

Caracterização do Uso de uma Rede Sem Fio de Grande Porte Distribuída por uma Ampla Área

Luiz Claudio Schara Magalhães¹ e Diogo Menezes Ferrazani Mattos¹

¹Mídiacom – Departamento de Engenharia de Telecomunicações
Universidade Federal Fluminense (UFF)
Niterói, RJ – Brasil

Resumo. *Um dos principais desafios no gerenciamento de redes sem fio é assegurar um limiar de desempenho mesmo em situações de disputa pelo uso compartilhado dos canais. Este artigo apresenta a análise da uma rede sem fio institucional usada para produção e pesquisa. A rede sem fio da Universidade Federal Fluminense usa tecnologia desenvolvida pelo grupo de trabalho SCIFI da RNP, que é composta de um controlador de software e um firmware que executa em pontos de acesso de baixo custo compatíveis com a distribuição OpenWRT. A análise da rede sem fio é realizada através da modelagem da rede como um grafo direcionado, em que nós são os pontos de acesso e arestas são as relações de vizinhança no meio sem fio. É feita uma comparação entre algoritmos para a escolha de canal de forma a melhorar o desempenho da rede sem fio, minimizando a interferência entre pontos de acesso existentes. São mostradas as características das associações dos dispositivos dos usuários na rede. Os resultados das análises mostram que, após uma troca de canal, até 75% das redes não gerenciadas na vizinhança de um ponto de acesso podem trocar seu canal para se adaptar à nova configuração global das redes sem fio.*

Abstract. *Managing wireless networks is challenging due to the requirement of ensuring good performance while coexisting with other networks. This paper analyses a production wireless network that is also used for research. The wireless network at Universidade Federal Fluminense uses home grown technology which was funded by RNP in the SCIFI work group, which is composed of a software controller and low cost access points compatible with OpenWRT. The analysis of the wireless network is performed modeling the network as a directed graph, in which nodes are the access points and edges represent vicinity. Algorithms for choosing the wireless channel in order to maximize performance by minimizing interference both by access points which are controlled or not by the system. The characteristics of associations of user devices to the wireless network are shown. The results of the analysis show that, after the installation of new channel, up to 75% of unmanaged networks in the vicinity of an access point switch their channel to adapt to the new wireless configuration.*

1. Introdução

O número de dispositivos conectados à Internet é crescente, impulsionado pela popularização de celulares inteligentes (*smartphones*) [Lin et al., 2017] e pela

diversidade de dispositivos conectados à Internet das Coisas (*Internet of Things* - IoT) [Mattos et al., 2018]. Estima-se que até o final de 2020, o número de objetos conectados à Internet ultrapasse 50 bilhões [Yaqoob et al., 2017]. Embora muitos objetos conectados tenham diversas tecnologias de acesso à rede diferentes [Al-Fuqaha et al., 2015], a tecnologia mais popular continua a ser a das redes sem fio [Li et al., 2011], padrão IEEE 802.11 [IEEE, 2016], devido ao baixo custo dos equipamentos e à facilidade de uso. No entanto, com o aumento do número de redes 802.11, o espectro das redes sem fio tem se tornado altamente disputado e compartilhado.

Um dos principais desafios para se prover um desempenho aceitável para usuários de redes sem fio é a sobreposição de canais [Luiz et al., 2015]. Canais próximos geram interferências e diminuem o desempenho das redes sem fio em suas vizinhanças. Portanto, é necessário que o projeto de instalação de redes sem fio considere a alocação de canais tanto do ponto de acesso instalado, como dos demais pontos de acesso já presentes na área. A alocação de canais ótima em redes sem fio é um problema NP-Difícil [Leung e Kim, 2003], mas existem aproximações que levam a boas escolhas de canal [Maturi et al., 2017]. Em redes sem fio de grande porte, alternativas proprietárias para o gerenciamento de pontos de acesso, e consequente atribuição de canais, têm bom desempenho com o compromisso de um alto custo financeiro [Balbi et al., 2012].

Este artigo foca na análise de uma rede sem fio de grande porte gerenciada por uma tecnologia de código aberto, desenvolvida no contexto do grupo de trabalho SCIFI da RNP (Rede Nacional de Ensino e Pesquisa). A tecnologia visa uso de *software* livre e pontos de acesso de baixo custo. O artigo desenvolve uma metodologia de caracterização do comportamento da rede através da análise do grafo de conectividade dos pontos de acesso no meio sem fio. A rede analisada é a rede sem fio universitária que cobre os *campi* da Universidade Federal Fluminense, na cidade de Niterói, Rio de Janeiro.

Por usar tecnologia desenvolvida na própria Universidade, a rede sem fio da Universidade Federal Fluminense (UFF) funciona também como um enorme laboratório, e permite a obtenção de dados que seriam difíceis de gerar em uma simulação ou mesmo coletar numa instalação de mesmo tamanho num laboratório. Neste artigo, é feita a comparação do algoritmo centralizado no controlador que faz a alocação de canais usados pelos pontos de acesso, com outros algoritmos, um iterativo com conhecimento global que muda os canais a cada rodada, um com conhecimento apenas local e outro com escolha aleatória de canais. Recentemente, o algoritmo centralizado no controlador foi modificado para considerar primeiro a interferência interna, entre os pontos de acesso controlados, e depois a interferência externa, dos pontos de acesso com todos os pontos de acesso nas vizinhanças. Anteriormente o cálculo era feito num único passo, através de um algoritmo de coloração de grafos como pode ser visto em [Balbi et al., 2012]. No trabalho anterior era considerada somente a interferência total e os pontos de acesso externos (não-controlados) já entravam no grafo coloridos, isto é, seus canais já eram pré-definidos.

O método utilizado para a determinação da interferência é a coleta de informação dos *beacons* recebidos que carregam apenas a interferência potencial, mas não a interferência real. A interferência real é causada pelo uso intenso da rede. Em uma área, onde existem 37 pontos de acesso controlados e 82 pontos de acesso não controlados, o algoritmo anterior considera o fator externo como preponderante, apesar do número de usuários dos pontos de acesso controlados ser muito maior e, por conseguinte, a inter-

ferência interna também é muito maior. Isto gera uma distorção, que pode ser corrigida considerando o caso em que o tráfego dos pontos de acesso controlados é muito maior, fazendo a minimização da interferência interna, entre pontos de acesso controlados, antes de se considerar a externa.

O novo algoritmo então funciona em dois passos. No primeiro faz-se a coloração de apenas os pontos de acesso controlados, minimizando a interferência entre eles, mas não se escolhe o canal que será alocado a cada cor. O canal é escolhido usando a interferência externa, de forma a minimizá-la. Ao se fazer isto, notou-se que como hoje em dia uma grande parte dos pontos de acesso usa a escolha automática de canais, existe uma tendência de os pontos de acesso externos migrarem para canais que minimizam a interferência, inclusive com os pontos de acesso controlados. Este fato não só melhora a interferência com os pontos de acesso externos como justifica, *a posteriori*, o uso de dois passos, já que a mudança de canal dos pontos de acesso não controlados que antes eram considerados "imutáveis" ocorre como efeito colateral das mudanças de canal dos pontos de acesso controlados.

O restante do artigo está organizado da seguinte forma. A Seção 2 discute os trabalhos relacionados. A infraestrutura da rede sem fio é apresentada na Seção 3. A coleta de dados é descrita na Seção 4. A Seção 5 analisa os resultados obtidos. A Seção 6 conclui o artigo.

2. Trabalhos Relacionados

A análise de desempenho de redes sem fio é um tema constante de pesquisa, devido à popularidade que as redes baseadas no padrão IEEE 802.11 têm assumido [Balbi et al., 2016, Balbi et al., 2012]. Mais recentemente, as redes IEEE 802.11 têm sido apontadas como uma das principais tecnologias habilitadoras da conexão de dispositivos à Internet das Coisas [Mattos et al., 2018, Li et al., 2011].

Henderson *et al.* analisam o perfil de tráfego de uma rede sem fio instalada em um *campus* universitário [Henderson et al., 2008]. Os autores identificam mudanças no perfil do tráfego dos usuários da rede e ressaltam que a ocorrência de associações de usuários visitantes a pontos de acesso (*roaming*) é uma característica marcante que deve ser levada em consideração no projeto da rede. Paralelamente, Balbi *et al.* verificam que em redes altamente densas o número de trocas entre pontos de acesso que os usuários estão associados é muito alto, mesmo quando o usuário não está se movimentando [Balbi et al., 2016].

Wang *et al.* propõem a otimização do uso do espectro das redes sem fio através da cooperação entre pontos de acesso para realizar *beamforming* [Wang et al., 2018]. Os pontos de acesso são conectados via *Ethernet* para tornar mais ágil a troca de informações. A proposta baseia-se em três pilares: um esquema cooperativo que permite o sistema estimar desvios de fase em cada símbolo transmitido e dinamicamente ajustar as fases para garantir o alinhamento; um mecanismo de estimação que mede a qualidade do canal; e um algoritmo aleatório de escolha de usuários para realizar *beamforming* com custo computacional constante. Os autores mostram que o algoritmo aleatório é capaz de escalar a rede linearmente e tem desempenho equivalente a 70% de algoritmos mais complexos.

Shin *et al.* usam a abordagem de descrever a rede sem fio através de um grafo para diminuir a latência durante o *hand-off* [Shin et al., 2004]. A ideia central é desenvolver

algoritmos que permitam que o *hand-off* ocorra sem que a estação tenha a necessidade de ficar monitorando todos os canais. Para tanto, a estação armazenaria o conjunto de canais que cada ponto de acesso vizinho está operando e o conjunto de pontos de acesso vizinhos em cada canal.

Quanto a alocação de canais, em um trabalho anterior, propôs-se a alocação centralizada de canais através de um algoritmo que reduz a interferência entre pontos de acesso dinamicamente, em uma rede sem fio composta por equipamentos de baixo custo [Balbi et al., 2012]. A ideia central é considerar o canal de redes não gerenciadas pelo controlador centralizado e ajustar as frequências dos pontos de acesso gerenciados para evitar a interferência. Maturi *et al.* propõem um esquema de seleção dinâmica de canais que permite que uma rede 802.11 salte sobre os canais disponíveis sempre escolhendo o com menor utilização [Maturi et al., 2017]. Os autores implementam a proposta e mostram a viabilidade de realizar o salto em frequências para redes 802.11 com equipamento padrão de mercado. Outras propostas realizam a alocação de canal através da interferência observada entre pontos de acesso [Lin et al., 2017, Monteiro et al., 2016] e entre clientes e pontos de acesso [Luiz et al., 2015]

A abordagem deste artigo considera a camada de enlace sem fio como sendo um grafo da vizinhança entre os pontos de acesso. Sobre esse grafo calculam-se as métricas para identificar interferências e o comportamento das redes gerenciadas e não gerenciadas por um controlador centralizado. Diferentemente de trabalhos anteriores, a caracterização da rede é realizada sobre a vizinhança dos nós sem fio e não sobre o tráfego da rede. O trabalho aborda ainda uma análise de desempenho de algoritmos de seleção de canais e verifica o resultado da seleção após a consolidação na rede.

3. A Infraestrutura de Redes Sem Fio SciFi

A rede sem fio institucional da Universidade Federal Fluminense (UFF), apesar de ainda não ter atingido seu tamanho projetado de quatro mil pontos de acesso, já cobre boa parte da UFF com mais de quinhentos pontos de acesso e tem picos de uso de mais de 5 mil usuários simultâneos, atendendo uma população total de 60 mil usuários internos entre alunos, docentes e funcionários e visitantes através da rede *eduroam*¹ na UFF. A Figura 1 mostra a variação do número dos usuários no período de um ano, entre março de 2017 e março de 2018. Pode-se notar os meses de férias, bem como os recessos no gráfico, caracterizados pelo baixo número de usuários.

A tecnologia usada na rede foi desenvolvida na própria UFF, com apoio do programa de grupos de trabalho da RNP (Rede Nacional de Ensino e Pesquisa) - o GT SCIFI (Sistema de Controle Inteligente para redes sem fio). O SCIFI criou um controlador de *software* e um *firmware* que pode ser instalado em pontos de acesso de baixo custo. Isto permitiu criar uma rede corporativa a um custo muito mais baixo que uma rede corporativa tradicional. Estima-se que o custo tenha sido cerca de um vigésimo de uma rede tradicional, gerando uma economia para a UFF estimada em mais de dois milhões de reais. A estrutura da rede atual é composta de seis redes sobrecamada (*overlay*) sobre a rede cabeada da UFF. A rede sem fio usa sete VLANs, três que abrangem todo o *campus*. Nestas três últimas trafegam os dados de controle, da rede cadastro e da rede de visitantes. A rede de controle serve para a comunicação entre os pontos de acesso (APs) e o

¹Informações disponíveis em <https://www.rnp.br/servicos/servicos-avancados/eduroam>.

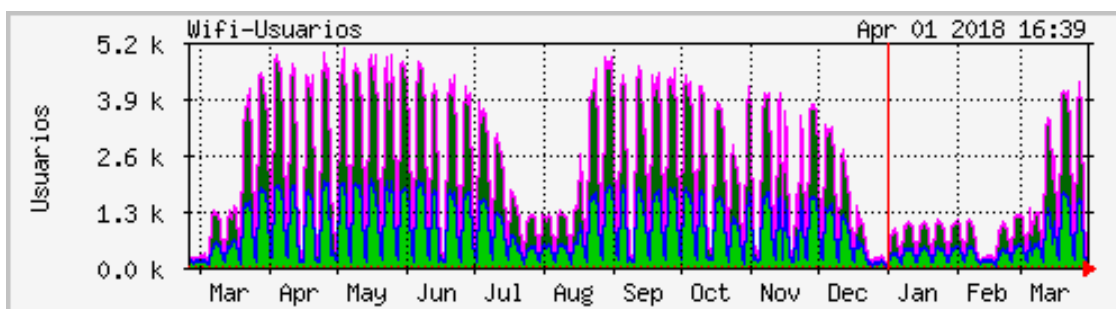


Figura 1. Número de usuários simultâneos da rede sem fio que se estende pelos *campi* da Universidade Federal Fluminense, na cidade de Niterói, RJ. O gráfico mostra a variação do número de usuários no período entre março de 2017 e março de 2018.

controlador, bem como o tráfego das informações de autenticação dos usuários entre os APs e os servidores Radius/LDAP. A rede de cadastro é uma rede *sand-boxed*, que não dá acesso à Internet, mas permite aos usuários acessar os manuais de como usar a rede EDUROAM², o aplicativo de configuração automática, para Android, e para os que não possuem credenciais na UFF, sistema iduff, é apresentada uma página de cadastro. Esta, ao ser preenchida, gera uma conta na rede visitantes. O nome de usuário e a senha na rede visitantes é enviado por SMS para o número de telefone que foi cadastrado. A rede visitantes dá aos usuários cadastrados acesso à Internet com segurança WPA2 *enterprise*, através de usuário e senha únicos por usuário.

As outras quatro VLANs cobrem grandes áreas da UFF. A UFF é distribuída em mais de 90 prédios em Niterói, em mais de 16 *campi* distintos. Atualmente, o número de APs e de usuários justifica duas VLANs específicas, uma para o *campus* da Engenharia (Praia Vermelha) e outra para o de Ciências Humanas (Gragoatá). Os outros *campi* e a reitoria são distribuídos em duas outras VLANs. Cada VLAN tem seu próprio servidor DNS e realiza o seu próprio NAT para o acesso à Internet. Dentro de uma área coberta por uma VLAN, o usuário pode se movimentar mantendo seu IP mesmo quando muda seu ponto de acesso. Como existe uma separação espacial entre áreas, a conexão naturalmente cai quando o usuário deixa um *campus*. Se o usuário migrar para outro *campus* coberto por APs da rede SCIFI de outra área, o dispositivo do usuário recebe um novo IP referente àquela área.

Vale ressaltar que por ser uma rede com propósito múltiplo, produção e pesquisa, o monitoramento da rede é de extrema importância. Os dados gerados pelo monitoramento da rede, em especial por coleta de dados SNMP (*Simple Network Management Protocol*), são armazenados para análise posterior. Os dados coletados mostram o uso de cada ponto de acesso, o número de usuários na rede, informações de consumo de recursos e, também, as associações de usuários a pontos de acesso. No entanto, o monitoramento da rede não considera o uso dos canais de cada ponto de acesso ou de pontos de acesso não gerenciados em uma mesma área.

²É um serviço de acesso a redes sem fio com conexão à Internet, desenvolvido para a comunidade internacional de educação e pesquisa, que se vale da federação de identidade para prover uma forma simples, rápida e segura de acesso à Internet. A autenticação dos usuários ocorre na instituição de origem.

4. A Coleta de Dados das Redes Sem Fio

A infraestrutura de redes sem fio SCIFI analisada cobre diversas áreas da Universidade Federal Fluminense (UFF) na cidade de Niterói, Rio de Janeiro. Os *campi* da UFF são distribuídos em diversos bairros de Niterói e, portanto, geram áreas de cobertura disjuntas da rede sem fio. A metodologia de caracterização do acesso à rede sem fio e divisão do uso de canais consiste em analisar os dados coletados pelos pontos de acesso instalados nas diversas localidades. O procedimento adotado verifica as redes sem fio conhecidas por cada ponto de acesso, averiguando se na vizinhança de cada ponto de acesso é possível identificar possíveis outros pontos de acesso SciFi vizinhos na camada de enlace sem fio. Ademais, o procedimento de verificação de vizinhança ainda armazena quais são as outras redes sem fio na vizinhança de cada ponto de acesso. Tal procedimento permite realizar uma marcação de um estado global do compartilhamento espectro das redes sem fio, tanto para a rede SciFi monitorada quanto para as demais redes. Como a rede SciFi opera prioritariamente nos canais da faixa 2.4 GHz, o procedimento de marcação do estado global do compartilhamento dos canais foi realizado somente para a faixa de frequências de 2.4 GHz. A coleta de dados é composta por três etapas: a varredura de cada ponto de acesso instalado na rede, a concentração e a interpretação dos dados coletados e, por fim, a representação dos dados coletados na forma de um grafo direcionado.

A primeira etapa consiste na realização de uma varredura das redes sem fio que está no alcance de cada ponto de acesso. Para tanto, usa-se a ferramenta `iw scan`³. Como a estrutura da rede SciFi conta com um controlador de rede, a execução da varredura é orquestrada pelo controlador. Para evitar que algum possível usuário perca acesso à rede durante a varredura, a varredura é realizada através da criação de uma interface de rede sem fio virtual de acesso somente para a realização desse procedimento. Os usuários conectados no ponto de acesso que realiza a varredura continuam conectados na interface de rede sem fio inicialmente dedicada a ser o ponto de acesso através do software `hostapd`⁴. O controlador acessa cada um dos nós, pontos de acesso, da rede e executa a varredura. Por se tratar de uma rede em um ambiente de produção, a varredura de todos os pontos de acesso foi agendada para ser executada fora do período de pico de uso da rede. Em especial, a varredura foi executada durante a madrugada, quando os prédios dos *campi* da UFF estão vazios e, portanto, com menos obstáculos para a propagação dos sinais das redes sem fio. O controlador acessa cada ponto de acesso através de uma chamada por SSH (*Secure Shell*). O resultado da varredura nó a nó é então transferida para o controlador da rede. A varredura dos nós é repetida 5 vezes em turnos. A cada turno, todos os nós são varridos em uma ordem definida *a priori*. Vale ressaltar que a varredura em cada nó evidencia a interferência potencial que cada rede pode gerar, mas não a interferência real. A interferência potencial é medida através da qualidade do sinal informada no *beacon* de cada ponto de acesso identificado na varredura. Já a interferência real depende também do uso da rede. Assim, uma rede próxima com poucos usuários e uma alta relação sinal ruído pode ter uma interferência real mais baixa que uma rede mais distante, baixa relação sinal-ruído, porém com mais usuários usando intensamente a interface de rede sem fio e, conseqüentemente, gerando mais interferências.

A segunda etapa da coleta dos dados consiste na concentração e interpretação dos

³Disponível em <http://drvbp1.linux-foundation.org/mcgrof/rel-html/iw/>.

⁴Disponível em <https://w1.fi/hostapd/>.

Algoritmo 1: Representação da varredura de redes sem fio em um grafo direcionado.

Entrada: Scan; %Dicionário contendo os dados da varredura
APs; %Lista de APs monitorados
Saída: Grafo

início

```
Grafo = novo_grafo_vazio();
for turno ∈ Scan do
    for ap ∈ Scan do
        if ap ∉ Grafo then
            adiciona_nó(ap, Grafo);
            Grafo.nó[ap].scan = Dicionário();
        for mac ∈ Scan[ap] do
            qualidade = Scan[ap][mac].qualidade();
            if mac ∉ Grafo.node[ap].scan OU
                Grafo.node[ap].scan[mac].qualidade > qualidade then
                Grafo.node[ap].scan.adiciona(mac : qualidade);
            if mac ∈ APs then
                adiciona_aresta(ap → mac, Grafo);
        end
    end
end
```

fim

dados coletados. Os dados coletados em cada ponto de acesso são salvos no controlador de rede e, então, interpretados. Como todos os dados estão locais, torna-se possível a rápida correlação das informações. Assim, os dados da varredura são interpretados através um aplicativo desenvolvido em Python que consolida todos os dados em um grafo direcionado. Para tanto, utiliza-se a biblioteca `NetworkX`⁵ para a criação e a operação do grafo de conexão entre os pontos de acesso. Ao descrever o relacionamento dos pontos de acesso como um grafo, o problema de caracterização da rede sem fio torna-se um problema de redes complexas. Para realizar a terceira etapa da coleta de dados, a consolidação em um grafo, aplica-se o Algoritmo 1, em que a entrada é o conjunto de dados coletados e interpretados nas etapas anteriores. A rede é modelada como um grafo $G(N, A)$, em que N representa o conjunto dos nós, no caso os pontos de acesso da rede sem fio, e A representa o conjunto das arestas. Uma aresta $a_{i,j} \in A$ representa a relação de que o ponto de acesso i é capaz de receber o sinal e identificar o ponto de acesso j . Somente as relações entre dois pontos de acesso controlados pelo SciFi são considerados na formação do grafo $G(N, A)$.

A estrutura de dados utilizada para representar o grafo da rede armazena em cada nó a lista de redes obtidas na varredura realizada pelo nó. A variável *qualidade* armazena o valor da qualidade do sinal da rede retornada pelo `iw_scan`, que é uma inferência da qualidade de recepção do sinal da rede. Ao verificar se a qualidade da rede monitora é maior que uma qualidade já armazenada anteriormente, o algoritmo de construção

⁵Disponível em <https://networkx.github.io/>.

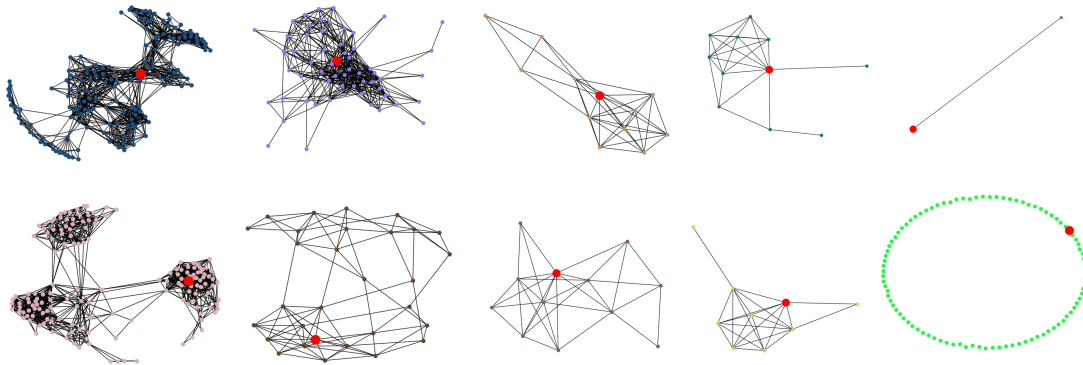


Figura 2. Grafo de conexão da rede sem fio monitorada visualizado em relação a suas componentes conexas. As componentes conexas correspondem fisicamente aos *campi* onde estão instalados os pontos de acesso. A maior componente conta com 160 nós e 92 componentes contam com apenas um nó em cada. Os nós vermelhos são os pontos de acesso com mais vizinhos dentro de uma componente.

do grafo considera apenas o melhor sinal recebido de cada rede em todos os turnos da varredura.

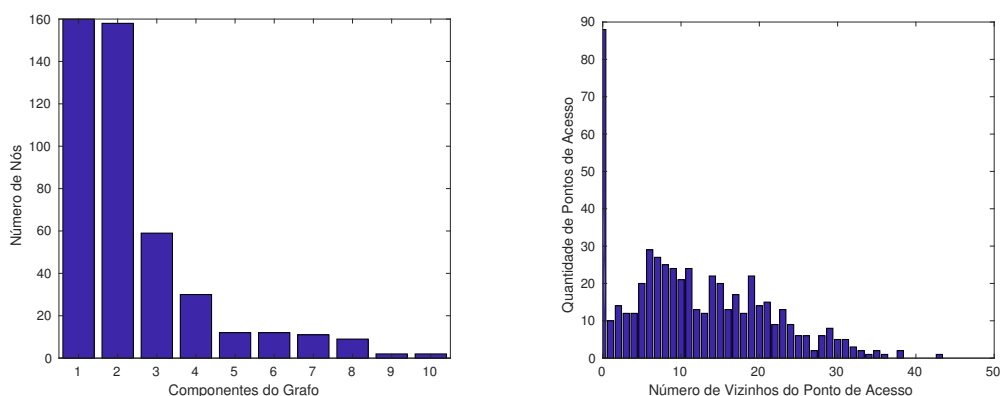
Após a coleta e o tratamento dos dados, é possível realizar uma visualização preliminar dos dados, visualizando as componentes conexas do grafo. No caso do grafo de vizinhança das redes sem fio, as componentes conexas são as partições da rede que estão isoladas na camada de enlace. A Figura 2 mostra a visualização da rede sem fio SciFi da UFF através da representação das suas componentes conexas. O grafo é composto por 547 nós, representando todos os pontos de acesso monitorados. Percebe-se que há 9 componentes conexas maiores, que são compostas por 454 pontos de acesso, e 93 pontos de acesso que não pertencem a nenhuma componente conexa. As 9 maiores componentes conexas representam os pontos de acesso distribuídos nos *campi* da UFF. Cada componente é um *campus*, ou prédio administrativo, que tem pontos de acesso da rede SciFi. Dentre os 93 pontos de acesso isolados estão pontos de acesso defeituosos que não estão com a interface sem fio ativada e, também, pontos de acesso em locais isolados nos quais não há sobreposição de cobertura da rede com outros pontos de acesso SciFi.

Vale ressaltar que a estrutura de dados utilizada para representar o grafo da rede armazena em cada nó a lista de redes obtidas na varredura realizada pelo nó. A variável *qualidade* armazena o valor da qualidade do sinal da rede retornada pelo `iw scan`, que é uma inferência da qualidade de recepção do sinal da rede. Ao verificar se a qualidade da rede monitorada é maior que uma qualidade já armazenada anteriormente, o algoritmo de construção do grafo considera apenas o melhor sinal recebido de cada rede em todos os turnos da varredura.

5. A Análise dos Dados

A primeira análise do grafo obtido consiste na avaliação das componentes do grafo e grau dos nós. O objetivo desse primeiro experimento é identificar as componentes do grafo e mensurar o tamanho delas. A Figura 3(a) mostra que há duas componentes maiores na rede sem fio, compostas por 160 nós cada. Essas componentes representam os dois maiores *campi* da UFF. Esse resultado mostra que os pontos de acesso dentro do mesmo *campus* formam uma rede conexa e, portanto, são capazes de fornecer cobertura

de rede sem fio na maior parte do *campus*. Já a Figura 3(b) mostra que o número de vizinhos que cada ponto de acesso tem na rede é bastante variado. Pontos de acesso sem vizinhos (zero vizinhos) são numerosos, pois nessa contagem consideram-se os pontos de acesso defeituosos e os instalados em áreas remotas. Os demais pontos de acesso têm até 50 vizinhos. Uma consequência do fato de o número de vizinhos ser alto, na média, é que os clientes que se associam a um ponto de acesso estão constantemente na visada de outros pontos de acesso e, portanto, ficam sujeitos a realizar constantemente a troca de associação entre diferentes pontos de acesso.



(a) Nós por componente conexa do grafo.

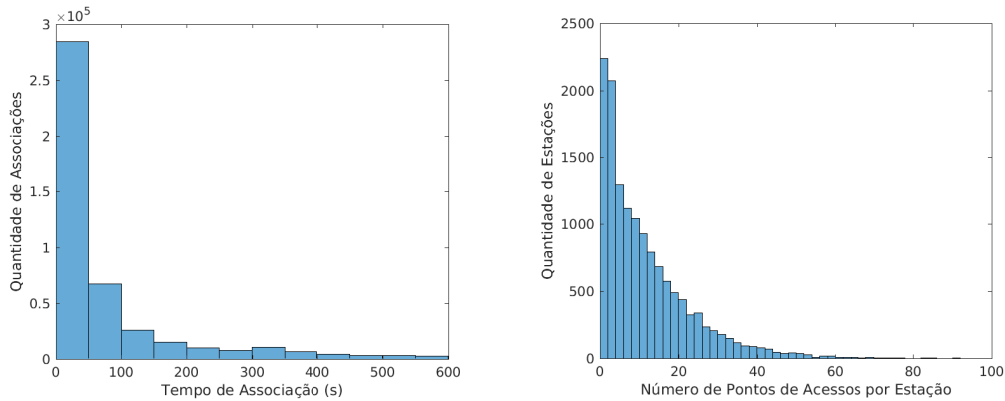
(b) Número de nós que um ponto de acesso percebe na sua vizinhança.

Figura 3. Caracterização do grafo de vizinhança entre os pontos de acesso que compõem a rede sem fio monitorada. Grafo consolidado a partir do monitoramento das redes sem fio em cada nó. a) Comparação do tamanho das 10 maiores componentes conexas formadas na rede. Cada uma das demais componentes é formada por apenas um ponto de acesso. b) Distribuição do grau de vizinhança dos nós na rede sem fio.

Para realizar análise dos dados, além de contar com as varreduras das redes sem fio em cada ponto de acesso, foram coletados também os registros de associações de clientes a cada ponto de acesso da rede. Foram considerados os registros de associação de todos os nós da rede de um único dia⁶. Nesse dia, foram identificados 13.806 dispositivos distintos que acessaram a rede sem fio. Assim, também é possível verificar o perfil de uso da rede por parte dos clientes, assim como detectar possíveis pontos de sobrecarga de acesso na rede. A Figura 4 mostra o comportamento dos clientes na rede. Pela Figura 4(a), verifica-se que o tempo de associação dos clientes aos pontos de acesso é predominantemente curto, da ordem de menos de 1 min. Esse comportamento deve-se ao fato de a rede sem fio analisada apresentar áreas de cobertura muito densas e, assim, um cliente troca constantemente o ponto de acesso a que está conectado. Como todos os pontos de acesso estão na mesma sub-rede IP, a constante reassociação de um cliente a outros pontos de acesso não gera quebra das conexões, nem exige a reconfiguração da interface de rede. Contudo, a reassociação exige a reconfiguração de tabelas de encaminhamento dos comutadores da rede, o que pode gerar um grande número de pacotes ARP sendo enviados em difusão na sub-rede e atrasos na reconfiguração das tabelas de encaminhamento dos comutadores. As múltiplas associações de um cliente a diversos pontos de acesso por

⁶O dia usado para o teste foi 27 de março de 2018.

estação fica evidente no histograma mostrado na Figura 4, na qual se nota que há clientes que se associam a mais de 100 pontos de acesso em um único dia. Paralelamente, o comportamento mais comum é de clientes que se associam a somente um ou a um grupo reduzido, menor que 10 pontos de acesso.



(a) Tempo de associação de estação por ponto de acesso. (b) Número de pontos de acesso que uma estação se associa por dia.

Figura 4. Comportamento da associação de estações a pontos de acesso. a) Distribuição do tempo e associação de uma estação a pontos de acesso. b) Distribuição do número de pontos de acesso únicos que uma estação se associa por dia.

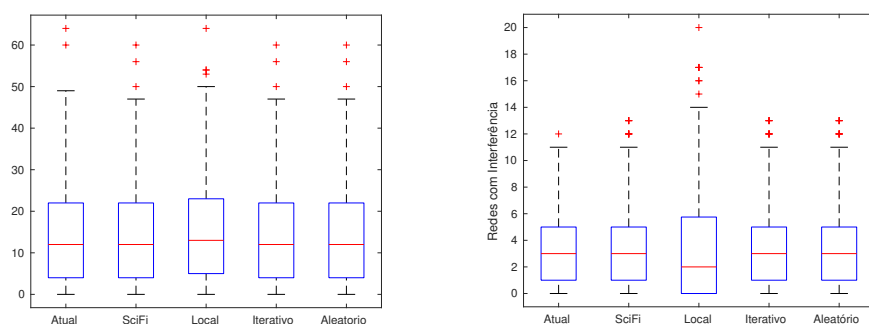
A experiência de acesso à rede sem fio pelos clientes depende da escolha de canais em que cada ponto de acesso serve a rede sem fio. Contudo, a escolha do canal de cada ponto de acesso é dependente tanto dos canais dos nós vizinhos, como das demais redes sem fio não monitoradas pelo controlador de rede SciFi. Um desafio na escolha dos canais de cada ponto de acesso é que há apenas 3 dos 11 canais⁷ da faixa de frequência de 2.4 GHz que não se interferem mutuamente. Assim, o problema de definição dos canais na rede sem fio é NP-difícil, pois pode ser reduzido a um problema de coloração de grafos. O problema é agravado pelo fato de que os nós no grafo apresentam graus altos, enquanto o número de cores disponíveis é de apenas 3. Assim, a Figura 5 mostra a distribuição do número de redes que compartilham canal com pontos de acesso SciFi, ao se considerar quatro algoritmos distintos de seleção de canal. A configuração da rede sem fio antes da aplicação de qualquer algoritmo é mostrada como *Atual*. O algoritmo de seleção de canal do controlador SciFi é mostrado como *SciFi*. Um algoritmo guloso iterativo (*Iterativo*), um algoritmo de escolha de canal usando somente conhecimento local (*Local*) e a escolha aleatória de canais (*Aleatório*) são propostas como critério de comparação.

O algoritmo iterativo consiste em executar iterações consecutivas nos nós da rede para minimizar localmente a interferência em cada nó, usando o conhecimento global das frequências. As iterações param quando o número de nós que trocam de canal em uma dada iteração é menor que 10% da rede. O algoritmo com conhecimento local realiza a troca do canal do ponto de acesso calculando qual é o canal, dentre os canais que não

⁷Canais 1, 6 e 11 não ortogonais. Os demais canais geram interferência em ao menos um desses 3 canais.

se interferem, que está menos poluído por outras redes. O algoritmo com conhecimento local simula o funcionamento de pontos de acesso que configuram automaticamente o seu canal. Por fim, a escolha aleatória consiste em selecionar uniformemente um canal entre os que não se interferem para cada ponto de acesso.

A Figura 5(a) mostra que os algoritmos com conhecimento global da rede, como o SciFi e o Iterativo, minimizam o número de redes não controladas que compartilham canal com as rede SciFi. Contudo, verifica-se também que a escolha aleatória de canal também apresenta uma boa escolha de canal que, como uma abordagem global, minimiza o número de interferência com outras redes. O comportamento da escolha de canais também se repete ao se considerar somente os nós controlados pelo SciFi, mostrado na Figura 5(b). Nota-se que o algoritmo com escolha local minimiza a mediana da interferência entre nós SciFi, mas aumenta a variância e média da interferência global. Os melhores resultados, mais uma vez, são dos algoritmos com conhecimento global da rede. Contudo, nota-se também que a solução com menor interferência é a configuração atual da rede sem a aplicação de qualquer algoritmo. Tal resultado levanta a hipótese que as demais redes sem fio, não controladas pelo SciFi, se adaptam às mudanças de canal dos pontos de acesso SciFi.



(a) Pontos de acesso não monitorados que compartilham o mesmo canal.

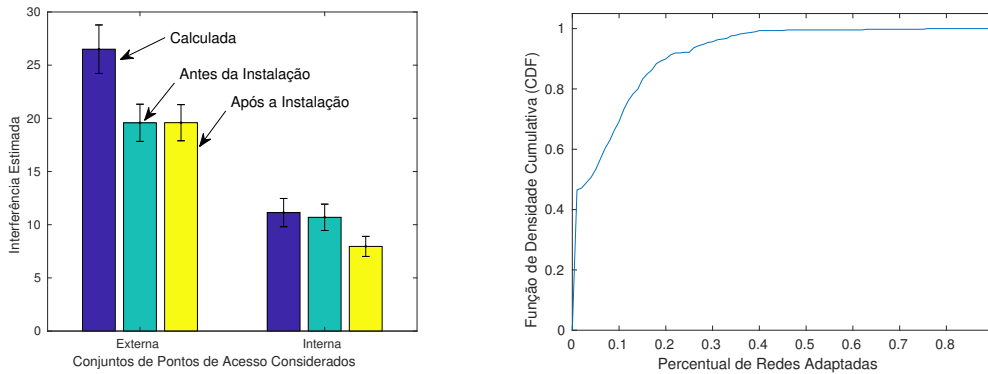
(b) Pontos de acesso monitorados e controlados que compartilham o mesmo canal.

Figura 5. Comparação entre quatro algoritmos de escolha de canal para os pontos de acesso monitorados, o algoritmo do SciFi, uma busca local do canal menos poluído, um algoritmo guloso com visão global da rede que realiza interações para diminuir a interferência interna e externa na rede e a seleção aleatória de canais. a) Número de pontos de acesso não monitorados que interferem no canal; b) Pontos de acesso monitorados que compartilham o canal.

Para verificar se a hipótese de que as redes sem fio adaptam-se às mudanças de canal dos nós SciFi, define-se uma métrica de interferência para calcular a interferência global da rede antes da instalação de novos canais, a interferência calculada para a configuração selecionada e, por fim, a interferência calculada após a nova configuração de canal ser instalada e consolidada na rede. A interferência de quanto uma rede i gera interferência ($interf_{i,j}$) em um ponto de acesso j foi modelada como sendo uma função da qualidade, normalizada entre 0 e 1, percebida pelo ponto de acesso em relação as outras redes:

$$interf_{i,j} = (1 - 0,2 * |canal_i - canal_j|) \frac{qualidade_{i,j}}{(1 - qualidade_{i,j})^3}, \quad (1)$$

para toda rede i tal que $|canal_i - canal_j| \leq 4$, em que $canal_i$ é o canal da rede i e $canal_j$, do ponto de acesso j . A Equação 1 não calcula a interferência real entre as redes, mas auxilia a mensurar o quanto os canais na faixa de 2.4 GHz estão usados. Ao usar o termo $(1 - qualidade_{i,j})^3$ pondera-se que quanto menor a qualidade do sinal de uma rede, menor é a sua interferência no ponto de acesso. Vale ressaltar que a medida da $(1 - qualidade_{i,j})$ pode ser interpretada como função proporcional à distância entre os pontos de acesso das redes i e j . Embora a métrica da Equação 1 permita inferir a interferência entre as redes, essa métrica não é capaz de considerar o uso real da rede e, portanto, a inferência é realizada somente sobre a interferência potencial.



(a) Interferência estimada em função da qualidade do sinal medida nos nós.

(b) Função de densidade cumulativa do percentual de redes sem fio não controladas que mudam de canal.

Figura 6. A interferência estimada externa foi maior que a interferência estimada após a instalação de novos canais. Os pontos de acesso não controlados mudam o canal para se adequarem aos novos canais da rede sem fio controlada. a) Comparação dos valores de interferência estimados antes e depois da instalação de novos canais. b) Função de densidade cumulativa das redes não controladas que mudam de canal para se adaptar à rede sem fio controlada.

A Figura 6(a) apresenta as interferências médias inferidas através da Equação 1, com um intervalo de confiança de 95%. Os resultados mostram que ao instalar novos canais calculados com o algoritmo do SciFi, a interferência externa que os pontos de acesso sofrem aumenta em relação à interferência calculada para a configuração da rede antes da instalação dos novos canais. O algoritmo de instalação de novos canais do SciFi reduz ligeiramente a interferência interna calculada. Contudo, ao instalar a nova configuração de canais, as demais redes sem fio se adaptam aos novos canais e mudam o seu próprio canal. Esse comportamento é verificado ao realizar uma nova varredura das redes sem fio. Na nova varredura, a interferência média das rede externas ao SciFi volta a atingir o mesmo patamar anterior e, como o algoritmo de controle do SciFi considera a potência de cada ponto de acesso no canal, a nova configuração de canais reduz ainda a interferência interna entre os nós SciFi.

A probabilidade de pontos de acesso externos ao SciFi mudarem o canal em resposta a uma mudança de canal da rede SciFi é mostrada na Figura 6(b). Verifica-se que até 75% das outras redes sem fio mudam de canal em resposta a uma mudança da configuração do SciFi. Há uma probabilidade de 0.4 de que no mínimo 10% das outras redes mudem seus canais em resposta à mudança na rede SciFi.

6. Conclusão

O número de dispositivos conectados à Internet é cada vez maior e a principal tecnologia de acesso são as redes sem fio do padrão 802.11. Com a popularização dessas redes, o número de pontos de acesso em áreas urbanas tornou-se vertiginosamente alto. Assim, uma das tarefas mais desafiadoras no gerenciamento de redes sem fio é atribuição de canais a pontos de acesso de modo que minimize tanto a interferência entre pontos de acesso gerenciados quanto a interferência com pontos de acesso não gerenciados. Contudo, esse é um problema sem uma solução exata. Esse artigo apresentou a caracterização de uma rede sem fio da Universidade Federal Fluminense, uma rede de grande porte implantada e gerenciada com *software* livre e *hardware* de baixo custo. A rede sem fio conta com picos de uso de mais de 5 mil usuários ativos e 547 pontos de acesso gerenciados espalhados por *campi* da universidade. O grafo construído a partir de uma varredura total da rede mostrou que há 9 componentes conexas no grafo, indicando que em cada *campus* em que há pontos de acesso instalado, os pontos de acesso são todos vizinhos. A distância máxima entre pontos de acesso em uma componente é de 8 saltos. A análise dos dados de acesso dos usuários revelou que, em um dia, mais de 12 mil dispositivos se associam a rede, mas que o tempo de associação entre dispositivo e ponto de acesso é muito curto devido a constantes *hand-offs*. A análise de algoritmos para a definição de canais entre os pontos de acesso mostrou que o conhecimento global do canal de cada ponto de acesso leva a heurísticas que têm melhor desempenho, mas a definição aleatória de canais também geram bons resultados. Por fim, os resultados mostraram, também, que ao executar a mudança de canal em pontos de acesso em uma rede, gera-se uma reação em cadeia na área em que até 75% dos pontos de acesso não gerenciados em uma área mudam sua frequência para diminuir a disputa pelo canal na rede sem fio.

Como trabalhos futuros, pretende-se avaliar o perfil de uso das redes por cliente e inferir uma métrica de qualidade de experiência para que se possa medir o quanto os clientes estão satisfeitos com o serviço de rede sem fio.

Agradecimentos

Agradecemos a todos os alunos, funcionários e a todos que direta ou indiretamente trabalham na instalação e manutenção da infraestrutura de rede sem fio SciFi.

Referências

- Al-Fuqaha, A., Guizani, M., Mohammadi, M., Aledhari, M. e Ayyash, M. (2015). Internet of Things: A survey on enabling technologies, protocols, and applications. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 17(4):2347–2376.
- Balbi, H., Fernandes, N., Souza, F., Carrano, R., Albuquerque, C., Muchaluat-Saade, D. e Magalhaes, L. (2012). Centralized channel allocation algorithm for IEEE 802.11 networks. Em *2012 Global Information Infrastructure and Networking Symposium (GIIS)*, p. 1–7.
- Balbi, H., Passos, D., Carrano, R., Magalhaes, L., e Albuquerque, C. (2016). Análise e solução para o problema da instabilidade de associação em redes IEEE 802.11 densas. Em *XXXIV Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos - SBRC'2016*.

- Henderson, T., Kotz, D. e Abyzov, I. (2008). The changing usage of a mature campus-wide wireless network. *Computer Networks*, 52(14):2690 – 2712.
- IEEE (2016). 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 802.11-2016 (Revision of IEEE Std 802.11-2012)*, p. 1–3534.
- Leung, K. K. e Kim, B. J. (2003). Frequency assignment for IEEE 802.11 wireless networks. Em *2003 IEEE 58th Vehicular Technology Conference. VTC 2003-Fall (IEEE Cat. No.03CH37484)*, volume 3, p. 1422–1426 Vol.3.
- Li, L., Xiaoguang, H., Ke, C. e Ketai, H. (2011). The applications of WiFi-based wireless sensor network in Internet of Things and Smart Grid. Em *2011 6th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*, p. 789–793.
- Lin, F. Y. S., Wen, Y. F., Fang, L. W. e Hsiao, C. H. (2017). Resource allocation and multisession routing algorithms in coordinated multipoint wireless communication networks. *IEEE Systems Journal*, PP(99):1–12.
- Luiz, T. A., Freitas, A. R. e Guimarães, F. G. (2015). A new perspective on channel allocation in wlan: Considering the total marginal utility of the connections for the users. Em *Proceedings of the 2015 Annual Conference on Genetic and Evolutionary Computation, GECCO '15*, p. 879–886, New York, NY, USA. ACM.
- Mattos, D. M. F., Velloso, P. B. e Duarte, O. C. M. B. (2018). Uma infraestrutura Ágil e efetiva de virtualização de funções de rede para a internet das coisas. Em *XXXVI Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos - SBRC'2018*.
- Maturi, F., Gringoli, F. e Cigno, R. L. (2017). A dynamic and autonomous channel selection strategy for interference avoidance in 802.11. Em *2017 13th Annual Conference on Wireless On-demand Network Systems and Services (WONS)*, p. 1–8.
- Monteiro, A., Souto, E., Pazzi, R. e Kiljander, J. (2016). Atribuição dinâmica de canais em redes sem fio não coordenadas ieee 802.11, baseada em fatores de sobreposição e intensidade de sinal. Em *XXXIV Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos - SBRC'2016*.
- Shin, M., Mishra, A. e Arbaugh, W. A. (2004). Improving the latency of 802.11 hand-offs using neighbor graphs. Em *Proceedings of the 2Nd International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services, MobiSys '04*, p. 70–83, New York, NY, USA. ACM.
- Wang, T., Yang, Q., Tan, K., Zhang, J., Liew, S. C. e Zhang, S. (2018). Dcap: Improving the capacity of wifi networks with distributed cooperative access points. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 17(2):320–333.
- Yaqoob, I., Ahmed, E., Hashem, I. A. T., Ahmed, A. I. A., Gani, A., Imran, M. e Guizani, M. (2017). Internet of things architecture: Recent advances, taxonomy, requirements, and open challenges. *IEEE Wireless Communications*, 24(3):10–16.