

Análise e solução para o problema da instabilidade de associação em redes IEEE 802.11 densas

Helga Balbi¹, Diego Passos¹, Ricardo Carrano², Luiz Magalhaes²,
Célio Albuquerque¹

¹Instituto de Computação

– Universidade Federal Fluminense (UFF) – Niterói – RJ – Brazil

²Departamento de Engenharia de Telecomunicações

– Universidade Federal Fluminense (UFF) – Niterói – RJ – Brazil

{helgadb, diego, carrano, schara, celio}@midia.com.uff.br

Abstract. *The decision of whether or not to perform a handoff between access points in an infrastructured IEEE 802.11 network is taken exclusively by the stations. Even without mobility, client devices may decide to migrate to another access point with the goal of improving performance. However, the criteria used to perform handoffs are not defined by the IEEE 802.11 standard and, thus, are dependent on specific vendor implementations. In this paper, we use data from a real large scale production network deployed at Universidade Federal Fluminense (UFF) and run experiments to demonstrate that such implementations are commonly deficient, resulting in high levels of association instability in dense environments. By analyzing the implementation used by the most common devices found on the Wi-Fi network at UFF, we were able to conclude that this instability, which we refer to as “ping-pong”, results from the direct usage of RSSI measurements which are highly variable. Finally, we propose a simple process to smooth the time series of these samples. Experiments performed in a real network show that this smoothing effectively eliminates the occurrence of “ping-pongs”.*

Resumo. *A decisão de realização ou não de handoff entre pontos de acesso em uma rede IEEE 802.11 infraestruturada é uma prerrogativa exclusiva das estações. Mesmo sem mobilidade, dispositivos clientes 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 IEEE 802.11, ficando a cargo das implementações dos fabricantes. Neste trabalho, realizando-se experimentos e utilizando-se dados reais de uma rede sem fio de larga escala implantada na Universidade Federal Fluminense (UFF), demonstra-se que tais implementações são comumente deficientes, resultando em grande instabilidade de associação em ambientes densos. Através da análise da implementação mais comumente utilizada por clientes na rede Wi-Fi da UFF, concluiu-se que, esta instabilidade, denominada neste trabalho de “ping-pong”, resulta da utilização direta de amostras de RSSI que são altamente variáveis. Finalmente, propõe-se um processo simples de suavização da série temporal destas amostras. Experimentos realizados em uma rede real mostram que esta suavização efetivamente elimina o “ping-pong”.*

1. Introdução

Atualmente, a tecnologia IEEE 802.11 [IEEE 2012] é amplamente empregada em ambientes residenciais, corporativos e de eventos, oferecendo conectividade de rede sem fio a dispositivos móveis. No decorrer dos anos, com a redução dos custos relacionados a esta tecnologia, redes IEEE 802.11 infraestruturadas densas, compostas por milhares de estações cliente (STAs) e centenas de pontos de acesso (APs) instalados para prover cobertura e capacidade aos usuários, se tornaram comuns [Magalhães et al. 2013]. Muitas vezes, em um mesmo ambiente, uma STA pode estar ao alcance de diversos APs que compõem o *Extended Service Set* (ESS), tendo a possibilidade de se conectar a qualquer um deles [Vasudevan et al. 2005]. A necessidade de redes densas se torna ainda maior em certos contextos, como o da Internet das Coisas, no qual interfaces de comunicação residirão em qualquer objeto utilizado no dia a dia das pessoas, possibilitando o desenvolvimento de novas aplicações nas áreas de transporte, logística, saúde, segurança e conforto [Tan e Wang 2010].

O padrão IEEE 802.11 define que a STA deve escolher a qual AP irá se conectar, mas não define como esta escolha deve ser realizada. A implementação do algoritmo de escolha varia para diferentes fabricantes e, comumente, é baseada no RSSI (*Received Signal Strength Indication*), que é um indicador do nível de sinal recebido do AP. Em geral, o AP que apresenta maior RSSI é escolhido em detrimento dos outros. Outra função comumente realizada pela STA, e que, conforme será mostrado neste trabalho, também costuma depender do RSSI, é a migração espontânea entre APs de um mesmo ESS em busca de melhor desempenho, processo denominado comumente por *handoff*¹. Assim como a escolha inicial de um AP, os critérios para migração não são definidos pelo padrão, ficando a cargo da implementação dos fabricantes [Vasudevan et al. 2005].

Como será demonstrado neste artigo, estas implementações são comumente ineficientes, resultando em trocas de AP frequentes, o que pode ser inconveniente para o usuário. Idealmente, uma migração para um novo AP deveria ocorrer apenas quando, de fato, há um ganho de desempenho. Um exemplo é um usuário móvel que gradativamente se afasta do seu AP atual, aproximando-se de outro AP da rede. Entretanto, especialmente em ambientes densos, verifica-se que muitas vezes a migração leva uma STA estática a se associar a outro AP de desempenho muito similar ou até inferior ao atual. Mais grave, em certos casos uma STA realizará migrações sucessivas, alternando várias vezes em um curto período entre dois ou mais APs. Este comportamento, que foi previamente citado em [Raghavendra et al. 2007], causa prejuízo aos usuários por resultar em interrupções na conectividade e quebras de conexões ativas, além de ocasionar troca de quadros desnecessários na rede. Esta instabilidade é comumente referida como “ping-pong” na literatura [Mhatre e Papagiannaki 2006].

As migrações excessivas prejudicam, particularmente, aplicações interativas ao ocasionar interrupções na conexão. Além disso, o processo de migração requer a troca de mensagens de controle, o que acarreta um maior gasto energético, algo indesejado em dispositivos móveis. Os inconvenientes são mais graves nos casos em que a migração é mais custosa em termos de tempo, como em redes que necessitam de nova autenticação do cliente baseada em 802.1X, e nos casos em que uma nova autenticação do usuário via

¹Neste trabalho, “*handoff*” e “migração entre APs” serão utilizados com o mesmo significado.

captive portal é necessária. Em certos casos, as migrações frequentes podem impossibilitar a utilização da rede [Raghavendra et al. 2007].

Embora o processo de migração entre APs já tenha sido estudado na literatura, como em [Mishra et al. 2003], [Ramani e Savage 2005] e [Huang et al. 2006], os trabalhos existentes, normalmente, têm foco na redução do tempo necessário para a realização da migração. Há ainda trabalhos que buscam otimizar as migrações de estações móveis com base no seu trajeto [Kim et al. 2012]. Entretanto, a questão do ping-pong, que afeta, inclusive, estações estáticas, comumente, não é analisada nas soluções propostas.

Neste trabalho, utilizando como estudo de caso a rede Wi-Fi de produção da Universidade Federal Fluminense (UFF), será mostrada a severidade do problema do ping-pong, que ocorre de forma recorrente para dispositivos de uma grande gama de fabricantes. Uma análise profunda e detalhada do código fonte que implementa o algoritmo de *handoff* utilizado pelos dispositivos mais populares entre os usuários da rede Wi-Fi UFF mostra que a raiz do problema está na utilização direta de medidas de RSSI, um valor que, conforme será mostrado, possui alta variabilidade no tempo. Com base nesta análise, uma solução que aplica a suavização destas variações é proposta. Por fim, o trabalho apresenta os resultados dos testes experimentais comparativos realizados em rede real, mostrando que o ping-pong foi efetivamente evitado com a utilização da solução proposta.

As próximas seções estão organizadas da seguinte forma: a Seção 2 apresentará a caracterização do problema do ping-pong e mostrará que o problema é comum e recorrente em redes densas, e, especificamente, na rede analisada como estudo de caso; a Seção 3 analisará as causas do problema do ping-pong, tendo como base os dispositivos mais populares na rede, e proporá uma solução baseada na suavização dos valores de RSSI; a Seção 4 mostrará os resultados dos testes comparativos para avaliação da solução proposta; a Seção 5 tratará dos trabalhos relacionados ao tema e discutirá os compromissos da solução proposta; e, por fim, a Seção 6 apresentará as conclusões do trabalho e propostas para trabalhos futuros.

2. Caracterização do problema e estudo de caso

Esta seção apresentará a análise da ocorrência do problema do ping-pong em uma rede real em produção, atualmente composta por 390 pontos de acesso instalados em diversos *campi* da UFF, em Niterói, RJ [Magalhães et al. 2013]. Os pontos de acesso utilizados na rede Wi-Fi UFF rodam o Linux embarcado OpenWrt e o *daemon hostapd*, responsável por realizar funções de um AP do padrão IEEE 802.11, como o envio de *beacons*, associação/desassociação e autenticação/desautenticação das estações cliente. Este *daemon* gera *logs* de cada um dos eventos de autenticação/desautenticação e associação/desassociação, que, por sua vez, são enviados para um servidor centralizado na rede. Através dos *logs*, é possível avaliar em qual momento um determinado cliente se conectou/desconectou a um determinado AP. Para este trabalho, foram coletados e analisados *logs* no período entre 0h do dia primeiro e 3h:45min do dia 26 de abril de 2015. A sequência de eventos no *log* esperados para um cliente que se conecta à rede em questão é: (1) autenticação do cliente; (2) associação do cliente; (3) autenticação WPA2 Enterprise do cliente; e (4) desassociação e/ou desautenticação do cliente. Neste trabalho, uma

Tabela 1. Descrição dos parâmetros utilizados para a caracterização do ping-pong.

Parâmetro	Descrição	Valor
X_{max}	Intervalo de tempo máximo entre conexões a APs diferentes e consecutivos que caracteriza o ping-pong.	30 segundos
Z_{max}	Intervalo de tempo máximo entre a desconexão de um AP de origem e conexão a um AP de destino, que caracteriza o <i>handoff</i> .	2 segundos
N_{min}	Número mínimo de migrações entre APs, que devem ocorrer consecutivamente respeitando os limiares de tempo estabelecidos, para que o ping-pong seja caracterizado.	2 migrações

conexão² de uma STA a um AP é definida se há nos *logs* ao menos um dos eventos de autenticação ou associação. De forma análoga, uma desconexão da STA é definida se há nos *logs* ao menos um dos eventos de desassociação ou desautenticação.

A Tabela 1 mostra a descrição dos parâmetros que foram utilizados para a caracterização do ping-pong. Para que o ping-pong ocorra, mais de um *handoff* deve ocorrer em um período determinado. Neste trabalho, o *handoff* é definido como a desconexão espontânea do cliente de um AP de origem e a subsequente conexão a um AP de destino (*e.g.*, se um cliente se desassocia de um AP e se associa novamente à rede no dia seguinte, isso não configura um *handoff*). A decisão do *handoff* varia de acordo com o fabricante do dispositivo cliente e de configurações do *software* utilizado para esta função. Estudos anteriores, como [Mishra et al. 2003], mostram que diferentes dispositivos podem apresentar diferentes comportamentos durante a realização do *handoff*, resultando em durações variáveis para este processo. Para lidar com esta variabilidade, a caracterização do problema do ping-pong utiliza o parâmetro Z_{max} , que define o intervalo de tempo máximo entre a desconexão de um AP anterior e a conexão a um novo AP caracterizando um *handoff*. Em outras palavras, se este intervalo for maior que Z_{max} , este processo não configura um *handoff* e, portanto, não pode ser parte de um ping-pong.

Além da ocorrência do *handoff*, para que o ping-pong seja caracterizado também é necessário que o cliente permaneça pouco tempo no AP de origem. A definição do que seria “pouco tempo” é subjetiva e deve levar em conta a degradação de qualidade do acesso percebida pelo usuário. Neste trabalho, este tempo é limitado por X_{max} , que define o tempo máximo entre conexões consecutivas a diferentes APs caracterizando a ocorrência de ping-pong. Além dos limiares de tempo, um número N de migrações consecutivas entre APs mínimo, denominado N_{min} , deve ocorrer respeitando estes limiares. Após o limiar N_{min} ser alcançado, as demais migrações que se enquadrarem nos limiares de tempo Z_{max} e X_{max} ocasionarão o incremento do número de ping-pongs observados para o cliente. Caso uma migração que não se enquadre nos limiares ocorra, o contador N é zerado. É importante notar que o ping-pong pode envolver um número variável de APs, tendo em vista que, em um mesmo ambiente, um cliente poderá encontrar diversos APs pertencentes ao mesmo ESS e migrar entre eles. Desta forma, o número de APs diferentes

²Como nos *logs* analisados um evento de associação pode se referir tanto à associação inicial quanto à reassociação de uma STA a um AP, deste ponto em diante o termo “conexão” será utilizado para denotar ambos.

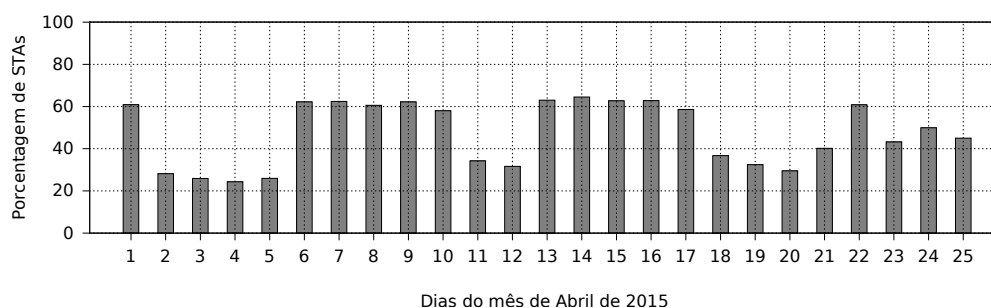


Figura 1. Porcentagem de STAs que sofreram ping-pong a cada dia analisado.

envolvidos nos eventos de ping-pongs não foi limitado. O único requisito é que os APs de origem e destino em uma migração sejam diferentes.

Nas análises apresentadas nesta seção, conforme mostra a Tabela 1, os valores utilizados para os parâmetros definidos foram: $X_{max} = 30$ segundos; $Z_{max} = 2$ segundos e $N_{min} = 2$ migrações. Z_{max} foi escolhido com base em resultados anteriores, como o de [Mishra et al. 2003], e adicionada uma margem para enquadrar variações de tempo para realização do *handoff* que possam vir a ocorrer para diferentes dispositivos. Os valores de X_{max} e N_{min} foram escolhidos considerando-se que, se no máximo em 1 minuto o usuário realizou dois *handoffs*, ao menos um deles foi desnecessário. Com estes valores, é esperado que os casos em que o ping-pong gera incomodo ao usuário da rede sejam representados.

No decorrer das análises dos *logs*, um total de 15.783 STAs diferentes, com pelo menos um ciclo de conexão/desconexão e que tinham credenciais para acesso à rede, foram encontradas. A Figura 1 mostra, para cada dia do *log* analisado, a porcentagem destas STAs que sofreram ao menos um ping-pong. Os resultados mostram que, nos dias referentes a feriados, pontos facultativos e finais de semana, que são 2, 3, 4, 5, 11, 12, 18, 19, 20, 21, 23, 24 e 25, o ping-pong ocorreu com menor frequência. Já nos demais dias, o ping-pong foi observado para mais de 50% das STAs. O dia 26 foi excluído do gráfico porque apresentou dados somente até às 3:54 hs da tarde.

Um dos motivos que podem explicar o maior número de ping-pongs observados nos dias úteis é o aumento do tempo total de conexão observado para as STAs. Este aumento do tempo de permanência no ambiente aumenta a possibilidade de que o cliente experimente o ping-pong. No dia 4, por exemplo, no qual 24% das STAs sofreram ping-pong, a porcentagem de STAs que permaneceram mais de 10 minutos conectadas foi apenas 38,48%. Dentre estas, 54% sofreram ping-pongs. Já no dia 14, no qual 64,53% das STAs sofreram ping-pong, a porcentagem de STAs que permaneceram mais de 10 minutos conectadas subiu para 86% e, destas, 72,19% sofreram ping-pongs. Um comportamento semelhante pode ser observado para os demais dias. Outra questão que pode influenciar a ocorrência de ping-pongs é a movimentação das pessoas e objetos pelo ambiente analisado. Esta movimentação pode ocasionar variações momentâneas no RSSI amostrado pelas STAs, estimulando mais ocorrências de ping-pongs. Desta forma, a circulação de um maior número de pessoas estimula o aumento no número de ping-pongs observados nos dias úteis.

Dentre os dias úteis, o número total de ocorrências do ping-pong por dia variou

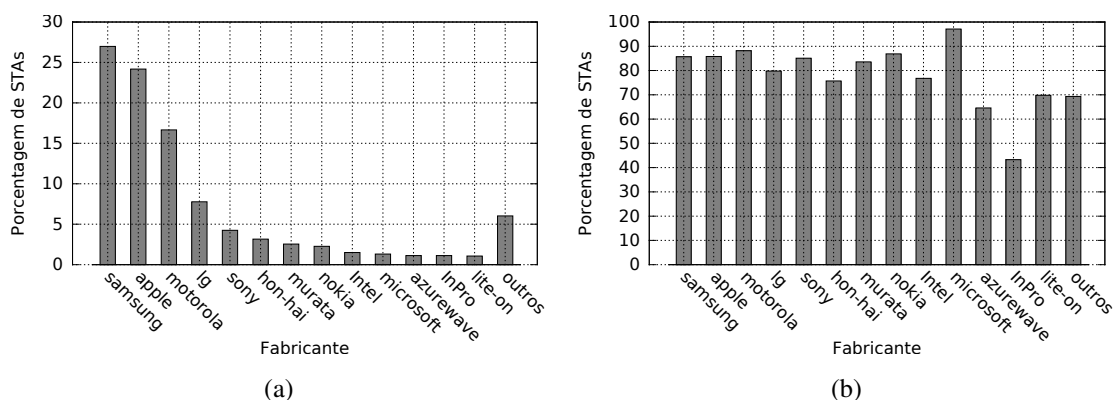


Figura 2. (a) Distribuição de dispositivos por fabricantes mais populares encontrados na rede; (b) Porcentagem dos dispositivos de cada fabricante que sofreram ping-pong.

entre 35.170 e 67.155. O dia com maior número de ocorrências foi o dia 17. Neste dia, a média do número de ping-pongs por STAs que sofreram o problema foi 17, 83. O usuário com maior número de ocorrências neste dia apresentou 1.007 ping-pongs e permaneceu na rede durante 7, 4 horas. No dia 10, no qual o número de ocorrências foi o menor dentre os demais, a média foi de 9, 3 ping-pongs por STAs que sofreram o problema. O usuário com maior número de ocorrências neste dia apresentou 683 ping-pongs e permaneceu 6, 63 horas conectado na rede.

As estações que sofreram ao menos um ping-pong estão suscetíveis aos inconvenientes que podem ser ocasionados pelo *handoff* indesejado em um ESS. Os resultados mostram que a ocorrência de ping-pongs é comum e recorrente na rede analisada.

A Figura 2 mostra estatísticas relativas aos fabricantes dos dispositivos encontrados. Nesta análise, para identificar o fabricante de cada STA, foi utilizada a base de dados fornecida por [Stiller 2015], baseada nos registros do próprio IEEE que relacionam o endereço MAC do dispositivo ao fabricante. Os gráficos apresentam os resultados para fabricantes com mais de 1% de ocorrências, dentre o total. A Figura 2(a) mostra a distribuição de STAs por fabricante. Os dispositivos dos fabricantes Samsung, Apple, Lenovo/Motorola e LG foram os mais encontrados, somando aproximadamente 76% do total de dispositivos. A Figura 2(b) mostra a porcentagem de STAs de cada fabricante que sofreram ao menos um ping-pong em relação a todas as STAs do respectivo fabricante. Os resultados mostram que a ocorrência de ping-pongs é comum entre diferentes fabricantes e ocorreu para mais de 70% das STAs dos principais fabricantes listados. No caso dos dispositivos Samsung, 85% das STAs sofreram ping-pongs.

Além dos *logs* gerados pelo *hostapd*, os *logs* gerados pelos servidores DHCP (*Dynamic Host Configuration Protocol*) da rede foram analisados para o mesmo período dentre os dias 1 e 26 de abril de 2015. A informação avaliada a partir destes *logs* foi relativa ao *hostname* requisitado pelas STAs. Tendo em vista que dispositivos móveis comumente apresentam *hostname* que segue determinado padrão, esta informação foi coletada para inferir o sistema operacional (SO) utilizado pelas STAs da rede e gerar estatísticas relativas a este parâmetro.

A Figura 3(a) mostra a distribuição de STAs de acordo com o seu sistema operaci-

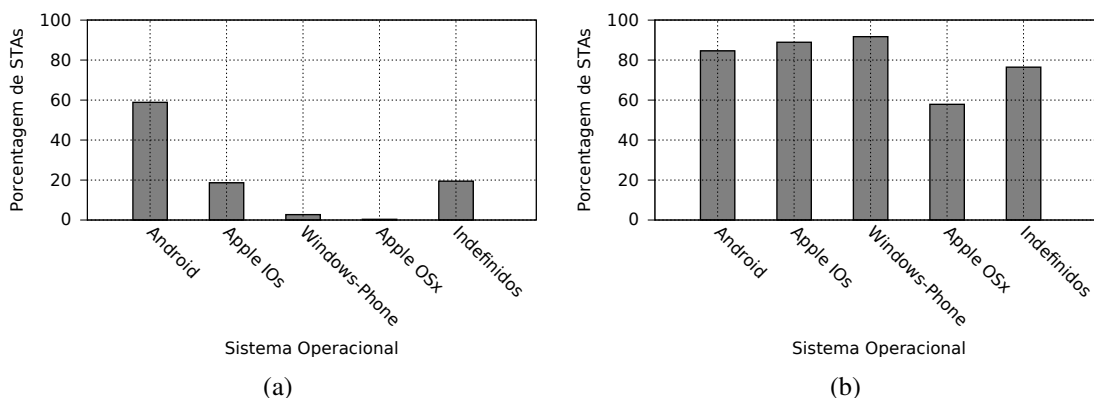


Figura 3. (a) Distribuição de dispositivos por sistema operacional; (b) porcentagem dos dispositivos de cada sistema operacional que sofreram ping-pong.

onal. Os resultados mostram que 60% das estações utilizam sistema operacional Android. A coluna “Indefinidos” refere-se às STAs cujo *hostname* não segue um padrão conhecido. Desta forma, para estas STAs, não foi possível estimar o sistema operacional utilizado. A Figura 3(b) mostra a porcentagem de STAs que sofreu ao menos um ping-pong para os diferentes sistemas operacionais no decorrer do período analisado. Os resultados mostram que aproximadamente 80% dos dispositivos Android, que são os mais encontrados na rede, sofreram ao menos um ping-pong.

3. Análise da origem do problema e proposta de solução

Como a decisão de realização do *handoff* é originada na STA, é intuitivo que a solução para o problema do ping-pong seja implementada nestes dispositivos. Um ponto de partida para uma proposta de solução é a avaliação do funcionamento dos dispositivos que operam com sistema Android, já que, conforme mostrado na Seção 2, representam 60% das STAs da rede utilizada como estudo de caso neste trabalho. Além disso, o código implementado neste sistema é aberto, e, portanto, mais acessível em relação aos demais sistemas, como os da Apple e Microsoft.

Assim como distribuições Linux, o Android comumente utiliza o *software Wpa Supplicant* [Linux Wireless Wiki 2015] para a realização do processo de autenticação do cliente na rede. Além da autenticação, o *Wpa Supplicant* pode ser configurado para disparar a realização de varreduras espectrais em busca de APs vizinhos, e *handoff* entre APs de um ESS. Em dispositivos móveis, esta configuração é comumente definida pelo fabricante, podendo, em alguns casos, estar desabilitada. Neste caso, o dispositivo não irá realizar *handoff* automaticamente. Porém, os resultados apresentados na Seção 2 mostraram que a realização de *handoffs* por parte das STAs é comum.

A Figura 4 (a) mostra o fluxograma de decisão do *handoff* do *Wpa Supplicant*. Para realizar o *handoff*, o *Wpa Supplicant* requisita informações de varredura para obter dados sobre APs nas redondezas. A varredura pode ser requisitada ao *driver* da interface sem fio pelo *Wpa Supplicant* ou por outros *softwares*. Quando o *Wpa Supplicant* realiza esta função, as varreduras ocorrem em intervalos que variam de acordo com a qualidade da conexão da STA ao AP. Desta forma, mais varreduras poderão ser realizadas caso a qualidade da comunicação se torne pior.

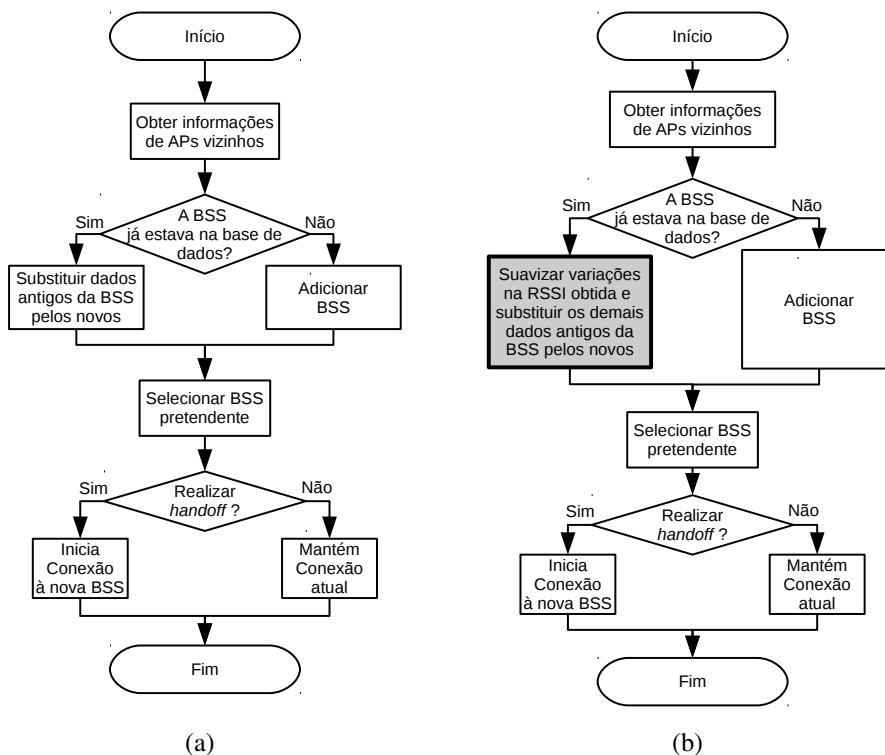


Figura 4. Fluxogramas de decisão de *handoff* (a) originalmente encontrado no *Wpa Supplicant*; (b) incluindo alterações para amenizar o problema do ping-pong.

Após obter informações sobre redes vizinhas, o *software* as armazena em uma base local da seguinte forma: caso um novo AP seja encontrado, ele é adicionado à base local; caso o AP já se encontre na base, os dados antigos são substituídos pelos dados atuais. A seguir, o *Wpa Supplicant* escolhe um AP pretendente dentre os pertencentes ao ESS ao qual a STA está atualmente associada. A escolha é realizada a partir de uma lista de prioridades, que é definida por parâmetros como segurança suportada e RSSI do AP.

Após escolher o AP pretendente, o *software* define se o *handoff* deve ou não ser realizado. Na versão atual do *software*, que é a 2.5, esta decisão é realizada com base no RSSI dos APs, incluindo o AP ao qual a STA está conectada, amostrado no decorrer da realização da varredura. Nesta implementação, o *handoff* é realizado somente caso o AP pretendente possua RSSI maior do que o do AP atual, e, além disso, a diferença entre os RSSIs deverá ser maior do que um determinado limiar. Este limiar varia de acordo com o RSSI recebido do AP atual no momento. Na implementação original do *Wpa Supplicant*, o maior limiar considerado é de 5 dB para um RSSI atual acima de -70 dBm, e o limiar diminui conforme o RSSI atual diminui.

Nesta implementação, os seguintes fatores favorecem a ocorrência de ping-pongs: (1) a nova informação de RSSI obtida a partir da varredura é copiada para a base de dados do *software* sem considerar o histórico do RSSI dos APs. Tendo em vista que o RSSI pode variar muito, conforme será mostrado adiante, *handoffs* indesejados podem ocorrer; e (2) o limiar que define a diferença entre os níveis dos sinais do AP atual e do AP pretendente não é suficiente para enquadrar a grande variabilidade do RSSI que pode ocorrer.

Para comprovar a grande variabilidade do RSSI, a Figura 5 mostra estatísticas

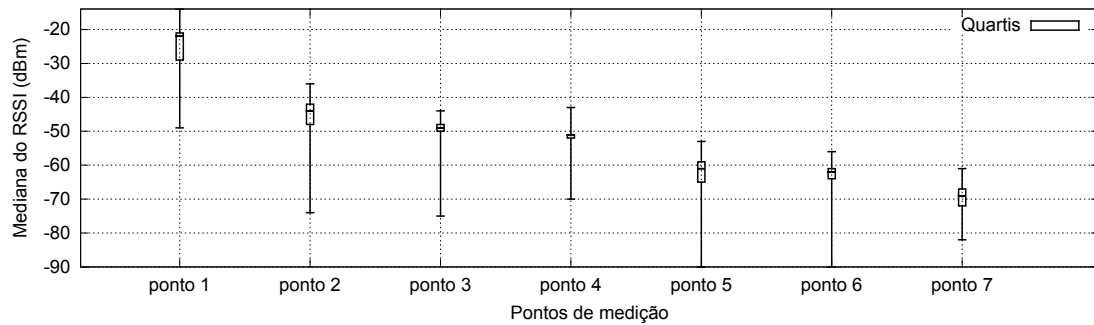


Figura 5. Mediana do RSSI (dBm) com estatísticas dos valores mínimo e máximo, e primeiro e terceiro quartis.

obtidas a partir de amostras de RSSI de *beacons* (em dBm, conforme reportado pelo cabeçalho *radiotap*), coletadas a diferentes distâncias de um ponto de acesso em um ambiente *indoor*. As amostras foram coletadas de forma consecutiva por uma mesma estação cliente em sete pontos de medição, sendo o ponto 1 o mais próximo do AP e o ponto 7 o mais distante. A estação cliente foi posicionada estaticamente em cada ponto para realizar a coleta de dez mil quadros de *beacon* consecutivos. O intervalo entre *beacons* foi de 0,1024 segundos. Desta forma, a captura em cada ponto durou em torno de 17 minutos. A estação operou com uma interface sem fio *Broadcom BCM4313*, *driver brcmsmac*, e sistema operacional Ubuntu 14.04. O AP que emitiu os *beacons* possui modelo TL-WR740N e operou com Linux embarcado OpenWrt 14.07. O gráfico é um *Box Plot*, *i.e.*, mostra a mediana dos valores de RSSI para cada ponto de medição, primeiro e terceiro quartis (representados pelos retângulos inferior e superior à mediana, respectivamente), e valores máximo e mínimo (representados pelas linhas acima e abaixo da mediana, respectivamente). Através destes resultados é possível verificar a grande variabilidade do RSSI, chegando a 37 dB de diferença entre valores máximo e mínimo para o ponto 5. Esta variabilidade, que já foi observada em outros trabalhos, como o de [Mhatre e Papagiannaki 2006], pode ser explicada por alterações na propagação do sinal geralmente ocasionadas pela movimentação de pessoas e objetos em ambientes *indoor*.

Por não considerar a grande variabilidade do RSSI, o algoritmo de *handoff* utilizado pelo *Wpa Supplicant*, que é o *software* utilizado pela maioria das STAs na rede analisada neste trabalho, favorece a ocorrência de ping-pongs. Uma solução imediata, com o objetivo de mitigar a causa identificada para o problema, é a aplicação de uma técnica para suavizar as variações no RSSI amostrado. Um exemplo de técnica bem conhecida e amplamente utilizada para tal finalidade é a aplicação da Média Móvel Exponencialmente Ponderada (MMEP) ao conjunto de dados. A MMEP age sobre a série de dados como um filtro passa baixa, removendo ruídos de alta frequência e suavizando variações bruscas.

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

A Equação 1 descreve matematicamente a MMEP. Aplicando-se a MMEP ao problema do ping-pong, o conjunto de dados x representará os valores de RSSI amostrados a partir da varredura e o conjunto de dados s representará a MMEP destes valores, que serão efetivamente armazenados na base de dados e utilizados para a decisão de *handoff*. O momento $t = 0$ representa a inserção do AP na base de dados com seu valor original de RSSI amostrado. Conforme indica a equação, o parâmetro α define o peso que será dado

às amostras originais de RSSI. Desta forma, aumentando-se o valor de α , mais peso será dado às novas amostras, o que reduz a suavização dos dados. Reduzindo-se o valor de α , mais peso será dado às amostras antigas, aumentando-se a estabilidade dos dados. Para $\alpha = 1$, tem-se o algoritmo original utilizado pelo *Wpa Supplicant*.

A Figura 4(b) apresenta o fluxograma do algoritmo de *handoff* proposto neste trabalho, incluindo a aplicação da MMEP aos dados de RSSI. Em relação ao algoritmo tipicamente implementado nas STAs, apresentado na Figura 4(a), este novo algoritmo introduz a suavização das variações da RSSI antes de armazenar informações de varredura na base de dados.

4. Resultados dos testes comparativos

Para verificar o impacto da solução proposta no número de ping-pongs observados, testes comparativos foram realizados em uma rede real composta por dois pontos de acesso e uma STA posicionada em um local intermediário. Tanto os APs quanto a STA estavam em posição fixa. Inicialmente, a STA foi associada a um dos APs e informações foram coletadas no decorrer de uma semana, a partir de *logs* locais. Estas informações incluíram o momento em que a STA realizou varreduras e *handoffs*. A estação operou com interface sem fio *Broadcom BCM4313*, *driver brcmdsmac*, e sistema operacional Ubuntu 14.04. A versão do *Wpa Supplicant* utilizada como base para os testes foi a 2.1. Os APs utilizados nos testes possuíam modelos TL-WR740N e TL-WR743ND e operaram com Linux embarcado OpenWrt 14.07.

Os testes foram realizados sequencialmente (em semanas distintas) com diferentes implementações do algoritmo de *handoff* sumarizadas na Tabela 2. Além do algoritmo original utilizado pelo *Wpa Supplicant*, foram testadas a versão proposta com valores de $\alpha = \{0,2; 0,4; 0,6; 0,8\}$ e uma versão semelhante à original, porém com limiar de diferença de sinal fixo em 10 dB, *i.e.*, para que o *handoff* seja realizado, a diferença entre o RSSI do AP pretendente em relação ao AP atual deverá estar acima de 10 dB. O novo valor de 10 dB representa o dobro do valor máximo utilizado no algoritmo original do *Wpa Supplicant*.

Tabela 2. Algoritmos de *handoff* testados.

Original	Versão original do <i>Wpa Supplicant</i> .
Limiar fixo	<i>Wpa Supplicant</i> modificado para operar com limiar fixo de 10 dB.
MMEP	<i>Wpa Supplicant</i> modificado para aplicar MMEP aos valores de RSSI obtidos a partir da varredura, com peso $\alpha = \{0,2; 0,4; 0,6; 0,8\}$ para amostras novas.

A Figura 6 mostra o número de ping-pongs obtidos para cada algoritmo testado no decorrer de uma semana. Para definir a ocorrência de ping-pongs, o valor de X_{max} foi definido como 240 segundos, tendo como base a frequência da execução de varreduras pela STA. Tendo em vista que o intervalo entre varreduras foi, em mais de 89% das vezes, de 120 segundos, o valor de X_{max} foi dado como o dobro deste intervalo. O valor de N_{min} foi mantido em 2 e a definição do limiar Z_{max} não foi necessária, já que o *log* fornecido localmente pelo *software* informa a ocorrência de fato dos *handoffs*. Os resultados mostram que o algoritmo original sofreu 20 ping-pongs, enquanto o algoritmo limiar fixo, sofreu 6 ping-pongs, ou seja, sofreu redução de 70%, mas não eliminou os ping-pongs. O algoritmo proposto, que implementa a MMEP para amenizar variações

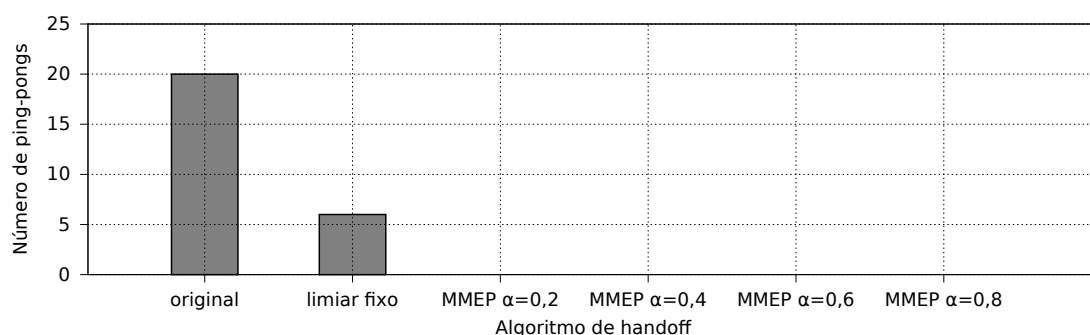


Figura 6. Número de ping-pongs observados, no período de uma semana, para cada algoritmo de *handoff* testado.

no RSSI dos APs vizinhos, não experimentou ping-pongs para os diferentes valores de α testados, ou seja, o ping-pong foi reduzido em 100% em relação ao algoritmo original.

Apesar da redução do número de ping-pongs observada para o algoritmo proposto, *handoffs* ainda foram observados para determinados valores de α . A Tabela 3 mostra, para cada algoritmo, a distribuição do número de *handoffs* por intervalo de tempo entre ocorrências. A última coluna apresenta o número total de *handoffs* observados, mostrando que este número reduziu com a redução do valor de α . Este resultado é esperado, tendo em vista que, quanto menor o valor de α , menor é o peso dado a novas amostras de RSSI, tornando mais eficaz a filtragem das variações bruscas e momentâneas da RSSI.

Tabela 3. Distribuição do número de *handoffs* de acordo com o intervalo de tempo entre ocorrências.

Algoritmo	0 e 5 min.	5 e 10 min.	10 e 15 min.	15 e 20 min.	20 e 25 min.	25 e 30 min.	acima de 30 min.	total
Original	62	29	15	12	5	10	37	170
Limiar fixo	21	10	6	3	1	2	21	64
MMEP $\alpha = 0,8$	9	7	2	1	4	4	27	54
MMEP $\alpha = 0,6$	0	3	0	0	0	0	6	9
MMEP $\alpha = 0,4$	0	0	0	1	1	0	3	5
MMEP $\alpha = 0,2$	0	0	0	0	0	0	0	0

As demais colunas da Tabela 3 apresentam o número de *handoffs* que ocorreram dentro de um determinado intervalo de tempo após a ocorrência anterior. Os intervalos estão distanciados em 5 minutos. Os resultados mostram que os *handoffs* observados para os algoritmos original e limiar fixo ocorrem com intervalos mais variados e com mais frequência em relação ao algoritmo MMEP. Observando-se pontualmente o *log* para os testes com o algoritmo proposto, pôde-se notar que a ocorrência de *handoffs* com intervalos maiores são comumente seguidos por outro *handoff* com um intervalo menor. Isto pode ser explicado pela ocorrência de variações bruscas na RSSI, tanto do AP atual ao qual a STA está associada quanto do AP pretendente. Nestes casos, a MMEP com valores de α mais altos não foi capaz de suavizar suficientemente estas grandes variações. No caso dos testes com $\alpha = 0,4$, por exemplo, a maior variação entre a RSSI amostrada (*i.e.*, sem aplicação da MMEP) e a armazenada previamente na base de dados, para o mesmo AP, chegou a 11 dB. Já para $\alpha = 0,2$, nenhuma migração entre APs ocorreu.

5. Discussão

O processo de *handoff* pode ser dividido em quatro etapas. A primeira delas define quando a STA deve realizar a migração (etapa de *triggering*). A seguir, a STA realiza a descoberta de APs vizinhos e a escolha de um novo AP. Por fim, a STA realiza a migração [Mhatre e Papagiannaki 2006]. Alguns trabalhos, como o de [Mishra et al. 2003], caracterizam o *handoff* em termos de tempo necessário para sua realização e comportamento para diferentes fabricantes. Outros, como os de [Ramani e Savage 2005] e [Huang et al. 2006], buscam amenizar os inconvenientes ocasionados pelo *handoff*, através do emprego de técnicas para reduzir o tempo necessário para a realização de suas diferentes fases, como, por exemplo, a fase de descoberta e a fase da autenticação do cliente. O padrão IEEE 802.11r [IEEE 2008] também busca a realização de *handoffs* rápidos, e, para isso, utiliza métodos para reduzir o número de mensagens de autenticação trocadas durante a migração da STA. De fato, reduzir o tempo necessário para o *handoff* ameniza os efeitos do problema do ping-pong, já que o processo se tornaria menos custoso para a STA. Porém, não extingue o problema, *i.e.*, a conectividade seria momentaneamente interrompida e conexões ativas poderiam ser quebradas.

O trabalho [Raghavendra et al. 2007], que também aponta o problema da alta frequência de migrações em redes densas, realiza a análise dos *handoffs* em um cenário no qual muitos usuários se conectam ao mesmo AP simultaneamente. A principal causa apontada para o problema foi o alto índice de colisões, que levam à perda de quadros e à migração da STA para um novo AP em busca de melhor desempenho. Uma diferença em relação ao trabalho apresentado aqui é o fato de que a rede da UFF é menos densa, estando menos suscetível ao nível de colisões assumidos pelos autores. Além disso, como foi demonstrado na Seção 3, neste trabalho foi identificada a ocorrência de ping-pongs causados pela grande variação do RSSI, mesmo em cenários com baixa taxa de perdas. O trabalho de [Mhatre e Papagiannaki 2006] sugere o uso de um limiar de qualidade de conexão (denominado *operating region*) para evitar o ping-pong. A STA deve iniciar o processo de migração caso a qualidade esteja abaixo deste limiar. Porém, este limiar não soluciona o problema nos casos em que a STA está em um ambiente no qual a qualidade dos APs vizinhos é similar e abaixo do limiar. Além disso, o trabalho busca resolver um problema oposto ao observado aqui, que é a carência de realização de *handoffs* pelas STAs, mesmo em situações em que a qualidade da conexão poderia ser melhorada. Conforme foi mostrado, esta questão não é mais uma realidade. O trabalho de [Kim et al. 2012], assim como o apresentado aqui, também busca reduzir a frequência de *handoffs*, porém considera a trajetória de STAs em movimento. O problema descrito aqui ocorre também para estações com baixa mobilidade.

Por fim, outros trabalhos propõem melhorias no mecanismo de *handoff* e testam implementações utilizando o *Wpa Supplicant* e sistema Android. O trabalho de [Montavont et al. 2015], por exemplo, propõe um mecanismo para prever o nível de sinal futuro dos APs e antecipar a ocorrência da migração, resultando em melhor desempenho para estações em movimento.

5.1. Compromissos da solução proposta

A aplicação da MMEP para solucionar o problema do ping-pong possui a vantagem de amenizar variações bruscas no RSSI amostrado pela STA de APs nas redondezas, o que

reduz a ocorrência de *handoffs* indesejados. Entretanto, espera-se que sua aplicação possua a desvantagem de atrasar a reação da STA para casos em que o *handoff* é desejado, por exemplo, nos casos em que a estação está em movimento e uma migração seria benéfica, ou nos casos em que o RSSI do AP atual decaia em decorrência de um fator não momentâneo, como uma falha ou a instalação de um obstáculo. Nestes casos, é esperado que o *handoff* ocorra, porém com certo atraso em relação ao algoritmo original. Em trabalhos futuros, estudos serão realizados para verificar quantitativamente este atraso. Além disso, tendo em vista que a maioria dos dispositivos atualmente são *smartphones*, outra ideia interessante a ser avaliada é a utilização de dados obtidos a partir de sensores incluídos nos dispositivos, como o acelerômetro, por exemplo. Através destes dados, o mecanismo de decisão de *handoff* poderia ser otimizado nos casos em que a STA possui pouca mobilidade, por exemplo.

6. Conclusões

Este trabalho descreveu e discutiu o problema do ping-pong e analisou sua ocorrência em uma rede real densa em produção, composta por 390 pontos de acesso e aproximadamente 16.000 estações cliente. Os resultados mostraram que o problema é comum e recorrente para dispositivos de diferentes fabricantes, e, em particular, no sistema Android, que opera em mais de 60% destes dispositivos. Tendo em vista que este SO possui código acessível, este foi utilizado como base para a análise do problema e a proposta de uma solução. A análise da ocorrência do problema em outras redes será realizada em trabalhos futuros utilizando-se traços disponibilizados pela comunidade científica.

O *software* que comumente controla a realização de *handoffs* em dispositivos Android (e outras distribuições Linux) é o *Wpa Supplicant*. A análise de seu código mostrou que este *software* não considera a grande variação do RSSI amostrado de APs vizinhos em um ambiente *indoor* e, desta forma, permite que *handoffs* indesejados ocorram em momentos pontuais de variações bruscas do RSSI. A solução proposta para o problema sugere a suavização destas variações através da aplicação da Média Móvel Exponencialmente Ponderada (MMEP) ao RSSI. Os resultados dos testes realizados em uma rede real mostram que, ao implementar a solução proposta, o problema do ping-pong foi mitigado para diferentes valores de ponderação α utilizados. A MMEP possui o benefício de suavizar o RSSI amostrado, porém, pode ocasionar o atraso na realização do *handoff* em momentos nos quais ele é desejado, como em casos de falha do AP ao qual a STA está conectada ou no caso em que a STA está em movimento. Uma análise mais profunda das limitações da aplicação da MMEP, e de potenciais soluções, será realizada em trabalhos futuros. Outra questão que pode ser investigada é o motivo da variação da RSSI, que pode também ser ocasionada pela qualidade do *hardware*, por exemplo, e não apenas pela alteração nos padrões de propagação do sinal eletromagnético.

Por fim, como o código de outros sistemas operacionais não está disponível para avaliação, por serem proprietários, uma análise mais profunda não pôde ser realizada para estes sistemas. No entanto, tendo em vista que outros sistemas, como os da Apple, também apresentaram o problema do ping-pong em condições bastante similares às enfrentadas pelos dispositivos Android, é possível especular que a causa também seja relacionada à aplicação direta de amostras de RSSI na tomada de decisão de *handoff*. Neste caso, a solução proposta poderia também ser aplicada a estes dispositivos.

Referências

- Huang, P.-J., Tseng, Y.-C. e Tsai, K.-C. (2006). A Fast Handoff Mechanism for IEEE 802.11 and IAPP Networks. Em *Vehicular Technology Conference*, volume 2, páginas 966–970.
- IEEE (2008). IEEE Standard for Information technology– Local and metropolitan area networks– Specific requirements– Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment 2: Fast Basic Service Set (BSS) Transition. *IEEE Std 802.11r-2008 (Amendment to IEEE Std 802.11-2007 as amended by IEEE Std 802.11k-2008)*.
- IEEE (2012). IEEE Standard for Information technology–Telecommunications and information exchange between systems Local and metropolitan area networks–Specific requirements Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. *IEEE Std 802.11-2012 (Revision of IEEE Std 802.11-2007)*.
- Kim, M., Liu, Z., Parthasarathy, S., Pendarakis, D. e Yang, H. (2012). Association control algorithms for handoff frequency minimization in mobile wireless networks. *Wirel. Netw.*, 18(5):535–550.
- Linux Wireless Wiki (2015). Wpa Supplicant Linux documentation page. URL: https://wireless.wiki.kernel.org/en/users/documentation/wpa_supplicant.
- Magalhães, L. C. S., Balbi, H., Corrêa, C., Valle, R. e Stanton, M. (2013). SCIFI–A Software-Based Controller for Efficient Wireless Networks. Em *6th UbuntuNet Alliance annual conference*.
- Mhatre, V. e Papagiannaki, K. (2006). Using Smart Triggers for Improved User Performance in 802.11 Wireless Networks. Em *Proceedings of MobiSys*, páginas 246–259.
- Mishra, A., Shin, M. e Arbaugh, W. (2003). An Empirical Analysis of the IEEE 802.11 MAC Layer Handoff Process. *SIGCOMM Comput. Commun. Rev.*, 33(2):93–102.
- Montavont, N., Blanc, A., Navas, R., Kerdoncuff, T. e Castignani, G. (2015). Handover triggering in IEEE 802.11 networks. Em *WoWMoM*, páginas 1–9.
- Raghavendra, R., Belding, E. M., Papagiannaki, K. e Almeroth, K. C. (2007). Understanding Handoffs in Large IEEE 802.11 Wireless Networks. Em *Proceedings of IMC*, páginas 333–338.
- Ramani, I. e Savage, S. (2005). Syncscan: practical fast handoff for 802.11 infrastructure networks. Em *INFOCOM*, volume 1, páginas 675–684.
- Stiller, N. (2015). MAC Vendor Lookup. URL: <http://www.macvendorlookup.com/>.
- Tan, L. e Wang, N. (2010). Future internet: The Internet of Things. Em *ICACTE*, volume 5, páginas 376–380.
- Vasudevan, S., Papagiannaki, K., Diot, C., Kurose, J. e Towsley, D. (2005). Facilitating Access Point Selection in IEEE 802.11 Wireless Networks. Em *Proceedings of IMC*, páginas 293–298.