

Um Mecanismo para a Seleção Dinâmica de Canal em Redes IEEE 802.11 Infra-estruturadas

Marcel W. R. da Silva¹, José F. de Rezende¹

¹Grupo de Teleinformática e Automação
PEE/COPPE/UFRJ
Universidade Federal do Rio de Janeiro
Rio de Janeiro, RJ - Brasil

{marcel,rezende}@gta.ufrj.br

Abstract. *The great popularity of IEEE 802.11 along with channel scarcity may lead to a degraded overall performance if an intelligent channel allocation process is not being used. A channel allocation unaware of other network's presence in the area may increase medium access contention and co-channel interference, harming networks' aggregate capacity. This work proposes a new automatic channel allocation mechanism for infra-structured IEEE 802.11 networks that works in an independent and distributed manner in access points and uses clients station's measurements exchanged with the new IEEE 802.11k standard.*

Resumo. *A grande popularidade das redes IEEE 802.11 aliada ao pequeno número de canais disponíveis para a sua utilização pode causar uma degradação do desempenho quando não existe um processo inteligente de alocação de canais em redes dispostas numa mesma região. Uma alocação de canal, que não leve em conta a presença de outras redes dentro de uma região, pode gerar um aumento da disputa pelo acesso ao meio e da interferência co-canal, prejudicando a capacidade agregada dessas redes. Neste trabalho é proposto um mecanismo para a seleção automática de canal para o uso em redes infra-estruturadas. Este mecanismo atua de forma independente e distribuída em cada ponto de acesso e utiliza medições realizadas por determinadas estações que são trocadas através do novo padrão IEEE 802.11k.*

1. Introdução

As redes do padrão IEEE 802.11 vêm ganhando popularidade e alguns problemas decorrentes de sua utilização em larga escala começam a surgir. Um deles, que ocorre principalmente nas redes 802.11 infra-estruturadas, é a questão da escolha do canal de operação do ponto de acesso (*Access Point* - AP). Em uma rede 802.11 operando no modo infra-estruturado todos os quadros trafegados passam pelo AP e a escolha do seu canal de operação determinará qual será a faixa de frequências utilizada para as transmissões. Esta escolha afeta diretamente o desempenho da rede, podendo aumentar a influência de outras redes presentes na mesma área (aumentando a disputa pelo acesso ao meio) ou em regiões distantes (gerando interferência co-canal).

As redes dos padrões IEEE 802.11b [802.11b working group 1999] e 802.11g [802.11g working group 2003] utilizam a faixa de frequências ISM (*Industry, Scientific and Medical*) de 2.4 GHz, que é uma das bandas de espectro de livre acesso, ou seja, ela

não é exclusiva de uma única tecnologia e os usuários não precisam de nenhum tipo de licença de operação. Nesta faixa, o 802.11 fornece a possibilidade de escolha de até onze canais de operação diferentes. Dentre estes onze, apenas os canais 1, 6 e 11 não possuem espectros de frequência sobrepostos (Figura 1). No caso das redes do padrão IEEE 802.11a [802.11a working group 1999], que operam na banda de frequências livre de 5 GHz, doze canais podem ser utilizados sem sobreposição espectral, oito para aplicações em ambientes internos e quatro para aplicações em ambientes externos.

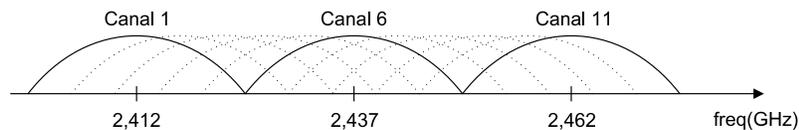


Figura 1. Espectro de frequência dos canais 1, 6 e 11 das redes 802.11b e 802.11g.

Devido à quantidade limitada de canais apenas algumas redes 802.11 podem coexistir em uma mesma região sem gerar interferência mútua. Principalmente no caso dos padrões 802.11b e 802.11g, que são os mais populares. Além disso, a interferência presente nas redes 802.11 pode ser resultante de outros dispositivos que utilizam a banda ISM para a sua operação, como por exemplo, as redes *Bluetooth*. Estas contribuições afetam o desempenho das redes prejudicando a qualidade e a capacidade alcançada nas suas transmissões.

A interferência pode se apresentar de várias formas nas redes 802.11. Para melhorar o desempenho da rede diminuindo a interferência, a escolha do canal de operação deve ser realizada buscando basicamente três objetivos:

- minimizar o compartilhamento espectral, evitando que redes diferentes disputem o acesso ao mesmo canal e ampliando a reutilização de frequências;
- minimizar a interferência gerada por canais adjacentes, evitando que a sobreposição de espectros cause uma perda na qualidade das transmissões;
- e, por último, cuidar para que a interferência co-canal, proveniente da reutilização de um mesmo canal em outra região, não ultrapasse níveis que gerem relações sinal-ruído (*Signal-to-Noise Ratio* - SNR) inaceitáveis.

Na prática, o problema da seleção do canal de operação depende muito do cenário em que ele ocorre. Existem casos em que os APs são dispostos por um mesmo administrador com o objetivo de fornecer conectividade em grandes áreas (aeroportos, hotéis, e etc.). Nestes cenários, o posicionamento dos APs é previamente conhecido e existe uma administração única que controla todos eles. Neste caso, a alocação de canais é um problema mais simples, pois o administrador possui autonomia para configurar os APs e decidir qual é a melhor configuração para a alocação de canais da sua rede.

Mas existem outros cenários em que os próprios usuários instalam seus APs de maneira independente em uma mesma área. Este cenário vem se tornando cada vez mais comum devido à popularização das redes 802.11 com aplicações em pequenas empresas ou em redes domiciliares. Nestes casos, não existe apenas um administrador para todos os APs e o posicionamento deles não é conhecido. As características deste tipo de configuração dificultam a alocação de canais. Os administradores das redes que coexistem na região precisam entrar em um acordo, o que nem sempre é possível ou viável.

Além disso, os administradores dessas redes independentes, na maioria das vezes, são os próprios usuários finais que, nem sempre, têm conhecimento suficiente para a tarefa da escolha do melhor canal. Ou também, novas redes podem ser instaladas sem aviso prévio, o que traria a necessidade dos operadores realizarem verificações e ajustes periódicos para garantir um bom desempenho. Com isso, o problema da escolha de canal nestes cenários com administrações independentes permanece um desafio.

Como citado no parágrafo anterior, nem sempre o problema da escolha do canal de operação possui uma solução viável. Podem facilmente existir casos em que, devido à quantidade e ao posicionamento das redes, não é possível evitar que algumas delas utilizem o mesmo canal disputando o acesso ao meio. Neste caso, seria interessante que a escolha fosse realizada automaticamente sem a necessidade de configuração dos operadores.

Para o desenvolvimento de um mecanismo que realize a escolha automática do canal de operação sem a intervenção dos operadores, a nova extensão k da norma 802.11 fornecerá ferramentas úteis. A norma 802.11k está em desenvolvimento pelo IEEE desde janeiro de 2003 e tem como principal objetivo especificar tipos de informação que podem ser medidas pelo rádio 802.11 e padronizar a troca de mensagens de pedido e de envio dessas informações. Ela permite, por exemplo, que estações gerem relatórios sobre o nível de ruído presente nos diversos canais de operação. Neste artigo são utilizados dois dos tipos de relatórios que estão sendo padronizados na norma 802.11k para desenvolvimento de um mecanismo de seleção automática do canal de operação nas redes 802.11 infra-estruturadas.

Na próxima seção serão apresentados alguns trabalhos relacionados. Na segunda seção o problema da interferência será discutido e abordado com enfoque nas redes 802.11. Na terceira seção será apresentado um resumo sobre as principais características e funcionalidades do padrão IEEE 802.11k. A quarta seção apresenta o funcionamento do mecanismo de seleção de canal proposto e a quinta apresenta as simulações realizadas com o novo mecanismo. E por fim, a sexta e última seção traz as conclusões.

2. Trabalhos Relacionados

O problema de alocação de canais nas redes 802.11 infra-estruturadas já foi abordado em alguns outros trabalhos. Na maioria deles, voltado para o cenário em que os APs estão sobre uma mesma administração.

A técnica de coloração de vértices é a mais adotada em propostas para resolver o problema da alocação de canais (como por exemplo, em [Mahonen et al. 2004], [Hills and Schlegel 2004], [Leung and Kim 2003] e [Mishra et al. 2005]). Geralmente, neste tipo de solução, considera-se que cada AP é um vértice do grafo que representa as regiões de conflito entre as redes sem fio. As regiões de conflito são as regiões em que existe sobreposição das áreas de cobertura dos BSSs (*Basic Service Set*) e são representadas no grafo pelas interligações entre os vértices (Figura 2).

Na maioria dos trabalhos os autores comprovam também que a alocação de canais nas redes 802.11 é um problema NP-completo. Assim, em redes grandes, o custo computacional de algoritmos que buscam a solução ótima para a alocação é muito alto. Então, na maioria dos casos, são propostos algoritmos desenvolvidos através de heurísticas para

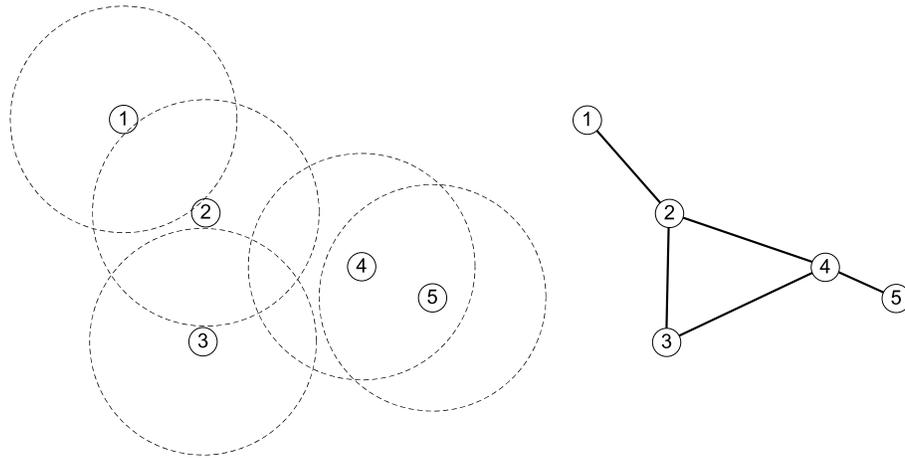


Figura 2. Exemplo de topologia de alguns APs e o grafo representante.

encontrar máximos locais no conjunto de soluções do problema da coloração. O que diferencia os vários trabalhos que utilizam coloração de vértices são as funções objetivo e o algoritmo utilizado para a coloração. A função objetivo indica qual é a meta do algoritmo de coloração proposto.

Em [Mahonen et al. 2004] um algoritmo guloso (*greedy*) é proposto com o objetivo de encontrar uma alocação de canais que maximize a quantidade de vizinhos que utilizam canais diferentes nos seus APs. Em [Leung and Kim 2003] propõe-se um algoritmo heurístico que busca soluções para a alocação de canais levando em conta a carga de tráfego de cada AP.

Em [Hills and Schlegel 2004] é desenvolvida uma ferramenta para auxiliar a disposição e a alocação de canais em APs. Um algoritmo de complexidade exponencial é utilizado para a descoberta da solução ótima para a minimização da utilização de canais iguais em APs adjacentes. Mas o algoritmo em questão possui um alto custo computacional e a sua utilização acaba sendo viável apenas para cenários com poucos APs. Então, a ferramenta também conta com um algoritmo *greedy* com menor custo computacional para redes maiores.

Já [Mishra et al. 2005] considera a possibilidade de utilização de canais parcialmente sobrepostos na alocação. Eles utilizam um índice de sobreposição entre os espectros de frequência dos canais 802.11. Este índice foi obtido através de medições para verificar a porcentagem do nível de sinal que, gerado em um canal, pode ser captado nos outros canais adjacentes. Um dos problemas desta proposta é que a sobreposição de canais gera muita interferência nas transmissões. Isto pode afetar diretamente a porcentagem de perda de pacotes devido ao possível aumento dos erros de transmissão, característica que não é avaliada no artigo.

[Mishra et al. 2005] também desenvolve uma nova abordagem para o problema da coloração de vértices. Nesta abordagem são atribuídos pesos às arestas do grafo representante da rede que indicam a importância de utilizar-se canais diferentes e com os menores índices de sobreposição espectral naqueles APs. Os pesos representam a porcentagem de estações presentes na região de interferência associada àquela aresta. A detecção de outras estações interferentes é realizada pelos nós clientes do AP, que procuram passi-

vamente nos canais disponíveis por essas estações e que possuem uma visão melhor do problema da interferência do AP.

O uso da quantidade de estações presentes na região de interferência como uma métrica indicativa para a alocação de canais diferentes em redes próximas pode ser um problema. Nem sempre a detecção de estações que podem gerar interferência garante que a interferência existirá. Um nó presente na região de interferência pode detectar a presença de outras estações que representam uma possível ameaça, mas essas outras estações não concretizam a ameaça se estiverem ociosas ou se sua carga for muito baixa. Mais importante que a presença de estações que podem causar interferência, é que a interferência exista de fato. Nesse artigo, eles apresentam propostas para a alocação de canais de maneira centralizada ou de maneira descentralizada. O modo de operação descentralizado pode requerer, ou não, comunicação entre os APs e realiza a seleção do canal de maneira automática.

Ainda em [Mishra et al. 2005] os autores citam outro mecanismo de seleção automática de canal, o LCCS (*Least Congested Channel Search*). Este mecanismo é implementado em alguns produtos da empresa CISCO e, com ele, o AP se encarrega de procurar por outro canal menos congestionado quando percebe que o tráfego de quadros de outro BSS que utiliza o mesmo canal de operação ultrapassa um limite.

O mecanismo de seleção automática proposto neste artigo muito se assemelha ao LCCS. A sua diferença é que, como em [Mishra et al. 2005], as estações é que realizam a detecção de outras redes. Com isso consegue-se detectar interferência em uma variedade maior de cenários. O mecanismo aqui proposto utiliza os níveis de carga de tráfego e de ruído na seleção do canal e, além disso, a escolha do canal é realizada de maneira pró-ativa avaliando-se a qualidade presente em todos os canais no momento da escolha.

3. Interferência no 802.11

Existem algumas questões referentes à interferência nas redes 802.11 que precisam ser discutidas para o entendimento do algoritmo de seleção de canal proposto neste artigo. A interferência representa um problema nas redes 802.11, mas não da mesma forma que em outros sistemas de comunicação sem fio (como o sistema de telefonia celular). Essa diferença deve-se principalmente ao tipo de método de acesso ao meio que é utilizado.

Com o método de acesso CSMA/CA, para transmitir um quadro, uma estação 802.11 precisa detectar que o meio esteve livre por um período de tempo. Um quadro só pode ser transmitido quando o meio está livre, e transmissões simultâneas geram colisões. Assim, impede-se que seja gerada interferência entre estações que estão dentro do alcance umas das outras, pois se é possível detectar que alguma outra transmissão está em curso, deve-se esperar o término desta para se transmitir. Esta característica faz do CSMA/CA um protocolo robusto com relação à interferência em detrimento do tempo de acesso ao meio e da vazão alcançada.

Para as transmissões 802.11 existem três zonas de recepção com características diferenciadas [Xu et al. 2002]. Na zona de recepção, a transmissão de pacotes pode ser percebida e os mesmos podem ser decodificados. Na zona de detecção da portadora, os receptores não conseguem decodificar os pacotes, mas podem perceber que uma transmissão está em andamento devido ao nível de energia presente no meio. E na zona de

interferência, as transmissões não podem ser percebidas pelos receptores e são consideradas como interferência juntamente com o ruído.

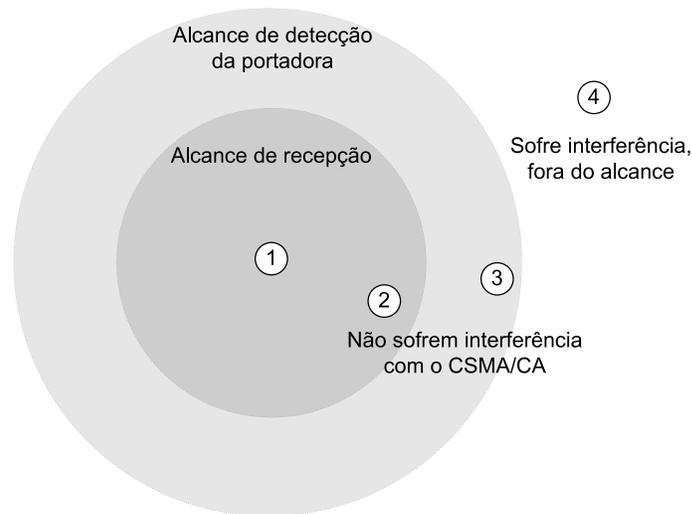


Figura 3. Ação do CSMA/CA impedindo a interferência.

Então no exemplo da Figura 3, quando a estação (1) transmite, a estação (2) e a estação (3) devem esperar o término desta transmissão para começar uma outra. Elas não sofrem interferência da estação (1), mas compartilham o acesso ao meio. Já no caso da estação (4) é diferente. Ela está fora do alcance de detecção das transmissões da estação (1), então ela não compartilha o acesso ao meio com a estação (1), ela sofre interferência gerada pelas transmissões da mesma. Este é o caso de interferência co-canal.

Como exemplificado, a decodificação do pacote 802.11 e a detecção da portadora (através do nível de energia presente no meio) impedem que outras estações 802.11 transmitam novos quadros antes que a primeira transmissão se finalize. A decodificação do quadro faz com que as outras estações obtenham informação sobre a duração da transmissão (um dos campos presentes no cabeçalho quadro 802.11). Assim elas configuram o seu NAV (*Network Allocation Vector*) com a duração obtida no quadro 802.11. O NAV é um contador que indica quando o meio estará livre para novas transmissões, funcionando como uma detecção virtual da portadora. A detecção da portadora física também impede que outras estações próximas interfiram em uma transmissão. Enquanto o meio não permanece livre (pela detecção da portadora virtual ou da portadora física) as outras estações não podem realizar transmissões.

Assim, o CSMA/CA impede que o uso do mesmo canal em redes adjacentes provoque interferências nas transmissões. Em contrapartida, ele aumenta a disputa pelo acesso ao meio, que passa a ser compartilhado entre as duas redes. O compartilhamento do acesso gera um grande impacto na vazão e na latência da comunicação em redes 802.11. Isto ocorre porque uma estação só tem a possibilidade de transmitir, quando nenhuma outra estiver transmitindo.

As características do método de acesso CSMA/CA citadas anteriormente impedem que outros mecanismos de alocação de canais já projetados, como por exemplo, os mecanismos para redes de telefonia celular, sejam utilizados no 802.11. Estes mecanismos lidam simplesmente com a interferência co-canal, porque se células adjacentes

utilizam o mesmo canal não ocorre um compartilhamento, as transmissões se interferem. Então o nível de ocupação do canal e o nível de interferência devem ser levados em consideração ao projetar-se a alocação de canais em redes 802.11 infra-estruturadas.

Na próxima seção será apresentado o novo padrão 802.11k. Que permite às redes 802.11 infra-estruturadas a obtenção direta dos dois parâmetros levantados neste capítulo como cruciais para a escolha do canal: o nível de ocupação do meio e o nível de interferência.

4. Padrão IEEE 802.11k [802.11k working group 2005]

A nova extensão k da norma 802.11 padroniza diversos tipos de informação sobre características do rádio 802.11 que podem ser medidas, bem como as mensagens utilizadas na troca das mesmas. Os principais objetivos da extensão 802.11k são:

- permitir que as estações realizem medições de parâmetros específicos do rádio 802.11;
- padronizar mensagens de requisição e de relatório com os resultados das medições;
- disponibilizar o acesso a estas informações para as camadas superiores da pilha de protocolos.

O desenvolvimento desta nova norma oferece ferramentas úteis para o monitoramento e gerenciamento dos nós da rede sem fio. Com isso, surgem novas possibilidades para o desenvolvimento de mecanismos e protocolos que utilizam estas informações para a sua operação.

4.1. Tipos de Relatório

Os oito tipos de relatório que são previstos pelo padrão IEEE 802.11k são os seguintes:

Relatório de carga no canal Obtém informação sobre a carga em um ou mais canais durante o período de medição. É um cálculo simples da porcentagem de tempo em que o canal foi considerado ocupado dividido pela duração total da medição. Para considerar o canal ocupado pode-se utilizar o NAV ou a detecção da portadora física.

Relatório de nível de ruído no canal Fornece os valores do nível de ruído em um ou mais canais nos períodos em que o meio foi detectado desocupado. O resultado da medição é fornecido na forma de um histograma.

Relatório de quantidade de *beacons* Obtém informação sobre a quantidade de *beacons* recebidos de cada AP em um ou mais canais durante o intervalo de medição.

Relatório de quantidade de quadros Obtém informação sobre a quantidade de quadros recebidos de cada estação presente em um ou mais canais durante o período de medição. Também informa a potência média de recepção dos quadros para cada fonte detectada.

Relatório de estações escondidas Realiza a detecção de estações escondidas informando o seu endereço MAC (*Medium Access Control*). Uma estação é considerada escondida quando o nó medidor recebe pacotes de dados destinados à mesma, mas não consegue receber as confirmações de recebimento (*ACKs - Acknowledgments*) que ela envia. A medição também informa a quantidade de vezes que esta situação ocorreu durante a medição.

Relatório de tempo de ocupação/liberação do canal Informa, por meio de um histograma, os valores dos intervalos de tempo durante os quais o meio permaneceu livre ou ocupado no período em que foi realizada a medição. A determinação de meio livre ou ocupado pode ser realizada pela verificação do NAV ou pela detecção da portadora física.

Relatório de estatísticas das estações Obtém informações sobre estatísticas que são armazenadas na base de dados de gerenciamento associada à camada MAC (*Management Information Base - MIB*).

Relatório de informação de posicionamento Obtém informações sobre o posicionamento geográfico das estações quando as mesmas possuem esta funcionalidade.

A medição dessas informações pode ser requisitada no canal de serviço, que é o mesmo canal onde o nó está operando, ou em canais diferentes. A medição de informações sobre o próprio canal de operação na maioria dos casos pode ser realizada passivamente, pela simples observação do meio e pelo armazenamento de estatísticas. O problema ocorre no caso em que as medições precisam ser realizadas em canais diferentes do canal de operação. Nestes casos é preciso que o nó encarregado da medição fique fora de operação durante o período em que a mesma é realizada, impossibilitado de receber ou enviar pacotes. Na norma 802.11k a recomendação é que as medições fora do canal de operação da rede sejam requisitadas por curtos períodos de tempo e com pouca frequência.

O impacto gerado pelo tempo de medição também pode ser reduzido com a requisição de medições concorrentes. Quase todas as medições podem ser realizadas de maneira simultânea pelo nó encarregado se assim for requisitado. Com isso, o tempo de medição diminui e a queda de desempenho originada pela mudança de canal é menor. Outro fator que também pode minimizar o problema em questão é o armazenamento (*buffering*) dos pacotes destinados àquela estação medidora durante o período de medição. Assim os quadros seriam armazenados nas estações transmissoras enquanto a estação de destino está medindo outros canais. Esta é uma funcionalidade já presente no mecanismo de economia de energia do 802.11.

4.2. Troca de mensagens

O padrão 802.11k define dois tipos básicos de mensagens, as mensagens de pedido e as mensagens de relatório. Estas mensagens podem ser enviadas de estação para estação (no caso de redes ad-hoc), ou entre estações e APs (no caso de redes infra-estruturadas). Além disso, as mensagens podem ser enviadas em *unicast*, *multicast* ou *broadcast*. A troca de mensagens no 802.11k pode ocorrer de duas formas: uma estação pode simplesmente responder às requisições de outras estações e APs 802.11 ou ela pode gerar relatórios periódicos de medições que realiza automaticamente. No primeiro caso, a estação só realiza medições quando solicitada. Já no segundo caso, as medições são configuradas na própria estação e não dependem de mensagens de pedido para serem realizadas.

Cada mensagem de pedido ou de relatório é uma mensagem de gerenciamento da subcamada MAC do padrão 802.11 que contém informação sobre os tipos de requisição ou resultado de medição. As mensagens podem conter informação de várias requisições ou relatórios de medições, permitindo a solicitação ou a notificação de vários tipos de informação simultaneamente. Cada medição é representada nas mensagens por um elemento e cada elemento contém informação sobre os parâmetros que devem ser utilizados

na medição (no caso de uma requisição) ou os resultados de uma medição específica (no caso de um relatório).

5. Seleção Dinâmica de Canal

Como discutido nas seções anteriores, os problemas ocasionados por uma escolha equivocada do canal de operação são o aumento da disputa pelo acesso ao meio e o aumento da interferência co-canal. O algoritmo que realizará a escolha do canal deve então levar em conta estas informações no processo de seleção. Para isto, o 802.11k será uma ferramenta fundamental alimentando o algoritmo de seleção presente nos APs com o nível de carga e o histograma do nível de ruído em cada canal.

Com os relatórios sobre o nível de carga e ruído experimentado nos vários canais, o algoritmo possuirá informação suficiente para tomar a decisão sobre qual canal é o mais indicado para o uso. Mas antes de explicar o funcionamento do algoritmo, alguns cuidados precisam ser tomados ao se obter as informações que serão usadas na seleção.

5.1. Obtenção das entradas do algoritmo de seleção

Para o seu funcionamento, o algoritmo de seleção de canal utiliza valores indicativos do nível de carga e do nível de ruído nos possíveis canais de operação. As mensagens de pedido e de relatório do padrão 802.11k são utilizadas na obtenção dessas informações. O AP envia periodicamente pedidos de medição de nível de ruído e de carga para estações sobre a sua gerência. Essas medições precisam ser feitas em todos os canais disponíveis para a utilização da rede. Uma mesma mensagem pode requisitar as duas informações (de carga e de ruído) e pode também requisitar que elas sejam obtidas paralelamente.

Não é desejável que as medidas sejam realizadas pelo AP, pois, como já foi explicado anteriormente em [Mishra et al. 2005], quando as medidas são realizadas pelas estações clientes consegue-se captar situações de interferência que não são percebidas pelo AP. Além disso, fazê-lo mudar de canal impediria o tráfego de todos os nós da rede simultaneamente.

A escolha da estação medidora é um fator importante e que pode afetar o desempenho do algoritmo de seleção. O processo de escolha pode ser feito de diversas maneiras podendo levar em consideração vários fatores. Abordagens simples para o problema podem ser, por exemplo, uma escolha aleatória ou a escolha da estação considerada pelo AP como mais ociosa ou com mais energia. Mas o problema não é tão simples. O uso de medições de apenas uma estação pode gerar uma queda no desempenho, pois quanto menor a quantidade de informação fornecida, mais limitada é a visão que o AP utiliza na seleção de canal. O uso de relatórios de apenas uma estação forneceria uma visão pontual do problema e ocasionaria uma escolha de canal que só satisfaria a mesma.

Então a proposta para o problema é realizar medições em todas as estações da rede criando uma visão global do problema. Com todas as estações medindo a carga e ruído nos canais, o resultado final passado para o algoritmo é o valor médio. O AP faz o pedido a cada estação em um instante de tempo aleatório dentro do intervalo entre rodadas do algoritmo. Assim, no momento em que o algoritmo vai realizar a seleção de canal, ele possui medições que compreendem a visão de todas as estações que ele gerencia. O AP então calcula a média com os vários relatórios de carga e ruído nos canais medidos e passa para o algoritmo.

Além da realização de medições em todas as estações apresentarem uma visão mais completa da rede, a carga adicional gerada só se torna significativa quando elas são muito longas e frequentes. Se os intervalos entre medições forem relativamente altos, as medições possuirão pouca influência no desempenho da rede.

No caso do mecanismo de seleção aqui proposto, a periodicidade da tarefa de medição é a mesma com que o algoritmo precisa ser executado para fazer a escolha do canal. Esta frequência não precisa ser muito alta, pode ser da ordem de alguns minutos, pois, intuitivamente em cenários típicos infra-estruturados, as mudanças na topologia não ocorrem com frequência. E o intervalo de tempo necessário para realizar medições não precisa ser muito alto. [Mishra et al. 2005], por exemplo, considera que as medições passivas para a descoberta das estações vizinhas na rede poderiam durar 150 ms. Valores nesta faixa podem ser considerados baixos em relação ao intervalo entre seleções de canal da ordem de minutos. Com isso, podemos considerar que as medições em todas as estações a cada rodada do algoritmo não vai gerar uma perda significativa de desempenho.

Uma vez obtidos, os resultados das medições nos diversos canais 802.11 servirão de entrada para o algoritmo de seleção do canal. A informação que o algoritmo precisa deve estar contida em dois vetores, um para o nível de carga e outro para o nível de ruído. Nos vetores, cada posição representa um dos canais e o seu conteúdo representa os valores médios das medidas de carga e ruído das várias estações. Para os resultados da medição de carga, a montagem de um vetor é a simples obtenção da média dos relatórios e a sua organização nas respectivas posições.

Já no caso do nível de ruído os resultados são fornecidos na forma de um histograma (Figura 4). Para a montagem do vetor, uma média dos valores de cada histograma pode ser calculada, como em (1). Fazendo assim o nível de ruído medido por cada estação fica expresso na forma de um valor único, o que facilitará o funcionamento do algoritmo de seleção que é apresentado na próxima parte desta seção.

a	b	c	d	e
1	2	3	4	5

Figura 4. Exemplo de histograma: as letras representam as ocorrências de cada faixa de valores. Os números representam os valores médios de cada faixa.

$$Media = \frac{1 \times a + 2 \times b + 3 \times c + 4 \times d + 5 \times e}{a + b + c + d + e} \quad (1)$$

5.2. Algoritmo de seleção

O algoritmo que seleciona o canal de operação utiliza as informações do nível de carga e do nível de ruído obtidas com o 802.11k. O algoritmo recebe de entrada dois vetores contendo os valores medidos sobre a carga de tráfego e os valores medidos do nível de ruído presentes em cada canal durante a medição. Na sua operação, o algoritmo leva em conta primeiramente os níveis de carga presentes nos vários canais, selecionando canais menos utilizados, o que amplia o reuso de frequências. Em segundo lugar, o algoritmo escolhe canais com menores níveis de ruído, buscando SNR maiores.

O algoritmo opera seguindo os três passos apresentados a seguir:

1. Na primeira etapa, verifica-se o nível de carga medido no canal de operação atual. Se a ocupação existente não ultrapassa um limiar α , mantém-se o mesmo canal de operação e finaliza-se a execução do algoritmo.
2. Na segunda etapa, são selecionados os N canais que apresentam os menores níveis de ocupação média, de acordo com a informação contida no vetor de carga.
3. Dos N canais selecionados na segunda etapa, o canal que apresenta o menor nível de ruído é escolhido como canal de operação.

O primeiro passo do algoritmo é necessário, pois se os nós medidores captam a presença de pouco tráfego originado por mensagens de controle de outra rede, mantém-se o canal atual na próxima janela finalizando a escolha.

Pode-se perceber que o simples uso do nível de carga no canal pode gerar instabilidades. A medição da carga gerada pelo próprio BSS pode conduzir a situações onde o canal de operação atual sempre possui muita carga. Por exemplo, em um cenário simples onde existe somente um BSS na região, a carga medida no canal de operação da mesma será sempre maior do que a carga presente nos outros canais que não estão sendo utilizados. Com isso podem ocorrer oscilações e uma condição de equilíbrio nunca será encontrada.

Para resolver o problema, a medição da carga no canal deve levar em conta apenas o tráfego gerado por estações de outras redes. Assim, o nó medidor pode simplesmente verificar antes de acrescentar a contribuição de um quadro, de qual rede ele foi gerado. Se o quadro for de um BSS diferente do BSS do nó medidor, ele é acrescentado no cálculo da carga, se não, ele é descartado.

6. Simulações

A verificação e avaliação do funcionamento do mecanismo de seleção de canal foram realizadas através de simulações com o ns-2¹, que é amplamente utilizado e conhecido no meio científico. A utilização deste simulador como ferramenta de avaliação do mecanismo proposto envolveu a implementação de características que não estão presentes na sua versão original.

Primeiramente, foram desenvolvidos mecanismos de medição dos valores de níveis de carga e de ruído presentes no canal de acordo com as especificações da norma 802.11k. Além disso, no caso do nível de ruído, todo o cálculo de interferência co-canal gerada pelas transmissões das outras estações da rede também precisou ser desenvolvido por não fazer parte do código original do ns-2.

Outra característica que não está presente no código original do ns-2 é a capacidade da mudança do canal de operação durante a simulação. Cada canal é um objeto instanciado pelo simulador aos quais as interfaces de rede de cada estação 802.11 se conectam no início da simulação. Para realizar a mudança, um nó 802.11 conectado a um canal, precisa ter a habilidade de desfazer a conexão existente entre sua interface de rede e o canal de origem para conectar-se novamente no canal de destino. Esta foi a habilidade incorporada ao código.

¹The Network Simulator (ns-2) - <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>

Além disso, todo o tráfego de roteamento *ad hoc* foi eliminado pela utilização de um módulo denominado NOAH². Este protocolo de roteamento implementado no simulador ns-2 não gera mensagens de descoberta de rota ou realiza o roteamento de pacotes, ele só permite a comunicação direta entre estações, sem a presença de múltiplos saltos, característica das redes infra-estruturadas.

A única característica não implementada no simulador foi a carga adicional gerada pelas medições de outros canais, que deveria fazer o nó perder a comunicação nos períodos em que está medindo os outros canais. Como explicado anteriormente, essas pausas pouco influenciarão no desempenho do nó por não serem muito frequentes e por possuírem uma relativa baixa duração. Na prática, o tempo utilizado para a medição dos canais pode ser da ordem de alguns ms e o intervalo entre essas medições seria da ordem de alguns minutos. Por exemplo, considerando um tempo de medição de 150 ms em cada canal (como já foi utilizado em [Mishra et al. 2005]), um intervalo entre medições de 120 segundos e que a medição no canal de operação não impede a comunicação, a porcentagem de tempo que um nó 802.11b (com a possibilidade de escolha de três canais) fica impedido de se comunicar é de apenas 0,25% do tempo total. Logo, esta perda gerada pelas medições pouco influencia no desempenho.

Como nas simulações a medição não representou um impacto no desempenho, o tráfego utilizado não era variável e o objetivo era validar o funcionamento do algoritmo proposto, realizamos as medições e as seleções de canal em intervalos de tempos menores do que os utilizados na prática, diminuindo os tempos de simulação. Esta consideração tornou mais prática e fácil a obtenção dos resultados.

Alguns parâmetros da rede e do algoritmo de seleção de canal se mantiveram fixos em todas as simulações realizadas. No caso da rede, todos os nós (APs ou clientes) foram configurados com um alcance de recepção máximo de 250 metros. Cada BSS foi constituído de um AP e três estações clientes, sendo que cada estação cliente gerava um tráfego TCP direcionado ao AP (*uplink*). A taxa de transmissão do meio físico foi fixada em 11 Mbps para quadros de dados e em 2 Mbps para os quadros de controle.

Já no caso do algoritmo de seleção, o limiar α utilizado em sua primeira etapa foi configurado em 10% de carga e o parâmetro N da segunda etapa foi fixado em dois canais para todas as simulações. O intervalo entre execuções do algoritmo de seleção de canal utilizado nas simulações era escolhido aleatoriamente entre 15 e 25 segundos a partir da última medição. As medições foram realizadas também com esta frequência e suas durações foram de 150 ms por canal medido. Assim, no intervalo de execução do algoritmo, cada estação gerava um relatório para o AP.

6.1. Cenário simples

O objetivo da primeira simulação é demonstrar o funcionamento básico do algoritmo de seleção em um cenário controlado e simples. Para isso, os BSSs foram posicionados de modo que todas as estações da rede (APs e clientes) estivessem dentro do alcance de recepção umas das outras e o canal 0 (zero) foi definido como o canal inicial³. Desta forma, o nível de ruído medido era sempre o ruído de fundo do canal (pois todos os nós

²NO Ad-Hoc Routing Agent (NOAH) - <http://icapeople.epfl.ch/widmer/uwb/ns-2/noah/>

³Na implementação do algoritmo de seleção os canais foram numerados de zero até $(n - 1)$, representando n canais de operação.

das redes estão dentro de seus alcances de recepção) e o único valor que permitiu a seleção do canal de operação foi o do nível de carga.

Foram realizadas simulações com três BSSs disputando o acesso a três canais de operação (simulando uma rede 802.11b ou 802.11g) e com oito BSSs disputando o acesso a oito canais (simulando uma rede 802.11a).

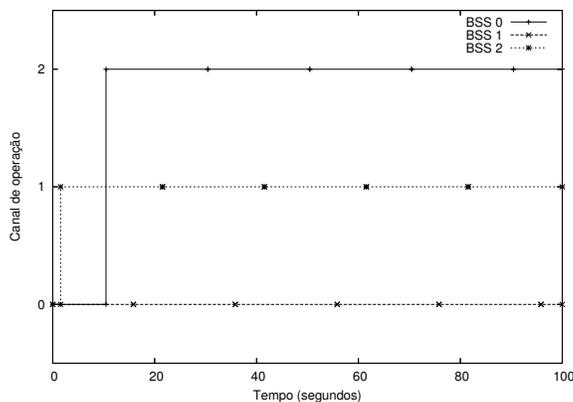


Figura 5. Evolução no tempo da mudança de canais para o caso de 3 BSSs e 3 canais.

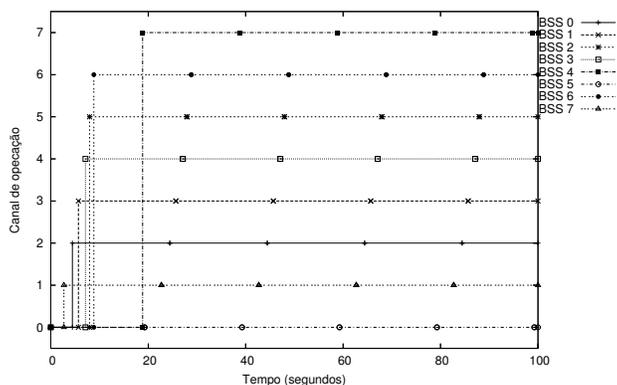


Figura 6. Evolução no tempo da mudança de canais para o caso de 8 BSSs e 8 canais.

As Figuras 5 e 6 apresentam o resultado da evolução da mudança de canais de acordo com o tempo da simulação. Pode-se perceber que, como existe um canal de operação para cada BSS, em ambas as simulações a perfeita alocação de canais pode ser realizada. Como todas as estações estão dentro do alcance umas das outras todos os APs migram para canais diferentes, pois ao constatar que outros canais estão com pouca ocupação o algoritmo decide pela troca para um canal mais ocioso. Em ambas as simulações apenas uma rodada completa do algoritmo em todos os APs foi necessária para atingir a convergência. O que já era esperado considerando-se a baixa complexidade do cenário avaliado.

6.2. Cenário aleatório

Nesta outra simulação, os BSSs foram posicionados aleatoriamente dentro de uma área quadrada de 2000 metros de lado. O canal inicial de operação dos BSSs foi escolhido

aleatoriamente. Variou-se então, a quantidade de BSSs para verificar os efeitos deste aumento com a seleção automática de canal e com a simples utilização da alocação aleatória de canais. Para cada configuração foram executadas 35 simulações. Desta forma foram criados cenários em que o posicionamento dos BSSs pode, ou não, gerar sobreposição de suas áreas de cobertura, permitindo em alguns casos o reuso de frequências. Este posicionamento gera situações que melhor se aproximam do cenário alvo do mecanismo proposto, em que os BSSs são posicionados de maneira independente e a alocação dos seus canais não segue uma coordenação.

A Figura 7 apresenta os resultados da vazão total agregada alcançada com um intervalo de confiança de 95%. A vazão total agregada representa o somatório das vazões médias de todos os tráfegos gerados em todas as redes. Este parâmetro fornece uma boa estimativa do nível de utilização dos canais e do reuso de frequências existente em uma região, quanto maior a vazão agregada, maior a reutilização de frequências iguais em locais diferentes.

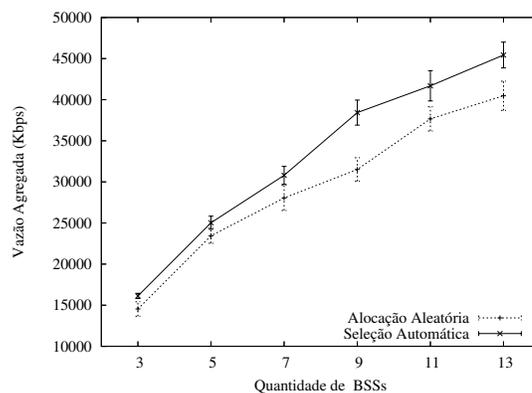


Figura 7. Vazão total agregada em função da quantidade de BSSs dentro da área quadrada de 2000 metros de lado.

Os resultados mostram que, com o aumento da quantidade de BSSs presentes na região, a vazão total agregada aumenta. Isto ocorre, pois a quantidade de fluxos de tráfego e o reuso de frequências aumentaram à medida que simulações com mais BSSs são realizadas. Pode-se perceber também que, na média, a seleção automática de canal atinge valores de vazão superiores aos atingidos com a simples alocação aleatória de canais. Isto se deve ao trabalho do algoritmo de seleção que procura uma melhor escolha de canais para cenários em que a alocação aleatória fracassa.

O uso da alocação aleatória de canais apresenta resultados próximos aos conseguidos com a seleção automática em cenários em que a quantidade de BSSs é muito baixa. Nestes casos, a área em que os BSSs são distribuídos acaba sendo muito grande em relação à sua quantidade. Logo, a probabilidade de que os BSSs não se interfiram e possam reutilizar o mesmo canal é maior, diminuindo a vantagem obtida pelo mecanismo de seleção automática.

A Figura 8 apresenta os resultados referentes ao número total de mudanças de canal realizadas em cada simulação por todos os BSSs com um intervalo de confiança de 95%. Pode-se perceber que a quantidade de mudanças aumenta com o aumento da

quantidade de BSSs na área de teste. Isto ocorre, pois com o aumento da quantidade de BSSs, ocorrerá também um aumento da quantidade de APs que podem mudar de canal. É importante destacar que o número total de trocas de canal não cresce muito para a quantidade de BSSs presentes na simulação. A Figura 9 mostra a quantidade média de trocas de canal para cada BSS. Neste caso pode-se confirmar que o número de trocas de canal em cada um fica, na média, abaixo de uma troca. Isso nos leva a concluir que, no máximo, uma troca de canal foi suficiente para que o mecanismo de seleção automática encontrasse o equilíbrio nos cenários avaliados.

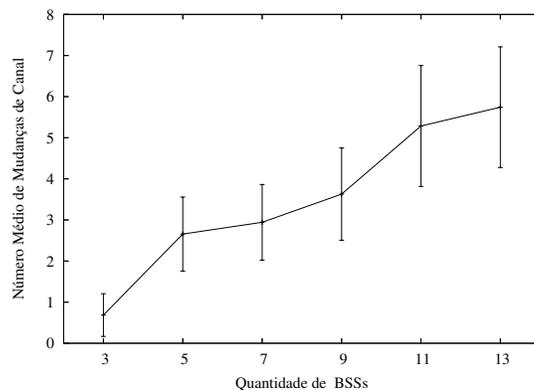


Figura 8. Quantidade média de mudanças de canal em função da quantidade de BSSs.

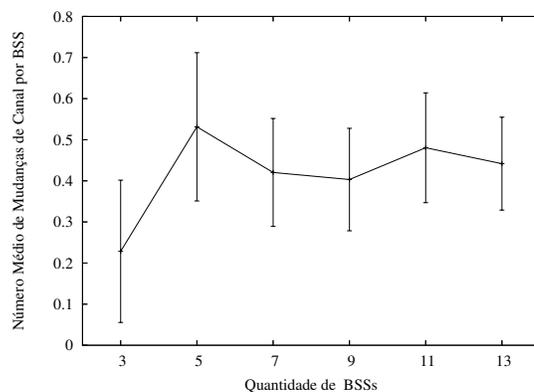


Figura 9. Quantidade média de mudanças de canal por BSS em função da quantidade de BSSs.

7. Conclusões

O problema da alocação de canais nas redes IEEE 802.11 é importante e pode gerar grandes impactos no desempenho. E este problema se agrava quando as redes não possuem uma administração única ou centralizada, cenário cada vez mais comum devido à popularização das redes 802.11 em aplicações domiciliares e em pequenas empresas. Então o desenvolvimento de mecanismos para a alocação de canais de maneira distribuída e independente sem a necessidade de comunicação com as outras redes da região, como foi proposto neste artigo, pode representar uma grande melhoria no desempenho destas redes.

Os resultados da verificação do mecanismo de seleção de canal proposto apresentam bons resultados para os cenários avaliados. Além disso, ele apresenta ganhos que variam de 10% a 15% quando comparamos a vazão total agregada de uma região com BSSs que utilizavam o mecanismo com o cenário em que a escolha era feita aleatoriamente. O mecanismo também apresentou bons resultados no que diz respeito à convergência na execução do algoritmo. Nos cenários avaliados nas simulações, o número médio de mudanças de canal em todos os APs se manteve abaixo de um, demonstrando que mesmo com o aumento da disputa pelos canais em uma mesma região, o número de mudanças de canal necessário para se atingir o equilíbrio foi baixo.

Em trabalhos futuros pretende-se avaliar outras técnicas de medição dos canais diferentes do simples cálculo da média dos valores obtidos. Também será interessante avaliar a variação do tempo de medição do canal e do possível compromisso existente entre este tempo, a perda de desempenho da comunicação (gerada pelo aumento do tempo de medição) e os possíveis ganhos no desempenho do algoritmo de seleção de canal proposto.

Referências

- 802.11a working group (1999). Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications: High-speed physical layer in the 5 ghz band. IEEE Standard.
- 802.11b working group (1999). Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications: Higher-speed physical layer extension in the 2.4 ghz band. IEEE Standard.
- 802.11g working group (2003). Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications: Further higher data rate extension in the 2.4 ghz band. IEEE Standard.
- 802.11k working group (2005). Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications: Radio resource measurement. IEEE Draft Standard.
- Hills, A. and Schlegel, J. (2004). Rollabout: a wireless design tool. *IEEE Communications Magazine*, 42.
- Leung, K. and Kim, B.-J. (2003). Frequency assignment for ieee 802.11 wireless networks. In *IEEE Vehicular Technology Conference*.
- Mahonen, P., Riihijarvi, J., and Petrova, M. (2004). Automatic channel allocation for small wireless local area networks using graph colouring algorithm approach. In *IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*.
- Mishra, A., Banerjee, S., and Arbaugh, W. (2005). Weighted coloring based channel assignment for WLANs. In *Mobile Computing and Communications Review*.
- Xu, K., Gerla, M., and Bae, S. (2002). How effective is the IEEE 802.11 RTS/CTS handshake in ad hoc networks? In *IEEE Global Telecommunications Conference*.