm            |
|---------------|-------------------|-------------------|
| AP1           | $-60,28 \pm 4,00$ | $-45,88 \pm 6,27$ |
| AP2           | $-56,19 \pm 5,68$ | $-42,58 \pm 7,19$ |

de inversão das potências de transmissão dos APs foi repetido, ou seja, no momento  $t4$ , o AP2 operou com 0 dBm e AP1 com 16 dBm. Desta forma, após um intervalo  $\Delta t_2$ , a STA fez um novo *handoff* de AP2 para AP1 no momento  $t5$ . A partir de  $t6$ , o mesmo processo de inversão de potências foi repetido de forma que o teste pudesse ser realizado diversas vezes consecutivamente.

Alguns cuidados foram tomados no decorrer dos testes. Primeiro, nos momentos  $t0$ ,  $t2$ ,  $t4$ ,  $t6$ , e assim por diante, as alterações das potências de transmissão foram realizadas simultaneamente (ou com um intervalo de tempo negligenciável) para ambos os APs. Segundo, para que as alterações na potência de transmissão fossem realizadas somente quando o cenário estivesse estável, um intervalo de tempo de estabilização foi aguardado, denominado  $\Delta t_{stab}$  na Figura 2.9. O cenário foi considerado estável no momento em que o RSSI filtrado se tornou semelhante ao RSSI amostrado.

Estes testes representam, por exemplo, cenários nos quais o AP ao qual a STA encontra-se atualmente associada falha, e um segundo AP aumenta sua potência para prevenir o surgimento de uma falha na cobertura da rede ocasionada pela falha do primeiro AP. Os valores médio e desvio padrão do RSSI amostrado pela STA para cada AP durante os testes estão apresentados na Tabela 2.6. Estes valores foram obtidos para aproximadamente 4.000 amostras de RSSI coletadas em *scans* pelos algoritmos durante os testes.

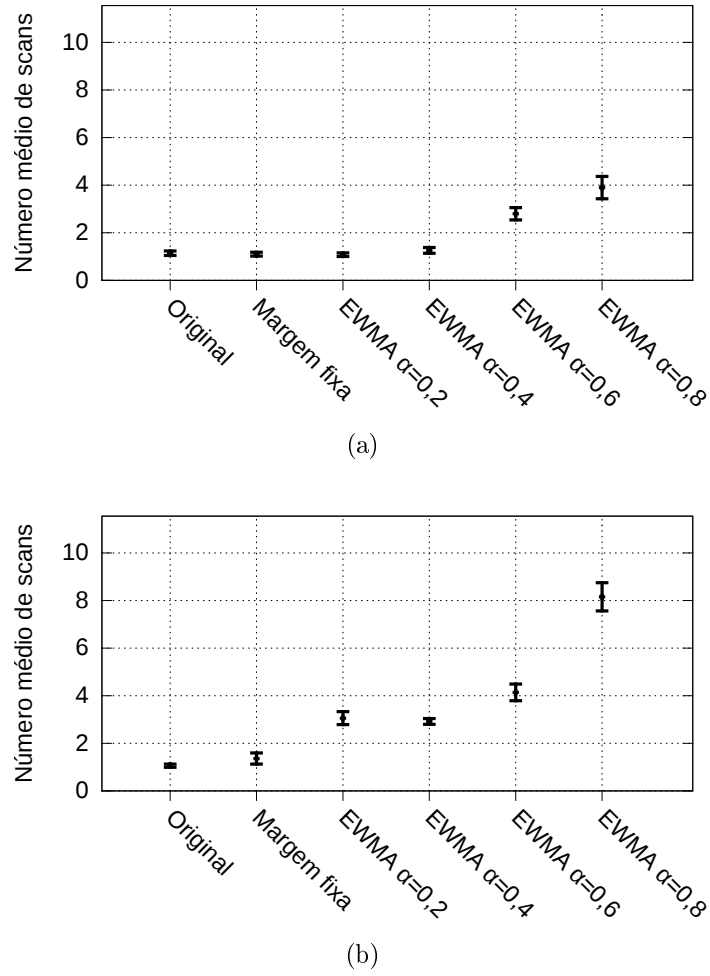


Figura 2.10: Número médio de *scans* requeridos para que o *handoff* ocorra nos testes (a) de AP1 para AP2 e (b) de AP2 para AP1.

Os intervalos de tempo  $\Delta t_1$  e  $\Delta t_2$  foram obtidos sequencialmente para cada um dos algoritmos listados na Tabela 2.4. A Figura 2.10 apresenta os resultados obtidos utilizando-se como métrica o número de *scans*, como na Seção 2.4.1. Para cada algoritmo, 50 amostras de  $\Delta t_1$  e  $\Delta t_2$  foram coletadas. As barras de erro são dadas pelo intervalo de confiança de 95%. A Figura 2.10 (a) apresenta o número médio de *scans* obtidos para a realização do *handoff* do AP1 para o AP2, e a Figura 2.10 (b) apresenta os resultados para *handoffs* do AP2 para o AP1. Como o RSSI amostrado não é o mesmo para ambos os APs, dois cenários diferentes podem ser definidos, com resultados diferentes para cada um deles.

Em ambos os cenários, pode-se observar que, para os algoritmos original e de margem fixa, o *handoff* ocorreu depois do primeiro *scan* na maioria dos casos. Ou seja, nestes cenários, o algoritmo de margem fixa pode ser utilizado para reduzir o efeito ping-pong sem ocasionar atraso adicional no *handoff* em relação ao algoritmo original. Uma pequena variância pode ser observada nos resultados porque, em certos momentos, a STA não

realizou o *handoff* após o primeiro *scan* devido a variações do sinal recebido. Tipicamente, quando esta variação ocorre, o *handoff* é realizado logo após o próximo *scan*, ou seja, após o segundo *scan*.

Nos resultados apresentados na Figura 2.10 (a), pode-se notar que o número médio de *scans* necessários pelo algoritmo EWMA com  $\alpha = 0,2$  e  $0,4$  foi por volta de 1, ou seja, valor similar ao obtido pelo algoritmo original. Então, neste cenário, o EWMA com  $\alpha \leq 0,4$  pode ser utilizado para prevenir ping-pongs sem ocasionar maiores atrasos na execução de *handoffs* desejados. Por outro lado, o algoritmo EWMA com  $\alpha = 0,6$  e  $0,8$  apresentou atrasos mais elevados em relação ao algoritmo original requerendo, respectivamente, por volta de 3 e 4 *scans* para realizar o *handoff*.

Nos resultados apresentados na Figura 2.10 (b) para *handoffs* do AP2 para AP1, pode-se observar que maiores atrasos foram obtidos para EWMA em relação ao cenário anterior, e este atraso aumentou muito para maiores valores de  $\alpha$ . Por exemplo, para  $\alpha = 0,8$ , o número médio de *scans* dobrou de 4 para 8. Entretanto, para EWMA com  $\alpha = 0,2$  e  $0,4$ , o número médio de *scans* extras necessários para *handoff* comparando-se com o algoritmo original, foi de apenas 2 aproximadamente.

O aumento do número médio de *scans* necessários para a realização do *handoff* pode ser considerado mais ou menos degradante de acordo com o intervalo entre *scans* observados. Caso o RSSI seja monitorado em tempo real, por exemplo, em intervalos de 100 ms entre *beacons*, um atraso extra de 2 *scans* representaria um intervalo de tempo de 200 ms, que pode ser considerado pequeno de certa forma. Por outro lado, caso o RSSI seja amostrado com frequência menor, este mesmo atraso de 2 *scans* será mais degradante porque o cliente permanecerá associado ao AP com menor RSSI por um maior intervalo de tempo até que o *handoff* seja iniciado.

Neste trabalho, a forma da execução do *scan* não será estudada. Porém, trabalhos relacionados, como os de [11, 36, 39, 46, 49, 50], indicam maneiras de se realizar o *scan* de forma a reduzir as desvantagens do processo e ao mesmo tempo reduzir o tempo de *handoff*. No caso do WPA Supplicant, o *scan* é realizado em intervalos que podem ser definidos pelo usuário de acordo com o RSSI amostrado para o AP atual. Entretanto, os intervalos estão na faixa dos segundos e não milissegundos. Por exemplo, nos testes realizados aqui, a maioria dos *scans* foi realizada em intervalos de 120 segundos. Neste caso em especial, reduzir o atraso para execução do *handoff* se torna muito importante.

Os resultados apresentados mostram que, nos cenários testados, o uso do algoritmo EWMA pode não ocasionar atrasos dependendo do valor  $\alpha$  utilizado, porém isto não

pode ser garantido para todos os cenários nem para valores maiores de  $\alpha$ . Para uma melhor avaliação dos *tradeoffs* da solução, a execução de testes em outros cenários, como os que incluem mobilidade, foi realizada nesta tese e os resultados serão apresentados no Capítulo 5.

# Capítulo 3

## Trabalhos Relacionados

Este capítulo apresenta trabalhos relacionados ao problema da instabilidade de associação em redes IEEE 802.11, incluindo trabalhos de análise de ocorrência do problema e trabalhos que propõem soluções para a questão. Por fim, trabalhos que tratam do RSSI serão apresentados, incluindo os que descrevem como diferentes fabricantes o calculam e o comportamento de sua série temporal, tendo em vista que esta métrica é utilizada por grande parte dos mecanismos de *handoff* encontrados na literatura e por dispositivos atuais. Esta análise busca o entendimento de como o RSSI pode afetar algoritmos de *handoff*, em busca da solução do problema da instabilidade.

### 3.1 Trabalhos relacionados ao problema da instabilidade de associação

O processo de *handoff* pode ser dividido em quatro fases: a primeira fase define quando a STA deve executar o *handoff* (fase de *triggering*); na segunda fase, a STA executa a descoberta de APs vizinhos; na terceira fase, a STA escolhe um novo AP (o AP pretendente); finalmente, na quarta fase, a STA realiza a troca de quadros com o AP pretendente para realizar o *handoff* [29].

Alguns trabalhos, como os de [30], caracterizam o *handoff* em termos do tempo necessário para a sua execução e o comportamento de diferentes dispositivos. Outros, como os de [36] e [15], buscam amenizar os inconvenientes causados pelo *handoff* através do emprego de técnicas para reduzir o tempo necessário para realização de suas diferentes etapas. O IEEE 802.11r [17] também tem como objetivo a realização de *handoffs* rápidos e, para este fim, utiliza métodos para reduzir o número de mensagens de autenticação trocadas no processo.

De fato, a redução do tempo necessário para a migração suaviza os inconvenientes ocasionados pelo efeito ping-pong, porque torna o processo de *handoff* menos custoso para a estação. No entanto, isso não extingue o problema, isto é, a conectividade é momentaneamente interrompida por *handoffs* consecutivos, as conexões ativas podem ser quebradas e energia será gasta para a realização de migrações desnecessárias.

Os trabalhos de [34,35] destacam o problema dos *handoffs* frequentes em redes densas através de análise com base em quadros capturados durante uma conferência. Neste cenário, no qual muitos usuários se conectam ao mesmo AP ao mesmo tempo, a principal causa do problema apontada pelos autores foi a alta taxa de colisões, que ocasionam perdas de quadros e o consequente *handoff* da STA para um novo AP em busca de um melhor desempenho. Neste caso, a tentativa de *handoff* ocorre porque a STA entende a perda de quadros como uma desconexão. Entretanto, caso este novo AP não exista, a STA acaba se reconectando novamente ao mesmo AP antigo, gerando *overhead* desnecessário de quadros de gerência na rede.

O trabalho de [38] também avalia o efeito ping-pong em uma rede de larga escala em produção, entretanto, baseia-se em dados obtidos a partir de um *software* instalado nos dispositivos clientes. Os autores apontam que, além das colisões, o uso de múltiplos SSIDs pelos APs e o mecanismo de *band steering*<sup>1</sup>, através do qual APs direcionam STAs que suportam múltiplas bandas de operação a se associar na faixa de 5 GHz em busca de melhor desempenho, também podem ocasionar o problema. Em [23] os autores também concluem que *handoffs* ocorrem de forma excessiva na rede avaliada, trazendo a necessidade de mecanismos de *handoff* mais estáveis. Nesse trabalho, a avaliação foi realizada através de *logs*, capturas e mensagens SNMP (*Simple Network Management Protocol*).

Nesta tese, resultados apresentados no Capítulo 2 e publicados em [5] mostraram que, para a maior parte dos dispositivos encontrados na rede Wi-Fi UFF, migrações desnecessárias também podem ser ocasionadas pela grande variação de RSSI que não é considerada pelo algoritmo de *handoff* destes dispositivos. Além disso, este problema pode também ocorrer em cenários com baixa taxa de perdas ocasionadas por colisões, bastando apenas que mais de um AP do mesmo ESS esteja no alcance da STA.

Os trabalhos que abordam o efeito ping-pong comumente propõem o uso de três técnicas para evitar o problema, que podem ou não ser combinadas: 1) *limiares de qualidade de conexão* [14, 15, 22, 29, 31]; 2) *margem de histerese* [10, 14, 29, 31, 36, 37]; e 3) *filtragem* [10, 29, 31, 33, 37, 47].

---

<sup>1</sup>[https://documentation.meraki.com/MR/Radio\\_Settings/Band\\_Steering\\_Overview](https://documentation.meraki.com/MR/Radio_Settings/Band_Steering_Overview)

Utilizando-se *limiares de qualidade de conexão*, uma STA dispara um *handoff* somente se a qualidade da conexão, que comumente é proporcional ao RSSI do AP ao qual está associada, está abaixo de um dado limiar. Os autores em [29] concluem que esta técnica não apresenta impacto no efeito ping-pong para os casos em que técnicas de filtragem de RSSI são utilizadas. Além disso, esta técnica não é capaz de prevenir ping-pongs nos casos em que os APs nas redondezas apresentam RSSI abaixo deste limiar, ou no caso em que amostras de vales de RSSI sejam utilizadas para decisão de *handoff*.

Com a utilização de *margens de histerese*, o *handoff* é disparado apenas se a diferença entre o RSSI do AP atual em relação ao novo AP pretendente está acima de uma dada margem. No trabalho de [36], que foi publicado em 2005, os autores indicam que implementações comerciais comumente utilizam esta técnica. Apesar de novas técnicas terem sido propostas no decorrer dos anos, os resultados apresentados no Capítulo 2 mostram que esta técnica ainda é utilizada até hoje, apesar de não ser a mais efetiva para mitigar o efeito ping-pong.

Outros tipos diferentes de limiares também podem ser utilizados para a prevenção de ping-pongs de acordo com as diferentes métricas de qualidade consideradas pelo algoritmo de *handoff*. Um exemplo é o trabalho de [52], que propõe um mecanismo de *handoff* com base na distância euclidiana entre STAs e APs que, por sua vez, é calculada com base na média de um determinado número de amostras de RSSI de APs vizinhos. Para reduzir o efeito ping-pong, os autores empregam dois limiares de distância, denominados *Th1* e *Th2*. Quando a STA está se aproximando de um novo AP, sua distância deverá ser menor do que um limiar *Th1* para que o *handoff* ocorra. Caso a STA esteja se afastando de um AP, sua distância deverá ser maior do que um limiar *Th2* para que o *handoff* ocorra.

Outros trabalhos que também utilizam limiares para evitar ping-pongs são [37] e [14]. Em ambos, os autores propõem um mecanismo de *handoff* para redes SDN (do inglês, *Software Defined Network*) que também considera o balanceamento de carga entre APs. Estas soluções baseiam-se na rede, isto é, não requerem alterações no mecanismo de *handoff* já implementado nas STAs. A execução do *handoff* baseia-se no RSSI de STAs e carga do AP, e ambas as informações são reportadas pelos APs da rede ao controlador central. Como nestes trabalhos a decisão de *handoff* baseia-se no RSSI, que apresenta alta variabilidade, e os limiares são calculados em processos *offline*, ou seja, são específicos para o cenário avaliado em cada trabalho, é possível que ping-pongs ocorram para outros cenários e outras interfaces.

Utilizando-se técnicas de *filtragem*, desvanecimentos rápidos na série temporal do

RSSI podem ser filtrados, evitando-se o ping-pong. Os autores em [29], por exemplo, propõem o uso da Média Móvel Exponencialmente Ponderada (ou em inglês, *Exponentially Weighted Moving Average* - EWMA), com  $\alpha = 0,9$  para realizar esta suavização. Além disso, verificam que o uso de margens de histerese sem a utilização de filtragem ocasiona grande número de ping-pongs, e o uso do EWMA é capaz de prover maior estabilidade. Este método também é utilizado em outras propostas de algoritmos de *handoff*, como em [37]. Entretanto, o uso desta técnica pode aumentar o atraso na realização de *handoffs* desejados, conforme mostrado no Capítulo 2.

Os autores do trabalho [29], que foi publicado em 2006, buscavam resolver o problema da carência de *handoffs* em situações nas quais a qualidade da comunicação poderia ser melhorada, o que é um problema oposto ao que ocorre atualmente, ou seja, o excesso de *handoffs*. Como foi mostrado no Capítulo 2, esta questão não é mais uma realidade. Um trabalho que busca reduzir a frequência de *handoffs* desnecessários é o de [22], porém, a proposta considera a trajetória de STAs em movimento. Conforme mostrado no Capítulo 2, apesar de a mobilidade ter um papel importante na ocorrência de ping-pongs, o problema também ocorre frequentemente para estações estáticas.

Outros tipos de filtro foram sugeridos na literatura para suavizar variações no RSSI. Em [33], por exemplo, os autores propõem o uso de um filtro baseado na estatística moda para suavizar variações do nível de sinal recebido. Porém, não comparam o desempenho do método proposto com outros filtros comumente encontrados na literatura.

Em [10] os autores constatarem que a aplicação de técnicas de filtragem gera atraso no *handoff* e que não existe um filtro que possa ser considerado melhor do que os outros em todos os cenários. Porém, os autores se baseiam em resultados de simulações sem considerar o comportamento verdadeiro do RSSI em ambientes *indoor*. Neste trabalho, os autores comparam diferentes filtros baseados no Modelo de Grey (ou modelo caixa cinza), Transformada de Fourier, filtro de Partículas e filtro de Kalman Discreto, apresentando o *tradeoff* entre atraso e estabilidade. Segundo os autores, o sinal filtrado com filtro baseado no Modelo de Grey tende a apresentar menos flutuação, entretanto este filtro amplifica o crescimento do sinal caso este ocorra rapidamente. Os filtros baseados em Kalman e Fourier apresentam comportamento similar, reduzindo flutuações sem gerar distorções em relação ao sinal original no caso de alterações abruptas. O filtro de Partículas reduz flutuações, porém gera grande atraso. Vales profundos momentâneos que podem ocorrer na série temporal do RSSI não são considerados, mas apenas flutuações leves e a movimentação do nó para perto ou longe de um AP. Segundo os autores em [33], estes filtros

são complexos e, portanto, não são adequados para dispositivos com recursos limitados, como estações móveis. Tendo esta questão em vista, não serão abordados com maior profundidade.

Mecanismos baseados em predição do RSSI com ou sem filtragem também podem ser encontrados na literatura. Com base na predição do RSSI, o momento do *handoff* pode ser predito, facilitando o provisionamento de recursos de acordo com a mobilidade da STA. Em [47] os autores propõem o uso de predição com suavização do RSSI baseada no modelo de *Holt-Winters*, ou *Double EWMA*. Em [10], o foco do trabalho é a comparação de mecanismos de predição utilizando-se ou não mecanismos de filtragem. Os autores concluem que a filtragem é efetiva para melhoria da predição do momento do *handoff* e o tipo de filtro utilizado deve ser escolhido no momento do provisionamento da rede de acordo com os requisitos do sistema, balanceando *overhead* e maior antecipação da predição. Apesar de ser uma área extensa e interessante, técnicas de predição não serão consideradas nesta tese, mas apenas mecanismos de filtragem.

Embora a filtragem tenha sido proposta anteriormente como a solução mais promissora para mitigar o efeito ping-pong há mais de 10 anos, nota-se que essa técnica não está sendo utilizada na prática por dispositivos atuais. Um dos motivos pode estar relacionado à falta de uma avaliação mais profunda, considerando o *tradeoff* entre o tempo de resposta do filtro e a instabilidade da associação. Nos trabalhos citados, o efeito ping-pong é avaliado apenas para poucos cenários com parâmetros fixos, o que pode não refletir a grande variedade de cenários encontrados na realidade, incluindo comportamentos variados de diferentes interfaces. Isto traz à tona a necessidade de estudos mais aprofundados sobre esse tema.

Outra questão refere-se à adequação dos filtros ao comportamento da série temporal do RSSI. Tendo em vista que ela pode apresentar comportamento diferenciado, filtros que são comumente aplicados em outras áreas podem não ser adequados ao RSSI. Desta forma, a realização de análises de algoritmos de *handoff* com filtros específicos se torna uma ideia interessante. O trabalho de pesquisa realizado nesta tese busca suprir essas demandas, avaliando e propondo um novo mecanismo de filtragem.

A próxima seção traz um estudo acerca do RSSI, incluindo estudos que indicam como esta métrica é calculada por diferentes fabricantes e como é o comportamento de sua série temporal.

## 3.2 Indicador do nível de sinal recebido (RSSI)

O RSSI (*Received Signal Strength Indicator*, ou indicador do nível de sinal recebido) é uma métrica comumente utilizada para a tomada de decisão de *handoff*. Embora outras métricas mais complexas e que envolvem outros fatores, como a carga na rede, tenham sido propostas na literatura, como em [37, 45], o RSSI ainda é utilizado por algoritmos de *handoff* atuais, inclusive em conjunto com outras métricas. Isto se dá devido à sua alta disponibilidade, já que o RSSI pode ser registrado para qualquer quadro recebido, incluindo *beacons* que são enviados frequentemente pelos APs. Além disso, segundo alguns autores, o RSSI pode refletir de forma razoável a movimentação do dispositivo móvel e a qualidade do canal [25, 47].

Como o RSSI será utilizado extensamente neste trabalho, esta seção busca apresentar o que é esta métrica, incluindo definições e conceitos acerca dela, bem como resultados de análises sobre ela encontrados na literatura. O objetivo é mostrar que o padrão IEEE 802.11 define algumas características do RSSI, porém, muitas delas ficam a cargo do fabricante, como qual é a função de mapeamento do nível de sinal em RSSI, qual é o valor de RSSI máximo possível, qual deve ser a granularidade, e se funções de suavização (filtros) devem ser utilizados. Isto explica o diferente comportamento da série temporal do RSSI reportado para diferentes interfaces de rede. Por fim, um estudo sobre a distribuição de probabilidade do RSSI em ambientes indoor será apresentado.

### 3.2.1 Definição de RSSI de acordo com o padrão IEEE 802.11

A arquitetura do padrão IEEE 802.11 [17] se subdivide em duas partes mais importantes, que são as camadas física (PHY) e de enlace (MAC). Ambas as camadas possuem entidades de gerência denominadas PLME (*Physical Layer Management Entity*) e MLME (*Medium Access Control Sublayer Management Entity*), respectivamente. Uma outra camada de gerência, denominada SME (*Station Management Entity*), se encarrega de obter dados a partir destas entidades e configurar parâmetros específicos das camadas. Estas funções são realizadas em nome de entidades gerais de gerenciamento do sistema e implementam protocolos padronizados. Por exemplo, o SME se comunica com o autenticador/suplicante do sistema e troca mensagens com as demais camadas de gerência envolvidas no processo para realizar a autenticação.

Funções de interfuncionamento (do inglês, *interworking*), que proveem assistência na descoberta e seleção de APs pelas STAs, no uso de QoS e de serviços de emergência, e

na conexão à provedores de serviços por assinatura, podem requerer que as informações provenientes destas várias entidades de gerência, e também de camadas mais altas, sejam correlacionadas. Para realizar esta correlação, a camada MAC provê o MSGCF (*MAC State Generic Convergence Function*), que se encarrega de observar as interações entre MLME, PLME e SME, e sintetizar as informações disponibilizando-as às camadas mais altas.

Tanto as camadas PHY e MAC quanto estas entidades de gerência possuem interfaces de serviço (SAP - *Service Access Point*) através das quais interações são realizadas. No caso das subcamadas MLME e PLME, por exemplo, as informações de gerência, que são armazenadas em MIBs (*Management Information Base*) distintas, podem ser modificadas ou consultadas pelo SME através do SAP entre elas.

Um dos serviços providos pelo MLME ao SME, por exemplo, é o *scan*. Através do *scan*, as características dos BSSs disponíveis para conexão são obtidas. Esta subcamada também disponibiliza o valor do RSSI para um *beacon*. Segundo o padrão, o valor é reportado em dBm com acurácia de  $\pm 5$  dB (com intervalo de confiança de 95%) dentro do intervalo dinâmico especificado para o receptor. Caso mais de uma cadeia de recepção<sup>2</sup> seja utilizada, o RSSI deverá ser calculado como o valor médio obtido para todas as cadeias de recepção. Além disso, o valor médio do RSSI no tempo poderá ser reportado, caso o fabricante utilize alguma função de suavização.

A informação do RSSI é reportada à camada MAC pela camada PHY. Apesar de a arquitetura da camada MAC ter sido criada para ser independente da camada PHY, algumas implementações da PHY requerem uma máquina de estados de gerenciamento de acesso ao meio, que é executada na camada MAC, mais precisamente na MLME. Tendo isto em vista, esta subcamada deverá interagir com a subcamada PLME. Estas interações são realizadas através do envio de vetores de transmissão (TXVECTOR) e recepção (RXVECTOR) entre as camadas.

Quando a PHY começa a receber uma PPDU (*Physical Protocol Data Unit*) com cabeçalho da camada física válido, ela indica isto à camada MAC e envia informações sobre a recepção através do vetor RXVECTOR. Os parâmetros incluídos neste vetor podem variar de acordo com a PHY utilizada. Alguns parâmetros mínimos requeridos são taxa de transmissão dos dados recebidos, comprimento do quadro, canal de operação, quais cadeias de recepção estão ativas, configurações da antena que serão utilizadas, entre

<sup>2</sup>*Hardware* que implementa técnicas de processamento de sinais para realizar a recepção do sinal e conversão analógico-digital [17].

outros.

O RSSI está incluído no RXVECTOR como um parâmetro adicional para as camadas PHY apresentadas no padrão IEEE 802.11. Este parâmetro é definido como uma medida da energia observada na(s) antena(s) utilizada(s) para a recepção da PPDU corrente, cujo valor é um inteiro entre 0 e 255 (1 byte), porém o fabricante poderá escolher o máximo valor para o RSSI, de forma que este seja codificado em valores entre 0 e o RSSI máximo. Este valor deve crescer monotonicamente com a potência do sinal recebido, e deve ser utilizado de maneira relativa.

Para todas as camadas PHY, exceto para HT-*mixed* (*High-Throughput mixed*), VHT (*Very high throughput*) e TVHT (*Television Very High Throughput*), a medição deve ser realizada pela PHY durante o recebimento do preâmbulo da PPDU. Para HT-*mixed*, a medição é realizada durante o campo HT-LTF. Já para as PHYs VHT e TVHT, as medições são realizadas durante os campos VHT-LTF e TVHT-LTF, respectivamente. Além disso, para a PHY DMG (*Directional Multi-Gigabit*), o padrão explicita que o ganho da antena deve ser considerado na definição do RSSI.

### 3.2.2 RSSI do ponto de vista dos fabricantes

O padrão IEEE 802.11 [17] permite que um valor máximo de RSSI seja adotado por diferentes fabricantes, de forma que o intervalo entre 0 até o RSSI máximo seja utilizado. Como certos valores de potência a partir de um certo limiar já são considerados suficientemente bons de forma similar, os fabricantes poderão escolher este limiar para definir o RSSI máximo. Desta forma, diferentes fabricantes podem apresentar diferentes valores de RSSI para uma mesma potência de sinal e, além disso, reportam o valor com diferentes granularidades. Por exemplo, em [9], o autor, ao analisar diferentes *chipsets* IEEE 802.11b em 2002, observou que a Cisco optou por medir 101 valores de 0 a 100. Já a Symbol utilizava apenas os valores entre 0 e 31 e a Atheros utilizava valores de RSSI entre 0 e 60.

O RSSI pode ser utilizado internamente pelo *hardware* ou pelo *driver* das interfaces, nas camadas física e de enlace. Um exemplo de utilização é a verificação de canal livre, no qual um limiar, denominado *Clear Channel Threshold*, que está associado a um valor de RSSI, é utilizado para definir se o canal está livre ou não. Outro exemplo é a realização do *handoff* que pode ser iniciado pelo *driver* da interface. Um limiar, denominado *Roaming Threshold*, que também é associado a um determinado RSSI, é utilizado para indicar se o *handoff* deve ou não ser realizado.

Segundo o autor em [9], as interfaces não necessitam de alta granularidade nem alta precisão na medição do RSSI para a realização de tarefas básicas, como as citadas. Porém, para tarefas mais complexas, como a de localização baseada no RSSI, a maior granularidade possível é indicada [20]. Para a comparação da potência do sinal recebido de dois APs, os que possuírem sinais próximos poderão ser considerados erroneamente como tendo a mesma potência caso a granularidade seja baixa.

Outra característica que também deve ser definida pelo fabricante é a relação entre o RSSI e o nível da potência do sinal em dBm. A forma de conversão do RSSI para dBm varia muito. Em [9], o autor apresenta tabelas de conversão para chips Atheros, Cisco e Symbol. Além disso, os fabricantes podem utilizar funções não lineares para mapear a potência do sinal em RSSI. Por exemplo, o RSSI poderá decair ou aumentar com velocidades diferentes em relação ao decaimento ou aumento da potência do sinal real de acordo com a função implementada pelo fabricante. Entretanto, como as implementações são fechadas, se torna difícil descobrir qual função é utilizada. Desta forma, certo cuidado deve ser tomado ao comparar-se o RSSI reportado por duas interfaces de diferentes fabricantes.

O nível de potência do sinal associado ao RSSI igual a 0 é comumente um valor próximo ao da sensibilidade da interface, de forma que, se o nível de sinal estiver abaixo deste valor, a interface não será mais capaz de diferenciar sinal de ruído térmico. O valor da sensibilidade é calculado como sendo o nível de sinal no qual a taxa de erro de bits alcança um limiar máximo estipulado pelo fabricante para uma determinada taxa de transmissão. Como as medidas são realizadas em ambientes eletromagneticamente isolados, a interferência não é considerada no cálculo da sensibilidade, mas apenas o ruído térmico do circuito.

### 3.2.3 Distribuição de probabilidade do RSSI segundo a literatura

Tradicionalmente, acredita-se que o RSSI possui distribuição normal de acordo com o modelo de propagação de larga escala [41] [42]. Acredita-se também que o valor médio do RSSI pode ser estimado utilizando-se um modelo de propagação que prevê as perdas para uma dada distância entre o AP e a STA. Desta forma, muitas das soluções propostas para diferentes problemas que utilizam o RSSI como métrica são baseadas nestas premissas. Porém, diversos trabalhos encontrados na literatura apresentam conclusões sobre a distribuição do RSSI que não condizem com estas expectativas, principalmente para medições realizadas por interfaces sem fio em ambientes *indoor*. Nestes cenários, o RSSI

pode apresentar desvios que, atualmente, não se sabe ao certo porque se dão.

Um exemplo desses trabalhos é o de [20], que apresenta uma profunda análise acerca do RSSI reportado para diferentes dispositivos (STAs e APs) IEEE 802.11. Os autores concluem que diferentes distribuições para o RSSI podem ser obtidas para diferentes valores médios registrados para a série temporal desta métrica. Isto se dá por conta dos limites para os possíveis valores de RSSI que podem ser reportados. Ou seja, séries temporais com médias baixas (por exemplo, abaixo de -80 dBm) poderiam apresentar grandes desvios acima da média e baixo desvio abaixo da média. Já as séries com médias altas (por exemplo, acima de -80 dBm) poderiam apresentar grandes desvios abaixo da média e baixos desvios acima da média. Entretanto, os resultados reportados mostram que desvios acima da média não são comuns, mas os abaixo da média são.

Na distribuição do RSSI, os desvios acima da média representam caudas à direita, e os abaixo da média representam caudas à esquerda. De todas as medições realizadas pelos autores em [20], que totalizaram 379 *traces* de RSSI, 70% delas apresentaram caudas à esquerda, enquanto que 10% apresentaram simetria na distribuição e 20% apresentaram leve cauda para a direita. Este último caso foi observado para as interfaces dos fabricantes D-Link<sup>3</sup> e EMC<sup>4</sup> e, para todas as medições, nenhuma delas se desviou por mais de 10 dB acima da média. Desta forma, os autores concluem que a distribuição do RSSI se aproximará da normal para valores médios do RSSI baixos, e apresentará distribuições com caudas à esquerda ou multimodais para valores médios de RSSI altos.

Este comportamento que inclui longa cauda à esquerda e até distribuições multimodais com modas locais à esquerda da moda global, foi visto em outros trabalhos, como em [13, 24, 40]. Os autores de [1] também relatam que, em determinadas posições e tempo, o sinal pode decair muito devido à degradação intermitente do canal no decorrer do tempo. Em [19], os autores avaliaram a variação do RSSI com relação à orientação da STA em relação ao AP, incluindo a posição dos usuários, e concluíram que, não apenas os valores médios do RSSI foram alterados, mas também grandes flutuações no RSSI com grandes variâncias foram obtidos quando um usuário estava presente. Além disso, o movimento do usuário que carrega a STA causa uma flutuação no RSSI denominada desvanecimento de pequena escala [41], ou desvanecimento rápido (*fast fading*).

Segundo os autores em [20], uma possibilidade que explicaria a variação nas distribuições encontradas de acordo com o RSSI médio é o mapeamento não linear entre o sinal

---

<sup>3</sup><https://www.dlink.com.br/>

<sup>4</sup><https://brazil.emc.com/>

real e o RSSI. Intuitivamente, quanto mais fraco é o sinal recebido, maior é a dificuldade que a interface apresenta para diferenciá-lo. Se a mediação fosse realizada de forma ideal, os autores acreditam que a distribuição do RSSI seria igual para todos os RSSIs médios (ou seja, todos apresentariam cauda à esquerda similares).

Além de variação no nível do sinal, o sinal de alguns APs pode sumir por alguns instantes. Os autores em [20] indicam que mudanças no ambiente, especialmente em ambientes que envolvem múltiplos andares, como prédios, este efeito é comum. Além disso, a movimentação do usuário da rede pode ocasionar atenuação do sinal, fazendo com que alguns quadros de determinados APs não sejam recebidos. Esta intermitência no sinal pode afetar o desempenho de mecanismos baseados no RSSI, como os de posicionamento ou de *handoff* e, portanto, deve ser considerada.

Outros comportamentos para diferentes interfaces também foram verificados no trabalho de [27], no qual os autores apresentam resultados obtidos em testes comparativos para diferentes interfaces a diferentes distâncias de um mesmo ponto de acesso, em ambientes *indoor* e *outdoor*. Os autores mostram que diferentes dispositivos reportam o RSSI de diferentes formas, mesmo alguns sendo do mesmo fabricante e até do mesmo modelo. Alguns comportamentos encontrados foram:

- *Dropout of data*: o RSSI decai momentaneamente e se recupera logo a seguir, resultando em oscilações. O efeito é mais ameno na faixa de 5GHz. Este comportamento é condizente com a distribuição com cauda à esquerda;
- *Caching*: o RSSI é apresentado de forma estável por um longo período após a variação da distância da STA em relação ao AP;
- A variação do RSSI é reportada em passos, por exemplo, de 2 dBs;
- Certos dispositivos não apresentaram valores de RSSI proporcionais à variação da distância. Desta forma, não estão aptos a utilizar as soluções de localização baseadas no RSSI e talvez não possam utilizar esta métrica para o disparo do *handoff*.

Outra observação feita em [27] é que algumas interfaces apresentam desvio padrão muito grande para a série temporal do RSSI, e este desvio é menor para a faixa de 5 GHz. Isto pode ser explicado pela baixa interferência co-canal na faixa de 5 GHz em relação à de 2,4 GHz e diferentes modos de propagação. Para amenizar os problemas encontrados, os autores recomendam o uso de filtragem do RSSI.

Esta variabilidade do sinal também foi relatada em outros estudos, como os de [29], e associada a efeitos de propagação. Porém, em [52], os autores indicam que isto também pode estar relacionado a variações na temperatura e no fornecimento de energia elétrica aos APs.

Tendo em vista estes comportamentos, os autores em [20] concluem que a distribuição do RSSI é difícil de se modelar e não se adequa a nenhuma distribuição conhecida, já que a maioria delas é deslocada para direita, como acontece para as distribuições log-normal, Chi-square, Rayleigh, e Maxwell. Uma possível distribuição deslocada à esquerda indicada é a Map-Airy<sup>5</sup>. Porém uma análise mais profunda não foi apresentada.

Sendo assim, para que a métrica RSSI possa ser utilizada com bom desempenho pelo algoritmo de *handoff*, o comportamento da série temporal do RSSI, incluindo possíveis variações para diferentes fabricantes, deve ser considerado.

---

<sup>5</sup><http://mathworld.wolfram.com/Map-AiryDistribution.html>

# Capítulo 4

## Proposta - Filtro Máximo

Este capítulo apresenta uma proposta para o problema do ping-pong baseada na utilização de filtragem. Diferentemente de outros mecanismos encontrados na literatura, a proposta aqui apresentada considera a distribuição de probabilidade do RSSI.

Inicialmente, para motivar a escolha do mecanismo proposto, resultados de testes realizados em redes reais serão apresentados, mostrando que a distribuição da série temporal do RSSI comumente apresenta cauda à esquerda ou comportamento multimodal com modas locais à esquerda da moda global, indicando a ocorrência comum de vales. Estes vales ocorrem momentaneamente, apresentando, em sua maioria, rajadas de até três amostras para os dispositivos testados. Caso tomadas de decisão sejam baseadas nestes vales, o *handoff* será realizado erroneamente.

Tendo em vista esta questão, a utilização do filtro Máximo é proposta como uma solução capaz de eliminar estes vales de RSSI da tomada de decisão de *handoffs*.

### 4.1 Análise Experimental do RSSI

Para demonstrar o comportamento da série temporal do RSSI em ambientes *indoor*, *traces* de RSSI foram coletados utilizando-se o *testbed* FIBRE<sup>1</sup> instalado na UFF<sup>2</sup>, que provê infraestrutura para a realização de testes com e sem mobilidade. O *testbed* inclui um trem que percorre um percurso de aproximadamente 60 metros em linha reta em um corredor, em aproximadamente 50 segundos, ou seja, com velocidade de 1,2 m/s, *i.e.*, próxima a de uma pessoa caminhando rapidamente. Este trem carrega um *laptop* que

---

<sup>1</sup><https://fibre.org.br/>

<sup>2</sup><https://fibre.org.br/start-using-fibre/register/uff-island/>

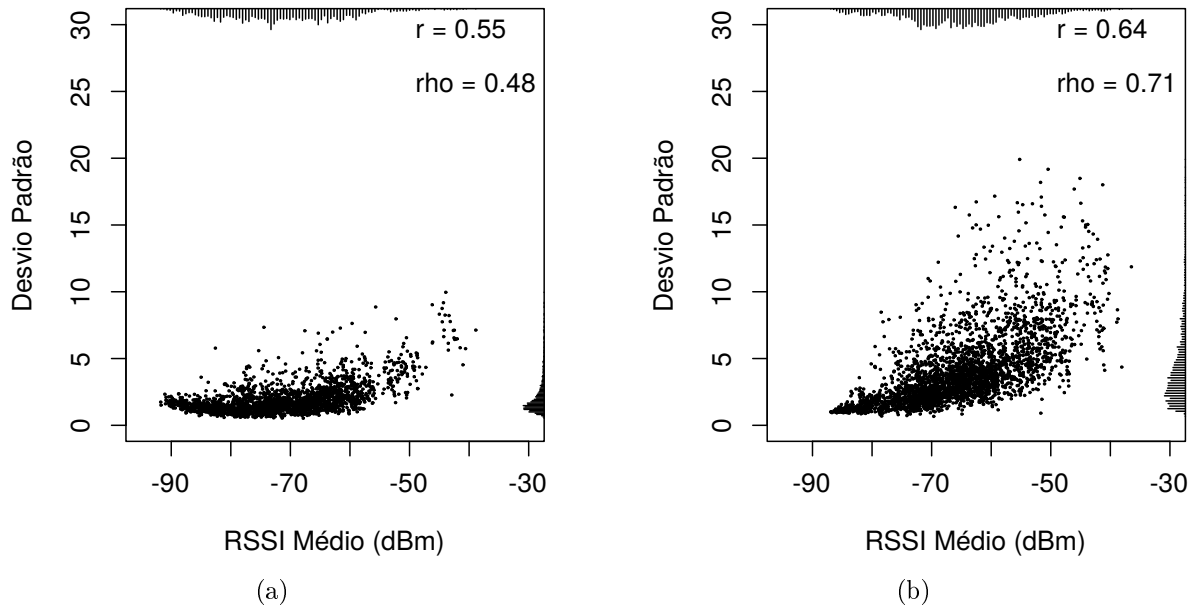


Figura 4.1: Gráficos de dispersão da média *vs.* desvio padrão do RSSI para as interfaces (a) TP-Link e (b) Airpcap-NX.

opera com o sistema operacional Linux Ubuntu 14.04, equipado com interfaces IEEE 802.11 para realização de captura de quadros. No percurso do trem, diversos APs podem ser encontrados. Alguns deles fazem parte do próprio *testbed*, enquanto outros são APs locais ou fazem parte da infraestrutura de rede sem fio da UFF. Mais detalhes acerca do *testbed* utilizado podem ser encontrados no Apêndice A.

Para a realização da captura dos quadros IEEE 802.11, duas interfaces foram instaladas no *laptop*: 1) Airpcap-NX<sup>3</sup>; e 2) TP-LINK TL-WN722N rev 1.0<sup>4</sup>. Todos os testes foram realizados durante horários de baixa movimentação de pessoas no ambiente, entre 0 e 6 h. Para cada interface, *traces* de RSSI foram obtidos a partir de *beacons* capturados no decorrer de dois minutos em diferentes posições estáticas do trilho do trem. Cada *trace* corresponde a, pelo menos, 400 amostras de *beacons* de um dado AP. No total, o trem parou em 101 posições distintas, e 144 APs foram encontrados no percurso. Isto deu origem a 3.031 *traces* para a interface Airpcap-NX e 2.349 *traces* para a interface TP-Link. O número de *traces* é diferente porque nem sempre ambas as interfaces conseguem capturar um mesmo *beacon* e apenas *traces* com mais de 400 *beacons* foram considerados nesta análise.

A Figura 4.1 apresenta gráficos de dispersão com barras de densidade do RSSI médio *vs.* o desvio padrão, e também os índices de correlação de Pearson ( $r$ ) e de Spearman

<sup>3</sup>[https://wikidevi.com/wiki/CACE\\_Technologies\\_AirPcap\\_Nx](https://wikidevi.com/wiki/CACE_Technologies_AirPcap_Nx)

<sup>4</sup>[https://wikidevi.com/wiki/TP-LINK\\_TL-WN722N\\_v1.x](https://wikidevi.com/wiki/TP-LINK_TL-WN722N_v1.x)

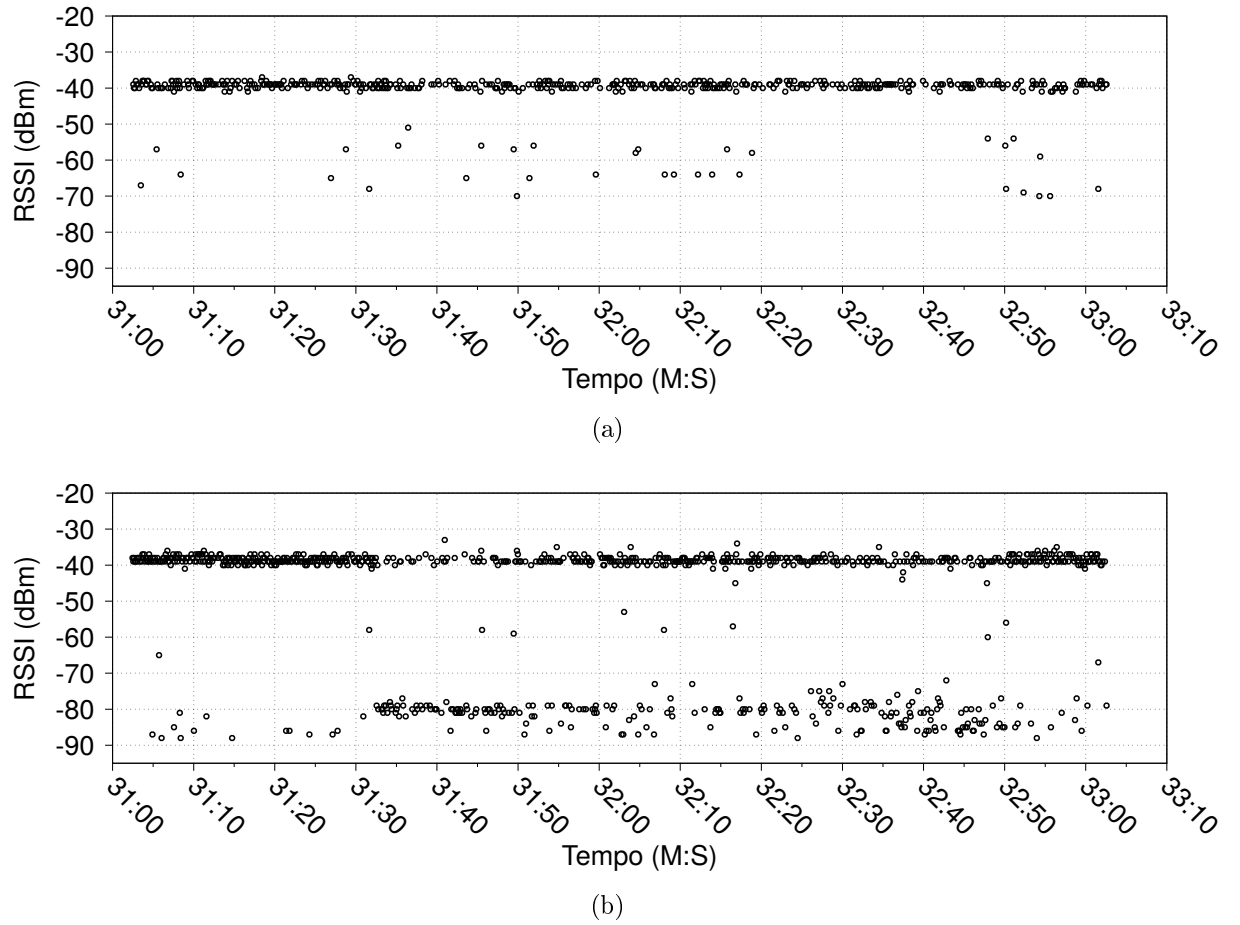


Figura 4.2: Série temporal do RSSI para um AP TL-WR740N v4.23 registrada pela interface (a) TP-Link e (b) Aircap-NX.

(rho) entre estas variáveis para as interfaces (a) TP-Link e (b) Aircap-NX. Os resultados mostram que o desvio, para ambas as interfaces, tende a crescer com o aumento do RSSI médio, assim como reportado em [20]. Os coeficientes de correlação embasam esta conclusão, apresentando valores moderados a fortes para a interface Aircap-NX e valores baixos para moderados para a interface TP-Link.

A Figura 4.2 mostra exemplos de *traces* obtidos para ambas as interfaces em uma mesma posição e em um mesmo momento, para um mesmo AP TP-Link TL-WR740N. Os valores de RSSIs baixos (vales) ocorrem para ambas as interfaces, porém são mais pronunciados (profundos) para a Aircap-NX. Conforme mencionado anteriormente na Seção 3.2, diferentes comportamentos da série temporal do RSSI obtidos para diferentes interfaces podem ser explicados pela liberdade oferecida aos diferentes fabricantes para determinar diferentes características do mapeamento do nível do sinal em RSSI, como o valor máximo a ser utilizado, granularidade, função de mapeamento linear ou não linear entre nível de sinal e RSSI, e aplicação ou não de suavização. Além disso, diferentes *hardwares*

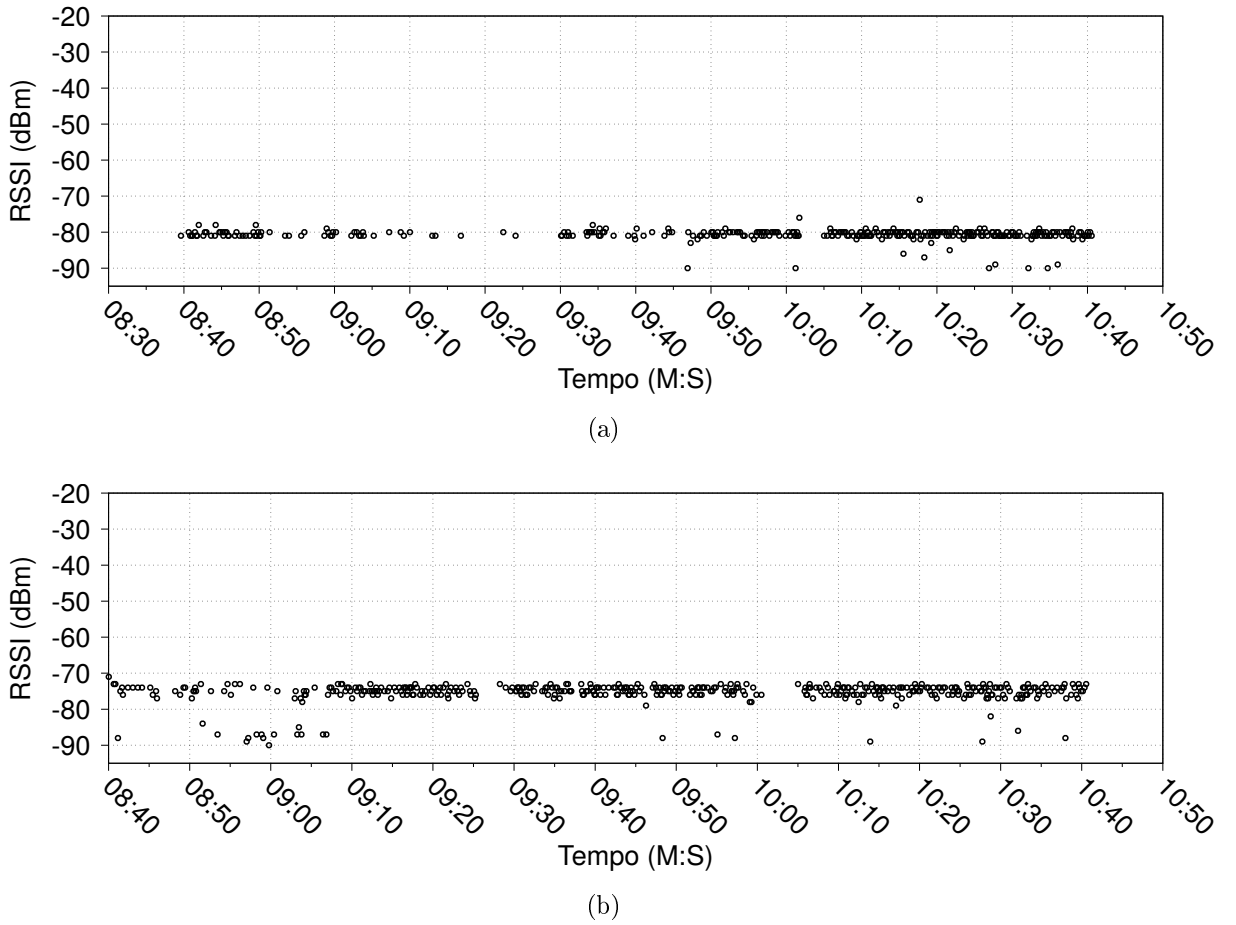


Figura 4.3: Série temporal do RSSI para um AP TL-WR740N v4.23 registrada pela interface (a) TP-Link interface e (b) Airpcap-NX no ponto de medição 30.

podem apresentar diferentes sensibilidades, fazendo com que quadros com determinados níveis baixos de sinal sejam recebidos por uma interface, mas não pela outra.

A Figura 4.3 mostra os *traces* obtidos para o mesmo AP da Figura 4.2, porém em outra posição do trilho. Neste ponto, o RSSI amostrado é mais baixo. Comparando-se as duas figuras, pode-se notar que vales mais profundos são mais percebidos para RSSIs mais altos, explicando os desvios mais altos encontrados na Figura 4.1 para maiores valores médios do RSSI. Em [20], os autores encontraram resultados semelhantes. Pode-se notar que a densidade de ocorrência de vales varia com o tempo, ou seja, pode ser maior em determinados intervalos de tempo e menor em outros. Isto explica os diferentes desvios obtidos para um mesmo determinado valor médio do RSSI na Figura 4.1.

A Figura 4.4 apresenta um corte dos *traces* apresentados na Figura 4.2, através do qual uma análise quadro a quadro pode ser realizada. Nesta figura, cada *beacon* é identificado por seu número de sequência. Os resultados mostram que a interface TP-Link apresenta mais perdas em relação à Airpcap-NX. Interessantemente, pode-se verificar que

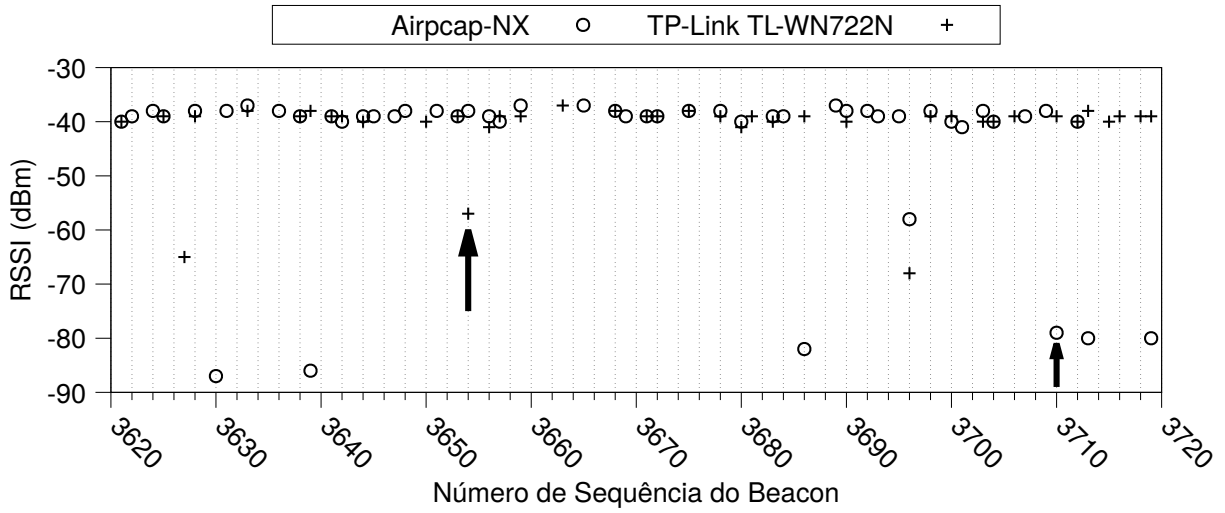


Figura 4.4: RSSI de *beacons* distinguidos pelos números de sequência, capturados pelas interfaces Airpcap-NX e TP-Link. As setas pretas apontam comportamentos diferenciados no registro do RSSI pelas interfaces.

nem sempre um *beacon* com baixo RSSI para uma interface, apresentará o mesmo comportamento para a outra interface. Isto pode ser notado para os números de sequência 3654 e 3710, por exemplo. Desta forma, constata-se que a variação do sinal recebido não tem relação com o sinal emitido pelo AP, e provavelmente está relacionada com efeitos de propagação e/ou características do receptor.

A Figura 4.5 mostra os histogramas para as séries temporais de RSSI apresentadas na Figura 4.2. Para ambas as interfaces, a série apresenta distribuição com cauda à esquerda. No caso da interface Airpcap-NX (Figura 4.5 (b)), a cauda é mais proeminente, e uma distribuição multimodal pode ser notada. Para a interface TP-Link (Figura 4.5 (a)), a cauda é mais discreta. Estes resultados são compatíveis com os relatados em [20].

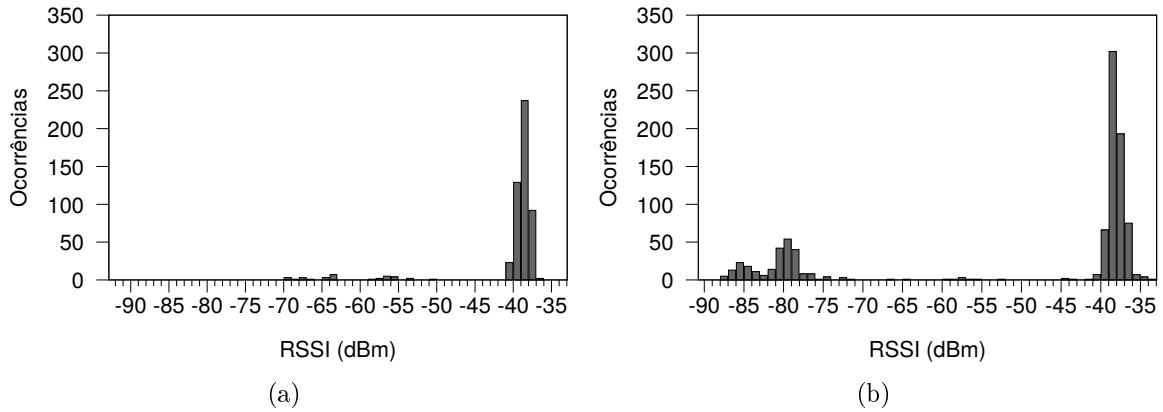


Figura 4.5: Distribuição do RSSI amostrado de um AP TL-WR740N pelas interfaces (a) TP-Link e (b) Airpcap-NX.

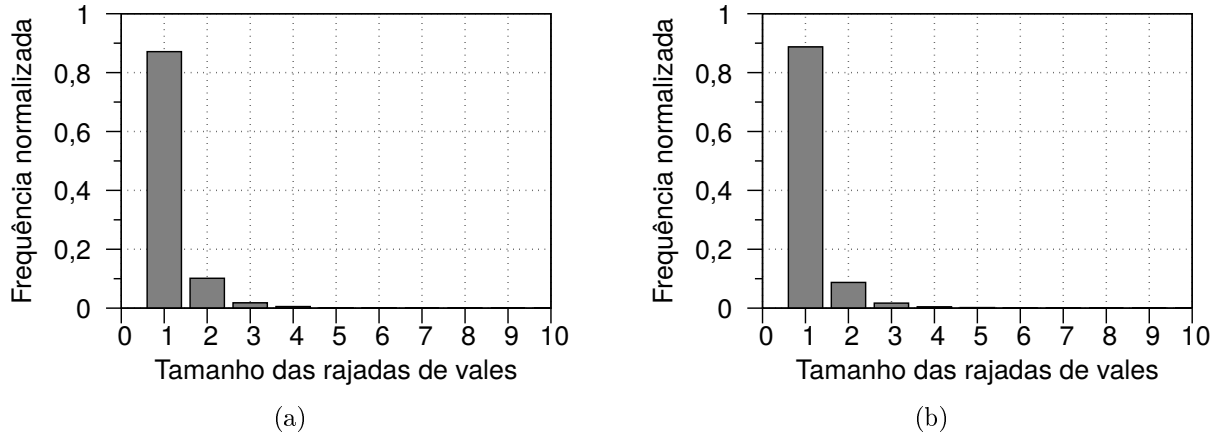


Figura 4.6: Distribuição da probabilidade do tamanho da rajada de vales de RSSI para a interface (a) TP-Link e (b) Aircap-NX.

A ocorrência de vales de RSSI é claramente momentânea, envolvendo poucas amostras consecutivas. Para avaliar as rajadas de ocorrência de vales de RSSI, ou seja, quantos ocorreram consecutivamente, um método simples e conhecido para detecção de *outliers* foi utilizado<sup>5</sup>. Neste método, a mediana da série temporal deve ser calculada, bem como as barreiras externas (*outer fences*) que definem os limiares entre amostras comuns e amostras extremamente fora do normal (*outliers* extremos). Estes valores foram calculados para cada *trace*. A seguir, cada amostra de RSSI foi comparada à barreira externa inferior e o tamanho de cada rajada de *outliers* extremos inferiores foi computado. A Figura 4.6 mostra a distribuição do tamanho destas rajadas, e a Figura 4.7 mostra a função de distribuição acumulada do tamanho delas para as interfaces (a) TP-Link e (b) Aircap-NX. Para ambas as interfaces, aproximadamente 88% dos *outliers* ocorrem em rajadas de tamanho 1, e 99% das rajadas apresentaram tamanhos menores ou iguais a 3, conforme indicam as linhas verticais tracejadas nas Figuras 4.7 (a) e (b). Porém, também pode-se observar que ambos os gráficos CDF apresentam caudas longas, indicando que rajadas longas podem ocorrer, porém com menor chance.

Por fim, um segundo teste foi realizado com a interface Broadcom BCM4313 utilizando o *driver* *brcmsmac* em um *laptop* estático rodando o sistema operacional Linux Ubuntu 14.04. O AP utilizado foi o TP-LINK TL-WR740N rodando o sistema OpenWrt 14.07. Capturas de *beacons* foram realizadas a diferentes distâncias do AP, em momentos variados. O ambiente de medição se trata de um laboratório composto por cadeiras, mesas, pessoas em movimento, computadores, divisórias de colmeia e vidro, janelas e paredes de alvenaria. Para cada ponto de medição, 10.000 *beacons* foram coletados.

<sup>5</sup><https://www.itl.nist.gov/div898/handbook/prc/section1/prc16.htm>

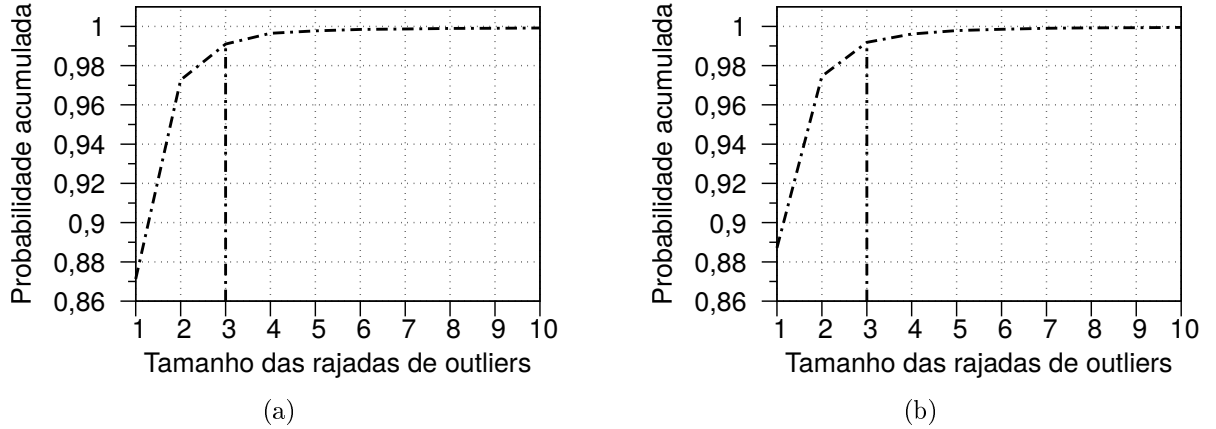


Figura 4.7: Função de distribuição acumulada (CDF) do tamanho das rajadas de vales para as interfaces (a) TP-Link e (b) Aircap-NX.

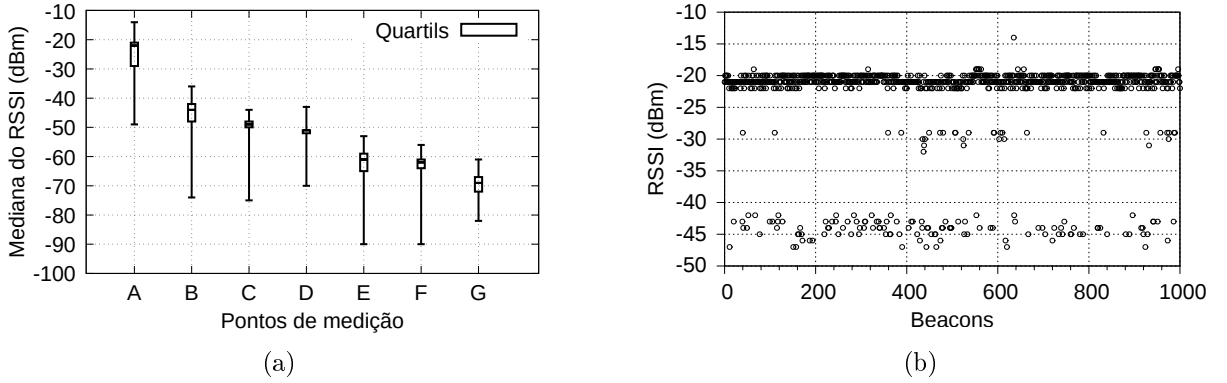


Figura 4.8: (a) Mediana do RSSI (dBm) com os valores mínimo e máximo e os primeiros e terceiros quartis. (b) Corte da série temporal do RSSI (dBm) para o ponto de medição A.

A Figura 4.8 (a) mostra o *Box Plot* do RSSI amostrado dos *beacons* (em dBm, conforme reportado pelo cabeçalho *radiotap*, assim como nos testes anteriores) para os diferentes pontos de medição. A alta variabilidade das amostras de RSSI é evidente, conforme ilustrado pelos 37 dB de diferença entre os valores máximo e mínimo obtidos para o ponto E.

Além disso, vales foram obtidos em maior quantidade em relação a picos, e apresentaram variações mais extensas em relação a eles. A Figura 4.8 (b) apresenta um corte da série temporal do RSSI observada para o ponto de medição A, para facilitar a visualização do comportamento do RSSI. A maioria das amostras apresentaram valores próximos a -20 dBm, porém, amostras esporádicas com RSSI muito abaixo (por volta de -45 dBm) também foram observadas. Estes vales também foram observados para os demais pontos de medição e são similares aos obtidos nos testes apresentados anteriormente.

Observando-se os resultados apresentados nesta seção, pode-se concluir que diferentes interfaces podem apresentar vales com profundidades mais ou menos extensas, caracterizando diferentes distribuições multimodais com o deslocamento das modas locais mais ou menos à esquerda em relação à moda global. Além disso, a ocorrência de picos é incomum e apresenta menor variação em relação à mediana. Com base nestes resultados e nos resultados reportados por trabalhos relacionados apresentados na Seção 3.2.3, pode-se concluir que este comportamento do RSSI é comum para interfaces IEEE 802.11 em ambientes *indoor*.

## 4.2 Proposta

Conforme demonstrado na Seção 4.1, a série temporal do RSSI apresenta, comumente, distribuição multimodal com modas secundárias à esquerda (ou cauda à esquerda), e não uma distribuição normal. Estas modas locais são relativas a vales na série temporal do RSSI que ocorrem frequentemente de forma momentânea. Ou seja, a ocorrência de picos do RSSI não é tão comum quanto a ocorrência de vales. Além disso, estes picos não apresentam grande variação da amplitude em relação à mediana, como ocorre com os vales.

Resultados apresentados no Capítulo 2 indicam que os mecanismos de *handoff* comumente utilizam o RSSI como métrica para decisão e não levam em consideração este comportamento, facilitando a ocorrência de ping-pongs. Por exemplo, as margens de histerese pequenas tipicamente empregadas em dispositivos populares não são efetivas na prevenção do ping-pong, devido à grande amplitude dos vales de RSSI. Pelo mesmo motivo, a série temporal do RSSI não poderá ser suficiente “suavizada” por filtros EWMA de baixo atraso, resultando em ping-pongs. Embora a combinação das duas técnicas seja possível, tempos de resposta baixos para *handoffs* desejados em cenários móveis requerem pequenas margens de histerese e filtros rápidos, ou seja, uma combinação que pode não prevenir ping-pongs.

Com base no exposto, torna-se interessante explorar o comportamento específico da série temporal do RSSI para a elaboração de novos mecanismos de filtragem para a prevenção do efeito ping-pong, buscando-se a redução do atraso para a execução do *handoff*.

O simples filtro proposto aqui, denominado Máximo, é capaz de suprimir vales ao apresentar em sua saída o valor máximo do RSSI encontrado em uma janela deslizante que contém as últimas  $W_s$  amostras obtidas a partir do *scan*. Tendo em vista que estes

vales ocorrem comumente em rajadas de pequenos tamanhos, até mesmo pequenas janelas poderão efetivamente filtrá-los, prevenindo ping-pongs sem ocasionar grande atraso nos *handoffs* desejados.

A Figura 4.9 apresenta dois exemplos de funcionamento do mecanismo Máximo para janelas de tamanho  $W_s = 5$  (à esquerda) e  $W_s = 2$  (à direita). Os círculos vermelhos indicam o valor máximo escolhido para tomada de decisão do *handoff*. Nestes exemplos, a STA encontra-se em posição estática e recebe amostras de RSSI com valor médio em torno de -40 dBm. Os valores em azul indicam os vales de RSSI amostrados, que, neste exemplo, ocorreram com tamanho máximo de rajada de vales igual a 2. As mesmas amostras de RSSI foram utilizadas nos dois exemplos. Para  $W_s = 5$ , todos os vales foram filtrados com sucesso. Para este tamanho de janela, o insucesso ocorreria apenas se 5 vales consecutivos fossem amostrados. Já para  $W_s = 2$ , um dos vales não foi filtrado corretamente, conforme indicado pela seta vermelha. Neste caso, como dois vales foram amostrados consecutivamente, a janela de tamanho 2 não foi suficiente para prevenir a utilização do valor de um vale como o máximo.

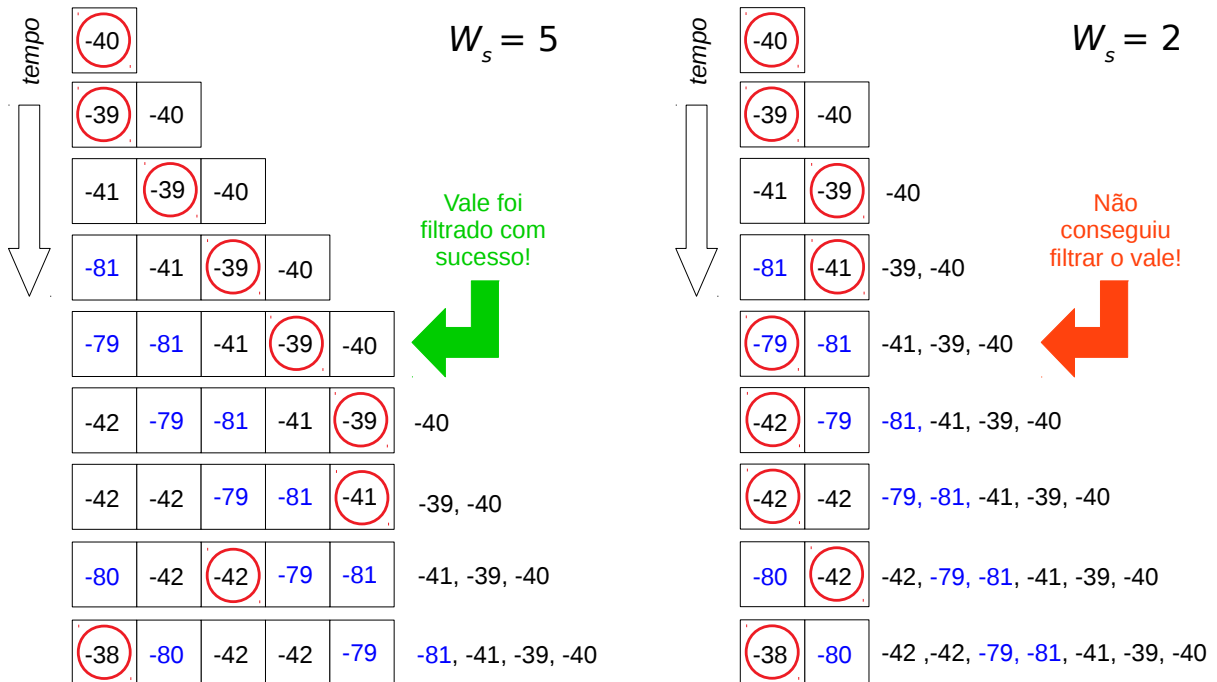


Figura 4.9: Exemplo de funcionamento do Máximo com janela deslizante  $W_s$  com tamanhos 5 e 2. Os círculos vermelhos marcam o valor escolhido para a tomada de decisão do *handoff*.

O tamanho escolhido para a janela deslizante irá influenciar no atraso ocasionado pelo filtro Máximo para os casos nos quais o RSSI esteja decaindo. Este atraso pode ser explicado pelo tempo de permanência de amostras com valores máximos na janela.

Conforme novas amostras são inseridas na janela, um novo máximo com valor menor do que o atual só será obtido caso a amostra relativa ao máximo atual saia da janela deslizante. Neste caso, quanto maior a janela, mais lenta será a convergência do valor filtrado em direção ao valor amostrado. No caso de o RSSI apresentar crescimento, a convergência para o valor máximo é imediata, independentemente do tamanho da janela. Isto faz com que o Máximo seja capaz de se recuperar rapidamente caso um vale não seja filtrado corretamente. Na Figura 4.9, para  $W_s = 2$  isto pode ser verificado após a falha ao filtrar o vale indicada pela seta vermelha. No momento seguinte, o filtro convergiu corretamente para o valor Máximo que, neste caso, representa melhor a distribuição do RSSI em detrimento do vale.

É importante notar que o mecanismo Máximo foi elaborado buscando-se evitar ping-pongs ocasionados por vales no RSSI. Porém, em cenários com mobilidade, ping-pongs também podem ocorrer no momento em que os RSSIs dos APs que se encontram no trajeto da STA se cruzam, ou seja, apresentam valores muito próximos. Conforme será mostrado na Seção 5.5, o Máximo também apresentou bons resultados nestes cenários nos quais há o cruzamento dos RSSIs dos APs.

# Capítulo 5

## Análise de desempenho

Este capítulo apresenta os resultados dos testes realizados para avaliação do filtro Máximo e a comparação do desempenho dele com outros filtros encontrados na literatura utilizados por algoritmos de *handoff* baseados no RSSI.

A avaliação foi realizada através de um emulador alimentado por *traces* reais de RSSI obtidos em cenários móveis e estáticos. Os resultados mostram que o Máximo conseguiu apresentar melhor relação entre atraso e estabilidade dentre os demais algoritmos testados em cenários com mobilidade. Além disso, em cenários estáticos, o filtro Máximo foi eficaz em eliminar praticamente 100% dos ping-pongs para a maioria dos parâmetros testados.

### 5.1 Descrição do emulador

A avaliação do filtro Máximo foi realizada utilizando-se um emulador criado como parte desse trabalho com base na estrutura do mecanismo de *handoff* do WPA Supplicant v.2.1 descrito no Capítulo 2, implementado utilizando-se *shell script bash*<sup>1</sup> em conjunto com o GNU Awk<sup>2</sup>.

A Figura 5.1 mostra o diagrama de fluxo do algoritmo Máximo. Para a implementação do Máximo, a função que define qual informação de RSSI será armazenada na base de dados interna do programa para a tomada de decisão de *handoff*, indicada na Etapa 2 da figura, foi alterada. No WPA Supplicant, o RSSI é armazenado diretamente na base de dados, sem a utilização de mecanismos de filtragem. No Máximo, caso o AP (ou BSS) não esteja na base de dados, uma janela deslizante é criada para ele e a informação de

---

<sup>1</sup><https://www.gnu.org/software/bash/manual/>

<sup>2</sup><https://www.gnu.org/software/gawk/manual/gawk.html>

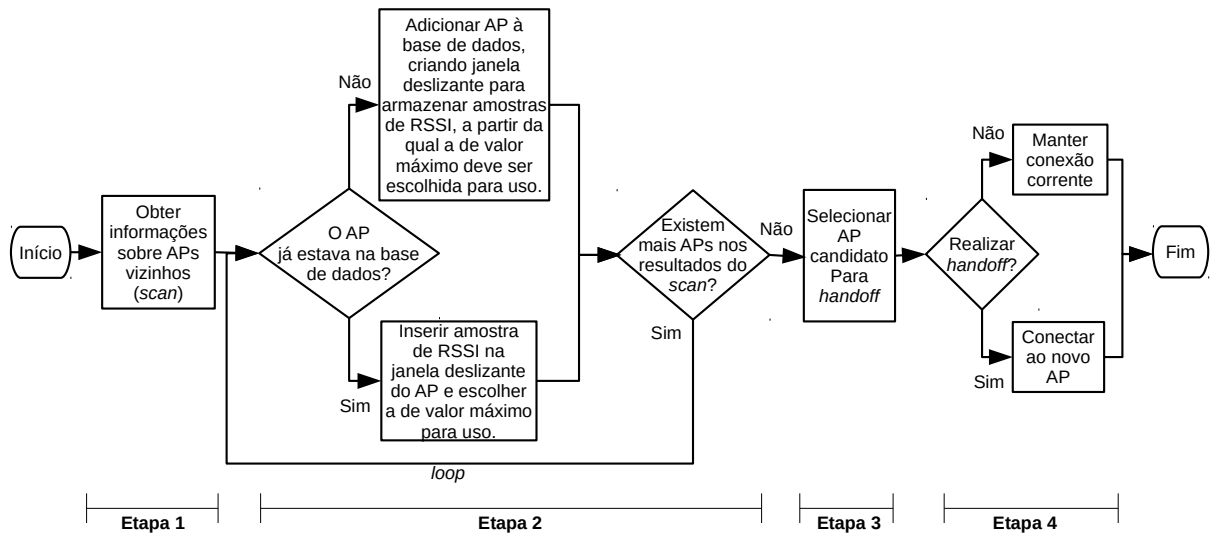


Figura 5.1: Diagrama de fluxo da decisão de *handoff* do Máximo.

RSSI é adicionada à janela. Caso o AP já esteja na base de dados, a nova amostra de RSSI será adicionada à janela deslizante deste AP. Para a tomada de decisões, como as de *handoff*, a amostra de valor máximo na janela deverá ser utilizada. O Máximo não utiliza mecanismo de margem de histerese para evitar ping-pongs, como ocorre no WPA Supplicant.

O emulador é alimentado por *traces* capturados em redes reais no formato *.cap*, que é comumente utilizado por programas de captura de pacotes como o tcpdump<sup>3</sup> e a distribuição wireshark<sup>4</sup>. Nos testes apresentados neste capítulo, os *traces* foram capturados utilizando-se o *testbed* FIBRE da UFF descrito na Seção 4.1 e mais profundamente detalhado no Apêndice A. *Traces* obtidos em cenários com mobilidade e em cenários estáticos foram utilizados nas avaliações.

O emulador possui os seguintes parâmetros configuráveis:

- Persistência  $N_p$ : após um AP não aparecer  $N_p$  vezes em *scans* consecutivos, esse AP (ou BSS) é excluído da lista de APs encontrados na vizinhança da STA. Este valor deve ser configurado considerando-se que perdas de *beacons* podem ocorrer momentaneamente devido a desvanecimentos ou execução de *scan* pelo AP. Este parâmetro é utilizado originalmente pelo WPA Supplicant com valor igual a 2. Nos testes apresentados neste capítulo, o valor utilizado foi  $N_p = 10$  para evitar

<sup>3</sup><http://www.tcpdump.org/manpages/tcpdump.1.html>

<sup>4</sup><https://www.wireshark.org/docs/man-pages/>

desconexões desnecessárias;

- Intervalo entre *scans* (*Scan Interval*): Intervalo em segundos entre a execução de *scans*. Nos testes, o intervalo utilizado foi o intervalo comumente utilizado para emissão de *beacons* por APs, ou seja, 0,1024 segundos;
- Tempo de escuta no canal (*Max Channel Time*): é o intervalo de tempo em segundos que a STA espera pela recepção de *beacons* durante um *scan*. Nos testes, o intervalo de 0,1024 segundos foi utilizado. Este valor, em conjunto com o *Scan Interval* escolhido anteriormente, representa o caso ótimo no qual a STA consegue monitorar a maioria dos *beacons* emitidos pelos APs. Os testes realizados aqui consideram que os APs encontram-se em apenas um canal, que foi como as capturas foram realizadas. Em relação ao WPA Supplicant, estas configurações gerarão *scans* com maior frequência, o que poderá ajudar na conversão mais rápida dos mecanismos de filtragem. Um estudo posterior poderá ser realizado para verificar o impacto do intervalo de *scan* nos diferentes mecanismos de filtragem. Porém, aqui, como o foco não é o mecanismo de *scan*, o cenário ótimo será considerado;
- *Offset*: este recurso foi criado para que, a partir de uma mesma captura, diferentes instâncias de testes pudessem ser obtidas variando-se brevemente o momento de início do primeiro *scan* e os intervalos *Scan Interval* e *Max Channel Time*. O emulador possui uma variável, denominada *offsetOn*, que é utilizada para definir se este recurso deve ou não ser utilizado nos testes. Em caso positivo, um valor de *offset* é definido de forma aleatória entre 0 e *Max Channel Time*<sup>5</sup>. Este valor é adicionado ao primeiro momento de inicialização do *scan* para que este não comece sincronizado com o início da captura. Além disso, um décimo do valor do *offset* é adicionado às variáveis *Scan Interval* e *Max Channel Time*, para que *scans* distintos possam ser gerados a partir de um mesmo arquivo de captura de *beacons*;
- MACs para filtrar: lista contendo endereços MACs de APs que farão parte da emulação. Nos testes apresentados neste capítulo, os cenários consideraram apenas a existência de dois APs na vizinhança da STA, buscando-se facilitar a avaliação. Porém, o emulador suporta a emulação de ambientes com qualquer número de APs;
- *Subtype*: Subtipo do quadro de gerência a ser utilizado para a extração das amostras de RSSI. O subtipo utilizado foi o 0x08, ou seja, apenas quadros de *beacons*. Uma

---

<sup>5</sup>O valor do *offset* também pode ser obtido como parâmetro de entrada do emulador, para que um teste com determinado *offset* possa ser repetido.

ideia para trabalhos futuros é a utilização de quadros de *probe response* em conjunto com *beacons*, para emular *scans* ativos. Este tipo de *scan* é baseado no envio de quadros *probe request* por parte das STAs, que são respondidos por *probe responses* por parte dos APs. Com isto, um menor tempo de escuta do canal pode ser utilizado em relação ao *scan* passivo, que é baseado apenas na recepção de *beacons*. Outra ideia é a utilização de quadro de dados para aumentar tamanho da amostra sem aumentar o *overhead* na rede.

O emulador recebe parâmetros de entrada para a execução de suas diferentes funções, além do nome do arquivo de captura. A primeira função a ser realizada é a filtragem do arquivo de captura. Nesta função, o programa *tshark*<sup>6</sup>, incluído na suíte *wireshark*, é utilizado para realizar a filtragem dos quadros de *beacons* e dos MACs escolhidos a partir do arquivo *.cap* de entrada. A saída desta etapa é a geração de um arquivo, denominado *rssi\_file*, contendo o *epoch time* de cada quadro de *beacon*, bem como o RSSI registrado no cabeçalho *radiotap*<sup>7</sup>, entre outras informações.

Após a filtragem, a função de *scan* genérica<sup>8</sup> deve ser executada. Esta função lê o arquivo gerado pela filtragem (*rssi\_file*) e emula a execução de *scans* com base no *epoch time* registrado para cada quadro e intervalos definidos anteriormente para o *Scan Interval* e o *Max Channel Time*, considerando-se a aplicação ou não do *Offset*. Um índice é gerado para cada *scan* iniciando-se em 0, e as amostras de RSSI obtidas em cada *scan* para cada AP são associadas a este índice. A saída desta função, que corresponde à Etapa 1 na Figura 5.1, é guardada no arquivo *scan\_file*, que será utilizado como base para a execução de todos os mecanismos de *handoff*.

Após a execução do *scan* genérico, cada algoritmo de *handoff* deverá ser executado. Inicialmente, uma função específica de *scan* deverá ser executada para cada algoritmo, retornando um arquivo denominado *scan\_file\_out* com os resultados desta nova etapa, que equivale à Etapa 2 na Figura 5.1. Nesta função, a persistência é aplicada, assim como o mecanismo de filtragem do algoritmo e seus parâmetros de execução. Além disso, os APs encontrados no *scan* são ordenados por prioridade de escolha com base na vazão estimada, SNR (*Signal to Noise Ratio*) estimada e RSSI do AP, assim como ocorre no WPA Supplicant v.2.1.

A etapa de escolha do AP pretendente para a realização de um possível *handoff*,

---

<sup>6</sup><https://www.wireshark.org/docs/man-pages/tshark.html>

<sup>7</sup><https://www.radiotap.org/>

<sup>8</sup>O resultado desta função equivale ao relatório de *scan* gerado pelo *driver* da interface que é repassado ao WPA Supplicant quando este requer a execução de um *scan*.

que corresponde à Etapa 3 na Figura 5.1, é realizada obtendo-se o primeiro colocado na lista de prioridades gerada na etapa anterior e armazenada no arquivo *scan\_file\_out*. A seguir, uma função de *handoff* deverá ser executada, o que corresponde à Etapa 4 na Figura 5.1. Esta função varre o resultado do *scan* anterior armazenado no arquivo *scan\_file\_out* e decide, a cada *scan*, se o *handoff* deve ou não ser realizado. Aqui, podem ser implementadas margens de histerese. A saída desta etapa, que é salva no arquivo de resultados denominado *alg\_results*, é equivalente a uma saída do *log* do WPA Supplicant, que informa em qual momento, e em qual índice de *scan*, a STA realizou o *handoff*, além de informar qual foi o motivo. As nove possíveis mensagens de *log* geradas por esta etapa e que serão armazenadas no arquivo de saída são<sup>9</sup>:

- M0 ASSOCIU-SE INICIALMENTE AO AP *\$MAC*;
- M1 DESASSOCIADO POR FALTA DE OPÇÕES NESTE SCAN. AGUARDAR O PRÓXIMO;
- M2 FEZ HANDOFF PARA *\$MAC\_NEW* PORQUE NÃO ACHOU AP ATUAL NO SCAN;
- M3 MANTEVE-SE ASSOCIADO A *\$MAC* PORQUE NÃO ACHOU AP PRETENDENTE;
- M4 MANTEVE-SE ASSOCIADO A *\$MAC* PORQUE O AP PRETENDENTE É IGUAL AO ATUAL;
- M5 FAZ HANDOFF de *\$MAC* para *\$MAC\_NEW*: Allow reassociation - selected BSS has better estimated throughput;
- M6 De *\$MAC* para *\$MAC\_NEW*: Skip roam - Current BSS has better signal level;
- M7 De *\$MAC* para *\$MAC\_NEW*: Skip roam - too small difference in signal level;
- M8 FAZ HANDOFF de *\$MAC* para *\$MAC\_NEW*: DIFERENÇA NO SINAL É MAIOR OU IGUAL *\$min\_diff*;

Dentre as mensagens de *log*, as que são consideradas nas avaliações são as que indicam *handoffs* ocasionados pela diferença do RSSI entre o AP atual e o pretendente (mensagem do tipo M8) e as que indicam *handoffs* ocasionados pela melhor vazão estimada para o AP pretendente (mensagens do tipo M5). O valor da persistência  $N_p$  escolhido assegurou a não ocorrência das mensagens do tipo M1 e M2. Além disso, a mensagem do tipo M0 foi obtida apenas uma vez para cada experimento.

---

<sup>9</sup>Todas as mensagens incluem registro do número do *scan* no qual foram geradas, que foram omitidas por brevidade.

Por fim, para que estatísticas referentes aos diversos motivos de realização ou não do *handoff* para cada algoritmo e parâmetro testado sejam geradas, a função de resumo deve ser executada. Esta função também indica o identificador do *scan* no qual o último *handoff* foi realizado e pode ser configurada para gerar estatísticas de número de ping-pongs com base nos parâmetros  $X_{max}$  e  $N_{min}$  definidos no Capítulo 2. A saída desta função é um arquivo denominado *fileoutput* que resume todos os resultados obtidos, apontando informações como nome do algoritmo e parâmetro utilizado, número de *handoffs* e o momento (identificador do *scan*) do último *handoff* realizado. A partir destes dados, o número médio de ping-pongs e de atraso podem ser calculados para cada algoritmo testado em cada cenário apresentado neste capítulo.

## 5.2 Métricas e Cenários de Avaliação

As métricas utilizadas para avaliação dos mecanismos de *handoff* em cenários com mobilidade foram:

1. Porcentagem de ocorrências de não estabilizações, ou seja, porcentagem de casos em relação ao número total de emulações em que a STA terminou a emulação associada ao AP1 e não ao AP2, conforme o esperado;
2. Porcentagem de ocorrências de estabilizações precoces, ou seja, porcentagem de casos em relação ao número total de emulações em que a STA realizou o *handoff* antes do momento ideal de *handoff*, considerando-se uma margem de erro inferior definida pelo método utilizado para a determinação do momento ideal de *handoff*.
3. Média do número de ping-pongs. Esta métrica não considera casos em que houve estabilização precoce ou não estabilização. As margens de erro, neste caso, são dadas pelo intervalo de confiança de 95%;
4. Média do atraso para a realização do *handoff* referente ao momento ideal. Esta métrica não considera casos em que houve estabilização precoce ou não estabilização. As margens de erro, neste caso, são dadas pelo intervalo de confiança de 95%.

O momento ideal para o *handoff* foi calculado tomando-se como base o ponto de intersecção estimado entre os *traces* de RSSI de dois APs quaisquer cujos *beacons* foram capturados de forma que o RSSI de um dos APs aumenta enquanto o RSSI do outro AP diminui. A estimativa foi realizada utilizando-se o modelo *path loss*, que descreve o

decaimento do sinal com o logaritmo da distância. Um ajuste de curvas (*fit*) foi realizado com base neste modelo para cada *trace*, e a intersecção entre as curvas foi calculada. Além disso, as curvas que definem o erro do modelo também foram calculadas considerando-se o intervalo de confiança de 95% em torno dos valores médios preditos. Os pontos de intersecção entre as curvas de erro inferior e superior também foram calculados, dando origem ao ponto inferior do cruzamento das curvas de erro e ao ponto superior.

Para ilustrar um cenário com mobilidade e facilitar a visualização das curvas citadas, a Figura 5.2 apresenta um exemplo de dois dos *traces*, referentes a AP1 e a AP2, utilizados nos testes. O eixo *X* indica o tempo, dado em intervalos de *beacons* (0,1024 s). Pode-se notar um total de aproximadamente 190 intervalos, ou seja, aproximadamente 190 decisões de *handoff* serão emuladas. O eixo *Y* indica o RSSI de cada amostra. A STA inicialmente se associa ao AP1 e se locomove em direção ao AP2 com velocidade aproximada de 1,2 m/s, ou seja, aproximadamente a velocidade de uma pessoa caminhando rapidamente. Em determinado momento, o *handoff* de AP1 para AP2 é realizado, ou seja, espera-se que somente um *handoff* seja realizado em cenários com mobilidade.

A Figura 5.2 também inclui as curvas modeladas para a estimativa do momento ideal de *handoff* (em preto) e as curvas dadas pelas margens de erro do modelo. A curva em azul é a curva de erro inferior e a em vermelho é a curva de erro superior. Neste exemplo, o momento ideal do *handoff* foi 135,73, enquanto os pontos inferior e superior do cruzamento das curvas de erro foram 131,63 e 139,77, respectivamente. Pode-se notar a presença de vales para ambos os *traces* em momentos variados. Também é possível notar que, no início da emulação, a STA permaneceu estática e, no final da emulação, o RSSI de AP2 decaiu levemente devido ao afastamento da STA em relação a este AP após passar por ele. As curvas do *fit* foram ajustadas manualmente para cada instância emulada, de forma a se adequar a este comportamento que pode variar para cada uma delas.

O módulo do atraso do *handoff* foi calculado considerando-se o último *handoff* detectado no decorrer da emulação<sup>10</sup>. Este *handoff* pode ocorrer antes ou depois do momento ideal. Caso o *handoff* ocorra antes do ponto inferior do cruzamento das curvas de erro, o resultado é contabilizado como estabilização precoce. Caso o *handoff* ocorra depois deste limiar, o *handoff* é válido. Caso a STA sofra estabilização precoce ou não estabilização em uma determinada rodada de testes, atrasos e ping-pongs desta rodada não serão contabilizados para o cálculo dos valores médios.

<sup>10</sup>Nas análises, o atraso é dado em número de intervalos de *scans*, sendo que cada intervalo possui aproximadamente 0,1024 segundos.

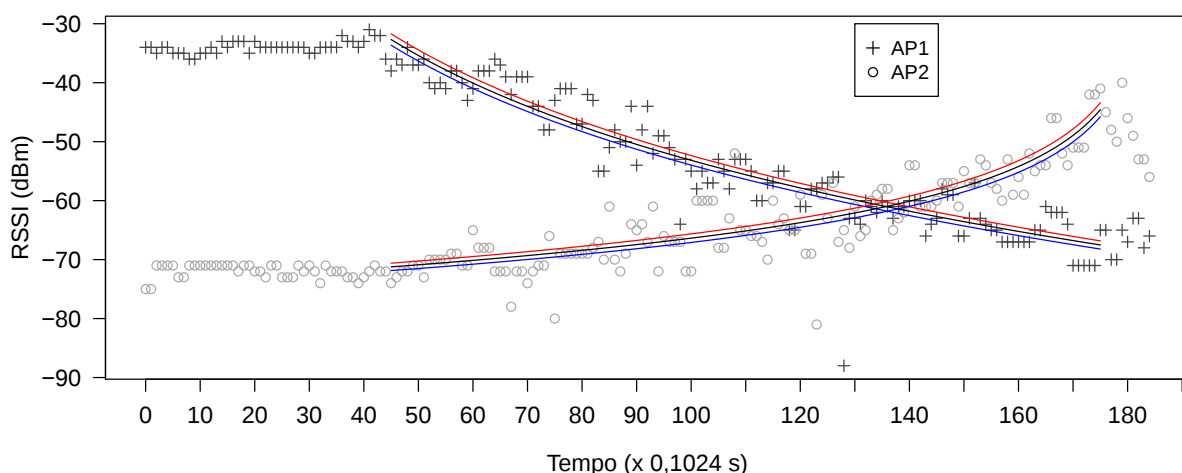


Figura 5.2: Exemplo de *traces* utilizados nos testes, incluindo as curvas modeladas para a estimativa do momento ideal para o *handoff* (em preto) e as curvas dadas pelas margens de erro do modelo (em azul e vermelho).

Considerando-se que as emulações em cenários com mobilidade duram em torno de 19 segundos, *i.e.*, um intervalo de tempo que pode ser considerado muito curto para a realização de mais de um *handoff* entre AP1 e AP2, o número de ping-pongs foi calculado como sendo o número de *handoffs* extra realizados nestes cenários, além do único *handoff* esperado.

Os filtros que geram séries temporais mais estáveis comumente apresentam maior atraso para a realização do *handoff* desejado, e vice-versa. Desta forma, as métricas atraso e número de ping-pongs podem ser consideradas critérios de avaliação conflitantes, ou seja, comumente uma métrica não pode ser melhorada sem que a outra seja piorada. Problemas que envolvem a tomada de decisão baseada em múltiplos critérios (MCDM, do inglês *Multiple-Criteria Decision-Making*) conflitantes podem apresentar mais de uma solução considerada ótima. Caso uma única solução seja desejada, uma informação de preferência arbitrária deve ser incorporada à tomada de decisão.

O problema MCDM pode ser representado através de um espaço de critérios de decisão. Nos testes com mobilidade, este espaço, que será utilizado para avaliar conjuntamente as métricas de atraso e número de ping-pongs para definir qual o melhor mecanismo de *handoff*, é dado pelos resultados de atraso médio *vs.* número médio de ping-pongs obtidos para cada algoritmo testado, incluindo a variação de seus diferentes parâmetros.

Uma forma de avaliação inicial é verificar quais configurações minimizam ambos os critérios. Como tipicamente uma configuração irá minimizar um critério, mas não o outro, configurações intermediárias entre aquelas que minimizam cada critério também podem

ser consideradas ótimas. Desta forma, mais de um resultado ótimo poderá ser obtido. Estas configurações são conhecidas como Paretos Ótimos, e seus resultados formam a fronteira de Pareto que pode ser observada no espaço de critérios.

Ao final, para decidir qual o melhor mecanismo dentre os Paretos Ótimos, uma regra arbitrária baseada na distância entre cada Pareto Ótimo e o ponto (0,0) do espaço de critérios será utilizada, de forma que o que obtiver menor distância será considerado o melhor. Este critério arbitrário foi escolhido da forma mais simples dando-se o mesmo peso para ambas as métricas, porém pesos diferentes poderiam ser escolhidos. Entretanto, isto envolveria uma análise mais profunda para determinação dos pesos. A Figura 5.3 exemplifica a fronteira de Paretos Ótimos obtida para o algoritmo Máximo em um dos testes com mobilidade. O eixo X representa o atraso de *handoff* médio enquanto o eixo Y representa o número de ping-ongs médio. Cada ponto cinza representa o resultado obtido por um diferente parâmetro (tamanho da janela) do Máximo. Os pontos circulado em preto são os Paretos Ótimos e o ponto circulado em vermelho é o melhor resultado segundo o critério arbitrário escolhido. As métricas de estabilização precoce e não estabilização serão utilizadas como critérios auxiliares de avaliação.

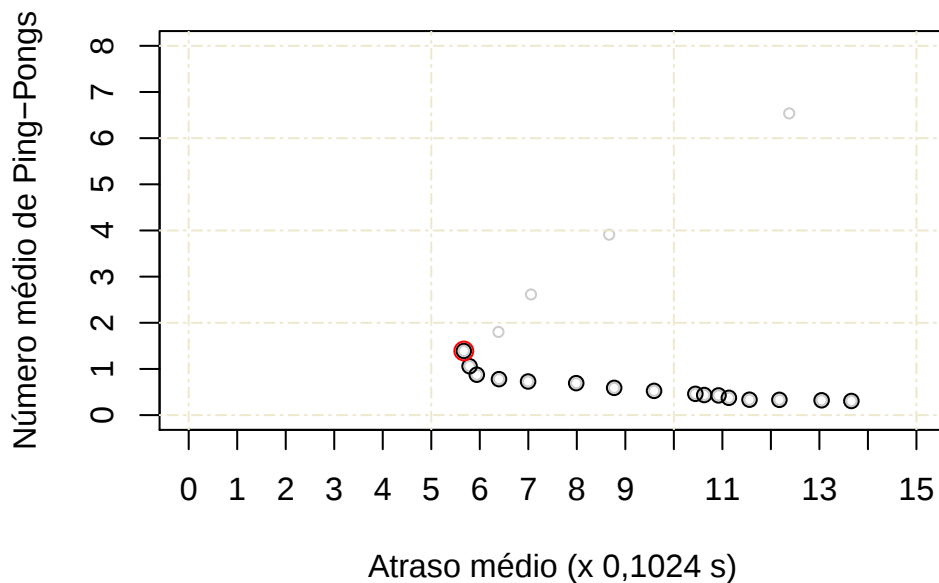


Figura 5.3: Exemplo do espaço de critérios obtido para o Máximo em um dos cenários com mobilidade. Cada ponto cinza representa o resultado obtido por uma diferente janela. Os pontos em preto são os Paretos Ótimos e o ponto em vermelho é o melhor resultado.

Nos cenários estáticos emulados, apenas o número de ping-ongs será utilizado como métrica de avaliação, tendo em vista que, nestes cenários, não é desejada a ocorrência de *handoffs*. Desta forma, nestes cenários, que também apresentam duração curta em torno de 2 minutos, todos os *handoffs* serão contabilizados como sendo ping-ongs.

Em todas as instâncias dos testes, os *traces* foram coletados pela interface Airpcap-NX, que, conforme demonstrado na Seção 4.1, apresentou resultados de RSSI com vales mais extremos em relação às demais interfaces testadas e, portanto, é mais suscetível ao efeito ping-pong que pode ser ocasionado por eles.

## 5.3 Descrição dos algoritmos testados

A Tabela 5.1 apresenta os sete algoritmos que foram considerados nas avaliações apresentadas neste capítulo, que são:

1. WPA - Algoritmo original do WPA Supplicant (versão 2.1), descrito no Capítulo 2;
2. EWMA - Algoritmo baseado no filtro da média móvel exponencialmente ponderada proposto para prevenir ping-pongs em [29] e descrito no Capítulo 2, com valores de  $\alpha$  entre 0,01 e 0,99. Os valores obtidos a partir do filtro não foram arredondados para o número inteiro mais próximo, conforme feito na implementação apresentada nos testes da Seção 2.4, tendo em vista que, com o arredondamento, a convergência do filtro se tornou muito lenta, ocasionando muitos casos de não estabilização. Além disso, nenhuma margem de histerese foi utilizada em conjunto com o filtro, como feito na Seção 2.4;
3. HM - Algoritmo de margem de histerese fixa, também descrito no Capítulo 2, porém com valores entre 1 e 20;
4. MAX - Algoritmo Máximo com tamanho de janelas  $W_s$  entre 2 e 21;
5. MODE - Algoritmo baseado na moda<sup>11</sup>, ou o valor mais frequente. O valor da estatística moda é escolhido a partir de uma janela deslizante. Tamanhos de janela  $W_s$  entre 3 e 22 foram utilizados nos testes. Caso haja mais de uma moda (empate), a moda com maior valor de RSSI é retornada. Caso uma moda não seja detectada, a mediana é retornada. Este filtro foi utilizado em [33] para a filtragem da série temporal de RSSI em busca de maior estabilidade;
6. MEDIAN - Algoritmo baseado na mediana calculada a partir de uma janela deslizante. Tamanhos de janela  $W_s$  ímpares entre 3 e 31 foram utilizados nos testes. Este algoritmo foi escolhido porque, comumente, a mediana é menos afetada por *outliers*

---

<sup>11</sup><https://itl.nist.gov/div898/handbook/eda/section3/eda351.htm>

em relação à média e, como vales de RSSI podem ser tratados como *outliers*, este filtro pode ocasionar bons resultados. Este filtro foi utilizado anteriormente em [21];

7. NDIST - Algoritmo baseado na distribuição normal. Este algoritmo é uma proposta que surgiu no decorrer da pesquisa apresentada neste trabalho, porém ainda está sob avaliação por apresentar muitos parâmetros e, conseqüentemente, difícil configuração.

O objetivo do algoritmo NDIST é verificar se uma nova amostra de RSSI pertence ou não à distribuição atual do RSSI, estimada pela média ( $\mu$ ) e desvio padrão ( $s$ ) de amostras guardadas em uma janela deslizante de tamanho  $W_s$ . Além disso, o algoritmo verifica se a amostra é um *outlier*, ou seja, apresenta valor muito afastado da média da distribuição. A verificação é realizada comparando-se a amostra de RSSI com limiares dados pela multiplicação de  $N*_s$  e  $N*_{sout}$  pelo desvio  $s$ , respectivamente.

Quando uma nova amostra de RSSI é recebida, um teste é realizado para saber se ela pertence ou não à distribuição do RSSI. Caso a amostra passe no teste, a média da distribuição não será atualizada, porém, a amostra será armazenada na janela deslizante. Caso a amostra não passe no teste, é verificado se ela é um *outlier* ou não. Caso não seja, a média é atualizada com base na janela de amostras guardadas, incluindo a amostra atual.

Para os casos em que a janela não se encontra cheia, a amostra recebida é armazenada na janela e a nova média e desvio padrão são calculados. Nestes casos, o valor utilizado para a decisão de *handoff* será a média das amostras contidas na janela.

Se a amostra é considerada um *outlier*, ela será armazenada, porém fora da janela anterior. Caso o número de *outliers* consecutivos alcance  $Max_{out}$ , uma nova média é iniciada com base nestes *outliers* consecutivos armazenados.

Desta forma, o NDIST necessita de quatro parâmetros para operar, que são: 1) multiplicador do desvio padrão  $N*_s$ , utilizado para definir o limiar de teste para verificar se a amostra pertence ou não à distribuição do RSSI; 2) multiplicador do desvio padrão  $N*_{sout}$ , utilizado para definir o limiar de detecção de *outliers*; 3) número máximo de *outliers* consecutivos  $Max_{out}$  que devem ocorrer para que a média da distribuição seja alterada com base nos *outliers*; 4) tamanho da janela, denominado  $W_s$ .

É importante notar que o NDIST foi criado considerando-se uma distribuição normal, porém, seus parâmetros podem facilmente ser alterados para que outra distri-

Tabela 5.1: Algoritmos de *handoff* utilizados nos testes.

| Algoritmo   | Descrição                                                                                                                                                                        |
|-------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| WPA         | Algoritmo Original do WPA Supplicant.                                                                                                                                            |
| MAX         | Filtro Máximo com $W_s$ entre 2 e 21.                                                                                                                                            |
| EWMA [29]   | Filtro EWMA com $\alpha$ entre 0,01 e 0,99                                                                                                                                       |
| HM [29]     | Margem de histerese de RSSI com valores entre 1 e 20.                                                                                                                            |
| MODE [33]   | Filtro baseado na moda com $W_s$ entre 3 e 22.                                                                                                                                   |
| MEDIAN [21] | Filtro baseado na mediana com $W_s$ ímpares entre 3 e 31.                                                                                                                        |
| NDIST       | Filtro baseado na distribuição normal com $N*_{s} = \{0,5; 0,7; 1,0; 1,2; 1,5\}$ ;<br>$N*_{sout} = \{4; 5\}$ ; $Max_{out} = \{4; 6; 8; 10\}$ ; $W_s = \{4; 6; 8; 10; 12; 14\}$ . |

buição seja suportada.

Os seguintes valores para os parâmetros foram utilizados nas simulações, gerando resultados para todas as combinações possíveis entre eles:

$$N*_{s} = \{0,5; 0,7; 1,0; 1,2; 1,5\}$$

$$N*_{sout} = \{4; 5\}$$

$$Max_{out} = \{4; 6; 8; 10\}$$

$$W_s = \{4; 6; 8; 10; 12; 14\}$$

Nestes algoritmos, assim como no Máximo, o mecanismo de margem de histerese original do WPA Supplicant não foi utilizado em conjunto com o filtro.

Dada a grande variedade de parâmetros listados na Tabela 5.1, uma etapa anterior à realização dos testes foi realizada para que os parâmetros com melhores resultados de cada algoritmo fossem selecionados. O procedimento de seleção será apresentado a seguir.

## 5.4 Pré-seleção de parâmetros

Devido à grande variedade de parâmetros escolhidos para serem testados para cada algoritmo listado na seção anterior (415 no total), um teste inicial foi realizado para a pré-seleção de parâmetros ótimos em busca de um conjunto menor de valores para cada algoritmo.

O objetivo foi escolher Paretos Ótimos em relação às métricas de número de ping-pongs e atraso em cenários com mobilidade, que são considerados os de maior importância aqui, por estarem relacionados a uma maior ocorrência de ping-pongs, conforme concluído no Capítulo 2.

Para a realização desta seleção, 2025 instâncias de cenários com mobilidade similares à apresentada na Figura 5.2 foram emuladas. Estas instâncias foram geradas a partir de 45 pares de *traces* de RSSI referentes a AP1 e AP2. Para cada um destes pares, 45 *Offsets* diferentes foram emulados, gerando as  $45 * 45 = 2025$  instâncias totais.

A Figura 5.4 apresenta os espaços de critérios obtidos para os sete algoritmos de *handoff* testados. Os círculos cinza representam os resultados obtidos para cada parâmetro testado. Os círculos pretos representam os Paretos Ótimos. O círculo em vermelho representa o Pareto Ótimo com menor distância até o ponto (0,0) do gráfico. Os eixos foram apresentados com a mesma extensão para todos os gráficos, para facilitar a comparação entre os resultados. O eixo *X* apresenta a média dos atrasos, dado em intervalos de *beacon*, obtidos nas 2025 instâncias da emulação (excluindo-se instâncias com estabilização precoce ou não estabilização), e o eixo *Y* apresenta o número médio de ping-pongs obtidos.

Em geral, pode-se observar que a curva do Atraso médio *vs.* N° de Ping-Pongs médio apresenta um vértice que indica o ponto de menor atraso médio para um determinado valor de ping-pongs. Para valores de *Y* acima deste valor, o atraso tende a aumentar. Isto pode ser explicado pela ocorrência de ping-pongs que são realizados após o momento ideal de *handoff*. Como o atraso é calculado com base no último *handoff* realizado (*i.e.* após a estabilização), este atraso cresce conforme o número de ping-pongs cresce. Entretanto, para valores de ping-pong abaixo do vértice, resultados mais estáveis são obtidos, porém com maior atraso conforme a estabilidade aumenta. Em todos os casos, este vértice foi considerado o melhor resultado, ou seja, a melhor combinação de parâmetro(s) para o algoritmo em questão, por apresentar menor distância ao ponto (0,0), que foi a métrica arbitrária escolhida para determinar o melhor resultado dentre os Paretos Ótimos.

A Figura 5.5 mostra dois Box Plots contendo os valores mínimo, máximo, mediana, e primeiro e terceiro quartis da porcentagem de ocorrências de casos de não estabilização (Figura 5.5 (a)) e estabilização precoce (Figura 5.5 (b)) para todos os Paretos Ótimos de cada algoritmo. Cada porcentagem de ocorrências foi calculada dentre o total das 2025 instâncias de testes. Na Figura 5.5 (a) pode-se notar que o MAX e o WPA não apresentaram casos de não estabilização, porém os algoritmos EWMA, NDIST, MODE, MEDIAN e HM sofreram este problema.

Diferentemente dos casos de não estabilização, todos os algoritmos apresentaram casos de estabilização precoce em diferentes proporções para diferentes parâmetros testados, conforme mostra a Figura 5.5 (b). O MAX obteve porcentagens baixas de ocorrência para a maioria dos parâmetros, porém, os demais algoritmos, exceto o HM e o WPA,

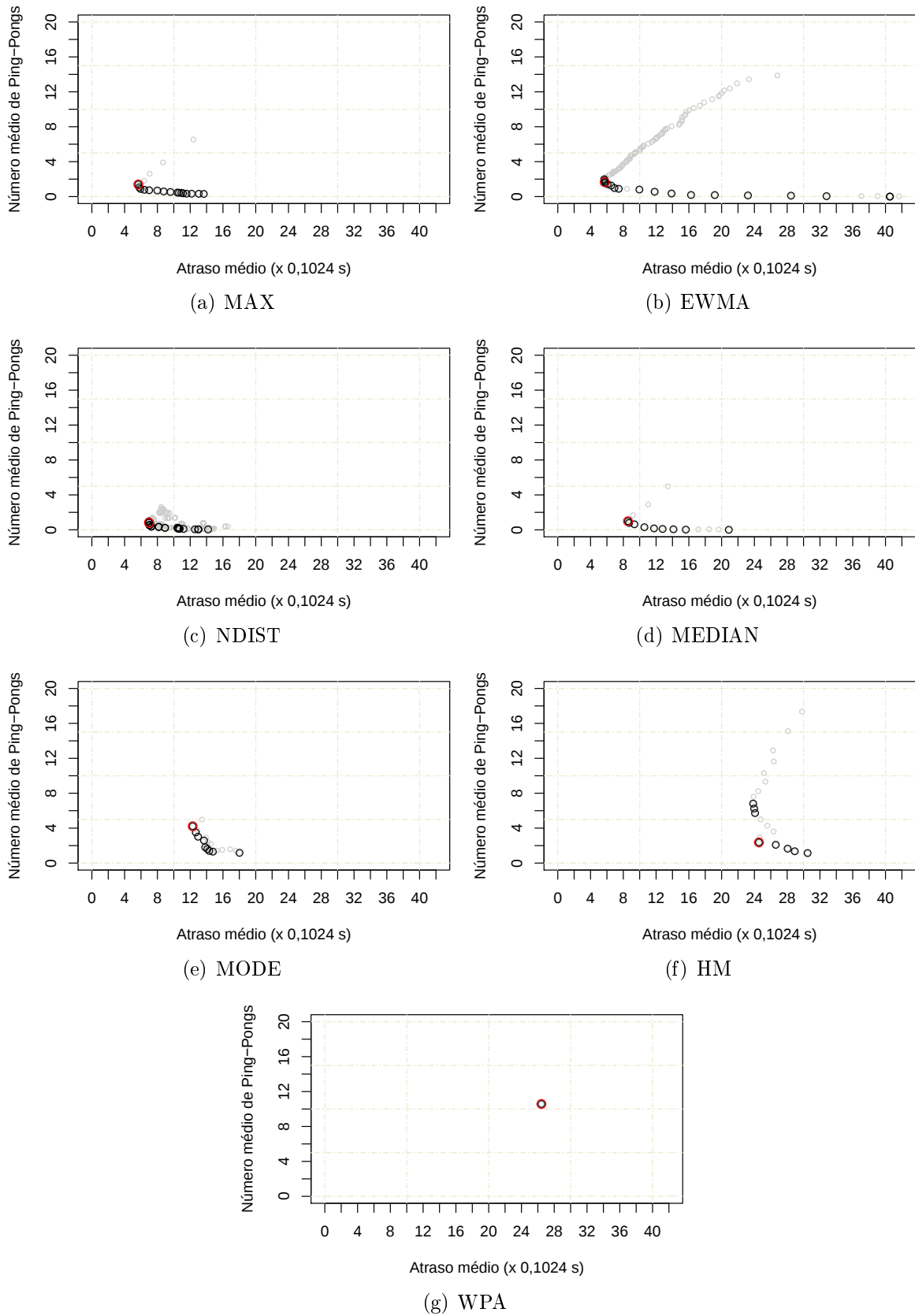
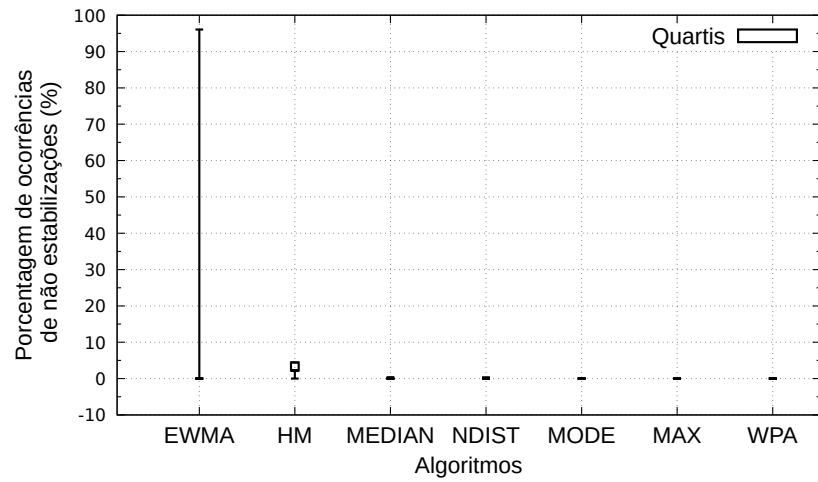
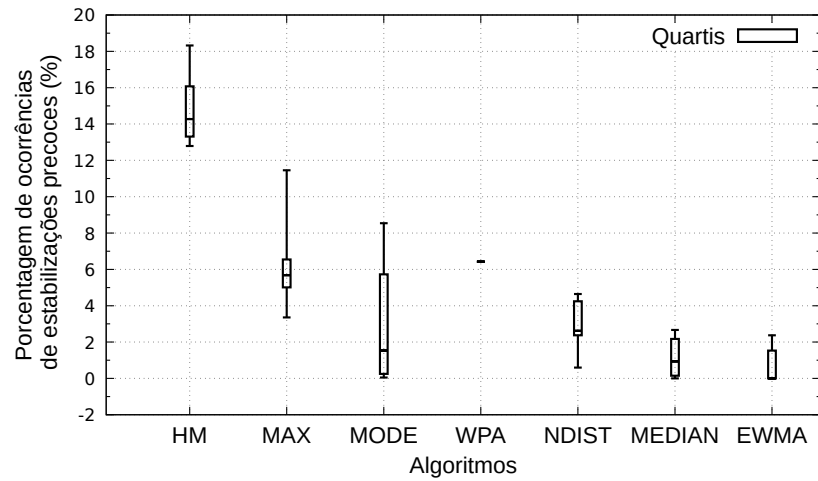


Figura 5.4: Gráficos do Atraso médio *vs.* Número médio de Ping-Pongs incluindo Paretos Ótimos marcados em preto e resultado de menor distância ao ponto (0,0) em vermelho, para (a) MAX; (b) EWMA; (c) NDIST; (d) MEDIAN; (e) MODE; (f) HM; (g) WPA.



(a) Não estabilizações



(b) Estabilizações precoces

Figura 5.5: Box Plots com máximo e mínimo, mediana e primeiro e terceiro quartis das porcentagens de casos de: (a) não estabilização e; (b) estabilização precoce.

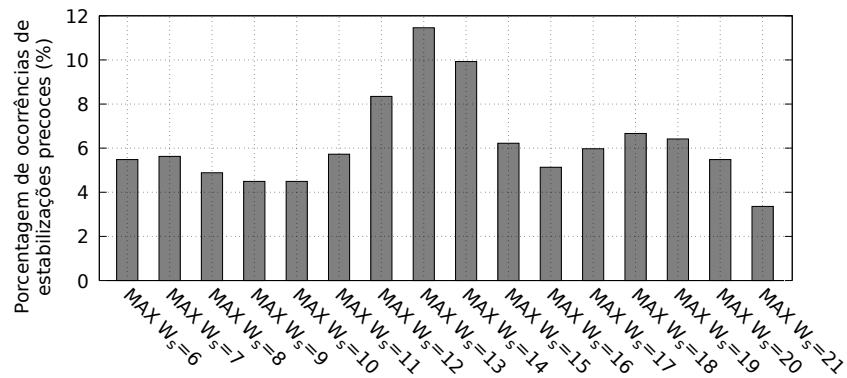


Figura 5.6: Porcentagem de casos de estabilização precoce obtidos para os Paretos Ótimos do algoritmo MAX.

obtiveram resultados melhores. A Figura 5.6 apresenta as porcentagens obtidas para cada Pareto Ótimo do algoritmo MAX. Para tamanhos de janelas entre 6 até 11 e 15 até 21, o MAX obteve porcentagens de ocorrência abaixo de 6,6%. Valores maiores foram obtidos para as janelas 12, 13 e 14, que obtiveram, respectivamente, 8,3%, 11,4% e 9,9% de ocorrências.

Observando-se as Figuras 5.4 (a) e (b), nota-se que os algoritmos que obtiveram menores atrasos foram MAX e EWMA. O MAX (Figura 5.4 (a)) obteve Paretos Ótimos para  $W_s = 6$  até 21, ordenados pela distância ao ponto (0,0). O melhor resultado (MAX  $W_s = 6$ ) apresentou atraso médio de  $5,67 \pm 0,40$  scans e  $1,39 \pm 0,06$  ping-pongs em média. Já o EWMA (Figura 5.4 (b)) obteve Paretos Ótimos para os parâmetros  $\alpha = \{0,79; 0,78; 0,76; 0,8; 0,81; 0,83 \text{ até } 0,85; 0,87 \text{ até } 0,94; 0,98; 0,99\}$ , com melhor resultado para  $\alpha = 0,79$  com atraso médio  $5,72 \pm 0,37$  e  $1,65 \pm 0,07$  ping-pongs na média. Pode-se notar que, apesar do baixo atraso, maior instabilidade foi obtida para o EWMA em relação ao MAX.

Os demais algoritmos obtiveram atrasos maiores em relação ao MAX e ao EWMA. O NDIST (Figura 5.4 (c)), que se saiu melhor dentre os demais algoritmos obteve melhor resultado para NDIST  $\{N*_s = 0,5; N*_{sout} = 5; W_s = 8; Max_{out} = 10\}$  com atraso médio de  $6,97 \pm 0,40$  e número médio de ping-pongs de  $0,81 \pm 0,05$ . Este algoritmo obteve atraso maior, porém com maior estabilidade em relação aos melhores resultados obtidos para MAX e EWMA. O MEDIAN (Figura 5.4 (d)) obteve melhor resultado para  $W_s = 9$ , com atraso de  $8,57 \pm 0,43$  e  $0,98 \pm 0,06$  ping-pongs. O MODE (Figura 5.4 (e)) obteve melhor resultado para  $W_s=4$  com atraso de  $12,30 \pm 0,56$  e  $4,21 \pm 0,10$  ping-pongs. O HM (Figura 5.4 (f)) obteve melhor resultado para HM=16 com atraso de  $24,55 \pm 0,64$  e  $2,36 \pm 0,14$  ping-pongs. Por fim, o WPA (Figura 5.4 (g)), que não possui parâmetros e portanto apresenta apenas um Pareto Ótimo, obteve atraso médio de  $26,43 \pm 0,85$  e número médio de ping-pongs de  $10,57 \pm 0,27$ , ou seja, o pior resultado dentre os Paretos Ótimos obtidos. A Figura 5.7 mostra estes resultados através do gráfico da média do atraso *vs.* o número médio de ping-pongs para os melhores resultados obtidos para cada algoritmo.

Para obter-se um resultado geral em relação a todos os algoritmos e todos os parâmetros emulados, os Paretos Ótimos foram calculados considerando-se o espaço de critérios contendo todos os resultados. A Figura 5.8 apresenta estes Paretos Ótimos (que serão denominados Paretos Ótimos gerais) e a Tabela 5.2 apresenta quais são os algoritmos e parâmetros associados a eles, ordenados de acordo com a distância até o ponto (0,0).

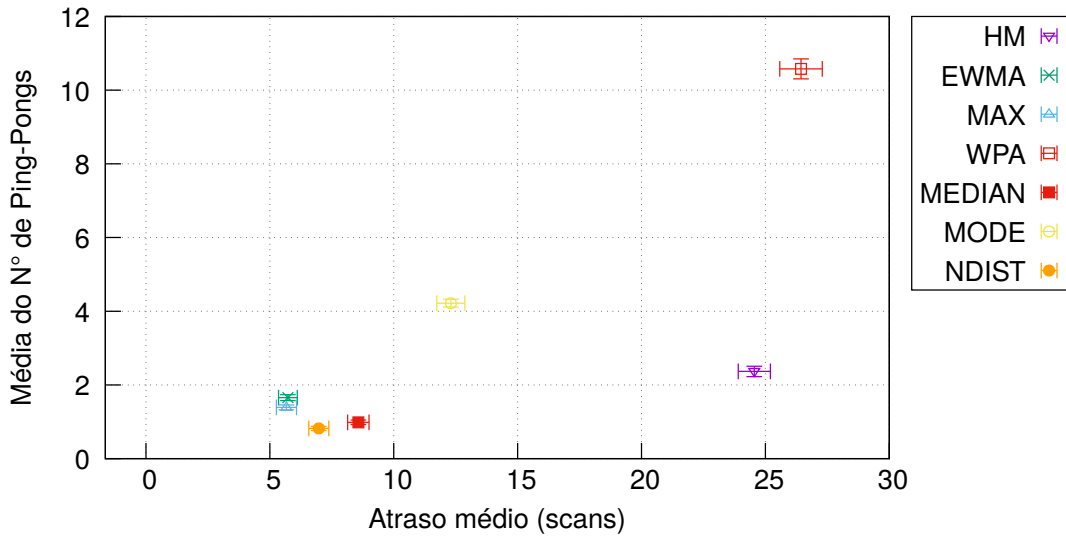


Figura 5.7: Gráfico dos melhores resultados obtidos por cada algoritmo em termos do atraso médio *vs.* número médio de ping-pongs. As margens de erro são dadas pelo intervalo de confiança de 95%.

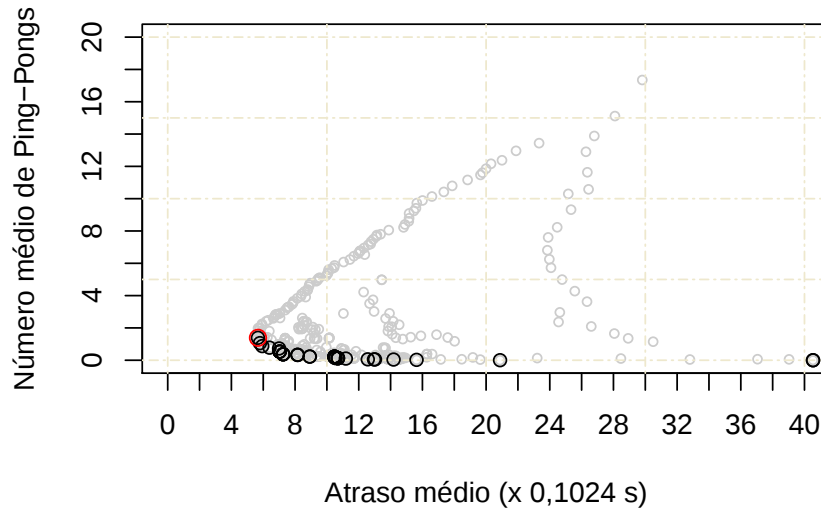


Figura 5.8: Gráficos do Atraso médio *vs.* Número médio de Ping-Pongs incluindo Pareto Ótimos marcados em preto e resultado de menor distância ao ponto (0,0) em vermelho, para todos os algoritmos testados.

Neste cenário, os Pareto Ótimos gerais incluíram os algoritmos MAX, NDIST, MEDIAN e EWMA. O MAX obteve melhor *tradeoff* entre atraso e número de ping-pongs para  $W_s = 6,7,8,9$  e 10, ocupando as primeiras posições no ranking considerando-se a distância até o ponto (0,0) do espaço de critérios. O mecanismo NDIST aparece logo em seguida no ranking, apresentando atrasos um pouco maiores, porém com maior estabilidade. O MEDIAN aparece em seguida e, por fim, o EWMA aparece como algoritmo mais estável, porém com grandes atrasos, o que é capaz de gerar muitos casos de não estabi-

lização<sup>12</sup>, conforme mostra a coluna  $\overline{Stab}$  da Tabela 5.2. A coluna Precoce apresenta a porcentagem de casos de estabilizações precoces obtida por cada Pareto Ótimo geral.

Por fim, a Tabela 5.3 apresenta os algoritmos e seus parâmetros selecionados para a realização de testes comparativos em cenários estáticos e novos testes em cenário com mobilidade. Estes 93 parâmetros são relativos aos Paretos Ótimos obtidos para cada algoritmo, apresentados anteriormente na Figura 5.4. Nas seções a seguir, os resultados destes testes serão apresentados.

---

<sup>12</sup>Devido ao grande atraso, o filtro pode não convergir até o final da emulação, o que acarreta a não realização do *handoff* esperado.

Tabela 5.2: Paretos Ótimos gerais ordenados pela distância ao ponto (0,0). Os erros do atraso médio e do número médio de ping-pongs são dados pelo intervalo de confiança de 95%. A coluna  $\overline{Stab}$  informa a porcentagem de não estabilizações, enquanto a coluna Precoce informa a porcentagem de estabilizações precoces. Por fim, a coluna Dist. informa a distância ao ponto (0,0) do espaço de critérios.

| Algoritmo                                                | Atraso           | Ping-Pongs        | $\overline{Stab}(\%)$ | Precoce(%) | Dist. |
|----------------------------------------------------------|------------------|-------------------|-----------------------|------------|-------|
| MAX $W_s = 6$                                            | $5,67 \pm 0,40$  | $1,39 \pm 0,06$   | 0                     | 5,48       | 5,83  |
| MAX $W_s = 7$                                            | $5,78 \pm 0,41$  | $1,05 \pm 0,05$   | 0                     | 5,62       | 5,88  |
| MAX $W_s = 8$                                            | $5,93 \pm 0,42$  | $0,87 \pm 0,05$   | 0                     | 4,88       | 6,00  |
| MAX $W_s = 9$                                            | $6,39 \pm 0,41$  | $0,77 \pm 0,04$   | 0                     | 4,49       | 6,44  |
| MAX $W_s = 10$                                           | $6,99 \pm 0,43$  | $0,72 \pm 0,04$   | 0                     | 4,49       | 7,03  |
| NDIST $N_{*s}=0,5$ $N_{*sout}=5$ $W_s=10$ $Max_{out}=10$ | $7,03 \pm 0,38$  | $0,53 \pm 0,04$   | 0                     | 2,17       | 7,05  |
| NDIST $N_{*s}=0,5$ $N_{*sout}=5$ $W_s=10$ $Max_{out}=4$  | $7,03 \pm 0,38$  | $0,53 \pm 0,04$   | 0                     | 2,17       | 7,05  |
| NDIST $N_{*s}=0,5$ $N_{*sout}=5$ $W_s=10$ $Max_{out}=6$  | $7,03 \pm 0,38$  | $0,53 \pm 0,04$   | 0                     | 2,17       | 7,05  |
| NDIST $N_{*s}=0,5$ $N_{*sout}=5$ $W_s=10$ $Max_{out}=8$  | $7,03 \pm 0,38$  | $0,53 \pm 0,04$   | 0                     | 2,17       | 7,05  |
| NDIST $N_{*s}=0,7$ $N_{*sout}=5$ $W_s=10$ $Max_{out}=10$ | $7,24 \pm 0,39$  | $0,37 \pm 0,03$   | 0                     | 4,24       | 7,25  |
| NDIST $N_{*s}=0,7$ $N_{*sout}=5$ $W_s=10$ $Max_{out}=4$  | $7,24 \pm 0,39$  | $0,37 \pm 0,03$   | 0                     | 4,24       | 7,25  |
| NDIST $N_{*s}=0,7$ $N_{*sout}=5$ $W_s=10$ $Max_{out}=6$  | $7,24 \pm 0,39$  | $0,37 \pm 0,03$   | 0                     | 4,24       | 7,25  |
| NDIST $N_{*s}=0,7$ $N_{*sout}=5$ $W_s=10$ $Max_{out}=8$  | $7,24 \pm 0,39$  | $0,37 \pm 0,03$   | 0                     | 4,24       | 7,25  |
| NDIST $N_{*s}=0,5$ $N_{*sout}=5$ $W_s=12$ $Max_{out}=10$ | $8,15 \pm 0,40$  | $0,33 \pm 0,03$   | 0                     | 2,51       | 8,16  |
| NDIST $N_{*s}=0,5$ $N_{*sout}=5$ $W_s=12$ $Max_{out}=4$  | $8,15 \pm 0,40$  | $0,33 \pm 0,03$   | 0                     | 2,51       | 8,16  |
| NDIST $N_{*s}=0,5$ $N_{*sout}=5$ $W_s=12$ $Max_{out}=6$  | $8,15 \pm 0,40$  | $0,33 \pm 0,03$   | 0                     | 2,51       | 8,16  |
| NDIST $N_{*s}=0,5$ $N_{*sout}=4$ $W_s=12$ $Max_{out}=4$  | $8,91 \pm 0,40$  | $0,22 \pm 0,02$   | 0                     | 2,41       | 8,92  |
| NDIST $N_{*s}=0,5$ $N_{*sout}=4$ $W_s=12$ $Max_{out}=6$  | $8,92 \pm 0,40$  | $0,22 \pm 0,02$   | 0                     | 2,41       | 8,93  |
| NDIST $N_{*s}=0,7$ $N_{*sout}=5$ $W_s=14$ $Max_{out}=10$ | $10,47 \pm 0,41$ | $0,22 \pm 0,02$   | 0                     | 2,61       | 10,47 |
| NDIST $N_{*s}=0,7$ $N_{*sout}=5$ $W_s=14$ $Max_{out}=4$  | $10,47 \pm 0,41$ | $0,22 \pm 0,02$   | 0                     | 2,61       | 10,47 |
| NDIST $N_{*s}=0,7$ $N_{*sout}=5$ $W_s=14$ $Max_{out}=6$  | $10,47 \pm 0,41$ | $0,22 \pm 0,02$   | 0                     | 2,61       | 10,47 |
| NDIST $N_{*s}=0,7$ $N_{*sout}=5$ $W_s=14$ $Max_{out}=8$  | $10,47 \pm 0,41$ | $0,22 \pm 0,02$   | 0                     | 2,61       | 10,47 |
| NDIST $N_{*s}=1,0$ $N_{*sout}=4$ $W_s=12$ $Max_{out}=4$  | $10,47 \pm 0,40$ | $0,16 \pm 0,02$   | 0                     | 2,71       | 10,48 |
| NDIST $N_{*s}=1,0$ $N_{*sout}=4$ $W_s=12$ $Max_{out}=6$  | $10,49 \pm 0,40$ | $0,16 \pm 0,02$   | 0                     | 2,71       | 10,50 |
| NDIST $N_{*s}=1,2$ $N_{*sout}=4$ $W_s=10$ $Max_{out}=6$  | $10,55 \pm 0,44$ | $0,12 \pm 0,02$   | 0                     | 4,49       | 10,55 |
| NDIST $N_{*s}=1,2$ $N_{*sout}=5$ $W_s=10$ $Max_{out}=10$ | $10,69 \pm 0,47$ | $0,12 \pm 0,02$   | 0                     | 4,64       | 10,69 |
| NDIST $N_{*s}=1,2$ $N_{*sout}=5$ $W_s=10$ $Max_{out}=4$  | $10,69 \pm 0,47$ | $0,12 \pm 0,02$   | 0                     | 4,64       | 10,69 |
| NDIST $N_{*s}=1,2$ $N_{*sout}=5$ $W_s=10$ $Max_{out}=6$  | $10,69 \pm 0,47$ | $0,12 \pm 0,02$   | 0                     | 4,64       | 10,69 |
| NDIST $N_{*s}=1,2$ $N_{*sout}=5$ $W_s=10$ $Max_{out}=8$  | $10,69 \pm 0,47$ | $0,12 \pm 0,02$   | 0                     | 4,64       | 10,69 |
| NDIST $N_{*s}=1,2$ $N_{*sout}=4$ $W_s=12$ $Max_{out}=4$  | $11,18 \pm 0,42$ | $0,10 \pm 0,02$   | 0                     | 2,71       | 11,18 |
| NDIST $N_{*s}=1,2$ $N_{*sout}=4$ $W_s=14$ $Max_{out}=8$  | $12,56 \pm 0,42$ | $0,05 \pm 0,01$   | 0                     | 2,22       | 12,56 |
| NDIST $N_{*s}=1,5$ $N_{*sout}=4$ $W_s=10$ $Max_{out}=6$  | $12,95 \pm 0,53$ | $0,05 \pm 0,01$   | 0                     | 2,76       | 12,95 |
| NDIST $N_{*s}=1,5$ $N_{*sout}=4$ $W_s=10$ $Max_{out}=10$ | $13,02 \pm 0,53$ | $0,04 \pm 0,01$   | 0                     | 2,76       | 13,02 |
| NDIST $N_{*s}=1,5$ $N_{*sout}=4$ $W_s=12$ $Max_{out}=4$  | $14,18 \pm 0,48$ | $0,04 \pm 0,01$   | 0,34                  | 0,59       | 14,18 |
| MEDIAN $W_s=23$                                          | $15,63 \pm 0,41$ | $0,02 \pm 0,01$   | 0                     | 0          | 15,63 |
| MEDIAN $W_s=31$                                          | $20,87 \pm 0,41$ | $0,002 \pm 0,003$ | 0,39                  | 0          | 20,87 |
| EWMA $\alpha=0,98$                                       | $40,53 \pm 3,89$ | 0                 | 96,04                 | 0          | 40,53 |
| EWMA $\alpha=0,99$                                       | $40,53 \pm 3,89$ | 0                 | 96,04                 | 0          | 40,53 |

Tabela 5.3: Algoritmos de *handoff* e parâmetros selecionados para realização de testes em cenários estáticos e móveis.

| Algoritmo | Descrição                                                                                                                  |
|-----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| WPA       | Algoritmo Original do WPA Supplicant.                                                                                      |
| MAX       | Filtro Máximo com $W_s = 6$ até 21.                                                                                        |
| EWMA      | Filtro EWMA com<br>$\alpha = \{0,76; 0,78 \text{ até } 0,81; 0,83 \text{ até } 0,85; 0,87 \text{ até } 0,94; 0,98; 0,99\}$ |
| HM        | Margem de histerese de RSSI igual a 9 até 11 e 16 até 20.                                                                  |
| MODE      | Filtro baseado na moda com $W_s = 4,6,7,9,14,15,16,17$ e 22.                                                               |
| MEDIAN    | Filtro baseado na mediana com $W_s = 9,11,13,15,17,19,21,23$ e 31.                                                         |
| NDIST     | Filtro baseado na distribuição normal com os seguintes parâmetros combinados:                                              |
|           | $N^*_s = \{0,5\}; N^*_{sout} = \{4\}; W_s = \{12\}; Max_{out} = \{4; 6\}$                                                  |
|           | $N^*_s = \{0,5\}; N^*_{sout} = \{5\}; W_s = \{8\}; Max_{out} = \{4; 6; 8; 10\}$                                            |
|           | $N^*_s = \{0,5\}; N^*_{sout} = \{5\}; W_s = \{10\}; Max_{out} = \{8; 10\}$                                                 |
|           | $N^*_s = \{0,5\}; N^*_{sout} = \{5\}; W_s = \{12\}; Max_{out} = \{4; 6; 10\}$                                              |
|           | $N^*_s = \{0,7\}; N^*_{sout} = \{4\}; W_s = \{6\}; Max_{out} = \{4\}$                                                      |
|           | $N^*_s = \{0,7\}; N^*_{sout} = \{5\}; W_s = \{10\}; Max_{out} = \{4; 6; 8; 10\}$                                           |
|           | $N^*_s = \{0,7\}; N^*_{sout} = \{5\}; W_s = \{14\}; Max_{out} = \{4; 6; 8; 10\}$                                           |
|           | $N^*_s = \{1,0\}; N^*_{sout} = \{4\}; W_s = \{12\}; Max_{out} = \{4; 6\}$                                                  |
|           | $N^*_s = \{1,2\}; N^*_{sout} = \{4\}; W_s = \{10\}; Max_{out} = \{6\}$                                                     |
|           | $N^*_s = \{1,2\}; N^*_{sout} = \{4\}; W_s = \{12\}; Max_{out} = \{4\}$                                                     |
|           | $N^*_s = \{1,2\}; N^*_{sout} = \{4\}; W_s = \{14\}; Max_{out} = \{8\}$                                                     |
|           | $N^*_s = \{1,2\}; N^*_{sout} = \{5\}; W_s = \{10\}; Max_{out} = \{4; 6; 8; 10\}$                                           |
|           | $N^*_s = \{1,5\}; N^*_{sout} = \{4\}; W_s = \{10\}; Max_{out} = \{6; 10\}$                                                 |
|           | $N^*_s = \{1,5\}; N^*_{sout} = \{4\}; W_s = \{12\}; Max_{out} = \{4\}$                                                     |

## 5.5 Testes com mobilidade

Após realizada a seleção dos melhores parâmetros para cada algoritmo considerando-se cenários com mobilidade, estes parâmetros, que estão listados na Tabela 5.3, serão utilizados para a realização de novos testes comparativos para a verificação do desempenho deles em um novo cenário com mobilidade.

O cenário móvel apresentado nesta seção é similar ao apresentado anteriormente, entretanto, aqui, o *Offset* do simulador não será aplicado. Neste cenário, dois APs, denominados AP1 e AP2, estão na vizinhança de uma STA móvel e esta deverá decidir, a cada intervalo de *beacon* de 0,1024 segundos, se deverá ou não realizar *handoff* de um AP para o outro. No total, 45 capturas de 19 segundos realizadas no *testbed* FIBRE com a interface Aircap-NX foram utilizadas para gerar *traces* de RSSI para ambos os APs. A Figura 5.9 mostra um exemplo de instância emulada utilizando-se o emulador apresentado na Seção 5.1. Assim como no cenário com mobilidade apresentado na seção anterior, aqui também espera-se que apenas um *handoff* seja realizado para cada instância de teste. A seguir, as métricas definidas na Seção 5.2 serão utilizadas para avaliação dos algoritmos.

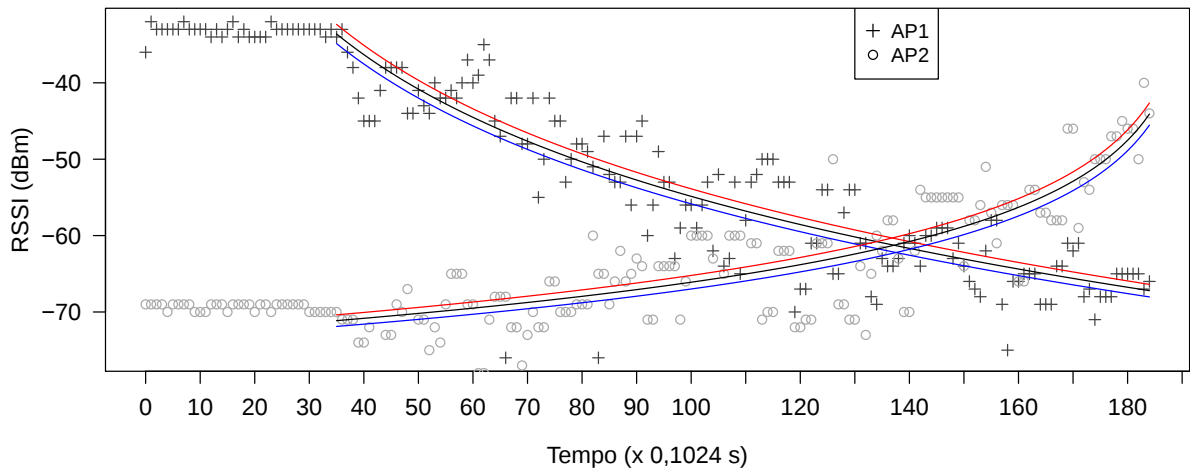


Figura 5.9: Exemplo de *traces* utilizados no teste com mobilidade, incluindo as curvas modeladas para a estimativa do momento ideal para o *handoff* (em preto) e as curvas dadas pelas margens de erro do modelo (em azul e vermelho).

A Figura 5.10 apresenta o espaço de critérios relativo ao atraso médio e média do número de ping-pongs obtidos nas 45 instâncias de teste. Este espaço de critérios inclui todos os resultados obtidos por todos os algoritmos/parâmetros testados. Em preto estão marcados os Pareto Ótimos gerais obtidos neste cenário, e em vermelho é apresentado o melhor resultado obtido, referente ao algoritmo  $MAX W_s = 8$ , que obteve atraso médio de  $4,84 \pm 1,56$  e média do número de ping-pongs de  $0,79 \pm 0,32$ .

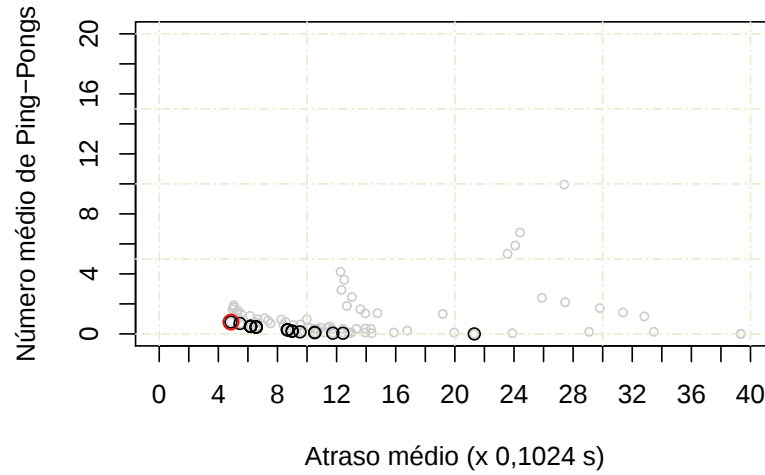


Figura 5.10: Gráficos do Atraso médio *vs.* Número médio de Ping-Pongs incluindo Paretos Ótimos marcados em preto e resultado de menor distância ao ponto (0,0) em vermelho, para todos os algoritmos testados.

Tabela 5.4: Paretos Ótimos gerais ordenados pela distância. As colunas  $\overline{Stab}$  e  $\overline{Precoce}$  informam respectivamente as porcentagens de não estabilizações e estabilizações precoces, e a coluna Dist. informa a distância ao ponto (0,0) do espaço de critérios.

| Algoritmo                                                | Atraso           | Ping-Pongs      | $\overline{Stab}(\%)$ | $\overline{Precoce}(\%)$ | Dist. |
|----------------------------------------------------------|------------------|-----------------|-----------------------|--------------------------|-------|
| MAX $W_s = 8$                                            | $4,84 \pm 1,56$  | $0,79 \pm 0,32$ | 0                     | 4,44                     | 4,91  |
| MAX $W_s = 9$                                            | $5,46 \pm 1,69$  | $0,69 \pm 0,28$ | 0                     | 4,44                     | 5,50  |
| NDIST $N^*_s=0,5$ $N^*_{sout}=5$ $W_s=10$ $Max_{out}=10$ | $6,17 \pm 1,35$  | $0,50 \pm 0,25$ | 0                     | 2,22                     | 6,19  |
| NDIST $N^*_s=0,5$ $N^*_{sout}=5$ $W_s=10$ $Max_{out}=4$  | $6,17 \pm 1,35$  | $0,50 \pm 0,25$ | 0                     | 2,22                     | 6,19  |
| NDIST $N^*_s=0,5$ $N^*_{sout}=5$ $W_s=10$ $Max_{out}=6$  | $6,17 \pm 1,35$  | $0,50 \pm 0,25$ | 0                     | 2,22                     | 6,19  |
| NDIST $N^*_s=0,5$ $N^*_{sout}=5$ $W_s=10$ $Max_{out}=8$  | $6,17 \pm 1,35$  | $0,50 \pm 0,25$ | 0                     | 2,22                     | 6,19  |
| NDIST $N^*_s=0,7$ $N^*_{sout}=5$ $W_s=10$ $Max_{out}=10$ | $6,56 \pm 1,39$  | $0,45 \pm 0,25$ | 0                     | 2,22                     | 6,57  |
| NDIST $N^*_s=0,7$ $N^*_{sout}=5$ $W_s=10$ $Max_{out}=4$  | $6,56 \pm 1,39$  | $0,45 \pm 0,25$ | 0                     | 2,22                     | 6,57  |
| NDIST $N^*_s=0,7$ $N^*_{sout}=5$ $W_s=10$ $Max_{out}=6$  | $6,56 \pm 1,39$  | $0,45 \pm 0,25$ | 0                     | 2,22                     | 6,57  |
| NDIST $N^*_s=0,7$ $N^*_{sout}=5$ $W_s=10$ $Max_{out}=8$  | $6,56 \pm 1,39$  | $0,45 \pm 0,25$ | 0                     | 2,22                     | 6,57  |
| NDIST $N^*_s=0,5$ $N^*_{sout}=5$ $W_s=12$ $Max_{out}=10$ | $8,67 \pm 1,72$  | $0,27 \pm 0,20$ | 0                     | 2,22                     | 8,67  |
| NDIST $N^*_s=0,5$ $N^*_{sout}=5$ $W_s=12$ $Max_{out}=4$  | $8,67 \pm 1,72$  | $0,27 \pm 0,20$ | 0                     | 2,22                     | 8,67  |
| NDIST $N^*_s=0,5$ $N^*_{sout}=5$ $W_s=12$ $Max_{out}=6$  | $8,67 \pm 1,72$  | $0,27 \pm 0,20$ | 0                     | 2,22                     | 8,67  |
| NDIST $N^*_s=0,5$ $N^*_{sout}=4$ $W_s=12$ $Max_{out}=4$  | $8,99 \pm 1,63$  | $0,18 \pm 0,17$ | 0                     | 2,22                     | 8,99  |
| NDIST $N^*_s=0,5$ $N^*_{sout}=4$ $W_s=12$ $Max_{out}=6$  | $8,99 \pm 1,63$  | $0,18 \pm 0,17$ | 0                     | 2,22                     | 8,99  |
| NDIST $N^*_s=1,2$ $N^*_{sout}=4$ $W_s=10$ $Max_{out}=6$  | $9,52 \pm 2,08$  | $0,13 \pm 0,15$ | 0                     | 2,22                     | 9,52  |
| NDIST $N^*_s=1,0$ $N^*_{sout}=4$ $W_s=12$ $Max_{out}=4$  | $10,52 \pm 1,58$ | $0,09 \pm 0,12$ | 0                     | 2,22                     | 10,52 |
| NDIST $N^*_s=1,0$ $N^*_{sout}=4$ $W_s=12$ $Max_{out}=6$  | $10,52 \pm 1,58$ | $0,09 \pm 0,12$ | 0                     | 2,22                     | 10,52 |
| MEDIAN $W_s = 17$                                        | $11,74 \pm 1,87$ | $0,04 \pm 0,08$ | 0                     | 2,22                     | 11,74 |
| MEDIAN $W_s = 19$                                        | $12,42 \pm 1,89$ | $0,04 \pm 0,08$ | 0                     | 0                        | 12,42 |
| MEDIAN $W_s = 31$                                        | $21,31 \pm 1,90$ | 0               | 0                     | 0                        | 21,31 |

A Tabela 5.4 apresenta os Paretos Ótimos gerais obtidos neste cenário em termos de atraso e número de ping-pongs, ordenados pela distância ao ponto (0,0) do espaço de critérios e incluindo outros resultados como a porcentagem de casos de não estabilização e de estabilizações precoces. Os algoritmos NDIST e MEDIAN também obtiveram Paretos Ótimos, porém com maiores distâncias ao ponto (0,0) devido ao maior atraso obtido. Pode-se notar que nenhum deles obteve casos de não estabilização e todos, exceto MEDIAN  $W_s = 19$  e 31, apresentaram casos de estabilização precoce, porém com baixa porcentagem de ocorrência.

A Figura 5.11 mostra os melhores resultados obtidos por cada algoritmo através do gráfico da média do atraso *vs.* o número médio de ping-pongs. Os desvios neste teste foram maiores em relação ao anterior porque um menor número de amostras foi avaliado. Os parâmetros com melhores resultados foram: MAX com  $W_s = 8$ ; EWMA com  $\alpha = 0,79$ ; NDIST  $N_{*s}=0,5$   $N_{*sout} = 5$   $W_s = 10$   $Max_{out} = 10$ ; MEDIAN com  $W_s=9$ ; MODE com  $W_s=7$ ; e HM=11. Pode-se notar que, apesar de terem obtido atrasos próximos, o MAX obteve menor ocorrência de ping-pongs em relação ao EWMA, e por isso este último não foi classificado como Pareto Ótimo neste cenário. O WPA obteve o pior resultado, com atraso médio de  $27,39 \pm 5,46$  e número médio de ping-pongs de  $9,95 \pm 1,66$ .

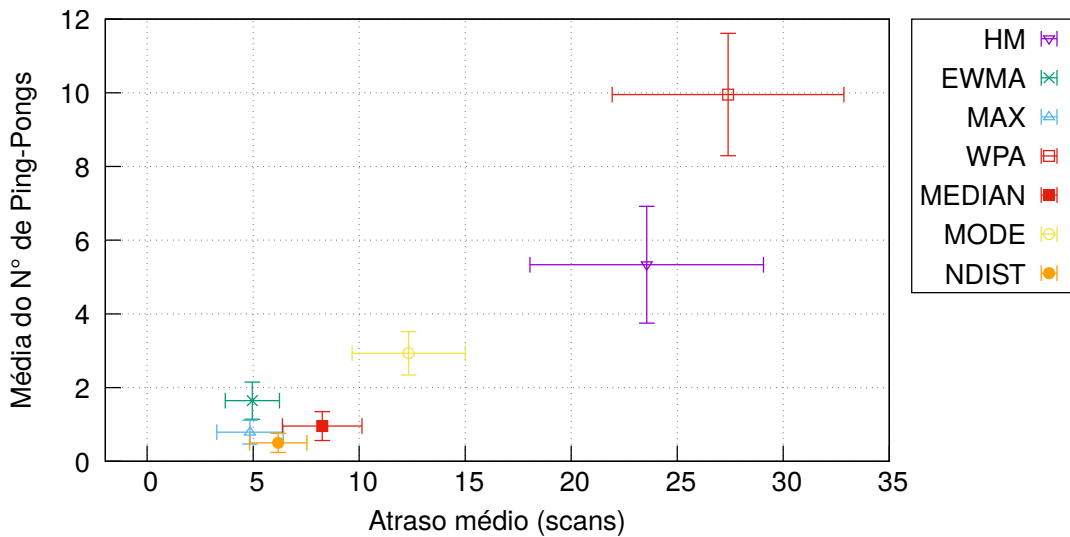
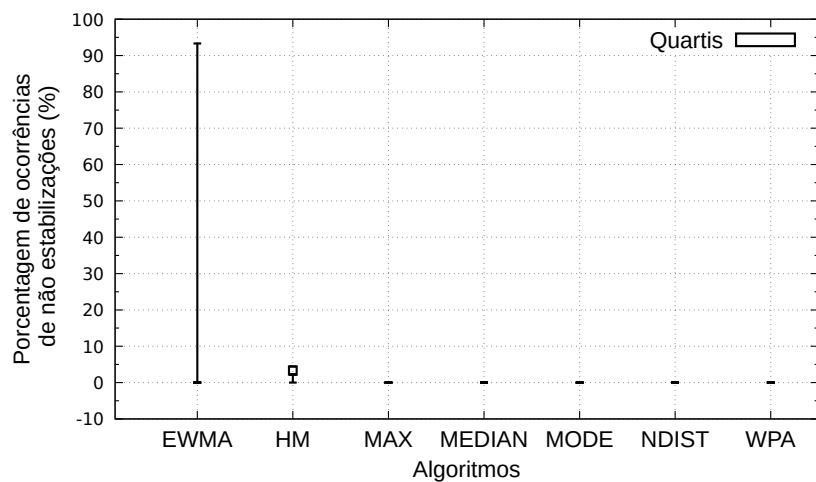
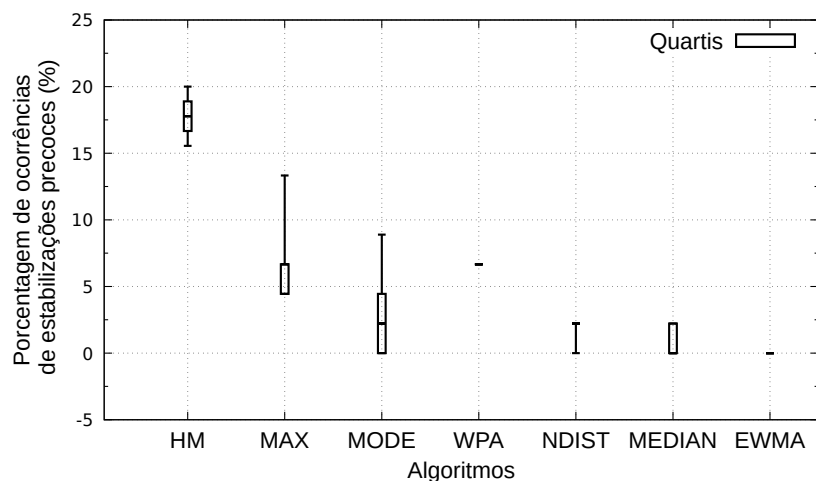


Figura 5.11: Gráfico dos melhores resultados obtidos por cada algoritmo em termos do atraso médio *vs.* número médio de ping-pongs. As margens de erro são dadas pelo intervalo de confiança de 95%.

A Figura 5.12 mostra dois Box Plots contendo os valores mínimo, máximo, mediana, e primeiro e terceiro quartis da porcentagem de ocorrências de casos de não estabilização (Figura 5.12 (a)) e estabilização precoce (Figura 5.12 (b)) para todos os parâmetros



(a) Não estabilizações



(b) Estabilizações precoces

Figura 5.12: Box Plots com máximo e mínimo, mediana e primeiro e terceiro quartis das porcentagens de casos de: (a) não estabilização e; (b) estabilização precoce.

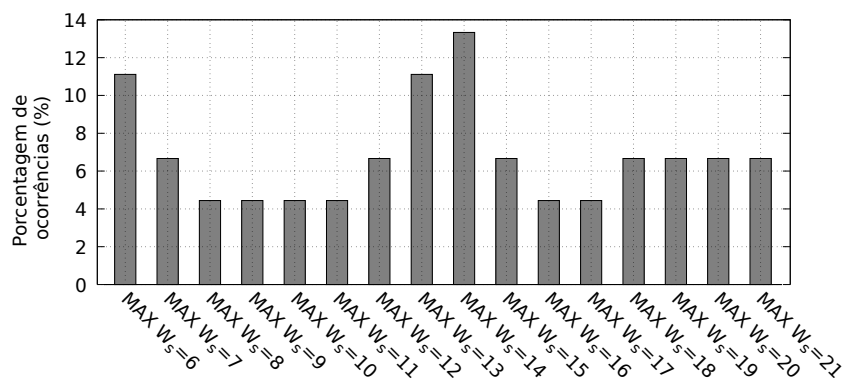


Figura 5.13: Porcentagem de casos de estabilização precoce obtidos para os parâmetros do algoritmo MAX.

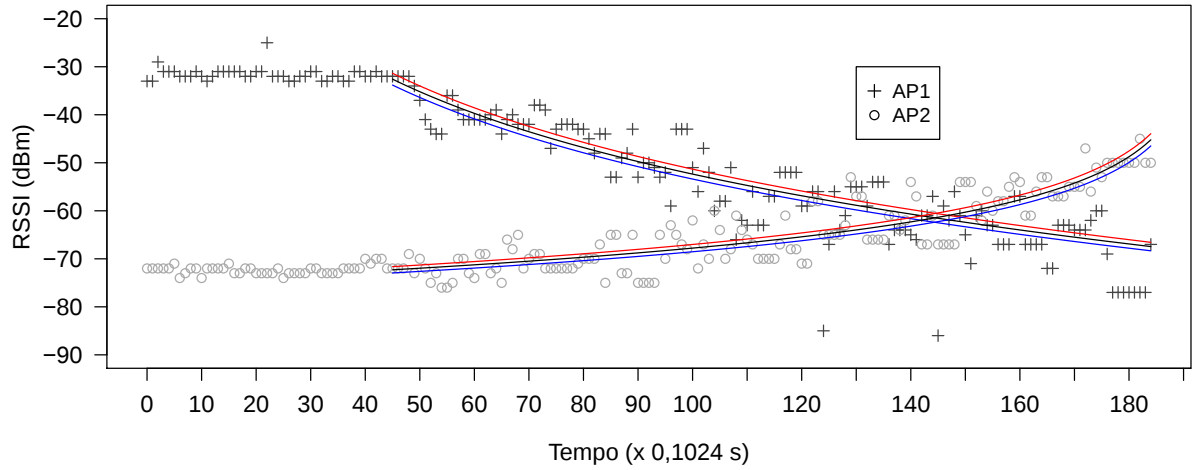
testados de cada algoritmo. Cada porcentagem de ocorrências foi calculada dentre o total das 45 instâncias de testes. Na Figura 5.12 (a) pode-se notar que o MAX não apresentou casos de não estabilização, porém os algoritmos EWMA com  $\alpha = \{0,93;0,94;0,98;0,99\}$  e HM=9,10,11,16,17,18,19 sofreram este problema.

Todos os algoritmos, exceto o EWMA, apresentaram casos de estabilização precoce em diferentes proporções para diferentes parâmetros testados, conforme mostra a Figura 5.12 (b). O MAX obteve porcentagens baixas de ocorrência para a maioria dos parâmetros, com valores entre 4,4% e 13,13%, conforme mostra a Figura 5.13, porém, os demais algoritmos, exceto o HM, obtiveram resultados melhores.

Estas estabilizações precoces são esperadas para algoritmos com atraso menor, porém, em certos casos, o *handoff* pode ser realizado em momento precoce devido a uma decisão incorreta. Por exemplo, estabilizações precoces podem ser obtidas para algoritmos com altas margens de histerese diante da ocorrência de um vale muito grande do RSSI antes do momento ideal de *handoff*. Como uma segunda variação no RSSI poderá não ocorrer novamente com a mesma proporção do primeiro vale, a STA poderá se manter conectada a AP2 sem que este apresente de fato RSSI maior do que o de AP1. O mesmo não costuma ocorrer para margens de histerese menores, porque estas tendem a retornar com maior facilidade ao AP1, ou seja, completam o ciclo do ping-pong para depois terem a oportunidade de realizar o *handoff* em um momento mais próximo ao ideal. Porém isto não exclui a possibilidade de convergência precoce para margens de histerese pequenas.

No caso do MAX, o *handoff* poderá ocorrer de forma precoce apenas pelo fato de este algoritmo estar considerando as amostras de valores máximo do RSSI. Um exemplo de instância é apresentado na Figura 5.14, no qual o MAX  $W_s = 7$  obteve estabilização precoce com atraso -15,44, ou seja, muito adiantado em relação ao ponto ideal de *handoff*. Na Figura 5.14(a) são apresentadas as amostras sem a aplicação da filtragem, incluindo as curvas modeladas para a estimativa do momento ideal do *handoff*. Na Figura 5.14(b) é apresentado o resultado das amostras filtradas pelo MAX  $W_s = 7$  em conjunto com as curvas de modelagem. Pode-se notar que, por volta do momento 130, AP2 passou a ter amostras com valores máximos maiores ou iguais as de AP1 com frequência suficiente para que estes máximos permanecessem na janela de tamanho 7. Desta forma, neste momento, a STA realizou o *handoff* de AP1 para AP2, e não retornou mais para AP1, ocasionando uma estabilização precoce. Na Figura 5.14(b) é possível perceber o quão precoce foi a estabilização em relação ao ponto ideal de *handoff*. Neste caso em específico, não ocorreram ping-pongs. Outros casos como este puderam ser observados nos testes,

chegando ao atraso mínimo (ou adiantamento) de -16,93. Este tipo de estabilização precoce que ocorre com o algoritmo MAX pode ser considerado menos prejudicial em relação ao que ocorre com o HM, porque este último pode gerar adiantamento maior no *handoff*, por ocorrer em momentos aleatórios. Neste cenário, por exemplo, o HM obteve adiantamento de até -33,42 para algumas instâncias de testes para os parâmetros 16,17,18,19 e 20.



(a) Amostras sem filtragem.

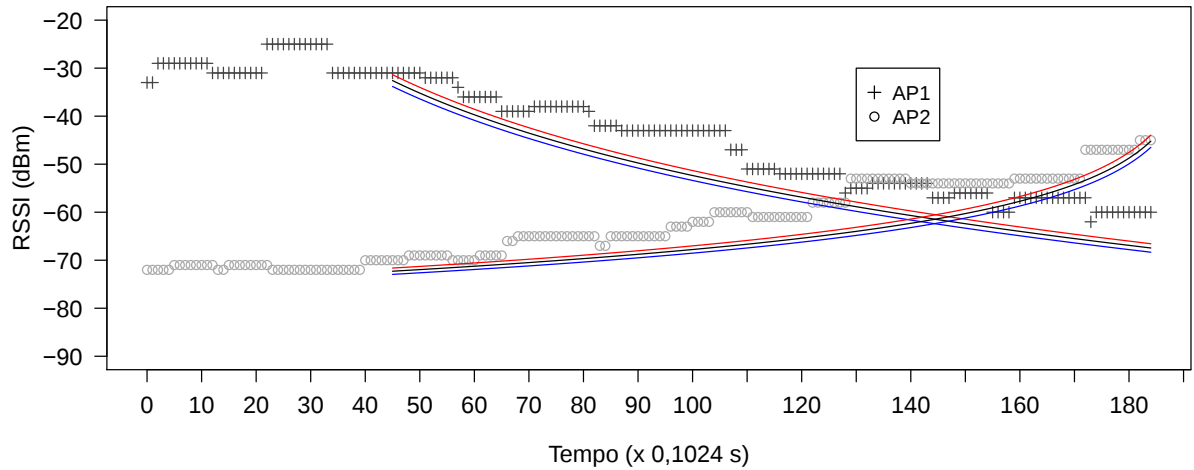
(b) Filtro MAX  $W_s = 7$ .

Figura 5.14: Exemplo de instância de teste com mobilidade no qual o MAX  $W_s = 7$  obteve estabilização precoce. Em (a) são apresentadas as amostras sem a aplicação da filtragem, incluindo as curvas modeladas para a estimativa do momento ideal do *handoff*. Em (b) é apresentado o resultado das amostras filtradas e as mesmas curvas de modelagem apresentadas em (a) para fins comparativos.

## 5.6 Testes em cenários estáticos

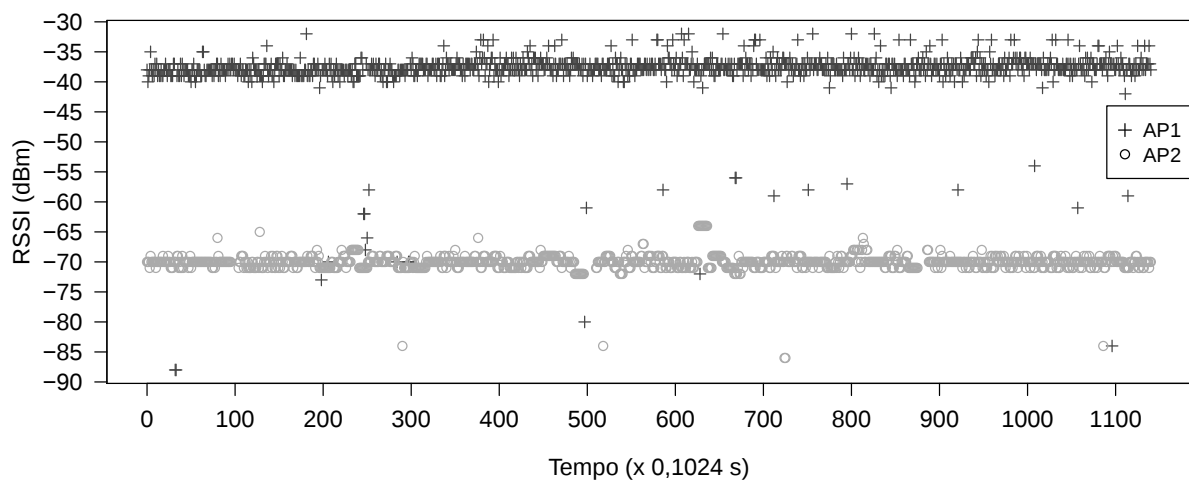
Tendo em vista que STAs estáticas também podem ser afetadas pela ocorrência de vales de RSSI e, portanto, são suscetíveis ao problema do ping-pong, testes em quatro diferentes cenários estáticos foram realizados para avaliar o comportamento dos algoritmos sob diferentes condições.

Nos cenários estáticos, dois APs, denominados AP1 e AP2 estão na vizinhança de uma STA estática e esta deverá decidir, a cada intervalo de *scan* com aproximadamente 0,1024 segundos (ou seja, aproximadamente o intervalo de *beacon* utilizado comumente por APs), se deverá ou não realizar *handoff* de um AP para o outro.

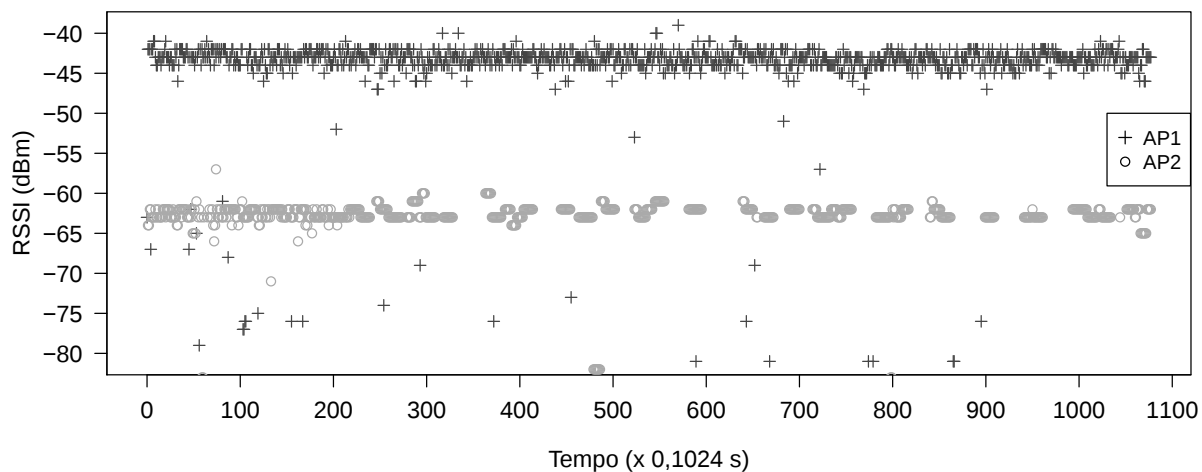
Os testes foram executados utilizando-se o emulador apresentado na Seção 5.1. No total, 45 instâncias de testes foram executadas para cada cenário emulado. Estas instâncias foram geradas a partir de dois *traces* com duração de 2 minutos referentes a AP1 e a AP2, aplicando-se 45 *Offsets* diferentes para gerar diferentes resultados de *scan*, conforme explicado na Seção 5.1. Considerando-se a curta duração dos *traces*, nestes cenários, todo *handoff* será considerado como uma ocorrência de ping-pong e o número total de ping-pongs será utilizado como métrica de comparação entre os algoritmos testados, que estão apresentados na Tabela 5.3.

A Figura 5.15 apresenta exemplos de instâncias de três cenários estáticos emulados contendo *traces* para AP1 e AP2. Nestas figuras, pode ser observado que o AP1 apresenta, sem dúvidas, RSSI mais elevado em relação à AP2 e, portanto, o ideal é que a STA mantenha-se associada a AP1, *i.e.*, não é esperado que *handoffs* ocorram nestes cenários. Entretanto, podem ser observadas ocorrências de vales de RSSI que podem ocasionar *handoffs* incorretos. Cada um dos cenários apresentam diferentes frequências de ocorrência de vales. Na Figura 5.15 (c), por exemplo, pode-se notar a grande ocorrência de vales de RSSI para o AP1, que possui a moda global da distribuição do RSSI com média em torno de -38 dBm. O AP2 apresenta uma menor ocorrência de vales e média do RSSI em torno de aproximadamente -71 dBm, ou seja, com aproximadamente 33 dB a menos do que a de AP1. Com base nesta frequência da ocorrência de vales, estes 3 cenários podem ser classificados em níveis de dificuldade como: fácil (Figura 5.15 (a)); moderado (Figura 5.15 (b)); e difícil (Figura 5.15 (c)).

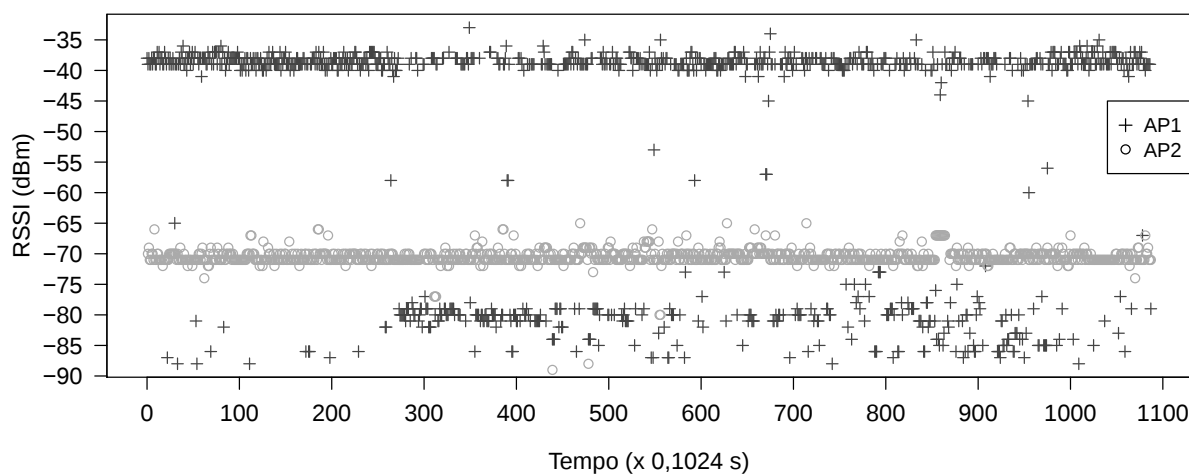
A Figura 5.16 mostra os resultados obtidos para os cenários estáticos fácil (Figura 5.16 (a)), moderado (Figura 5.16 (b)) e difícil (Figura 5.16 (c)), respectivamente. Os gráficos Box Plot apresentam a mediana, valor máximo, mínimo e primeiro e terceiro quartis da



(a) Fácil.

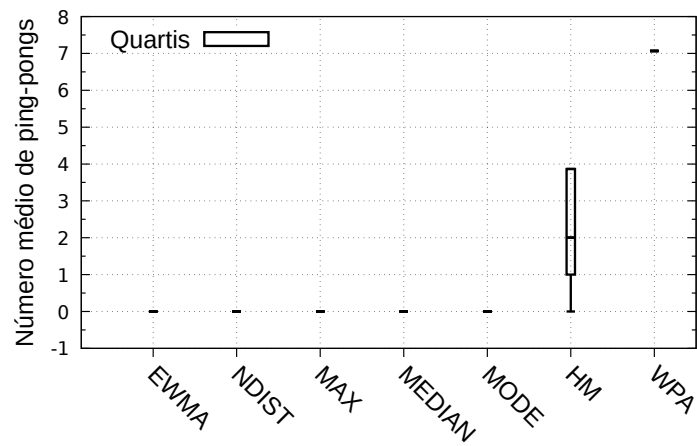


(b) Moderado.

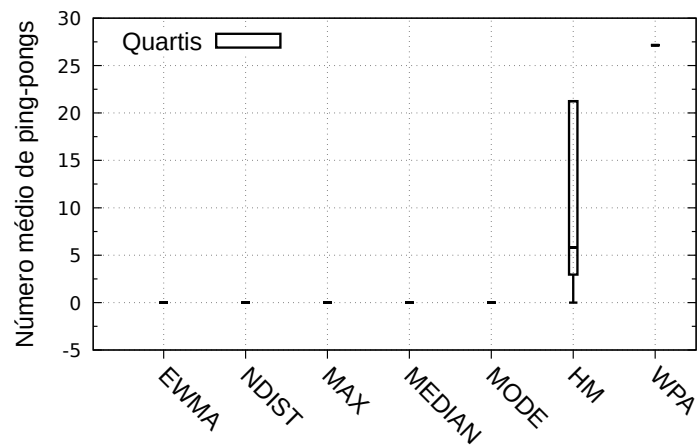


(c) Difícil.

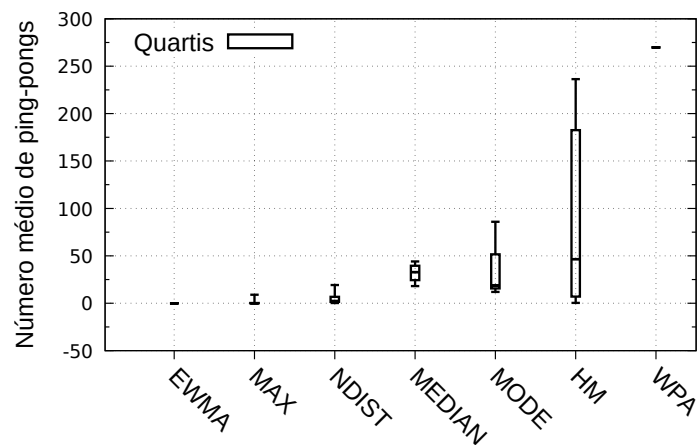
Figura 5.15: Exemplos de *traces* de AP1 e AP2 para os cenários estáticos testados com ocorrências de vales: (a) baixa; (b) moderada e; (c) alta.



(a) Fácil



(b) Moderado



(c) Difícil

Figura 5.16: Box Plots da média do número de ping-pongs obtida para cada algoritmo nos cenários estáticos: (a) fácil; (b) moderado e; (c) difícil.

média do número de ping-pongs obtida pelos diferentes Paretos Ótimos dos algoritmos testados. Pode-se notar que todos os algoritmos, exceto o HM e WPA, conseguiram evitar a ocorrência de ping-pongs em todas as instâncias de testes dos cenários Fácil e Moderado. Nestes cenários, apenas os algoritmos baseados em margem de histerese (HM e WPA) não se saíram bem.

No cenário Difícil (Figura 5.16 (c)), apenas o algoritmo EWMA conseguiu evitar o ping-pong em todas as 45 instâncias de teste para todos os seus Paretos Ótimos. O MAX teve bons resultados, conseguindo evitar ping-pongs com janelas  $W_s$  de tamanho 12 até 21. Para os demais tamanhos de janelas (6 até 11) o MAX obteve maiores números de ping-pongs conforme a redução do tamanho da janela, obtendo menos de 1 ping-pong médio para janelas de 9 até 11 e alcançando o valor máximo de  $8,97 \pm 0,49$  ping-pongs médios para a janela de tamanho 6, conforme mostra a Figura 5.17. As barras de erro são dadas pelo intervalo de confiança de 95%, assim como nos demais gráficos apresentados neste capítulo. Pode-se notar que, para o EWMA e o MAX, parâmetros que obtiveram bons resultados em cenários com mobilidade, como o MAX  $W_s = 9$  também obtiveram bons resultados nos cenários estáticos fácil, moderado e difícil.

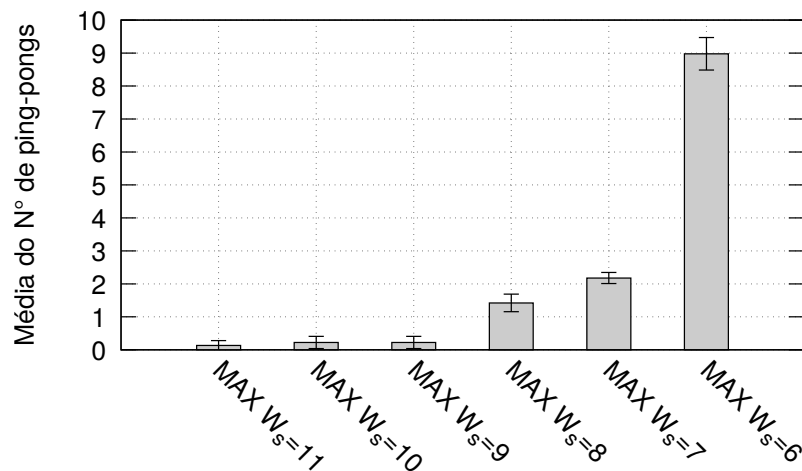


Figura 5.17: Gráfico do número médio de ping-pongs obtido pelo algoritmo MAX no teste em cenário estático difícil. Os parâmetros que não obtiveram ping-pongs não foram apresentados neste gráfico.

Por fim, um último cenário estático, que pode ser considerado desafiador devido à proximidade do RSSI de AP1 e AP2, foi emulado. A Figura 5.18 mostra um exemplo de instância deste cenário, no qual os *traces* de RSSI de AP1 e AP2 encontram-se praticamente sobrepostos com valor médio em torno de -60 dBm. Neste cenário, espera-se que a STA escolha um AP e mantenha-se associada a ele buscando maior estabilidade, já que claramente não haverá ganho de qualidade do RSSI migrando-se de um AP para outro.

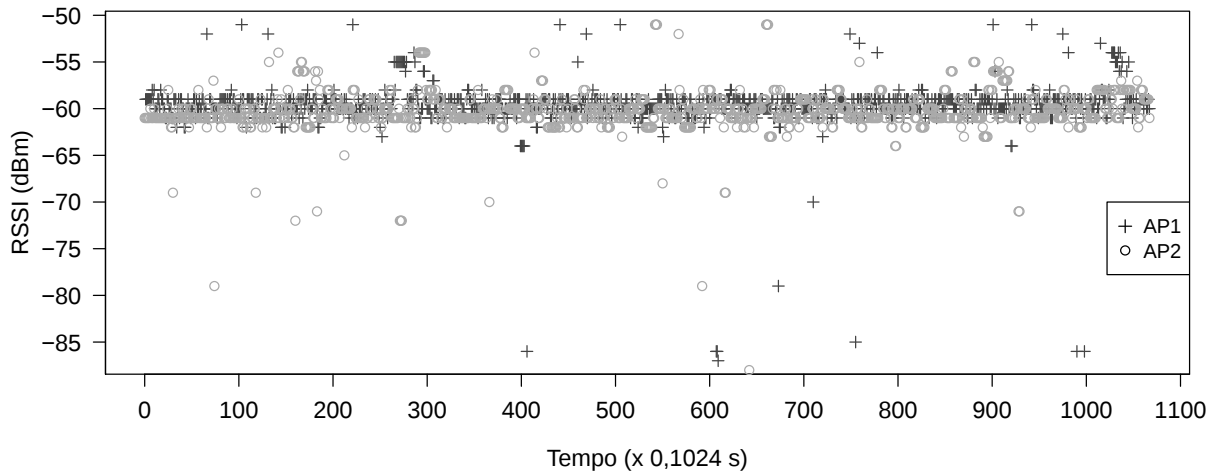


Figura 5.18: Exemplos de *traces* de AP1 e AP2 do cenários estático no qual o RSSI dos APs é muito próximo.

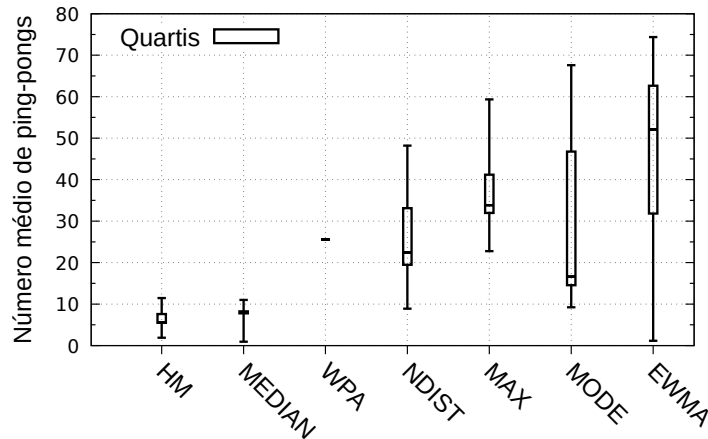


Figura 5.19: Box Plots da média do número de ping-pongs obtida para cada algoritmo no cenários estático Desafiador.

A Figura 5.19 apresenta o Box Plot do número médio de ping-pongs obtido pelos diferentes parâmetros dos algoritmos testados no cenário estático desafiador. Pode-se notar que, neste cenário, em oposição aos anteriores, nenhum mecanismo conseguiu evitar o ping-pong em todas as instâncias de teste. O HM se saiu melhor, obtendo maior estabilidade e menor variabilidade do número médio de ping-pongs para os diferentes parâmetros testados. Dentre os mecanismos testados, o EWMA obteve a maior variabilidade da média do número de ping-pongs para os diferentes parâmetros testados. O MAX obteve um resultado intermediário, com maior estabilidade para a maior janela  $W_s = 21$ , conforme mostra a Figura 5.20. Para esta janela, o número médio de ping-pongs foi  $22,77 \pm 0,67$ .

Pode-se observar que os mecanismos com melhor desempenho neste cenário desafiador foram aqueles que apresentaram altos atrasos nos cenários com mobilidade, que são:

MEDIAN  $W_s = 31$ , com média de  $0,93 \pm 0,13$  ping-pongs; EWMA  $\alpha = 0,99$ , com média de  $1,15 \pm 0,38$  ping-pongs; e HM=20, com média de  $1,88 \pm 0,21$  ping-pongs. Ou seja, dentre os mecanismos testados, uma solução ótima única e comum para ambos os cenários com mobilidade e desafiador não pôde ser encontrada, trazendo a necessidade de novas soluções envolvendo adaptação dos parâmetros ou novos mecanismos.

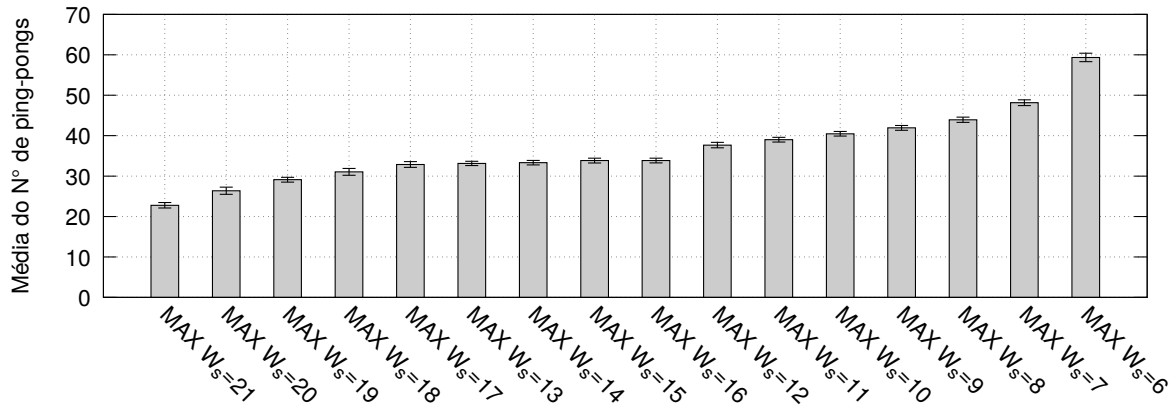


Figura 5.20: Gráfico do número médio de ping-pongs obtido pelo algoritmo MAX no teste em cenários estático desafiador. Os parâmetros que não obtiveram ping-pongs não foram apresentados neste gráfico.

Através dos testes apresentados, pode-se concluir que o Máximo apresentou melhores resultados em cenários móveis para janelas de tamanho menor, por exemplo  $W_s = \{6, 7, 8, 9 \text{ e } 10\}$ . Em cenário estático com baixa e moderada ocorrência de vales, o máximo conseguiu evitar ping-pongs em 100% dos casos para todas as janelas testadas, e no cenário estático com alta ocorrência de vales, os ping-pongs foram evitados para janelas a partir do tamanho 12. Por fim, em cenário estático com sobreposição do RSSI dos APs, considerado o mais desafiador dentre os demais cenários estáticos, o Máximo obteve menores números de ping-pongs conforme o tamanho da janela foi aumentado. Pode-se concluir então que, em cenários estáticos, o Máximo apresenta melhores resultados para janelas maiores. Uma solução que se saiu bem em ambos os cenários foi o Máximo com  $W_s = 9$ . Outra opção é o uso de janelas de tamanhos diferentes de acordo com o cenário, que poderia ser determinado com base em dados obtidos a partir de um acelerômetro, por exemplo, que é um sensor comumente disponível em dispositivos móveis como smartphones. Desta forma, uma janela  $W_s = 6$  poderia ser utilizada para cenários com mobilidade, e uma janela  $W_s = 21$  ou maior, poderia ser utilizada para cenários estáticos.

# Capítulo 6

## Conclusões

Este trabalho apresentou uma análise acerca do problema da instabilidade de associação em redes IEEE 802.11 densas e uma solução simples, eficaz e adequada para o problema em termos de estabilidade e baixo atraso. Apesar de o problema ser conhecido e estudado há mais de uma década, mecanismos de *handoff* utilizados em dispositivos atuais ainda sofrem com o problema conhecido por “efeito ping-pong”, conforme demonstrado através de uma análise realizada na rede Wi-Fi de produção da Universidade Federal Fluminense, composta por 420 APs e aproximadamente 18.000 estações cliente. Os resultados mostram que o efeito ping-pong é comum e recorrente para dispositivos de diferentes fabricantes e, particularmente, em sistemas operacionais Android, que foram encontrados em aproximadamente 65% dos dispositivos cliente da rede. Tendo em vista que este sistema é aberto e possui código acessível, ele foi utilizado como base para a análise das causas do problema do ping-pong.

Uma análise do código-fonte que implementa o algoritmo de *handoff* em dispositivos Android, o WPA Supplicant, mostrou que este algoritmo, que baseia-se no RSSI para a inicialização do *handoff*, não considera a grande variabilidade que a série temporal desta métrica pode apresentar. O mecanismo utilizado para evitar ping-pongs deste algoritmo é baseado no uso de margens de histerese com valores que podem ser considerados pequenos diante da grande variabilidade do RSSI. Testes realizados em redes reais utilizando-se este algoritmo e variações dele incluindo mecanismos de filtragem e maiores margens de histerese, mostraram que ping-pongs em cenários estáticos puderam ser efetivamente evitados. Entretanto, tais soluções ocasionaram maior atraso para a realização do *handoff* em cenários nos quais este é realmente desejado, o que é uma desvantagem, tendo em vista que, com este atraso, a STA permanecerá associada a um AP com qualidade da conexão pior por um maior intervalo de tempo.

Buscando-se a criação de uma solução que proporcionasse estabilidade, porém com menores atrasos, um estudo acerca do comportamento da série temporal do RSSI foi realizado. Após a avaliação de 5.380 *traces* de RSSI provenientes de 144 APs diferentes capturados por duas interfaces distintas, pode-se concluir que a série temporal de RSSI possui distribuição multimodal com cauda à esquerda ou modas locais à esquerda, indicando a ocorrência comum de vales que podem apresentar diferentes profundidades de acordo com efeitos de propagação do sinal e com a interface utilizada, tendo em vista que diferentes mapeamentos podem ser realizados entre nível de sinal recebido e RSSI por cada fabricante. Estes vales, que podem alcançar altas profundidades, ocorrem comumente em rajadas de tamanhos pequenos, podendo ocasionar a inicialização de *handoffs* indesejados e o efeito ping-pong. Portanto, eles devem ser excluídos das decisões de *handoff* que utilizam o RSSI como métrica.

Com base no comportamento do RSSI, o filtro Máximo foi proposto para evitar a tomada de decisões de *handoff* com base em vales de RSSI. Este filtro seleciona o RSSI com valor máximo em uma janela deslizante de tamanho configurável que contém as últimas amostras de RSSI recebidas. Apesar de simples, o filtro Máximo se mostrou efetivo em termos de atraso e estabilidade de associação. Testes baseados em emulação e *traces* reais, obtidos em cenários com e sem mobilidade, foram realizados para a comparação do desempenho do filtro Máximo com outros cinco mecanismos anti ping-pong encontrados comumente na literatura. Os resultados mostraram que o Máximo foi capaz de proporcionar o melhor *tradeoff* entre atraso e estabilidade em cenários com mobilidade dentre os mecanismos testados. Além disso, foi capaz de propiciar bons resultados em cenários estáticos nos quais o RSSI dos APs não está em sobreposição.

Desta forma, as contribuições desta pesquisa foram:

- Análise de ocorrência do problema da instabilidade de associação na rede Wi-Fi UFF;
- Identificação de causas para o problema, tomando como base o código-fonte implementado na maioria das STAs da rede Wi-Fi UFF;
- Validação das causas identificadas através de testes preliminares realizados em redes reais;
- Análise da distribuição de probabilidade da série temporal do RSSI, incluindo análise do tamanho das rajadas de vales;

- Proposta do filtro Máximo, adequado ao comportamento do RSSI em ambientes indoor e motivado pela aplicação desta métrica em algoritmos de *handoff*;
- Realização de emulações baseadas em *traces* reais de RSSI obtidos em cenários *indoor* com e sem mobilidade, demonstrando a efetividade do filtro Máximo.

Como fruto desta pesquisa e ao longo deste período de doutorado, alguns trabalhos foram publicados [2, 3, 5, 12, 18] e outros estão submetidos e em fase de revisão [6, 32, 44].

Como trabalhos futuros, soluções baseadas na combinação dos mecanismos testados neste trabalho serão avaliadas. Tendo em vista que cada mecanismo possui um comportamento diferenciado, a junção deles poderá propiciar resultados ainda melhores. Testes preliminares foram realizados em cenários com mobilidade e mostraram que a combinação do Máximo com o filtro da média móvel exponencialmente ponderada (EWMA), por exemplo, apresentou melhor *tradeoff* entre atraso e estabilidade em relação ao filtro Máximo puro. Além disso, tendo em vista que uma solução única comum para os cenários com mobilidade e estático com sobreposição de RSSI dos APs não pôde ser encontrada, uma ideia interessante é o desenvolvimento de soluções que incluam a adaptação do algoritmo de *handoff* para diferentes cenários.

Em relação ao emulador implementado neste trabalho, uma ideia para trabalhos futuros é a utilização de quadros de *probe response* em conjunto com *beacons*, para emular *scans* ativos. Com isto, um menor tempo de escuta do canal pode ser utilizado em relação ao *scan* passivo, que é baseado apenas na recepção de *beacons*. A utilização de quadros de dados para aumentar o tamanho da amostra de RSSIs sem aumentar o *overhead* na rede também poderá ser implementada. Outra ideia é a inclusão de outras métricas de avaliação no emulador. Por exemplo, o emulador poderia estimar, com base no RSSI amostrado, a vazão total (ou outra métrica de qualidade) obtida em uma instância de testes pela STA. Além disso, poderia estimar custos de *handoff*, considerando o tempo total em que a STA permanece sem conectividade como métrica. Este tempo pode ser estimado considerando-se as diferentes etapas do *handoff*, como a fase de *probe*, a fase de autenticação, e a troca de canal, por exemplo. Com estas novas métricas, o *tradeoff* entre qualidade da conexão e estabilidade poderia ser verificado, mostrando o quão prejudiciais para a STA os *handoffs* consecutivos são.

Em relação à análise da ocorrência de ping-pongs na rede Wi-Fi UFF através dos *logs*, uma ideia para trabalhos futuros é a verificação da correlação entre fabricantes das STAs e o tempo de permanência das STAs na rede, buscando verificar se STAs de fabrican-

tes com menor ocorrência de ping-pongs obtiveram este resultado porque permaneceram conectadas por pouco tempo à rede.

Em relação ao algoritmo NDIST, que surgiu no decorrer do desenvolvimento deste trabalho, uma ideia para trabalhos futuros é aprofundar a avaliação deste mecanismo. Neste trabalho, o mecanismo considerou uma distribuição normal, porém, o mecanismo pode ser adaptado para considerar distribuições mais aproximadas à encontrada na realidade para o RSSI.

Por fim, outra ideia para trabalhos futuros é a emulação de mecanismos de filtragem mais complexos para fins comparativos, como os filtros baseados em série de Fourier, Kalman, Grey e Partículas.

# Referências

- [1] AHMAD, U., GAVRILOV, A. V., LEE, S., LEE, Y.-K. A modular classification model for received signal strength based location systems. *Neurocomputing* 71, 13-15 (2008), 2657–2669.
- [2] BALBI, H., ALBUQUERQUE, C. V. N. Coleta de amostras de RSSI para testes de handoff em cenários com mobilidade utilizando-se testbeds FIBRE. In *2<sup>o</sup> Workshop do testbed FIBRE - Future Internet Brazilian Environment for Experimentation, XXXVII Congresso da Sociedade Brasileira de Computação* (2017), p. 183–192.
- [3] BALBI, H., CARRANO, R., PASSOS, D., ALBUQUERQUE, C. Revisiting probabilistic schedule-based asynchronous duty cycling. *International Journal of Wireless Information Networks* (2018).
- [4] BALBI, H., FERNANDES, N., SOUZA, F., CARRANO, R., ALBUQUERQUE, C., MUCHALUAT-SAADE, D., MAGALHAES, L. Centralized channel allocation algorithm for IEEE 802.11 networks. In *2012 Global Information Infrastructure and Networking Symposium (GIIS)* (2012), p. 1–7.
- [5] BALBI, H., PASSOS, D., CARRANO, R., MAGALHÃES, L., ALBUQUERQUE, C. Análise e solução para o problema da instabilidade de associação em redes IEEE 802.11 densas. In *Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC)* (Salvador, BA, Brasil, Maio 2016), p. 1–14.
- [6] BALBI, H., PASSOS, D. G., CARRANO, R., MAGALHÃES, L., ALBUQUERQUE, C. V. N. A case study of association instability in dense IEEE 802.11 networks. Relatório Técnico, Instituto de Computação, Universidade Federal Fluminense, 2018.
- [7] BALBI, H., SOUZA, F., CARRANO, R., ALBUQUERQUE, C., MUCHALUAT-SAADE, D., MAGALHAES, L. Algoritmo de seleção de canais centralizado para redes IEEE 802.11 com controlador. In *II Workshop de Redes de Acesso em Banda Larga-WRA, Brazil* (2012), p. 73–86.
- [8] BALBI, H. D. Estudo e implementação de controlador central para pontos de acesso IEEE 802.11 de baixo custo. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia, Universidade Federal Fluminense, Niterói, RJ, Brasil, Dezembro 2012.
- [9] BARDWELL, J. Converting Signal Strength Percentage to dBm Values. Relatório Técnico, WildPackets, Novembro 2002.
- [10] BELLAVISTA, P., CORRADI, A., GIANNELLI, C. Evaluating filtering strategies for decentralized handover prediction in the wireless internet. In *Symposium on Computers and Communications (ISCC)* (Junho 2006), IEEE, p. 167–174.

- [11] BRIK, V., MISHRA, A., BANERJEE, S. Eliminating Handoff Latencies in 802.11 WLANs Using Multiple Radios: Applications, Experience, and Evaluation. In *ACM SIGCOMM Conference on Internet Measurement* (Berkeley, CA, USA, 2005), IMC '05, USENIX Association, p. 27–27.
- [12] FERREIRA, V., BALBI, H., SEIXAS, F., ALBUQUERQUE, C., MUCHALUAT-SAADE, D. Wireless Body Area Networks: An Overview. In *Minicurso do XXXV Simpósio Brasileiro de Telecomunicações* (2017), p. 65–78.
- [13] HAEBERLEN, A., FLANNERY, E., LADD, A. M., RUDYS, A., WALLACH, D. S., KAVRAKI, L. E. Practical robust localization over large-scale 802.11 wireless networks. In *Annual international conference on Mobile computing and networking* (2004), ACM, p. 70–84.
- [14] HU, T., XUE, K., WEI, W., JIANG, W. LENV: A new light-weighted edge network virtualization framework in software-defined wireless networks. In *International Conference on Wireless Communications & Signal Processing (WCSP)* (2015), p. 1–6.
- [15] HUANG, P.-J., TSENG, Y.-C., TSAI, K.-C. A Fast Handoff Mechanism for IEEE 802.11 and IAPP Networks. In *Vehicular Technology Conference* (2006), vol. 2, p. 966–970.
- [16] IEEE. IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks - Port-Based Network Access Control. *IEEE Std 802.1X-2001* (2001).
- [17] IEEE. ISO/IEC/IEEE - International Standard - Information technology-Telecommunications and information exchange between systems-Local and metropolitan area networks-Specific requirements-Part 11: Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications. *ISO/IEC/IEEE 8802-11:2018(E)* (Maio 2018), 1–3538.
- [18] JULIO, E. P., BALBI, H. D., CARRANO, R., MAGALHAES, L. C. S., ALBUQUERQUE, C. Coexistence Server in Cognitive Networks: A Real Implementation. *Computer Standards & Interfaces* 50 (2016), 223–235.
- [19] KAEMARUNGSI, K., KRISHNAMURTHY, P. Properties of indoor received signal strength for WLAN location fingerprinting. In *Mobile and Ubiquitous Systems: Networking and Services* (2004), IEEE, p. 14–23.
- [20] KAEMARUNGSI, K., KRISHNAMURTHY, P. Analysis of WLAN's received signal strength indication for indoor location fingerprinting. *Pervasive and Mobile Computing* 8, 2 (2012), 292–316. Special Issue: Wide-Scale Vehicular Sensor Networks and Mobile Sensing.
- [21] KIM, H.-S., PARK, S.-H., PARK, C.-S., KIM, J.-W., KO, S.-J. Fast handoff scheme for seamless multimedia service in wireless LAN. In *International Conference on Research in Networking* (2006), Springer, p. 942–953.
- [22] KIM, M., LIU, Z., PARTHASARATHY, S., PENDARAKIS, D., YANG, H. Association Control Algorithms for Handoff Frequency Minimization in Mobile Wireless Networks. *Wireless Networks* 18, 5 (2012), 535–550.

- [23] KOTZ, D., ESSIEN, K. Analysis of a campus-wide wireless network. *Wireless Networks* 11, 1-2 (2005), 115–133.
- [24] LADD, A. M., BEKRIS, K. E., RUDYS, A., KAVRAKI, L. E., WALLACH, D. S. Robotics-based location sensing using wireless ethernet. *Wireless Networks* 11, 1-2 (2005), 189–204.
- [25] LEVIS, K. Rssi is under appreciated. In *Proceedings of the Third Workshop on Embedded Networked Sensors* (Janeiro 2006), p. 239–242.
- [26] LING, T. C., LEE, J. F., HOH, K. P. Reducing Handoff Delay In WLAN Using Selective Proactive Context Caching. *Malaysian Journal of Computer Science* 23, 1 (2010), 49–59.
- [27] LUI, G., GALLAGHER, T., LI, B., DEMPSTER, A. G., RIZOS, C. Differences in RSSI readings made by different Wi-Fi chipsets: A limitation of WLAN localization. In *ICL-GNSS* (2011), p. 53–57.
- [28] MAGALHÃES, L. C. S., BALBI, H., CORRÊA, C., VALLE, R., STANTON, M. SCIFI – A Software-Based Controller for Efficient Wireless Networks. In *6th UbuntuNet Alliance annual conference* (2013), p. 145–156.
- [29] MHATRE, V., PAPAGIANNAKI, K. Using Smart Triggers for Improved User Performance in 802.11 Wireless Networks. In *MobiSys* (2006), p. 246–259.
- [30] MISHRA, A., SHIN, M., ARBAUGH, W. An Empirical Analysis of the IEEE 802.11 MAC Layer Handoff Process. *SIGCOMM Computer Communication Review* 33, 2 (2003), 93–102.
- [31] MONTAVONT, N., BLANC, A., NAVAS, R., KERDONCUFF, T., CASTIGNANI, G. Handover triggering in IEEE 802.11 networks. In *WoWMoM* (2015), p. 1–9.
- [32] PASSOS, D., BALBI, H., CARRANO, R., ALBUQUERQUE, C. Asynchronous Radio Duty Cycling for Green IoT: State of the Art and Future Perspectives. Relatório Técnico, Instituto de Computação, Universidade Federal Fluminense, 2018.
- [33] PU, C., CHUNG, W. Mitigation of Multipath Fading Effects to Improve Indoor RSSI Performance. *IEEE Sensors Journal* 8, 11 (Novembro 2008), 1884–1886.
- [34] RAGHAVENDRA, R., BELDING, E. M., PAPAGIANNAKI, K., ALMEROTH, K. C. Understanding Handoffs in Large IEEE 802.11 Wireless Networks. In *SIGCOMM Conference on Internet Measurement* (2007), ACM, p. 333–338.
- [35] RAGHAVENDRA, R., BELDING, E. M., PAPAGIANNAKI, K., ALMEROTH, K. C. Unwanted Link Layer Traffic in Large IEEE 802.11 Wireless Networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing* 9, 9 (Setembro 2010), 1212–1225.
- [36] RAMANI, I., SAVAGE, S. SyncScan: practical fast handoff for 802.11 infrastructure networks. In *INFOCOM* (2005), vol. 1, p. 675–684.
- [37] RANGISETTI, A. K., BALDANIYA, H. B., B, P. K., TAMMA, B. R. Load-aware hand-offs in software defined wireless LANs. In *IEEE WiMob* (2014), p. 685–690.

- [38] SANG, X., WU, Q., LI, H. Deep analysis of invalid handoffs in WLANs based on network-client collaborative framework. In *2017 IEEE International Symposium on Local and Metropolitan Area Networks (LANMAN)* (Junho 2017), p. 1–6.
- [39] SANG, X., WU, Q., LI, H. iscan: Efficient wifi scan for mobile device based on client and network behavior learning. In *IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC)* (Julho 2017), p. 1109–1114.
- [40] SHRIVASTAVA, V., AGRAWAL, D., MISHRA, A., BANERJEE, S., NADEEM, T. Understanding the Limitations of Transmit Power Control for Indoor Wlans. In *SIGCOMM* (2007), IMC '07, p. 351–364.
- [41] SKLAR, B. Rayleigh fading channels in mobile digital communication systems .I. Characterization. *IEEE Communications Magazine* 35, 7 (Julho 1997), 90–100.
- [42] SMAILAGIC, A., SMALL, J., SIEWIOREK, D. P. Determining user location for context aware computing through the use of a wireless LAN infrastructure. Relatório Técnico, Institute for Complex Engineered Systems Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA, 2000.
- [43] SOLEIMANI, M. T., KAHVAND, M., SARIKHANI, R. Handoff reduction based on prediction approach in Cognitive Radio Networks. In *IEEE ICCT* (2013), p. 319–323.
- [44] SOUSA, C., PASSOS, D. G., BALBI, H., CARRANO, R., ALBUQUERQUE, C. V. N. BiRD - A Novel Bi-dimensional Design to Multi-channel Continuous Rendezvous in Cognitive Networks. Relatório Técnico, Instituto de Computação, Universidade Federal Fluminense, 2018.
- [45] SUN, Q., HUANG, L., XU, H. Achieving Handoff Optimization and Throughput Efficiency in Vehicular Networks. In *International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Networks* (2013), IEEE, p. 147–152.
- [46] TENG, J., XU, C., JIA, W., XUAN, D. D-Scan: Enabling Fast and Smooth Handoffs in AP-Dense 802.11 Wireless Networks. In *IEEE INFOCOM 2009* (Abril 2009), p. 2616–2620.
- [47] VALLATI, C., MINGOZZI, E., BENEDETTO, C. Efficient handoff based on link quality prediction for video streaming in urban transport systems. *Wireless Communications and Mobile Computing* 16, 15 (2016), 2298–2314.
- [48] VASUDEVAN, S., PAPAGIANNAKI, K., DIOT, C., KUROSE, J., TOWSLEY, D. Facilitating Access Point Selection in IEEE 802.11 Wireless Networks. In *SIGCOMM Conference on Internet Measurement* (2005), p. 293–298.
- [49] WU, H., TAN, K., ZHANG, Y., ZHANG, Q. Proactive Scan: Fast Handoff with Smart Triggers for 802.11 Wireless LAN. In *IEEE INFOCOM 2007 - 26th IEEE International Conference on Computer Communications* (Maio 2007), p. 749–757.
- [50] YI, J., SUN, W., KOO, J., BYEON, S., CHOI, J., CHOI, S. BlueScan: Boosting Wi-Fi Scanning Efficiency Using Bluetooth Radio. In *International Conference on Sensing, Communication, and Networking (SECON)* (Junho 2018), p. 1–9.

- 
- [51] YOO, S.-J., CYPHER, D., GOLMIE, N. Timely Effective Handover Mechanism in Heterogeneous Wireless Networks. *Wireless Personal Communications* 52, 3 (Fevereiro 2010), 449–475.
  - [52] ZOU, D., MENG, W., HAN, S. Euclidean distance based handoff algorithm for fingerprint positioning of WLAN system. In *IEEE WCNC* (2013), p. 1564–1568.

## APÊNDICE A – Coleta de amostras de RSSI para testes de handoff em cenários com e sem mobilidade utilizando-se testbeds FIBRE

Conforme indicado no Capítulo 2, uma das causas associadas ao problema da instabilidade de associação em redes IEEE 802.11 infraestruturadas densas é a utilização direta de amostras de RSSI pelos algoritmos de *handoff* implementados nos dispositivos cliente. Tendo em vista que o RSSI apresenta alta variabilidade no tempo, conforme indicado na Seção 3.2, torna-se interessante a utilização de mecanismos de filtragem destas amostras temporais para que aplicações que baseiam-se nesta métrica, como as de *handoff*, não tomem decisões equivocadas, conforme foi constatado no Capítulo 2.4.

Para que a avaliação de mecanismos de filtragem possa ser realizada de forma realística e sistemática, se torna necessária a coleta de amostras temporais (*traces*) de RSSI em redes reais com topologia conhecida. A partir destes *traces*, o comportamento de diferentes mecanismos de *handoff*, baseados em diferentes métodos de filtragem, poderá ser avaliado através do uso de emuladores que terão como entrada estas amostras temporais.

Tendo isto em vista, o trabalho apresentado neste capítulo, publicado em [2], objetivou a criação de *traces* de RSSI utilizando-se os *testbeds* disponibilizados pelo projeto FIBRE (*Future Internet Brazilian Environment for Experimentation*) em cenários com e sem mobilidade. Para tanto, as ilhas da Universidade Federal Fluminense (UFF) e Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) foram utilizadas para a realização dos experimentos, conforme descrito nas próximas seções. Os resultados incluíram a geração e disponibilização pública<sup>1</sup> dos *traces* obtidos a partir de diferentes interfaces IEEE 802.11 nos diferentes cenários.

---

<sup>1</sup>Os *traces* podem ser obtidos em [www.midiacom.uff.br/~helgadb/](http://www.midiacom.uff.br/~helgadb/)

## A.1 Descrição dos cenários de experimentação

Dentre os *testbeds* FIBRE<sup>2</sup>, o localizado na Universidade Federal Fluminense (UFF)<sup>3</sup> é o único que disponibiliza infraestrutura para realização de testes com mobilidade. No momento da execução dos testes, a infraestrutura funcional disponível era composta por dois roteadores sem fio Icarus<sup>4</sup> e quatro nós do tipo Mini ITX<sup>5</sup> programáveis. Dentre outras características destes nós, a mais importante para o experimento foi a facilidade de configuração de suas duas interfaces IEEE 802.11 para operar no modo AP, enviando quadros de *beacons* e *probe responses*, a partir dos quais amostras de RSSI pudessem ser coletadas. Além destes nós, a infraestrutura também incluiu um “trem” ao qual um *laptop* com interfaces IEEE 802.11 configuráveis está acoplado, cujos movimentos foram controlados remotamente através do envio de comandos no formato de requisições *web*.

A Figura A.1 mostra a planta e a topologia da rede funcional, incluindo o nó móvel (*laptop* acoplado ao trem) com duas estações de parada denominadas ORG e END, e os nós fixos (2 nós Icarus e 4 nós Mini ITX) disponíveis para a execução dos experimentos. Os nós Icarus possuíam interfaces Atheros AR9300 (driver ath9k) e AR5414 (driver ath5k) e os nós Mini ITX possuíam interface Atheros AR9271 r1 (driver ath9k). O percurso do trem possui aproximadamente 60 metros em linha reta, que pode ser percorrido nos sentidos de ida e de volta com velocidade constante equivalente à de uma pessoa caminhando rapidamente. Além disso, o trem pode se locomover até certa posição do trilho e permanecer estática pelo tempo desejado. As plantas incluem todos os andares do prédio do Bloco D da UFF, campus da Praia Vermelha, mostrando, além dos nós incluídos no *testbed* do FIBRE, alguns dos outros APs presentes no local, como os da rede Wi-Fi UFF e APs locais. A listagem dos APs, com a descrição de seus modelos e SSIDs pode ser encontrada na Figura A.2.

A infraestrutura também incluiu um servidor que pôde ser acessado de fora da rede da UFF e que possibilitou a comunicação com todos os nós sem fio descritos, incluindo nós Icarus, ITX, *laptop* e trem. A comunicação do *laptop* com a rede foi realizada através de rede sem fio, através do AP FibreUFF instalado dentro da estação ORG. Próximo a ele, encontrava-se o AP MotorCtrl, que foi instalado para servir como *backup* para caso o AP FibreUFF falhasse. Já a comunicação com o sistema de controle de movimentação do trem foi realizada por rede cabeada Ethernet. Uma *Webcam* instalada na estação de

---

<sup>2</sup><https://fibre.org.br/start-using-fibre/local-portals/>

<sup>3</sup><https://fibre.org.br/start-using-fibre/register/uff-island/>

<sup>4</sup><http://nitlab.inf.uth.gr/NITlab/hardware/wireless-nodes/icarus-nodes>

<sup>5</sup><https://www.youtube.com/watch?v=yTxCMYM7IRM>

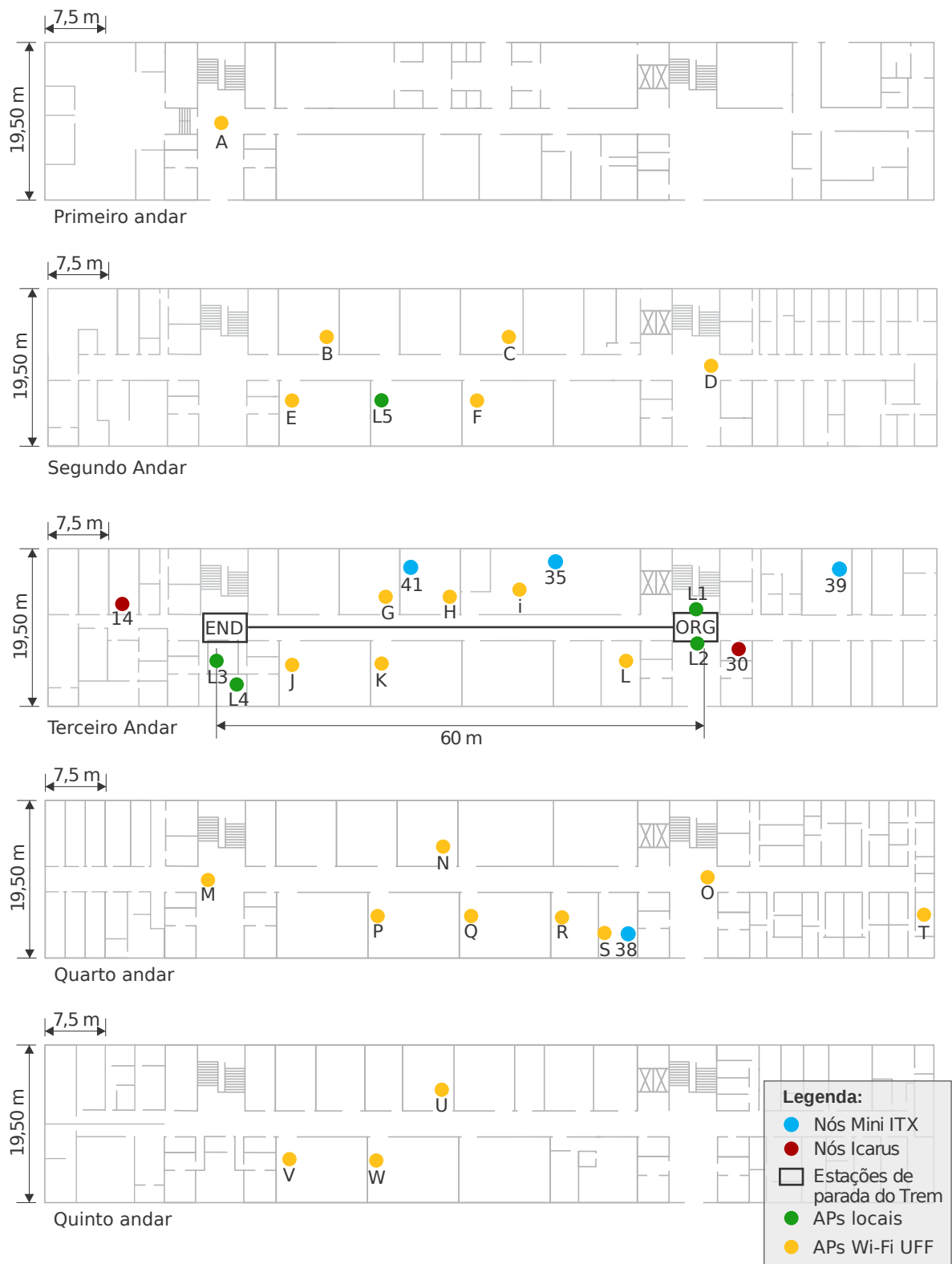


Figura A.1: Plantas com localização dos nós Icarus e Mini ITX instalados no 3º e 4º andar do *testbed* FIBRE da UFF.

| Nós Mini ITX  |                        |                                                                                    |                   |
|---------------|------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|
| ID            | SSIDs                  | Modelo                                                                             |                   |
| 35            | FibreITX35             | Atheros AR9271 Rev:1, driver ath9k_htc, hostapd v1.0                               |                   |
| 38            | FibreITX38             | Atheros AR9271 Rev:1, driver ath9k_htc, hostapd v1.0                               |                   |
| 39            | FibreITX39             | Atheros AR9271 Rev:1, driver ath9k_htc, hostapd v1.0                               |                   |
| 41            | FibreITX41             | Atheros AR9271 Rev:1, driver ath9k_htc, hostapd v1.0                               |                   |
| Nós Ícarus    |                        |                                                                                    |                   |
| ID            | SSIDs                  | Modelo                                                                             |                   |
| 14            | ICARUS14A<br>ICARUS14B | Atheros AR9300 Rev:3, driver ath9k, hostapd v0.7.3<br>Atheros AR5414, driver ath5k |                   |
| 30            | ICARUS30A<br>ICARUS30B | Atheros AR9300 Rev:3, driver ath9k, hostapd v0.7.3<br>Atheros AR5414, driver ath5k |                   |
| Aps Locais    |                        |                                                                                    |                   |
| ID            | SSID                   | Modelo                                                                             |                   |
| L1            | FibreUFF               | TP-LINK TL-WR842ND                                                                 |                   |
| L2            | MotorCtrl              | TP-LINK TL-WR740N                                                                  |                   |
| L3            | SmarttelJr             | TP-LINK TL-MR3220 v1.2                                                             |                   |
| L4            | P&QEngenhariaJr        | TP-LINK TL-WR541G v7.0                                                             |                   |
| L5            | TERwifi                | Intelbras WRG240E v1.0                                                             |                   |
| Aps Wi-Fi UFF |                        |                                                                                    |                   |
| ID            | SSIDs *                | Modelo                                                                             | MAC WLAN          |
| A             | ap0014                 | TP-LINK TL-WR743ND-v2.0                                                            | f8:1a:67:91:90:48 |
| B             | ap0663                 | TP-LINK TL-WR843ND-v1                                                              | c4:e9:84:6b:2c:d2 |
| C             | ap0651                 | TP-LINK TL-WR843ND-v1                                                              | c4:e9:84:71:2b:be |
| D             | ap0011                 | TP-LINK TL-WR743ND-v2.0                                                            | f8:1a:67:91:8d:60 |
| E             | ap0661                 | TP-LINK TL-WR843ND-v1                                                              | c4:e9:84:6b:42:18 |
| F             | ap0217                 | TP-LINK TL-WR743ND-v2.0                                                            | 64:66:b3:c1:c3:30 |
| G             | ap0652                 | TP-LINK TL-WR843ND-v1                                                              | c4:e9:84:6b:2c:cc |
| H             | ap0662                 | TP-LINK TL-WR843ND-v1                                                              | c4:e9:84:6b:4c:36 |
| I             | ap0083                 | TP-LINK TL-WR743ND-v2.0                                                            | f8:1a:67:91:96:b4 |
| J             | ap0667                 | TP-LINK TL-WR843ND-v1                                                              | c4:e9:84:71:16:b4 |
| K             | ap0104                 | TP-LINK TL-WR740N-v4.21                                                            | f8:1a:67:8a:7d:46 |
| L             | ap0666                 | TP-LINK TL-WR843ND-v1                                                              | c4:e9:84:6b:4b:4a |
| M             | ap0007                 | TP-LINK TL-WR740N-v4.21                                                            | a0:f3:c1:d9:d7:fe |
| N             | ap0462                 | TP-LINK TL-WR743ND-v2.0                                                            | 64:66:b3:c1:d0:08 |
| O             | ap0006                 | TP-LINK TL-WR743ND-v2.0                                                            | f8:1a:67:91:8d:66 |
| P             | ap0653                 | TP-LINK TL-WR843ND-v1                                                              | c4:e9:84:71:15:d2 |
| Q             | ap0472                 | TP-LINK TL-WR743ND-v2.0                                                            | 64:66:b3:c1:c2:94 |
| R             | ap0396                 | TP-LINK TL-WR743ND-v2.0                                                            | 64:66:b3:c1:c4:16 |
| S             | ap0648                 | TP-LINK TL-WR843ND-v1                                                              | c4:e9:84:6b:2b:92 |
| T             | ap0101                 | TP-LINK TL-WR740N-v4.21                                                            | f8:1a:67:8a:7c:e4 |
| U             | ap0665                 | TP-LINK TL-WR843ND-v1                                                              | c4:e9:84:6b:4c:14 |
| V             | ap0664                 | TP-LINK TL-WR843ND-v1                                                              | c4:e9:84:6b:2e:62 |
| W             | ap0654                 | TP-LINK TL-WR843ND-v1                                                              | c4:e9:84:71:14:fe |

\* Todos os Aps Wi-Fi UFF anunciam, além do SSID com a numeração do AP, os seguintes SSIDs: eduroam, CadastroWifiUFF, VisitantesUFF, ClubWifi. Caso o AP esteja em modo de configuração, apenas o seguinte SSID será anunciado: config-mac, onde mac deve ser substituído pelo mac da WLAN do AP.

Figura A.2: Listagem dos APs presentes no ambiente do *testbed* FIBRE, incluindo seus modelos.



Figura A.3: Fotos do trem e do *laptop* que é acoplado a ele para a realização de testes com mobilidade: (a) *laptop* com interfaces IEEE 802.11 conectadas; (b) engrenagens do trem; (c) o trem visto por baixo, ao lado da estação ORG; (d) vista de trás do trem e corredor ao fundo.

parada ORG também estava acessível através deste servidor. As imagens geradas por ela puderam ser recebidas por *streaming* a qualquer momento, mostrando visualmente a localização do trem e se ele estava ou não em movimento.

A Figura A.3 mostra fotos do “trem” e do *laptop* que fica acoplado a ele para a execução dos testes com mobilidade. Três interfaces de rede IEEE 802.11 extras foram acopladas ao *laptop* para a realização dos experimentos (Figura A.3 (a)), duas para captura de quadros (Aircap-NX<sup>6</sup> e TP-LINK TL-WN722N rev 1.0<sup>7</sup>) e uma para envio de quadros de *probe request* (TL-WN722N rev 1.0), para que quadros de *probe response* pudessem

<sup>6</sup>[https://wikidevi.com/wiki/CACE\\_Technologies\\_AirPcap\\_Nx](https://wikidevi.com/wiki/CACE_Technologies_AirPcap_Nx)

<sup>7</sup>[https://wikidevi.com/wiki/TP-LINK\\_TL-WN722N](https://wikidevi.com/wiki/TP-LINK_TL-WN722N)

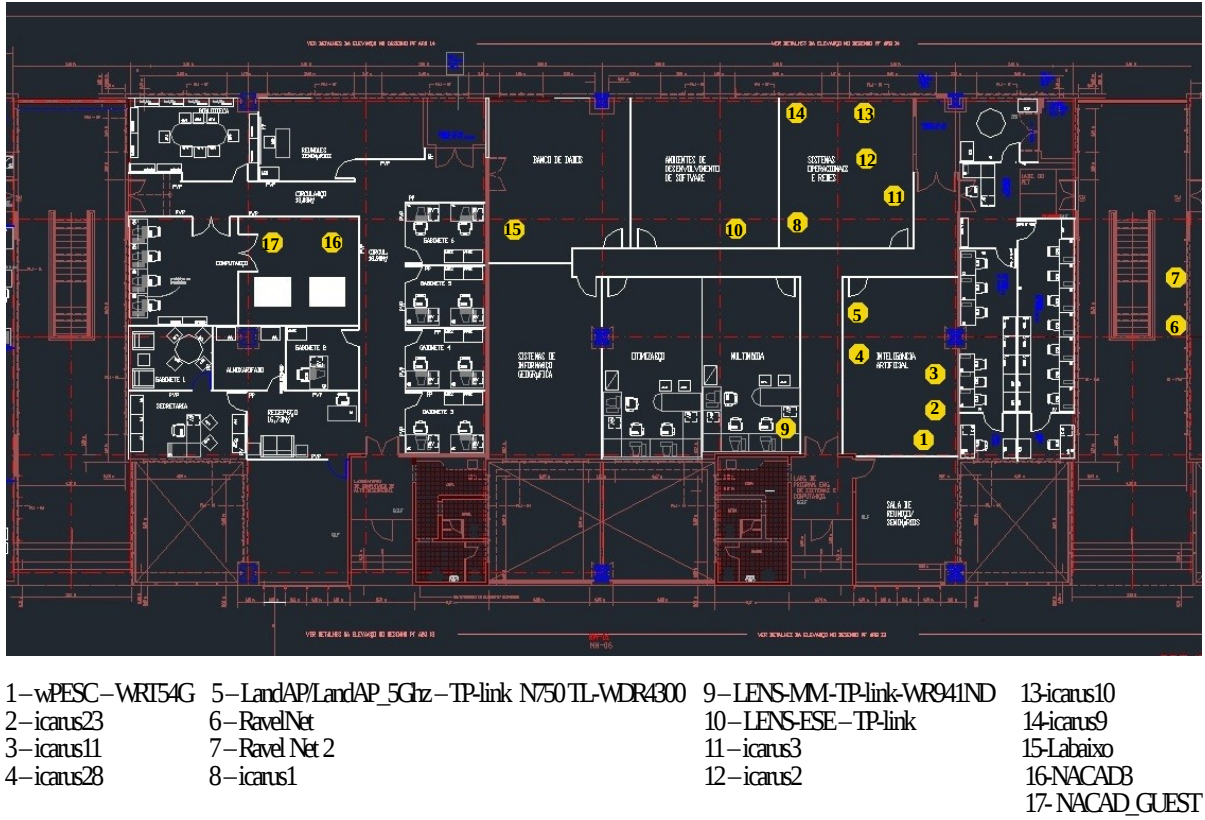


Figura A.4: Planta com localização dos nós Icarus e outros APs localizados nas proximidades do *testbed* FIBRE da UFRJ marcados em amarelo.

ser coletados, além de *beacons* provenientes dos APs localizados nos arredores do trem. A Figura A.3 (b) mostra as engrenagens do trem e, ao fundo, o corredor pelo qual ele se desloca. A Figura A.3 (c) mostra o trem visto por baixo, ao lado da estação de parada ORG, ambos pendurados ao teto. A Figura A.3 (d) mostra o trem visto por trás e ao fundo o corredor. Esta foto foi obtida a partir da *Webcam* do trem.

Para a realização dos experimentos sem mobilidade, ou seja, com estações fixas, ambos os *testbeds* da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)<sup>8</sup> e o da UFF foram utilizados. Na UFF, o trem foi posicionado em diferentes posições estáticas no trilho para realização de capturas. Na UFRJ, a infraestrutura funcional disponível para os testes era composta por três nós Icarus, cujos IDs eram 2, 11 e 28. Os nós 2 e 28 operaram com uma interface sem fio IEEE 802.11g de modelo BCM4318 rev 2 e *driver* b43<sup>9</sup>. O nó 11 operou com uma interface IEEE 802.11abg AR5413/4 rev 1 e *driver* ath5k<sup>10</sup>. A Figura A.4 apresenta a planta do bloco no qual o *testbed* se localiza, incluindo o posicionamento dos três nós Icarus indicados em amarelo. Além destes nós, alguns dos outros APs pre-

<sup>8</sup><https://fibre.org.br/start-using-fibre/register/ufrj-island/>

<sup>9</sup><https://wireless.wiki.kernel.org/en/users/drivers/b43>

<sup>10</sup><https://wireless.wiki.kernel.org/en/users/drivers/ath5k>

sentes nas redondezas do *testbed* no momento dos testes estão indicados, bem como seus modelos.

## A.2 Descrição e resultados dos experimentos com mobilidade na UFF

Para a execução dos experimentos com mobilidade na ilha da UFF, uma das interfaces de rede IEEE 802.11 do *laptop* do “trem” foi configurada para enviar 5 *probe requests* por segundo utilizando o Aireplay-ng<sup>11</sup> e as outras duas foram configuradas para capturar *beacons* e *probe responses* utilizando o *tcpdump*<sup>12</sup>, enquanto os demais nós Icarus e Mini ITX foram configurados para atuar como APs, emitindo *beacons* e respondendo aos *probe requests* utilizando o Hostapd<sup>13</sup>, todos operando no canal 11 da banda de 2.4 GHz. Os nós Icarus utilizaram Hostapd v0.7.3, e os nós Mini ITX utilizaram Hostapd v1.0. A seguir, o “trem” foi configurado para movimentar-se nas duas direções disponíveis no percurso, gerando *traces* relativos a dois cenários, IDA e VOLTA. Ambos os percursos foram percorridos 116 vezes na madrugada de 22/03/2017 entre 00:37 hs e 4:45 hs GMT-3, totalizando aproximadamente 14 km de distância total. Desta forma, para cada trecho percorrido, dois arquivos de captura foram gerados, um para a interface Airpcap-NX e outro para a interface TP-Link TL-WN722N rev 1.0 .

Além das capturas, arquivos com *logs* indicando o momento em que o trem iniciou cada movimento foram guardados para cada trecho. A Figura A.5 mostra exemplos do conteúdo de arquivos de *log* para o sentido de IDA (Figura A.5 (a)) e de VOLTA (Figura A.5 (b)). Cada linha é iniciada por um *timestamp*, indicando o momento em que as mensagens foram recebidas pelo controlador do trem. A mensagem CLEAR indica que o *log* foi reiniciado, ou seja, o histórico foi apagado. A mensagem FWD significa que o comando *Forward* foi recebido, ou seja, o trem se movimentará no sentido ORG para END. A mensagem BWD indica que o comando *Backward* foi recebido, ou seja, o trem se movimentará de END até ORG. A mensagem HALT significa que o trem parou. A numeração após os comandos indica a posição do trem em número de rotações do motor, ou seja, 0 representa ORG e 6720 representa END.

Após a finalização dos experimentos, os *traces* (no formato .cap) foram verificados, e informações de RSSI referentes aos *beacons* de cada AP encontrado no percurso foram

<sup>11</sup><https://www.aircrack-ng.org/doku.php?id=aireplay-ng>

<sup>12</sup>[http://www.tcpdump.org/tcpdump\\_man.html](http://www.tcpdump.org/tcpdump_man.html)

<sup>13</sup><https://wireless.wiki.kernel.org/en/users/documentation/hostapd>

```

1490166700.89 2017-03-22 04:11:40 CLEAR ORG 0
1490166704.0045 2017-03-22 04:11:44 FWD ORG 0
2017-03-22 04:11:47 Reset button pressed. Train has reached end of track
2017-03-22 04:11:47 Reset button pressed. Train has reached end of track
1490166753.9383 2017-03-22 04:12:33 HALT END 6720
2017-03-22 04:12:33 Reset button pressed. Train has reached end of track
2017-03-22 04:12:34 Reset button pressed. Train has reached end of track

```

(a)

```

1490166764.8135 2017-03-22 04:12:44 CLEAR END 6720
1490166767.9199 2017-03-22 04:12:47 BWD END 6720
2017-03-22 04:12:50 Reset button pressed. Train has reached end of track
2017-03-22 04:12:50 Reset button pressed. Train has reached end of track
1490166816.1744 2017-03-22 04:13:36 HALT ORG 0
2017-03-22 04:13:36 Reset button pressed. Train has reached end of track
2017-03-22 04:13:36 Reset button pressed. Train has reached end of track

```

(b)

Figura A.5: Exemplos de conteúdo do arquivo de log: (a) sentido de IDA; (b) sentido de VOLTA.

extraídas. Além disso, gráficos RSSI x Tempo (*Epoch Time*) foram plotados. As Figuras A.6 e A.7 mostram alguns dos gráficos obtidos. A Figura A.6 refere-se aos dados obtidos do AP MotorCtrl, e a Figura A.7 refere-se aos dados obtidos do AP FibreITX35, ambos para o teste de N<sup>o</sup> 0 (ou seja, a primeira rodada de teste). Em ambas as figuras, em (a) e (b) são mostrados os resultados para o sentido de IDA para as interfaces TP-Link e Airpcap-NX, respectivamente. Em (c) e (d) são mostrados os resultados para o sentido de VOLTA para as interfaces TP-Link e Airpcap-NX, respectivamente.

Além de coletar *beacons* de APs pertencentes ao *testbed* FIBRE, *beacons* provenientes de outros APs instalados nos arredores do percurso do “trem” também foram coletados. No total, foram encontrados 151 APs com mais de 100 *beacons* recebidos. As amostras de RSSI provenientes destes APs também poderão ser utilizadas em trabalhos científicos. Os arquivos de captura, dados e gráficos foram disponibilizados para acesso público<sup>14</sup>.

## A.3 Descrição e resultados dos experimentos sem mobilidade na UFF

Para a realização dos experimentos sem mobilidade utilizando o *testbed* FIBRE da UFF, o trem foi programado para parar em 101 posições distintas do trilho e realizar capturas

<sup>14</sup><http://www.midiacom.uff.br/~helgadb/tracesfibre.zip>

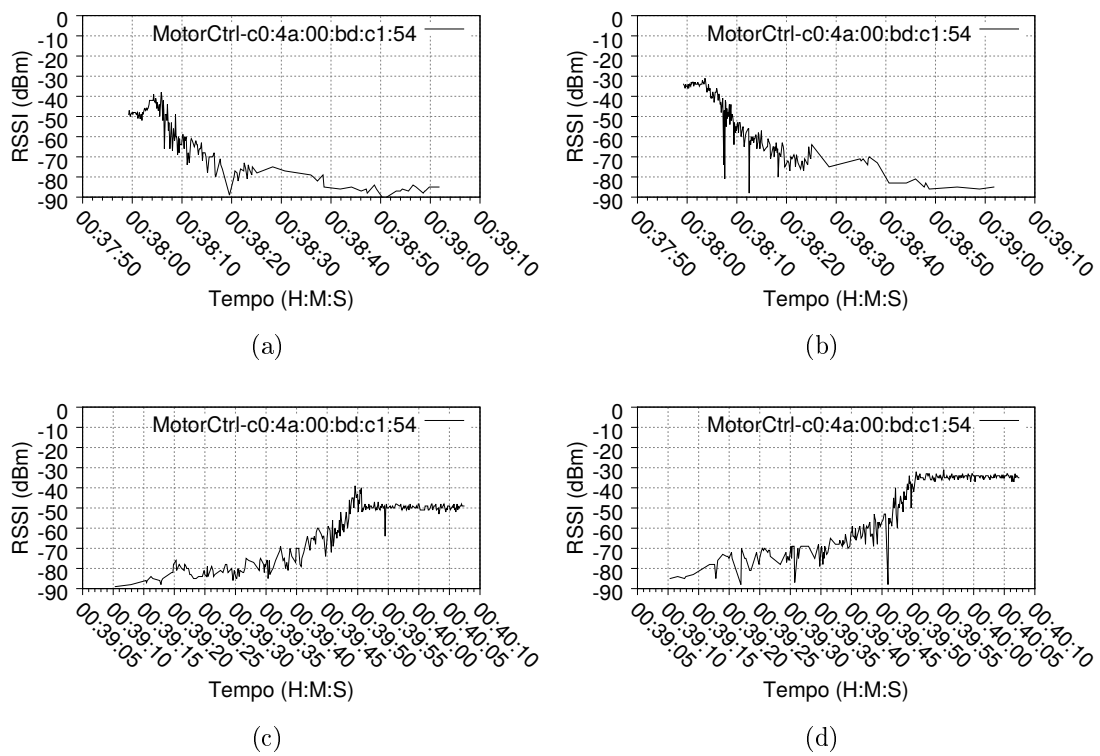


Figura A.6: Gráficos RSSI x Tempo (*Epoch Time*) de amostras provenientes do AP MotorCtrl coletadas pela interface: (a) TP-Link no sentido de IDA; (b) Airpcap-NX no sentido de IDA; (c) TP-Link no sentido de VOLTA; (d) Airpcap-NX no sentido de VOLTA.

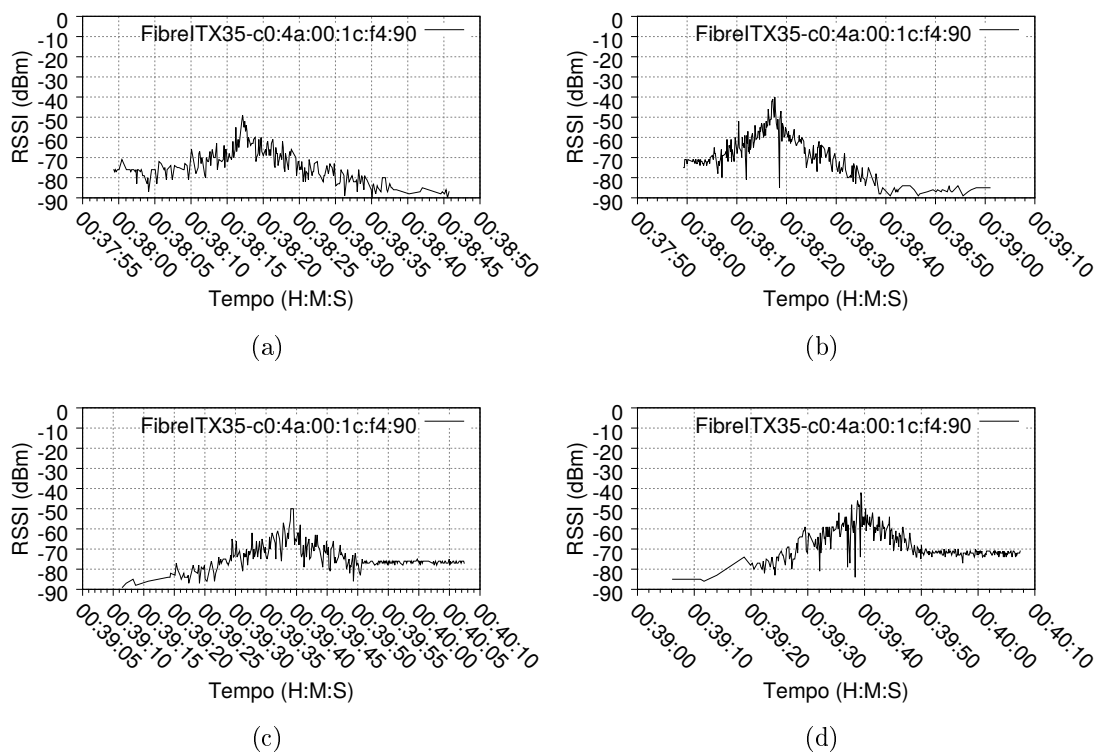


Figura A.7: Gráficos RSSI x Tempo (*Epoch Time*) de amostras provenientes do AP FibreITX35, coletadas pela interface: (a) TP-Link no sentido de IDA; (b) Airpcap-NX no sentido de IDA; (c) TP-Link no sentido de VOLTA; (d) Airpcap-NX no sentido de VOLTA.

com duração de 2 minutos de quadros de *beacons*. Todos os testes foram realizados em períodos de baixa circulação de pessoas, entre 0h e 6h dos dias entre 23/03 e 07/04 de 2017. Assim como nos testes com mobilidade, as interfaces Aircap-NX e TP-LINK TL-WN722N rev 1.0 foram utilizadas para realizar as capturas, e os nós Icarus e Mini ITX foram configurados para operarem como APs.

Após a execução dos experimentos, informações de RSSI referentes aos *beacons* de cada AP encontrado no percurso foram extraídas para cada ponto de medição. No total, 3.031 *traces* com mais de 400 amostras foram obtidos para a interface Aircap-NX e 2.349 para a interface TP-Link. Estes *traces* são relativos tanto a APs pertencentes ao *testbed* FIBRE quanto a outros APs encontrados no ambiente de experimentação, totalizando 144 APs.

Além disso, gráficos RSSI x Tempo (*Epoch Time*) foram plotados. As Figuras A.8 e A.9 mostram alguns dos gráficos obtidos para o AP MotorCtrl em diferentes pontos do trilho. A primeira figura refere-se ao ponto de medição N<sup>o</sup> 0, e a segunda figura refere-se ao ponto N<sup>o</sup> 30. Em (a) são apresentados os resultados para a interface Aircap-NX, e em (b), para a interface TP-Link.

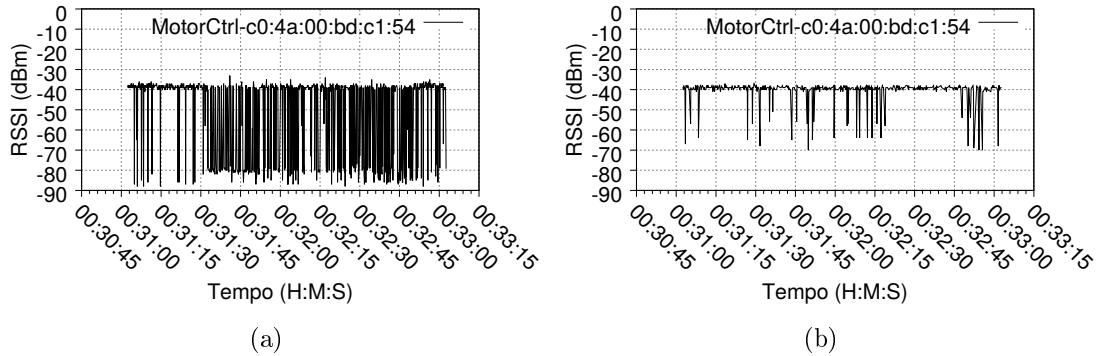


Figura A.8: Gráficos RSSI x Tempo (*Epoch Time*) de amostras provenientes do AP MotorCtrl no ponto de medição N<sup>o</sup> 0 para as interfaces (a) Aircap-NX e (b) TP-Link.

Os arquivos de captura, dados e gráficos foram disponibilizados para acesso público<sup>15</sup>.

## A.4 Descrição e resultados dos experimentos sem mobilidade na UFRJ

Para a realização dos experimentos sem mobilidade utilizando-se o *testbed* FIBRE na UFRJ, as interfaces de rede IEEE 802.11 dos nós Icarus 2, 11 e 28 foram configuradas

<sup>15</sup><http://www.midiacom.uff.br/~helgadb/tracesfibre3.zip>

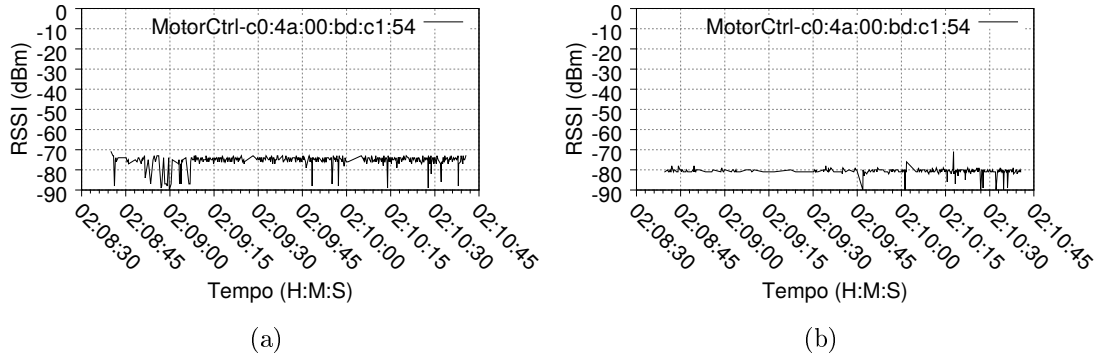


Figura A.9: Gráficos RSSI x Tempo (*Epoch Time*) de amostras provenientes do AP MotorCtrl no ponto de medição N<sup>o</sup> 30 para as interfaces (a) Airpcap-NX e (b) TP-Link.

para operar como AP, através da utilização do *software* Hostapd v2.1 (exceto o nó 11, que utilizou a versão 2.6) e, simultaneamente, realizar capturas de pacotes através da utilização do *tcpdump* v4.5.1 (exceto o nó 11, que utilizou a versão 4.2.1). Todos os nós foram configurados para operarem no canal 11 da banda de 2.4 GHz. A captura foi realizada sem filtros no decorrer de uma semana, iniciando-se às 21 h de 21/06/2017 e terminando às 21 h de 28/06/2017.

Os arquivos de captura foram subdivididos pelo intervalo de 24 h. Desta forma, sete arquivos foram gerados para cada nó, totalizando 21 arquivos. A partir destas capturas, informações de RSSI referentes aos *beacons* de cada AP encontrado por cada um dos nós foram extraídas e registradas. Além disso, gráficos RSSI x Tempo (*Epoch Time*) foram plotados. A Figura A.10 mostra os gráficos obtidos para o nó 2 no dia 21/06 referentes aos *beacons* recebidos dos nós 11 (Figura A.10 (a)) e 28 (Figura A.10 (b)).

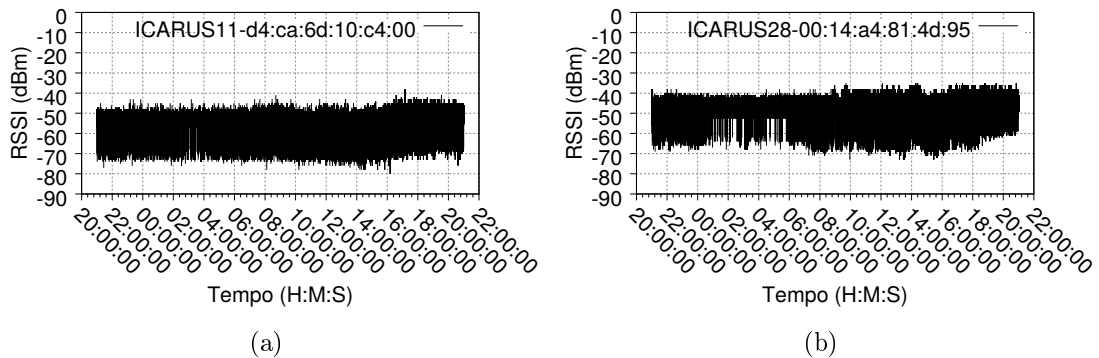


Figura A.10: Gráficos RSSI x Tempo (*Epoch Time*) de amostras provenientes dos APs Icarus 11 (a) e 28 (b), coletadas pelo nó Icarus 2.

Além de coletar *beacons* pertencentes ao *testbed* FIBRE, *beacons* provenientes de outros APs instalados na região também foram coletados. No total, foram encontrados

40 APs com mais de 100 *beacons* recebidos. Assim como nos demais experimentos, estas amostras de RSSI também poderão ser utilizadas em trabalhos científicos. Os arquivos de captura, dados e gráficos foram disponibilizados para acesso público<sup>16</sup>.

---

<sup>16</sup><http://www.midiacom.uff.br/~helgadb/tracesfibre2.zip>