

ALOCAÇÃO DE CANAL EM REDES SEM FIO IEEE 802.11 INDEPENDENTES

Marcel William Rocha da Silva

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

Aprovada por:

Prof. José Ferreira de Rezende, Dr.

Prof. Fabio Kon, Ph.D.

Prof. Luís Henrique Maciel Kosmalski Costa, Dr.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

DEZEMBRO DE 2006

SILVA, MARCEL WILLIAM ROCHA DA

Alocação de Canal em Redes Sem Fio
IEEE 802.11 Independentes [Rio de Janeiro]
2006

XII, 71 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc.,
Engenharia Elétrica, 2006)

Dissertação - Universidade Federal do Rio
de Janeiro, COPPE

1. Redes Sem Fio
2. Alocação de Canal

I. COPPE/UFRJ II. Título (série)

Aos meus pais, Marcos e Sonia.

Agradecimentos

Inicialmente, agradeço a Deus, que me deu saúde, física e mental, para investir nesse desafio.

Aos meus pais e avós, que sempre me incentivaram e criaram condições para alcançar meus objetivos e também força nos momentos mais difíceis.

A você Gabi, porque não sei o que seria de mim nessa reta final sem a sua ajuda, apoio e compreensão. Obrigado por tudo.

Ao Prof. José Ferreira de Rezende, pelo apoio e auxílio no desenvolvimento do trabalho e pela confiança na minha capacidade.

Aos amigos do mestrado, Fabiana, Henrique, Laila, Rodrigo e Kleber, pelas inúmeras discussões enriquecedoras sobre alguns assuntos técnicos e outros nem tanto!

Aos outros colegas e professores do GTA, que foram sempre prestativos em todas as situações.

E, por fim, a todos os meus outros familiares, amigos e conhecidos, que, nem que por apenas uma única vez, tenham me perguntado: - *E aí? Como vai o mestrado? :-)*

Obrigado a todos vocês mais uma vez, estão todos no meu coração!

Marcel

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

ALOCAÇÃO DE CANAL EM REDES SEM FIO IEEE 802.11 INDEPENDENTES

Marcel William Rocha da Silva

Dezembro/2006

Orientador: José Ferreira de Rezende

Programa: Engenharia Elétrica

O aumento expressivo do uso das redes IEEE 802.11 faz com que em determinadas regiões, principalmente em ambientes domiciliares e corporativos, existam redes gerenciadas por administradores distintos com uma grande parcela de sobreposição de cobertura. Nestes cenários não existe uma entidade central com autoridade para a realização de uma alocação de canal satisfatória que minimize as eventuais perdas de desempenho ocasionadas pelo compartilhamento do canal e pelas interferências co-canal. Neste trabalho, as dificuldades geradas na aplicação das técnicas usuais de alocação de canal em redes IEEE 802.11 independentes, sem administração centralizada, são abordadas. Além disso, são propostos e avaliados, através de simulações, novos mecanismos de seleção de canal que operam de maneira distribuída e dinâmica nestes cenários.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

CHANNEL ALLOCATION IN INDEPENDENT IEEE 802.11 NETWORKS

Marcel William Rocha da Silva

December/2006

Advisor: José Ferreira de Rezende

Department: Electrical Engineering

The increasing use of IEEE 802.11 networks at home and enterprise environments, and so managed by distinct owners, leads to situations where a great amount of overlapping in the coverage areas occur. These scenarios lack a unique authority to perform an adequate channel allocation that minimizes the performance degradation created by medium access sharing and co-channel interference. This work focuses on the restrictions imposed in the channel allocation techniques by scenarios with independent IEEE 802.11 networks. Also, this work proposes and evaluates new channel allocation mechanisms that operate in a distributed and dynamic way on these scenarios.

Sumário

Resumo	v
Abstract	vi
Lista de figuras	ix
Lista de tabelas	xi
Lista de Acrônimos	xii
1 Introdução	1
1.1 Motivação	1
1.2 Objetivos	5
1.3 Organização da Dissertação	7
2 Alocação de Canal em Redes 802.11	8
2.1 Redes IEEE 802.11	8
2.1.1 Modos de Operação e Canais Disponíveis	9
2.1.2 Interferência	14
2.2 Alocação de Canal	18

2.2.1	Mecanismos Centralizados	22
2.2.2	Mecanismos Independentes	27
3	Seleção Dinâmica de Canal	33
3.1	IEEE 802.11k	34
3.2	Mecanismo de Seleção Dinâmica de Canal (SDC)	37
3.3	Mecanismo de Seleção Dinâmica de Canal Disparada (SDCD)	45
3.4	Implementação no NS-2	47
4	Resultados e Discussões	49
4.1	Ambiente de Simulações e Metodologia	50
4.2	Avaliação do Parâmetro n	54
4.3	Comparação dos Mecanismos de Seleção de Canal com Tráfego FTP	58
4.4	Comparação dos Mecanismos de Seleção de Canal com Tráfego HTTP	61
4.5	Comparação dos Mecanismos de Seleção de Canal com Tráfego HTTP+FTP	62
4.6	Resumo dos Resultados	64
5	Conclusões e Trabalhos Futuros	65
5.1	Conclusões	66
5.2	Trabalhos Futuros	67
	Referências Bibliográficas	69

Lista de Figuras

1.1	Mapa das redes detectadas no sul de Manhattan [3].	3
2.1	Exemplos de redes ad hoc.	10
2.2	Exemplo de rede IEEE 802.11 infra-estruturada.	11
2.3	Canais 802.11 na banda de frequências ISM.	12
2.4	Funcionamento do CSMA/CA.	15
2.5	Cenários de interferência.	17
2.6	Avaliação do desempenho de alocações de canal simples em redes independentes.	21
2.7	Exemplo de grafo representativo da interferência entre BSSs.	23
2.8	Resultados do <i>benchmark</i> aplicado em redes independentes.	26
2.9	Cenário onde a alocação de canal estática causa injustiça.	31
3.1	Diagrama esquemático do mecanismo de seleção dinâmica de canal (SDC).	38
3.2	Exemplo de histograma.	39
3.3	Linha do tempo do processo de medição dos canais disponíveis.	41
3.4	Linha do tempo da operação do SDCD.	46
4.1	Vazão Agregada Normalizada variando-se n	55

4.2	Índice de justiça entre as vazões médias dos BSSs variando-se n	57
4.3	Número total de mudanças de canal variando-se n	58
4.4	Vazão agregada normalizada para os diferentes mecanismos de alocação de canal com tráfego FTP.	59
4.5	Índice de justiça entre as vazões médias dos BSSs para os diferentes mecanismos de alocação de canal com tráfego FTP.	60
4.6	Número de mudanças de canal para os diferentes mecanismos de alocação de canal com tráfego FTP.	61
4.7	Vazão agregada normalizada para os diferentes mecanismos de alocação de canal com tráfego HTTP.	63
4.8	Índice de justiça entre as vazões médias dos BSSs para os diferentes mecanismos de alocação de canal com tráfego HTTP.	63

Lista de Tabelas

2.1	Canais disponibilizados pelo padrão IEEE 802.11.	13
2.2	Valores para os índices de sobreposição obtidos através de medições para uma transmissão realizada no canal 6.	29
2.3	Seqüência de mudanças ideal para garantir justiça.	31
3.1	Tempo gasto em uma mudança de canal para diferentes <i>chipsets</i> 802.11.	44
4.1	Parâmetros de simulação.	51
4.2	Parametrização do tráfego http.	53

Lista de Acrônimos

ACK :	<i>Acknowledgment;</i>
AP :	<i>Access Point;</i>
BSS :	<i>Basic Service Set;</i>
CSMA/CA :	<i>Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance;</i>
DIFS :	<i>Distributed Inter-Frame Space;</i>
ESS :	<i>Extended Service Set;</i>
FTP :	<i>File Transfer Protocol;</i>
GPS :	<i>Global Positioning System;</i>
HTTP :	<i>HyperText Transfer Protocol;</i>
IAPP :	<i>Inter-Access Point Protocol;</i>
IEEE :	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers;</i>
ISM :	<i>Industry, Scientific and Medical band;</i>
LCCS :	<i>Least Congested Channel Search;</i>
MAC :	<i>Medium Access Control;</i>
MIB :	<i>Management Information Base;</i>
NAV :	<i>Network Allocation Vector;</i>
NOAH :	<i>NO Ad Hoc routing protocol;</i>
PDA :	<i>Personal Digital Assistant;</i>
SDC :	<i>Seleção Dinâmica de Canal;</i>
SDCD :	<i>Seleção Dinâmica de Canal Disparada;</i>
SINR :	<i>Signal to Interference plus Noise Ratio;</i>
TCP :	<i>Transmission Control Protocol;</i>
U-NII :	<i>Unlicensed Nature Information Infrastructure.</i>

Capítulo 1

Introdução

1.1 Motivação

Atualmente, as redes sem fio do padrão IEEE 802.11 já podem ser consideradas um grande sucesso, apresentando uma ampla expansão de mercado. Redes deste padrão já estão presentes na maioria dos dispositivos móveis existentes, desde computadores portáteis (*Laptops*) até assistentes pessoais digitais (*Personal Digital Assistants* - PDAs) e seu crescimento se deve à diminuição do custo dos dispositivos 802.11 e à sua relativa simplicidade de instalação e uso. De acordo com [1], o número de pontos de acesso (*Access Points* - APs) comercializados durante o terceiro trimestre do ano de 2004 foi de 4,5 milhões, e estima-se que a venda de equipamentos deva triplicar até 2009. Estes fatores fazem com que cada vez mais usuários adotem as redes 802.11 como solução para o provimento de conectividade nas mais diversas situações, empregando-as tanto em aplicações domiciliares quanto em aplicações corporativas. Entretanto, a popularização das redes 802.11 faz surgir problemas até então inexistentes, principalmente nos chamados cenários de redes independentes.

Existem dois tipos de cenários de aplicação para as redes 802.11. No cenário mais estudado até então, os APs são instalados com o objetivo de cobrir de maneira eficiente uma determinada região como, por exemplo: os escritórios de uma empresa, as dependências de uma fábrica, o *campus* de uma universidade, estabelecimentos comerciais, redes

públicas ao ar livre, etc. Neste caso, uma única entidade administrativa é responsável pela instalação e gerenciamento de todos os APs necessários à cobertura completa da região na forma de um conjunto de células (*Basic Service Sets* - BSSs), compondo uma ESS (*Extended Service Set*). Logo, nestes cenários de administração centralizada, o posicionamento, a configuração e o gerenciamento dos APs podem ser otimizados pela entidade responsável pelos mesmos, visando melhorar o desempenho de cada uma das células e da rede como um todo.

Um outro tipo de cenário que se torna cada vez mais comum devido à popularização das redes 802.11 é o cenário formado por redes independentes. Também denominados caóticos [1] ou não-coordenados [2], os cenários com redes independentes ocorrem principalmente em grandes centros urbanos, onde redes 802.11, geralmente com apenas um AP e alguns poucos clientes, são utilizadas em aplicações domiciliares ou de pequenas empresas. Nestes casos, em uma determinada região podem existir diversas redes distintas, onde cada uma delas é formada por um único AP, ou por um pequeno conjunto de APs, e onde sua característica mais importante é a de que cada rede possui uma administração independente das demais. Além disso, muitas das vezes, essas redes independentes são administradas pelo próprio usuário final, que adquire um AP buscando prover conectividade de maneira prática para seus *laptops*, ou até mesmo para seus *desktops*, sem a necessidade de investimentos em infra-estrutura de cabeamento. Devido a esses fatores, os administradores de redes independentes nem sempre possuem autoridade ou competência técnica para minimizar, ou até mesmo avaliar, o impacto do funcionamento de sua rede sobre as outras redes presentes na região.

Para ilustrar um cenário de redes independentes, a Figura 1.1 apresenta um mapa com as diversas redes detectadas através de técnicas de *wardriving* no sul de Manhattan [3]. A técnica de *wardriving*, ainda pouco explorada no Brasil, consiste na utilização em veículos automotivos e de computadores dos mais variados tipos (*laptops*, *palmtops* e até mesmo celulares) equipados com interfaces de rede IEEE 802.11, GPS (*Global Positioning System*) e um software capaz de efetuar uma varredura nos canais utilizados pelas redes 802.11. Ao se movimentarem durante a varredura, tais equipamentos coletam um certo número de informações sobre as redes encontradas e a posição geográfica do equipamento em deslocamento. De posse dessas informações, torna-se possível descobrir os



Figura 1.1: Mapa das redes detectadas no sul de Manhattan [3].

APs presentes em uma região e seus canais de operação. Além disso, também é possível inferir, com alguma imprecisão, o posicionamento destes APs.

De acordo com a Figura 1.1, pode-se perceber o grande número de redes existentes e a proximidade das mesmas. Estas características fazem com que, eventualmente, as redes sofram problemas de interferência devido à sobreposição de suas áreas de cobertura ou devido à interferência co-canal. Estes problemas podem causar uma má utilização dos recursos do meio de comunicação gerando uma diminuição no desempenho das redes independentes coexistentes. Além disso, nos cenários independentes, a interferência torna-se um problema ainda maior. Isto ocorre porque, como cada rede possui um administrador único, não existe uma coordenação na alocação de canais em APs da mesma região ou um planejamento do posicionamento dos APs que utilizam o mesmo canal.

Os problemas de interferência começam a surgir quando duas ou mais redes de uma

determinada região utilizam o mesmo canal, ou canais parcialmente sobrepostos, para as suas transmissões. O número de canais disponíveis para a alocação nas redes 802.11 é uma das grandes limitações existentes. Nas redes 802.11 mais populares, as dos padrões b [4] e g [5], existem apenas três canais que não apresentam sobreposição espectral, ou seja, não interferentes. Esta escassez de canais limita o número de redes que podem coexistir sem a geração de interferência mútua. Por isso, é importante o emprego de técnicas de alocação de canal que busquem minimizar os efeitos nocivos gerados pelo aumento da interferência com o menor número possível de canais.

Usualmente, as técnicas de alocação de canal pressupõem a existência de uma administração centralizada que controle todas as células existentes em uma determinada região. Neste caso, o administrador seria capaz de gerenciar o posicionamento dos APs e a sua atribuição de canais de maneira a minimizar a interferência mútua na região. Entretanto, no caso das redes 802.11 independentes existem restrições que dificultam o emprego das técnicas de alocação de canal utilizadas em redes de administração centralizada [2, 6, 7]. Essas técnicas normalmente se baseiam no controle da associação de clientes aos APs, na atribuição coordenada de canais ou no reposicionamento de APs.

No caso das redes independentes não se pode prever que exista nenhum tipo de controle sobre a associação de clientes aos APs ou sobre o posicionamento dos APs. Nestes cenários, a alocação de canal deve ser feita de maneira distribuída, sem a necessidade de intervenção de uma entidade central ou comunicação entre redes de diferentes proprietários, devendo-se utilizar apenas informações que podem ser obtidas localmente na rede para a alocação de canal.

Na literatura já existem diversos mecanismos e técnicas de alocação de canal visando os cenários de administração centralizada [8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18]. Na maioria dos casos, o problema da alocação de canal é modelado como um problema de coloração de grafos, e o que difere um mecanismo de alocação do outro são as restrições impostas ao modelo desenvolvido e as funções objetivo que se deseja minimizar. Tal problemática será abordada com maiores detalhes na seção 2.2.1.

Já no caso das redes independentes, apenas alguns poucos trabalhos abordaram o problema da alocação de canal [2, 6, 7, 19]. Pode-se perceber então que o estudo dos proble-

mas existentes em redes 802.11 independentes, como o problema da alocação de canal, ainda foi pouco explorado. Logo, existe ainda uma demanda por novas técnicas e mecanismos de alocação de canal que operem localmente em redes independentes buscando melhorar a utilização dos recursos oferecidos pelos canais 802.11.

Visando o problema da alocação de canal em redes 802.11 independentes, este trabalho propõe novos mecanismos para a realização da seleção automática do canal de operação para redes independentes. Estes mecanismos atendem as restrições impostas por este tipo de cenário e realizam uma atribuição dinâmica de canal aos APs, fazendo com que a alocação de canal seja adaptável às mudanças de topologia, à entrada de novos APs e às variações de carga de tráfego. Para o seu funcionamento, o mecanismo em questão utiliza informações obtidas através de medições padronizadas pela norma IEEE 802.11k. Esta extensão da norma 802.11 tem como objetivo padronizar mensagens para a troca de informações entre dispositivos 802.11 fornecendo ferramentas para o desenvolvimento de novas técnicas e funcionalidades.

1.2 Objetivos

O objetivo deste trabalho é estudar e desenvolver mecanismos distribuídos e dinâmicos que realizem uma alocação de canal satisfatória, em termos de desempenho agregado e justiça, para cenários com redes IEEE 802.11 independentes. Estas novas propostas precisam atender às restrições impostas pelo tipo de cenário em que se aplicam e não podem se valer das técnicas usuais dos mecanismos centralizados de alocação de canal, como: o uso de informações globais da rede, a troca de mensagens entre pontos de acesso de redes de diferentes proprietários, o reposicionamento dos APs ou o planejamento da associação dos clientes.

Além da proposta de novos mecanismos, este trabalho também apresenta uma avaliação do desempenho das propostas apresentadas em face à outras já existentes na literatura. As avaliações realizadas foram desenvolvidas com o auxílio da ferramenta de simulação de redes ns-2 [20].

As principais contribuições deste trabalho são:

- O estudo dos problemas e restrições para a alocação de canal em cenários com redes IEEE 802.11 independentes;

Os cenários com redes IEEE 802.11 independentes apresentam inúmeros problemas que prejudicam o desempenho dessas redes e geram restrições à aplicação de técnicas de alocação de canal usuais. Os problemas existentes neste tipo de cenário ainda são muito pouco abordados na literatura. Este trabalho realiza um estudo sobre os impactos gerados pela falta de coordenação na alocação de canal nos cenários com redes independentes, avaliando como este problema pode gerar perdas de desempenho nas redes envolvidas.

- A proposta de novos mecanismos de alocação de canal destinados a cenários com redes IEEE 802.11 independentes;

Tendo em vista a ampla utilização das redes IEEE 802.11 em aplicações domiciliares e em pequenas empresas, os cenários com pequenas redes independentes estão se tornando cada vez mais comuns. Nestes cenários, o desempenho das suas redes pode ser prejudicado devido à falta de coordenação na alocação de canal realizada pelos administradores independentes. Logo, a proposta de novos mecanismos de alocação de canal distribuídos e dinâmicos fornece novas ferramentas para a melhoria do desempenho dessas redes.

- Uma avaliação do mecanismo proposto e comparação de desempenho com outras propostas.

Através de simulações, o desempenho das propostas foi avaliado e comparado com o de outros mecanismos existentes na literatura. Esta avaliação tem como objetivo demonstrar os ganhos que podem ser obtidos com o emprego de mecanismos de alocação de canal distribuída e dinâmica e comprovar a sua eficiência em relação a outras propostas já existentes.

1.3 Organização da Dissertação

O capítulo 1 ressalta a relevância do estudo do tema em questão, apresentando a motivação e os objetivos pretendidos com o trabalho. O capítulo 2 apresenta um estudo a respeito dos problemas da alocação de canal em redes 802.11, destacando as características mais importantes dessas redes e as propostas existentes na literatura para o problema da alocação de canal. Já o capítulo 3 relata o processo de desenvolvimento das propostas de mecanismos de atribuição distribuída e dinâmica de canal para redes independentes. Ainda neste capítulo, descrevemos o novo padrão IEEE 802.11k utilizado e também as modificações realizadas no simulador para a avaliação das propostas. O capítulo 4 apresenta e discute os resultados das simulações de avaliação do desempenho dos mecanismos propostos. E, por fim, o capítulo 5 traz as conclusões obtidas e os trabalhos futuros.

Capítulo 2

Alocação de Canal em Redes 802.11

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os problemas que podem surgir nas redes IEEE 802.11 a partir de uma alocação de canal equivocada. Para discutir o problema da alocação de canal nessas redes, inicialmente serão apresentadas algumas características de sua operação que servirão de base para o entendimento do problema. Em seguida, a interferência em redes 802.11 infra-estruturadas será abordada, através do estudo de seus diferentes tipos e casos. Já a parte final do capítulo discute a importância do uso de técnicas de alocação de canal nas redes 802.11, apresentando as propostas existentes na literatura, com um destaque especial para as soluções aplicáveis aos cenários de redes 802.11 independentes.

2.1 Redes IEEE 802.11

Antes de iniciar o estudo dos problemas gerados pela falta de coordenação na alocação de canal em redes IEEE 802.11, é necessária uma pequena introdução a respeito dessas redes. As próximas subseções apresentam algumas das características relevantes das redes 802.11, bem como suas limitações e problemas de funcionamento.

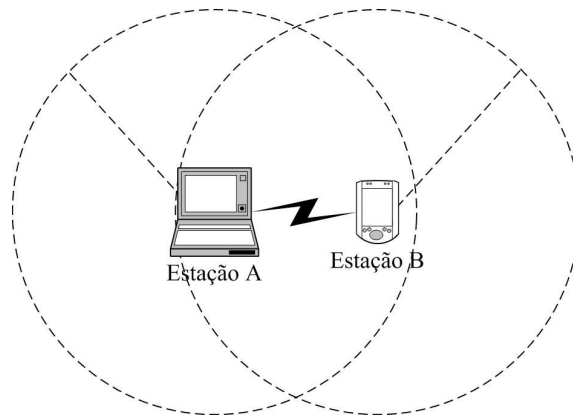
2.1.1 Modos de Operação e Canais Disponíveis

As redes do padrão IEEE 802.11 possuem basicamente dois modos de operação: ad hoc e infra-estruturado. Nas redes 802.11 operando no modo ad hoc, toda a comunicação dentro da rede é realizada de maneira direta. Portanto, se a estação A deseja se comunicar com a estação B, ela envia os seus quadros diretamente ao destino B (Figura 2.1(a)). Se a estação B estiver dentro do alcance de transmissão da estação A, ela receberá diretamente os quadros a ela enviados. Caso contrário, os quadros destinados à estação B precisarão ser encaminhados por estações intermediárias (Figura 2.1(b)). Este tipo de comunicação também é denominado comunicação de múltiplos saltos (*multi-hop communication*).

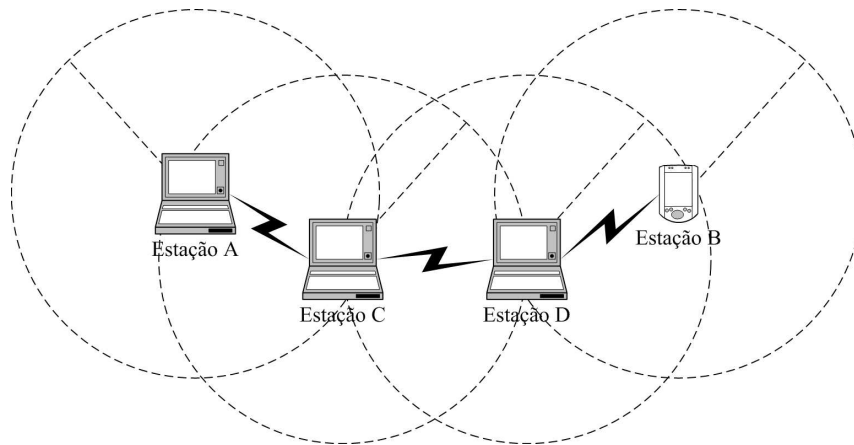
A tarefa de encaminhamento dos quadros não é definida pela norma 802.11, devendo ser realizada pelas camadas superiores através de mecanismos de roteamento. Para a construção das rotas, são utilizados protocolos de roteamento especialmente projetados para redes ad hoc. Existem diferentes tipos de protocolo de roteamento para redes ad hoc, mas não existe uma norma definindo qual deles é o padrão. Logo, o uso prático destas redes ainda é limitado e muito dependente do conhecimento técnico de seus usuários para a configuração correta de suas estações.

Já no caso das redes 802.11 infra-estruturadas, toda a comunicação entre estações móveis, ou entre estações móveis e estações na rede cabeada, é coordenada por um nó central denominado ponto de acesso (*Access Point* - AP). O AP é responsável por encaminhar os quadros de suas estações clientes para os destinos internos e externos à rede 802.11. A Figura 2.2 apresenta um exemplo de rede sem fio 802.11 operando no modo infra-estruturado. Neste exemplo, se a estação A deseja se comunicar com a estação B, primeiro ela envia os quadros para o AP, que encaminha os mesmos para a estação B. Neste modo de operação, as redes 802.11 formam células, que também são denominadas BSSs (*Basic Service Sets*), e cada uma delas opera de maneira independente em um canal fixo e único. Além disso, não existe comunicação de múltiplos saltos como no modo ad hoc, dentro de um BSS toda a comunicação é realizada de/para o AP.

O modo de operação infra-estruturado é o mais difundido e utilizado em aplicações de redes 802.11 por requerer menor esforço e conhecimento técnico por parte dos usuá-



(a) Comunicação ad hoc direta.



(b) Comunicação ad hoc múltiplos saltos.

Figura 2.1: Exemplos de redes ad hoc.

rios para a sua utilização. Grande parte do trabalho de configuração de uma rede infra-estruturada está no AP; aos clientes cabe apenas se associar ao mesmo. Além disso, este modo de operação atende à aplicação mais comum para os usuários deste tipo de rede, que é servir de ponte ou *gateway* de acesso a redes externas, como a Internet. Esta adequação às necessidades básicas dos usuários da Internet e a sua simplicidade de uso auxiliam no sucesso das redes IEEE 802.11 no modo infra-estruturado e fazem com que elas sejam cada vez mais utilizadas em centros comerciais, residências, grandes empresas, escritórios, etc.

Entretanto, apesar de sua relativa simplicidade de operação e utilização, existem algumas configurações das redes IEEE 802.11 que necessitam de algum cuidado, pois podem causar sérios impactos no seu desempenho. Este é o caso da atribuição do canal de ope-

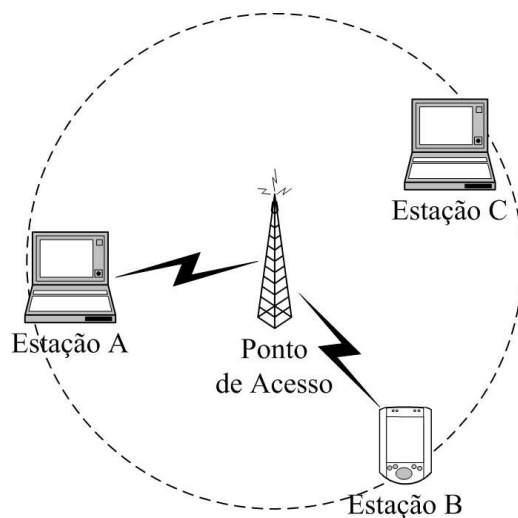


Figura 2.2: Exemplo de rede IEEE 802.11 infra-estruturada.

ração, que determina a faixa de frequência a ser utilizada para as transmissões em cada BSS. De acordo com o padrão IEEE 802.11, o canal utilizado pelos dispositivos de uma mesma rede é fixo e único. A norma 802.11 possui três extensões que definem que faixas de frequência podem ser utilizadas e que diferentes tipos de esquema de modulação e codificação podem ser empregados.

As extensões b [4] e g [5] da norma 802.11 coordenam a operação desses dispositivos na faixa de frequências ISM (*Industry, Scientific and Medical Band*) de 2,4 GHz, fornecendo taxas de transmissão de até 11 Mbps no caso do 802.11b e 54 Mbps no caso do 802.11g. Esta banda de frequência é conhecida como não licenciada, ou seja, nela não é necessário que os dispositivos possuam uma licença para a operação. Eles devem apenas atender a algumas restrições de largura de banda e potência de transmissão [21]. Além disso, esta faixa de frequências não é exclusiva das redes 802.11, podendo ser compartilhada com vários outros tipos de equipamentos: rádios comunicadores, telefones sem fio, redes *Bluetooth*, fornos de microondas, etc. Estes outros dispositivos também utilizam a banda ISM para a sua operação e dessa maneira podem causar interferência nas redes 802.11 b e g.

Na banda de frequência ISM, as normas 802.11 b e g definem 11 canais de operação com uma largura de banda de 20 MHz e uma separação entre suas frequências centrais de 5 MHz. A Figura 2.3 apresenta um esquema com os 11 canais definidos pelas normas

802.11 b e g na banda ISM. Pode-se perceber mais facilmente pela figura que os canais adjacentes apresentam certo nível de sobreposição espectral. Logo, como os canais não são completamente isolados no espectro de frequência, redes 802.11 que utilizem canais com algum nível de sobreposição podem sofrer problemas de interferência. Apenas três canais, os canais 1, 6 e 11, não apresentam sobreposição e podem ser utilizados ao mesmo tempo por redes distintas de uma determinada região sem que ocorram fenômenos de interferência.

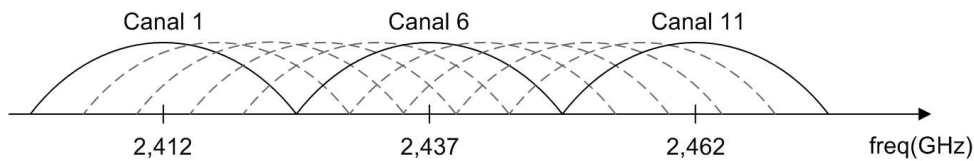


Figura 2.3: Canais 802.11 na banda de frequências ISM.

O problema da sobreposição espectral gera uma grande restrição para as técnicas de alocação de canal nas redes 802.11, uma vez que existe um número muito limitado de canais não interferentes disponíveis para o uso. Esta escassez de canais disponíveis limita o número de redes que podem coexistir na mesma região sem a geração de interferência mútua.

As redes da outra extensão da norma IEEE 802.11, a extensão 802.11a [22], também utilizam faixas de frequência não licenciadas para a sua operação. Neste caso, é utilizada a faixa de 5 GHz conhecida como banda U-NII (*Unlicensed National Information Infrastructure*) e esquemas de modulação que permitem taxas de transmissão de até 54 Mbps. O 802.11a disponibiliza nesta banda 12 canais distintos de operação, sendo que os canais não apresentam sobreposição espectral e podem ser utilizados sem a presença de interferência entre canais adjacentes. Estes canais são subdivididos em canais de banda baixa, média e alta. Os canais de banda baixa e média utilizam as frequências mais baixas da banda U-NII e com isso fornecem um maior alcance de transmissão, sendo indicadas para o uso em aplicações internas (*indoor*). Já os canais de banda alta utilizam as faixas de frequência mais altas da banda U-NII e são mais indicados para o uso em aplicações 802.11 externas (*outdoor*).

Apesar de oferecer mais canais não sobrepostos para o uso, os dispositivos que se-

guem a norma 802.11a não conseguiram ganhar muito destaque de mercado. Isto ocorreu pelo fato de não serem compatíveis com os dispositivos 802.11b que já eram numerosos no mercado e também com o surgimento do padrão 802.11g que fornecia as mesmas taxas de transmissão e era compatível com o padrão 802.11b. Além disso, as redes do padrão 802.11a utilizam frequências de operação elevadas, o que torna os dispositivos mais custosos e os alcances de transmissão dos rádios menores.

A Tabela 2.1 apresenta os diversos canais utilizados pelas diferentes normas 802.11 com os valores das suas frequências centrais de operação. Vale lembrar que estes valores seguem as normas da FCC definidas para a operação nos Estados Unidos, que acabam sendo seguidas na maior parte do mundo, apenas com algumas diferenças no número de canais disponíveis. No Japão, por exemplo, são disponibilizados 14 canais na banda ISM, três canais a mais dos que são permitidos nos Estados Unidos [12].

802.11a			802.11b e 802.11g	
Banda	Canal	Frequência (GHz)	Canal	Frequência (GHz)
Baixa	36	5180	1	2412
	40	5200	2	2417
	44	5220	3	2422
	48	5240	4	2427
Média	52	5260	5	2432
	56	5280	6	2437
	60	5300	7	2442
	64	5320	8	2447
Alta	149	5745	9	2452
	153	5765	10	2457
	157	5785	11	2562
	161	5805		

Tabela 2.1: Canais disponibilizados pelo padrão IEEE 802.11.

2.1.2 Interferência

Como foi citado na seção 2.1.1, o uso do mesmo canal ou de canais parcialmente sobrepostos pode gerar problemas de interferência nas redes 802.11. Esta seção aborda o problema da interferência nessas redes, apresentando e discutindo os diferentes tipos e casos de interferência existentes.

A interferência nas redes 802.11 pode se manifestar de duas formas distintas - compartilhamento da capacidade do canal e interferência co-canal - dependendo do nível de sinal interferente que atinge o receptor. A explicação para a existência de dois tipos diferentes de interferência reside no método de acesso ao meio empregado nestas redes. As redes 802.11 utilizam o método de acesso ao meio CSMA/CA (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*). De acordo com o CSMA/CA, sempre que uma estação 802.11 deseja transmitir um quadro, ela primeiro precisa “ouvir” o meio à procura de outras transmissões. Se o meio permanecer livre durante um intervalo de tempo predeterminado (*Distributed Inter-Frame Space* - DIFS), ela inicia a transmissão do seu quadro em espera. Se durante o intervalo em que a estação passou ouvindo o meio, ela detectar alguma outra transmissão, a estação deve esperar o seu término antes de iniciar a sua transmissão. Além disso, uma vez que outra transmissão é detectada antes da transmissão de um quadro, a estação deve esperar além de DIFS, um intervalo de tempo sorteado aleatoriamente (*backoff*) para evitar colisões.

O método de acesso CSMA/CA permite que as estações 802.11 próximas compartilhem o acesso ao meio evitando transmissões simultâneas. Entretanto, este método também faz com que as estações de redes distintas que estão suficientemente próximas compartilhem a capacidade do meio de comunicação ao utilizar o mesmo canal ou canais sobrepostos. Os rádios 802.11 detectam as transmissões de outras estações 802.11 ou de outros dispositivos interferentes através do nível de energia presente no canal de operação. Quando o nível de energia ultrapassa um determinado limiar, conhecido como limiar de detecção de portadora (*Carrier Sense Threshold*), o meio é considerado ocupado. Desta forma, estações posicionadas próximas o suficiente para que o nível de sinal ultrapasse o limiar de detecção de portadora, irão compartilhar o acesso ao meio e dividir a capacidade do canal por elas utilizado.

O compartilhamento da capacidade do canal é uma das formas de interferência nas redes 802.11. Esta é a forma de interferência mais prejudicial, pois reduz drasticamente a capacidade das estações. Considerando duas estações em plena carga como, por exemplo, durante uma transferência de longa duração de um arquivo grande, pode-se dizer que a capacidade individual de cada uma das duas estações é reduzida à metade se elas compartilham o acesso ao meio.

A Figura 2.4 mostra um exemplo onde os alcances de detecção de portadora e o alcance de recepção da estação 1 estão em destaque. O alcance de recepção é uma característica que depende do nível de energia do sinal recebido e da sua relação sinal/ruído (*Signal to Interference plus Noise Ratio - SINR*). Um quadro só é recebido corretamente se o sinal recebido estiver acima do limiar de recepção (*Rx Threshold*) para a taxa utilizada e possuir uma SINR suficiente para a sua decodificação correta. Portanto, de acordo com o método de acesso CSMA/CA, as estações 2 e 3 irão compartilhar o acesso ao meio com a estação 1. Além disso, também podemos dizer que as transmissões da estação 2 serão recebidas corretamente pela estação 1, pois a estação 2 se encontra dentro do seu alcance de recepção.

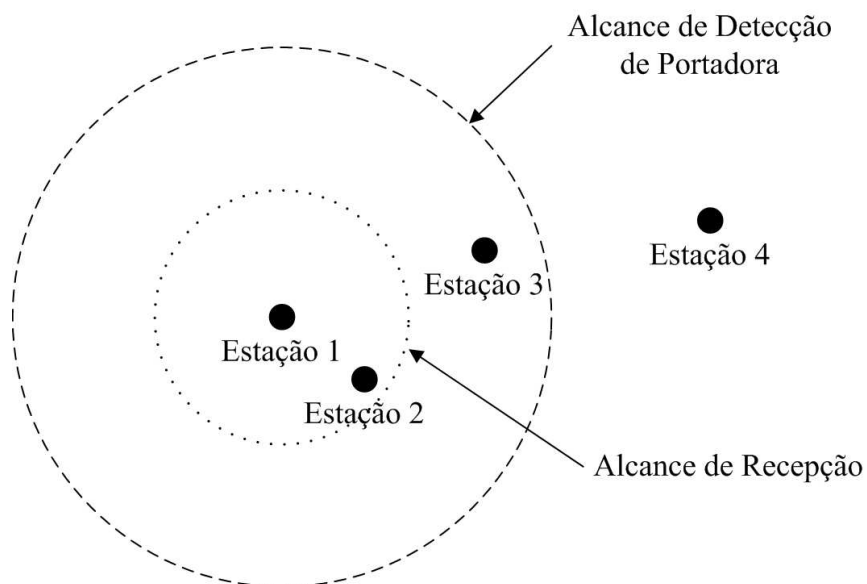


Figura 2.4: Funcionamento do CSMA/CA.

Ainda na Figura 2.4, pode-se perceber que a estação 4 está fora do alcance de detecção da portadora da estação 1 e não será capaz de detectar as transmissões da mesma.

Neste caso, apesar de não detectado, o sinal gerado pelas transmissões da estação 1 será recebido como interferência na estação 4, conhecida como interferência co-canal. A interferência co-canal é o outro tipo de interferência que afeta as redes 802.11 e seu efeito prejudicial é o aumento do nível de interferência, que somada ao ruído de fundo, causa a diminuição da SINR, piorando a qualidade dos sinais recebidos e dificultando a decodificação dos mesmos. Além disso, se a quantidade de fontes de interferência co-canal for suficientemente grande, as suas contribuições podem aumentar o nível de interferência de tal forma que o mesmo ultrapasse o limiar de detecção de portadora, causando o primeiro tipo de interferência.

Estes dois fenômenos de interferência apresentados diminuem a capacidade máxima das redes 802.11. No caso das redes 802.11 no modo infra-estruturado, esses dois tipos de interferência podem se manifestar em diferentes situações, tanto nos APs como nas estações clientes. A Figura 2.5 apresenta as diversas situações de interferência que podem ocorrer entre dois BSSs formados por um AP e uma estação cliente que estejam operando num mesmo canal ou em canais parcialmente sobrepostos [18].

- **Cenário 1** - os dois APs encontram-se dentro dos seus alcances de detecção da portadora, portanto a interferência irá afetar diretamente os APs na forma de compartilhamento da capacidade do meio. Este é o pior dos cenários de interferência, pois, como em uma rede infra-estruturada toda a comunicação é gerenciada pelo AP, toda a comunicação será prejudicada quando o AP sofre interferência.
- **Cenário 2** - os APs estão fora dos seus alcances de detecção da portadora, mas dentro do alcance das estações clientes do BSS vizinho. Este é basicamente o mesmo caso anterior, sendo que os APs compartilham o acesso ao meio com a estação do BSS vizinho.
- **Cenário 3** - neste cenário apenas as estações clientes dos BSSs compartilham o acesso ao meio. Entretanto, os APs, que não compartilham o acesso, geram interferência co-canal mútua. Desta forma, o desempenho das redes é prejudicado pelo compartilhamento do acesso nos clientes e pela interferência co-canal nos APs.
- **Cenário 4** - estações clientes e APs encontram-se fora dos seus alcances de de-

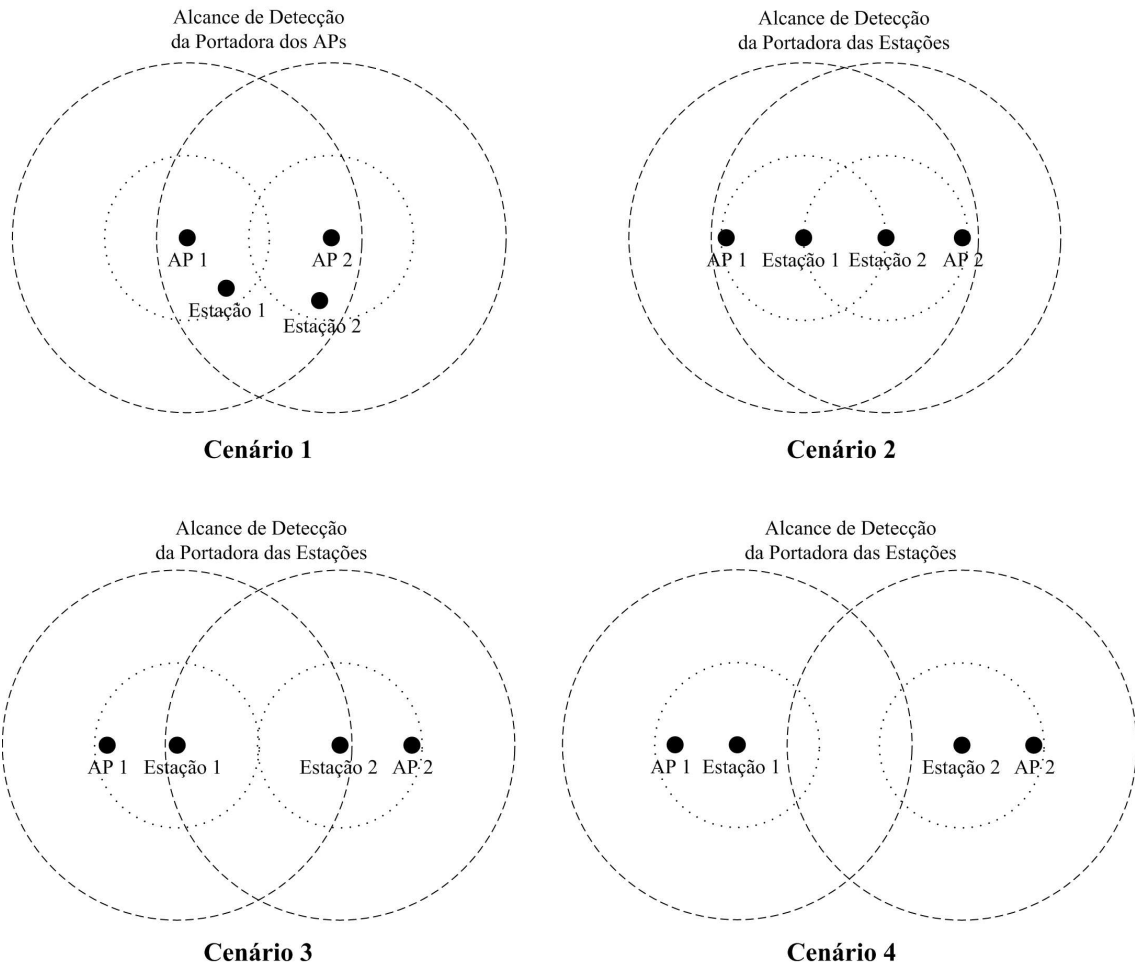


Figura 2.5: Cenários de interferência.

teção da portadora. Neste caso, o único tipo de interferência verificada seria a interferência co-canal, as redes não compartilhariam a capacidade do meio de comunicação.

De acordo com estes diferentes cenários pode-se perceber que a interferência pode ocorrer tanto no AP, quanto nos seus clientes. Esta característica demonstra que é importante utilizar informações sobre ambos, AP e clientes, no processo de alocação de canal. Portanto, fica evidente que as técnicas e mecanismos propostos para a alocação de canal devem conseguir captar os dois tipos de interferência e levar em conta os APs e os clientes no processo de atribuição de canal.

A próxima seção apresenta os esforços já existentes na literatura para solucionar o problema da alocação de canal em redes IEEE 802.11. Além disso, juntamente à revisão

bibliográfica será realizada a avaliação dos efeitos nocivos gerados por uma alocação de canal não planejada.

2.2 Alocação de Canal

A alocação de canal é uma necessidade nas redes sem fio celulares em geral, e tem o objetivo de minimizar a interferência entre células com o menor número possível de canais. Já no caso das redes 802.11, o problema possui algumas pequenas diferenças, principalmente no que diz respeito à interferência existente. Como foi apresentado na seção 2.1.2, o problema da interferência nas redes 802.11 se manifesta de duas maneiras distintas: compartilhamento da capacidade do meio ou interferência co-canal. Isto faz com que seja necessário levar em conta estes dois fenômenos no processo de alocação de canal.

Além da particularidade citada anteriormente, as redes 802.11 também sofrem com o problema da escassez de canais. No caso das redes 802.11 b e g, que são as mais comuns, apenas 3 canais não interferentes são disponibilizados. Esta limitação restringe a quantidade de redes que podem operar na mesma região sem a geração de nenhum tipo de interferência.

O problema ainda se agrava quando pensamos em cenários onde existem redes independentes sem nenhum tipo de coordenação na alocação dos canais. Para exemplificar os efeitos prejudiciais do não planejamento da atribuição de canais, foram realizadas algumas simulações utilizando o simulador ns-2. Foram gerados cenários com diferentes quantidades de redes 802.11 independentes. Cada BSS é formado por um ponto de acesso e cinco estações clientes.

Para a geração dos cenários, algumas restrições foram impostas no posicionamento dos nós de cada BSS. Desta forma buscou-se criar cenários mais parecidos com os cenários práticos de redes independentes. As restrições foram as seguintes:

- **Distância mínima entre APs** - estipulou-se uma distância mínima entre os pontos de acesso de redes distintas. Como as redes são independentes, é improvável que os

APs estejam muito próximos, pois estas redes pressupõem diferentes proprietários com os APs posicionados dentro de seus estabelecimentos.

- **Distância máxima entre AP e seus clientes** - garantiu-se também que existisse uma distância máxima entre os clientes e seu AP. Esta restrição é necessária para evitar que os clientes fiquem fora do alcance de recepção do seu AP. Além disso, evitou-se criar cenários onde os clientes pudessem estar muito distantes do seu respectivo AP. Em aplicações reais, pressupõe-se que os clientes não ficariam posicionados nos limites do alcance de recepção, sofrendo com uma conexão inconstante devido às variações do nível de sinal gerada pelos efeitos de propagação.
- **Distância mínima entre clientes** - esta restrição foi imposta para evitar que dois clientes fossem posicionados próximos um do outro, o que também se pressupõe não ser prático.

Foram utilizados os valores padrão do simulador ns-2 para sensibilidade de recepção, detecção de portadora e potência de transmissão. Além disso, foi empregado o modelo de propagação *two-ray-ground* onde apenas os efeitos de desvanecimento do sinal são considerados. Com essas configurações, o alcance de recepção de uma estação 802.11 no ns-2 fica em torno de 250 metros e o alcance de detecção de portadora em torno de 550 metros. A posição dos nós de cada rede, APs e clientes, foram sorteadas aleatoriamente dentro de uma área de 1000 metros por 4000 metros, obedecendo às restrições apresentadas. A distância mínima entre os APs e a distância máxima entre o AP e seus clientes foi configurada em 150 metros, já a distância mínima entre os clientes em 50 metros.

As simulações realizadas visavam reproduzir redes 802.11b, portanto foram disponibilizados 3 canais de operação e a taxa de transmissão foi configurada em 11 Mbps. As redes foram colocadas em plena carga de tráfego, com um fluxo TCP durando toda a simulação, do AP para os clientes (*downlink*). Desta forma, tentou-se fazer as redes atingirem a capacidade máxima disponível nos canais atribuídos. Maiores detalhes sobre a criação dos cenários com redes independentes, dos parâmetros de simulação e da metodologia para a obtenção dos resultados serão discutidos na seção 4.1.

Inicialmente, apresentamos os resultados para dois tipos de alocação de canal distin-

tas: todos os BSSs no mesmo canal de operação; e com uma alocação aleatória de canal. Alocar todos os BSSs no mesmo canal de operação é o pior caso de alocação de canal possível, pois todos os BSSs podem gerar interferência mútua. Esta alocação de canal fornece o que seria o limite inferior para os resultados obtidos. Já no caso da alocação aleatória, todos os BSSs sorteiam aleatoriamente seu canal de operação no início da simulação. Este tipo de alocação fornece uma idéia mais próxima do que seria a alocação existente na prática em redes independentes. Entretanto, trabalhos como [1], mostram que na prática a alocação de canais em cenários independentes não segue uma distribuição uniforme.

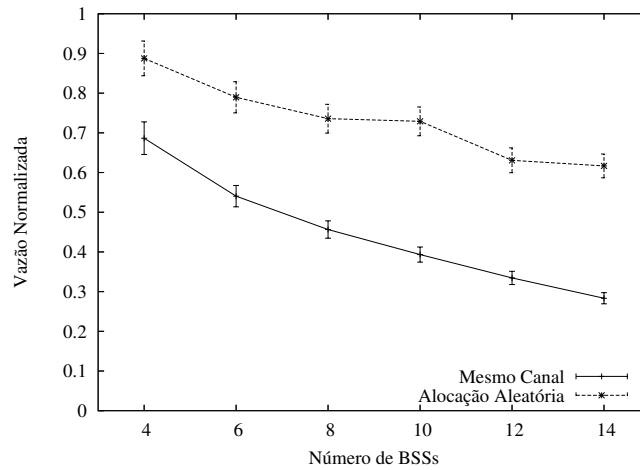
As métricas avaliadas foram: a vazão agregada normalizada e o índice de justiça entre as vazões individuais de cada rede independente. A vazão agregada é uma métrica que representa a soma de todas as vazões de todos os fluxos de tráfego presentes em cada cenário. Ela fornece uma idéia de como os recursos do meio estão sendo aproveitados de uma maneira global. Os valores da vazão agregada foram normalizados em função da vazão agregada média de um BSS isolado, que não sofre nenhum tipo de interferência externa, multiplicado pelo número de BSSs. Já o índice de justiça entre as vazões de cada rede é uma métrica proposta em [23] que indica o nível de justiça no compartilhamento de recursos quaisquer através da função 2.1. Os seus valores variam entre zero e um, sendo que, quanto mais próximo de um, maior o nível de justiça. O índice de justiça foi calculado utilizando-se a vazão média agregada obtida por todos os clientes de cada BSS.

$$Justiça = \frac{(\sum x_i)^2}{n \sum (x_i^2)} \quad (2.1)$$

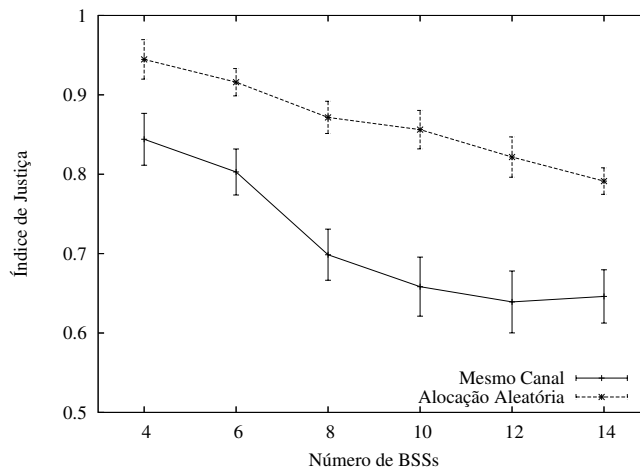
A Figura 2.6(a) mostra os resultados para a vazão agregada normalizada com intervalos de confiança de 95%. Pode-se perceber que a simples atribuição aleatória de canal já apresentou grandes melhorias nos resultados para a vazão agregada quando comparado com a atribuição do mesmo canal de operação em todos os BSSs. São verificados ganhos de até 30% na vazão agregada no melhor caso. Este resultado mostra que com apenas um pequeno esforço na alocação de canal já se pode atingir grandes melhorias. Entretanto, a simples alocação aleatória não é o que ocorre na prática em redes independentes. O trabalho [1] citado anteriormente mostra que em torno de 75% dos APs utilizam o canal 6 para

as suas operações, que é o canal padrão definido pela maioria dos fabricantes. Portanto, na prática, o desempenho apresentado pela alocação de canal aleatória deve ficar abaixo do que foi obtido nesta simulação.

A Figura 2.6(b) mostra os resultados para o índice de justiça entre as vazões individuais de cada rede independente com intervalos de confiança de 95%. Também para esta métrica percebe-se que a alocação de canal aleatória apresentou melhores resultados. Com isso comprova-se que a inexistência de um mecanismo de alocação de canal pode gerar um compartilhamento injusto dos recursos do meio de comunicação.



(a) Vazão agregada normalizada.



(b) Índice de justiça entre BSSs.

Figura 2.6: Avaliação do desempenho de alocações de canal simples em redes independentes.

De acordo com as simulações apresentadas podemos comprovar que a falta de planejamento na atribuição de canais em redes 802.11 independentes prejudica o desempenho agregado e a justiça. Os prejuízos causados no desempenho, aliado à escassez de mecanismos e técnicas para a alocação de canal em cenários com redes independentes, comprovam a necessidade da pesquisa e desenvolvimento de novas técnicas de alocação de canal para este tipo de cenário. Como já foi citado na seção 1.1, o problema da alocação de canal em redes sem fio 802.11 no modo infra-estruturado com administração centralizada já foi bastante estudado e várias técnicas e mecanismos de alocação de canal foram propostos. Entretanto, poucas soluções são aplicáveis ou especialmente desenvolvidas para cenários com redes independentes.

Nas próximas duas partes desta seção, serão apresentadas e discutidas algumas das propostas existentes para a solução do problema de alocação de canal nas redes sem fio 802.11. As propostas foram classificadas em centralizadas e independentes, referindo-se às propostas aplicáveis apenas em cenários onde as redes possuem uma administração centralizada, e onde as redes possuem administração independente.

2.2.1 Mecanismos Centralizados

Grande parte das soluções propostas para a alocação de canal em redes 802.11 existentes na literatura são aplicáveis apenas em cenários onde os BSSs possuem administração centralizada [8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 17]. Muitos desses trabalhos utilizam a mesma abordagem para solucionar o problema da alocação de canal. Nela, o problema da interferência entre BSSs é modelado através de um grafo e a alocação de canal é solucionada utilizando-se técnicas de coloração de grafos.

Ao modelar o problema da interferência como um grafo, os APs são considerados como vértices do grafo e a interferência entre dois BSSs é representada por uma aresta entre eles. Neste caso, é considerado como interferência apenas o fenômeno do compartilhamento da capacidade do meio, sem levar em conta a interferência co-canal. Esta é uma característica presente em praticamente todos os trabalhos que abordam o problema da alocação de canal, onde apenas os efeitos do compartilhamento do acesso ao meio são

considerados como interferência. A Figura 2.7 apresenta um exemplo de cenário com 5 BSSs e o grafo representativo do mesmo.

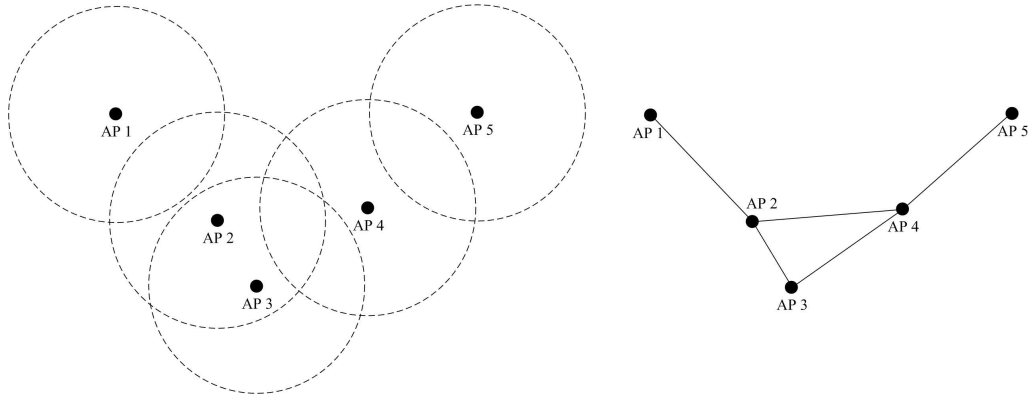


Figura 2.7: Exemplo de grafo representativo da interferência entre BSSs.

Uma vez que o grafo de interferência foi construído, técnicas de coloração de grafos são utilizadas para realizar a coloração dos vértices do mesmo. Cada cor utilizada representa um canal diferente e o objetivo da coloração é obter uma configuração tal que nenhum vértice adjacente utilize a mesma cor. Entretanto, este é um problema conhecidamente NP-completo, quando o número de canais disponíveis para a alocação é menor que o grau máximo do grafo [17, 19]. Portanto, não existe, ou simplesmente ainda não foi descoberto, um algoritmo capaz de solucionar este problema de coloração em tempo polinomial.

Para as redes 802.11, o problema é muito parecido: encontrar uma coloração que minimize os vértices adjacentes de mesma cor com um número limitado de cores disponíveis. Desta forma, o grande desafio das propostas de soluções para a alocação de canal em redes 802.11 é encontrar algoritmos de coloração que forneçam soluções mais próximas o possível do ótimo em tempo polinomial, buscando minimizar uma função objetivo em específico. A função objetivo é a métrica que o algoritmo de coloração pretende minimizar. Encontrar funções objetivo que representem de maneira eficiente os prejuízos causados pela interferência é um outro desafio das propostas existentes na literatura.

Rodrigues et al. em [8] propõem um algoritmo desenvolvido através de programação linear para solucionar o problema da coloração do grafo. O objetivo do algoritmo é minimizar o somatório da separação entre os canais atribuídos a vértices adjacentes do grafo,

garantindo uma separação de no mínimo 3 canais entre os mesmos. Já em [9], os mesmos autores propõem um novo algoritmo que utiliza em sua métrica o nível de utilização de cada BSS. Desta forma, busca-se priorizar as BSSs com maior demanda de clientes na alocação de canais.

Em [10], Hills não propõe uma técnica ou ferramenta para o problema da alocação de canal em redes 802.11. Entretanto, ele discute o problema explicando que as possíveis soluções para a alocação de canal podem ser obtidas com o uso de algoritmos de coloração, ou através da exploração de todas as possíveis alocações para o grafo em questão. Esta última técnica é particularmente interessante, pois permite explorar todas as possíveis alocações de canal para um determinado grafo, fornecendo a melhor solução para o problema da alocação de canal quando os cenários possuem alguns poucos BSSs e o esforço computacional não é uma restrição.

Já em [11], Hills e Schlegel propõem uma ferramenta para o auxílio no planejamento do posicionamento e na alocação de canais de redes sem fio 802.11. Denominada *Rollabout*, ela consiste de um dispositivo móvel (um carrinho) equipado com um *laptop* e um sistema de posicionamento (GPS). Medições são realizadas na área onde os APs estão posicionados para criar um mapa das áreas de cobertura. As informações coletadas servem de entrada para um software que diz se há a necessidade de modificar o posicionamento dos APs, e também calcula soluções para o problema da alocação de canal. Para o problema da alocação de canal, o software possui dois tipos de algoritmo de coloração: um algoritmo que fornece a solução ótima em tempo computacional exponencial, aplicável apenas em cenários com poucos APs; e um algoritmo de coloração guloso (*greedy*) que fornece soluções próximas do ótimo para cenários com muitos APs.

Hills e Friday discutem em [12] as várias técnicas existentes para o problema da alocação de canal em redes 802.11. O mais importante é que este parece ser o primeiro artigo a apontar a necessidade do uso de uma alocação de canal dinâmica, que leve em conta a interferência entre BSSs, o nível de carga nos BSSs, e também a interferência de dispositivos que não são 802.11. Entretanto, o artigo não apresenta nenhuma solução prática para o problema da alocação dinâmica de canal, apenas ressalta a sua importância.

Mahonen et al. em [17] propõem um algoritmo guloso para o problema da coloração

de grafos com o objetivo de encontrar uma alocação de canal que maximize a quantidade de redes vizinhas que utilizam canais diferentes nos seus APs. Leung e Kim em [13] desenvolvem uma heurística capaz de buscar soluções para o problema da alocação de canal levando em conta as demandas de tráfego de cada AP.

Os trabalhos [14] e [15] discutem a necessidade de acoplar a tarefa de posicionamento dos APs com a de alocação de canal. Desta forma, [15] desenvolve através de programação linear um modelo do problema com a função objetivo de minimizar o máximo da utilização dos canais. Já [14], propõe um algoritmo para a coloração do grafo de interferência que tem o objetivo de maximizar a vazão nos BSSs e a justiça no compartilhamento da banda entre eles.

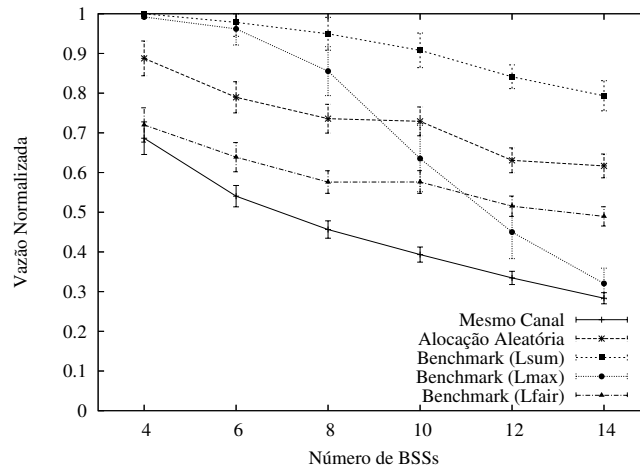
O estudo do problema da alocação de canal em cenários de administração centralizada mostrou que a maioria das soluções se baseia em modelagens do problema da interferência entre BSSs como um grafo, e na busca por configurações que minimizem alguma função objetivo em específico. Baseado nesta observação foi desenvolvido nesta tese uma ferramenta capaz de ler o posicionamento dos cenários utilizados nas simulações com o ns-2 e fazer uma busca pela solução ótima para a alocação de canal. Uma vez que a solução ótima para a alocação de canal é obtida, ela pode ser utilizada pelo ns-2 com os cenários em questão.

Pode-se perceber que, na prática, esta ferramenta seria aplicável apenas em cenários de administração centralizada, porque depende de informações de posicionamento de todos os APs e clientes presentes em cada cenário e, portanto, não poderia ser utilizada em um ambiente real com BSSs independentes. Entretanto, como neste trabalho possuíam-se informações globais de posicionamento em todos os cenários com redes independentes simulados, esta técnica foi utilizada para descobrir o limite superior de desempenho para as métricas avaliadas que pode ser obtido com a alocação de canal ótima de acordo com uma função objetivo específica.

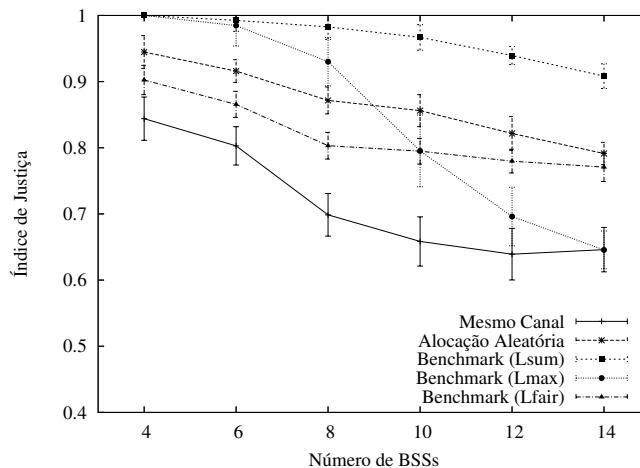
Na sua operação, a ferramenta em questão, que foi denominada *benchmark*, realiza a varredura de todas as possíveis alocações de canal e calcula o custo de cada configuração baseando-se em uma função objetivo. Para a montagem do grafo de interferência utilizamos a proposta descrita em [19], onde as arestas possuem pesos baseados na porcentagem

de clientes dos BSSs envolvidos que sofrem aquela interferência. Maiores detalhes a respeito dessa modelagem serão fornecidos na próxima seção.

Três funções objetivo foram testadas na ferramenta *Benchmark*: L_{sum} , que é o somatório dos pesos de todas as arestas do grafo; L_{max} , que é o valor da aresta de maior peso; e L_{fair} , que é o inverso do valor do índice de justiça entre os pesos das arestas do grafo. O *Benchmark* calcula o valor de uma das três funções objetivo para cada uma das possíveis alocações de canal em cada cenário. Com isso, é possível determinar aquela alocação de canal que faz o valor da função objetivo em questão ser mínimo.



(a) Vazão agregada normalizada.



(b) Índice de justiça entre BSSs.

Figura 2.8: Resultados do *benchmark* aplicado em redes independentes.

Para os mesmos cenários utilizados nos experimentos apresentados no início da se-

ção 2.2, utilizamos a ferramenta *benchmark* com as três diferentes funções objetivo para obter a alocação de canal que minimiza o valor de cada uma delas. Com esta alocação, foram realizados experimentos nos mesmos padrões utilizados anteriormente no início da seção 2.2. As Figuras 2.8(a) e 2.8(b) mostram os resultados para a vazão agregada normalizada e índice de justiça entre as vazões individuais dos BSSs comparados com os resultados obtidos anteriormente com a alocação do mesmo canal e alocação aleatória.

Pode-se perceber através dos novos resultados obtidos com o *benchmark* como o problema da alocação de canal pode prejudicar a capacidade agregada e a justiça na utilização dos recursos do meio de comunicação. Isto pode ser constatado ao se comparar os resultados obtidos para a alocação de canal fornecida pela função objetivo *Lsum* no *Benchmark*.

Pode-se perceber também que a alocação de canal obtida com a função objetivo *Lsum* foi a que apresentou melhor desempenho. Isto mostra que, dentre as três funções objetivo testadas, a *Lsum* foi a que melhor conseguiu representar numericamente os prejuízos gerados pela interferência entre os BSSs no desempenho agregado e na justiça.

2.2.2 Mecanismos Independentes

De acordo com o levantamento bibliográfico realizado, a primeira proposta de mecanismo de alocação de canal aplicável a cenários com redes independentes foi [19]. Neste trabalho, Mishra et al. apresentam um mecanismo que opera de maneira distribuída nos APs, realizando a seleção do canal de operação, e que pode utilizar: apenas informação local, visando cenários com redes independentes; ou informação global, obtida promovendo-se a comunicação entre os APs em cenários onde existe a colaboração entre os mesmos.

A proposta surgiu através da modelagem do problema da interferência entre os BSSs como um grafo, muito parecido com as propostas tradicionais. A diferença é que, neste caso, o grafo montado possui pesos nas arestas referentes às quantidades de estações clientes que sofrem com a interferência que gerou a aresta. Segundo a análise realizada, o problema de coloração do grafo com pesos também é NP-completo, portanto o trabalho propõe uma heurística para solucionar o problema da coloração. Entretanto, ao invés de

propor um algoritmo centralizado para realizar a alocação de canal, foi proposto um algoritmo distribuído capaz de ser executado periodicamente nos APs para realizar a seleção do canal desejado dinamicamente. Este algoritmo seleciona o canal utilizando um grafo de interferência obtido através de medições.

Para montar o grafo, o AP requisita que todos os seus clientes realizem uma varredura dos canais disponíveis em busca de quadros de outros BSSs. Ao término da varredura, o AP recebe as informações das estações clientes e monta a sua visão local do grafo de interferência. Através das medições dos clientes, cada AP saberá: em quais canais o BSS sofreria interferência; quais BSSs interferem em qual canal; e a quantidade de estações de seu próprio BSS que sofrem interferência. Essas informações serão suficientes para montar uma visão local do grafo de interferência. Se houver colaboração entre os APs, os mesmos podem trocar informações e montar uma visão global do grafo permitindo o uso de uma heurística mais refinada e que apresenta melhores resultados para realizar a atribuição de canais. Entretanto, esta vertente da proposta só se aplica em cenários centralizados, onde todos os APs se comunicam utilizando protocolos como o IAPP (*Inter-Access Point Protocol*) [19].

Outra característica interessante deste trabalho é a possibilidade de se utilizar canais parcialmente sobrepostos para a alocação. Alguns outros trabalhos estudando os efeitos do uso de canais sobrepostos foram publicados por esses mesmos autores [24, 25]. Segundo estes trabalhos, o nível de sobreposição dos canais pode ser representado por um índice de sobreposição variando de zero a um, que indica a porcentagem de sobreposição entre dois canais de acordo com seu grau de separação. Estes valores podem ser obtidos através de medições da SINR de um sinal recebido nos canais parcialmente sobrepostos ao canal do transmissor (Tabela 2.2), ou podem ser calculados teoricamente através das máscaras dos filtros de transmissão e recepção do rádio 802.11. [25] mostra que os valores práticos e teóricos ficam bem próximos.

Desta forma, pode-se utilizar o índice de sobreposição para dizer o quanto de potência de um sinal transmitido em um canal é percebido em um canal parcialmente sobreposto. Em [19], o índice de sobreposição é utilizado para escalar os pesos das arestas do grafo de interferência dependendo dos canais escolhidos para os BSSs responsáveis pela aresta

Canal	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Índice de sobreposição	0	0.22	0.60	0.72	0.77	1.0	0.96	0.77	0.66	0.39	0

Tabela 2.2: Valores para os índices de sobreposição obtidos através de medições para uma transmissão realizada no canal 6.

em questão durante a execução do algoritmo de seleção de canal. A heurística proposta para a seleção de canal nos APs busca minimizar a interferência de maneira incremental. A montagem do grafo de interferência seguida da execução do algoritmo de seleção é realizada periodicamente a cada execução. O algoritmo de seleção de canal escolhe o canal que faz o peso da sua aresta de maior custo ser minimizado. Vale lembrar que o peso das arestas é uma métrica da quantidade de estações que reportam uma determinada interferência e, de acordo com o canal escolhido, os pesos das arestas podem mudar, pois são multiplicados pelos índices de sobreposição entre os canais atribuídos.

A proposta apresentada em [19] possui uma limitação no que diz respeito à montagem do grafo de interferência. Para montar o grafo, as estações realizam a varredura dos canais em busca de tráfego de outros BSSs. Com esta varredura, as estações podem informar ao AP qual BSS interfere em cada canal, que é uma informação essencial para a montagem do grafo de interferência. Entretanto, para isto é necessário que os pacotes dos outros BSSs interferentes sejam decodificados. Portanto, as estações só conseguem detectar interferência proveniente de BSSs dentro do alcance de recepção. Como foi explicado na seção 2.1.2, duas estações também sofrem com o problema do compartilhamento do acesso ao meio quando estão dentro dos seus alcances de detecção da portadora. Este problema de interferência é negligenciado durante a montagem do grafo de interferência e pode prejudicar o desempenho desta proposta.

Em um outro trabalho [18], Mishra et al. apresentam uma nova abordagem para o problema da alocação de canais. Eles discutem a necessidade de realizar a alocação em conjunto com o balanceamento de carga entre os APs, ou seja, realizando também a re-associação dos clientes. Uma nova modelagem é realizada para o problema da interferência: a representação da mesma através do que foram denominados "conjuntos de

conflitos"(*conflict sets*). Segundo o trabalho, um conflito existe quando um cliente ou AP sofre interferência de um nó de outra rede. Os conjuntos de conflitos são os grupos de APs de redes vizinhas que podem interferir na comunicação de um cliente com o seu respectivo AP.

O mecanismo de alocação de canal proposto também é baseado em uma heurística distribuída, que tem como objetivo atribuir canais aos APs e re-associar os clientes, visando minimizar o tamanho dos conjuntos conflitantes de cada cliente de cada AP. Assim como no trabalho anterior, existe uma versão do mecanismo onde os APs colaboram, e uma independente, sem a colaboração entre os APs. Entretanto, devido às limitações dos cenários com redes independentes, o mecanismo sem a colaboração entre os APs não é capaz de realizar a re-associação de clientes, apenas a seleção do canal.

Esta proposta apresenta a mesma limitação de [19], pois utiliza medições apenas dos pacotes decodificados pelos clientes para a detecção dos conjuntos conflitantes, portanto não cobre todos os cenários de interferência descritos na seção 2.1.2.

Em seu trabalho mais recente [2], Mishra et al. propuseram uma nova abordagem para o problema da alocação de canal visando melhorar a justiça entre os BSSs. Devido à escassez de canais não interferentes disponíveis para a alocação nas redes 802.11 e as altas densidades em cenários com redes independentes, existem casos onde uma alocação de canal estática pode causar injustiça na utilização dos recursos do meio de comunicação.

A Figura 2.9 mostra um cenário em que com três canais disponíveis para a alocação é impossível determinar uma alocação de canal ótima onde se maximize o uso dos canais e se garanta o igual compartilhamento da capacidade dos mesmos entre os BSSs [2]. Neste exemplo, pelo menos dois BSSs serão sempre prejudicados, utilizando o mesmo canal.

Visando solucionar o problema levantado anteriormente, [2] propõe um novo mecanismo de alocação de canal baseado em seqüências de mudanças de canal sincronizadas (*Channel Hop Sequence*). Este novo mecanismo não procura uma configuração estática para a alocação de canais nos BSSs. Ao invés disso, procura uma seqüência de mudanças de canal para os BSSs que torne a divisão de recursos mais justa a longo prazo. A proposta baseia-se no fato de que a cada troca sincronizada de canal os BSSs utilizam uma

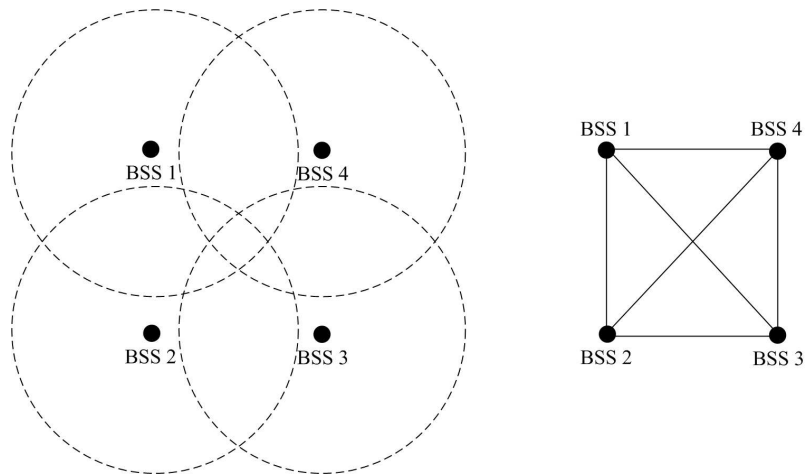


Figura 2.9: Cenário onde a alocação de canal estática causa injustiça.

alocação de canal diferente, que prioriza um conjunto diferente de BSSs. Com isso, após um longo período de tempo, a justiça no compartilhamento dos recursos entre os BSSs é atingida. A Tabela 2.3 apresenta o que seria uma das possíveis seqüências de mudanças de canal para os BSSs da Figura 2.9 que faria a capacidade ao final de uma seqüência de mudanças completa ser dividida igualmente entre os mesmos.

BSS	Mudanças de Canal						
1	1	6	6*	11*	6	6*	* - BSSs prejudicados nesta janela de salto de canal.
2	6	1*	6*	6	1*	1	
3	11*	1*	11	1	11	6*	
4	11*	11	1	11*	1*	11	

Tabela 2.3: Seqüência de mudanças ideal para garantir justiça.

Para encontrar as seqüências de mudanças de canal ideais, [2] propõe um algoritmo que analisa a seqüência de mudanças dos BSSs interferentes e escolhe o melhor canal para cada janela da seqüência. Para realizar esta tarefa, o AP utiliza medições realizadas com os seus clientes para encontrar os BSSs que interferem em cada canal durante cada janela da seqüência. Mais uma vez a precisão deste tipo de medição com os clientes depende da decodificação correta dos pacotes interferentes. Tal característica da medição faz com que este mecanismo apresente o mesmo problema das propostas anteriores, onde a interferência gerada pelos nós dentro do alcance de detecção da portadora não é

percebida.

Em seus trabalhos, Mishra et al. citam e comparam as suas propostas com o mecanismo de alocação de canal LCCS (*Least Congested Channel Search*). Este é um mecanismo de alocação automática de canal implementado em APs de alguns fabricantes. Muito pouca informação está disponível na literatura a respeito do LCCS, sendo os trabalhos [2], [18] e [19] as maiores fontes de informação a respeito. O LCCS opera unicamente nos APs e realiza a seleção automática do canal de operação. Ao ser ligado, o AP realiza uma varredura dos canais disponíveis e seleciona o canal menos congestionado, com a menor quantidade de tráfego de outros BSSs [2]. O LCCS apresenta grandes limitações, pois não utiliza os clientes no processo de detecção de outras redes. Além disso, a alocação de canal não é dinâmica, o canal escolhido no início da operação é mantido até o AP ser desligado.

Levando em conta os problemas das redes 802.11 e as propostas apresentadas neste capítulo, pode-se perceber que a alocação de canal ainda é um problema que demanda novas soluções. O próximo capítulo apresenta a proposta deste trabalho para a alocação de canal em redes 802.11 independentes. A proposta em questão pretende ser uma solução dinâmica e distribuída visando o cenário alvo deste trabalho: as redes IEEE 802.11 independentes.

Capítulo 3

Seleção Dinâmica de Canal

As redes IEEE 802.11 independentes possuem uma série de características e restrições que precisam ser levadas em consideração durante o processo de alocação de canal. São elas:

- a escassez de canais não interferentes, que limita a quantidade máxima de redes que podem coexistir em uma região sem a presença de interferência;
- a existência de dois tipos diferentes de interferência: a interferência co-canal e o compartilhamento da capacidade do meio. Os dois tipos podem prejudicar as comunicações e afetar o desempenho destas redes;
- a ocorrência da interferência tanto nos APs, quanto nas estações clientes;
- a impossibilidade de comunicação entre os BSSs, restringindo o uso das técnicas de alocação de canal convencionais.

Estes problemas tornam o desenvolvimento de soluções para o problema da alocação de canal em redes 802.11 independentes um grande desafio. A existência de poucas soluções na literatura e as limitações apresentadas pelas mesmas são fatores que impulsionam este trabalho para o desenvolvimento de propostas alternativas visando melhores soluções para o problema da alocação de canal.

Este capítulo apresenta o processo de desenvolvimento do mecanismo de seleção automática de canal. A proposta tem o objetivo de ser dinâmica, sendo adaptável às mudanças de demanda de tráfego e topologia, e distribuída, sendo capaz de realizar a escolha do seu canal de operação sem a colaboração dos outros BSSs da região. Além disso, ela atende às limitações existentes nas redes 802.11 e nos cenários com redes independentes.

Antes de iniciar as discussões sobre as propostas, o padrão IEEE 802.11k será apresentado. Esta nova norma padroniza diversos tipos de medição de parâmetros operacionais dos canais e do rádio 802.11 e define mensagens para a troca dessas informações entre as estações 802.11. As suas medições serão utilizadas pelas propostas desenvolvidas, que serão apresentadas no final desse capítulo.

3.1 IEEE 802.11k

A nova extensão k da norma 802.11 [26] padroniza diversos tipos de medições de características dos canais e do rádio 802.11. Além disso, ela também especifica mensagens utilizadas para a troca dessas informações entre os nós 802.11. Os principais objetivos da extensão 802.11k são:

- permitir que as estações realizem medições de parâmetros específicos dos canais e do rádio 802.11;
- padronizar as mensagens para a troca das informações obtidas com as medições, definindo mensagens de requisição e de relatório para cada parâmetro que pode ser medido;
- disponibilizar o acesso a estas informações para as camadas superiores da pilha de protocolos, fornecendo ferramentas para o desenvolvimento de novas aplicações e mecanismos.

Esta nova norma ainda está em desenvolvimento pelo grupo de trabalho 802.11. Entretanto, segundo a sua versão preliminar (*draft*) oito tipos diferentes de informação podem ser medidas e trocadas entre as estações 802.11. São as seguintes:

- **Nível de Carga** - fornece informação sobre a ocupação em um determinado canal durante o período estipulado para a medição. É um cálculo simples da porcentagem de tempo em que o canal foi considerado como ocupado dividido pela duração total da medição. Para considerar o canal ocupado pode-se utilizar a informação de detecção da portadora física, como descrito na seção 2.1.2, ou o NAV (*Network Allocation Vector*), que é um contador que indica quando o meio estará livre para novas transmissões e funciona como uma detecção virtual da portadora.
- **Nível de ruído** - fornece os valores do nível de ruído presente no canal no período em que o meio foi detectado desocupado durante a medição. O resultado da medição é fornecido na forma de um histograma.
- **Quantidade de *beacons*** - informa a quantidade de *beacons* recebidos de outros APs próximos em um determinado canal durante o período de medição. Os *beacons* são mensagens periódicas enviadas em *broadcast* pelos APs e que informam aos clientes o canal de operação do AP e as suas características de operação.
- **Quantidade de quadros recebidos** - informa a quantidade de quadros recebidos em um determinado canal durante o período de medição. O resultado é organizado por nó de origem e também fornece a informação sobre a potência média de recepção dos quadros de cada fonte.
- **Estações escondidas** - realiza a detecção de estações escondidas durante um período de medição, 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 (*Acknowledgments* - ACKs) que ela envia. A medição também informa a quantidade de vezes que esta situação ocorreu durante o período de medição.
- **Histograma dos intervalos de tempo de ocupação/liberação** - informa, por meio de um histograma, os tamanhos dos intervalos de tempo durante os quais o meio permaneceu livre ou ocupado no período em que foi realizada a medição. Assim como na medição do nível de carga, tanto o NAV, como a informação de detecção da portadora, podem ser utilizadas.

- **Estatísticas sobre as estações** - não é uma medição em específico, mas a capacidade de informar estatísticas armazenadas na base de dados de gerenciamento associada à camada MAC (*Management Information Base* - MIB).
- **Informação de posicionamento das estações** - permite a troca de informações sobre o posicionamento geográfico das estações quando as mesmas possuem esta funcionalidade.

A troca de mensagens definida pelo padrão 802.11k é bem simples e conta com dois tipos de mensagem: relatórios (*reports*) e requisições (*requests*). As mensagens de relatório servem para informar aos outros nós da rede os resultados obtidos a partir de alguma medição realizada. Ao término da medição, o nó medidor monta uma mensagem de relatório que pode ser enviada para um destino único, ou difundida em *broadcast* para várias estações vizinhas. Já as mensagens de requisição permitem o envio de pedidos de medição para um nó em específico ou para vários nós vizinhos com o envio em *broadcast*. Depois de realizar a medição requisitada, a estação medidora responde à estação requerente com uma mensagem de relatório informando os resultados obtidos.

Em uma única mensagem de requisição ou relatório vários tipos de informações podem ser pedidas ou relatadas. Isto permite uma diminuição do número de mensagens necessárias quando se realiza a troca de vários tipos de informação ao mesmo tempo. Além disso, com uma mesma mensagem podem ser requeridas medições em todos os canais disponíveis. Logo, o nó medidor irá precisar fazer uma varredura nos canais sinalizados para realizar as medições requeridas em cada um deles.

De acordo com o que já foi apresentado até agora, fica evidente que dependendo do tipo ou canal onde a medição é realizada pode ser necessário que o mesmo fique impedido de se comunicar. A maioria dos tipos de medição pode ser realizada passivamente, sem a necessidade de interromper a comunicação do nó medidor. Entretanto, quando se trata de uma medição fora do canal de operação da rede do nó medidor a comunicação é interrompida. Este problema é abordado pela norma 802.11k, que recomenda que as medições fora do canal de operação da rede sejam realizadas e requisitadas por curtos períodos de tempo e com pouca frequência. Este cuidado reduz o possível impacto prejudicial que a tarefa de medição causa no desempenho do nó medidor.

Outra característica citada pela norma 802.11k que pode reduzir os prejuízos causados por medições fora do canal de operação é a realização de medições concorrentes num mesmo canal. A maioria das medições pode ser realizada simultaneamente pelo nó medidor, com isso, o tempo empregado na obtenção de várias informações diminui. Além disso, o efeito prejudicial causado pela permanência fora do canal de operação realizando medições também é reduzido. 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.

3.2 Mecanismo de Seleção Dinâmica de Canal (SDC)

Como foi ressaltado no início do capítulo, o problema da alocação de canal em redes 802.11 independentes sofre com as restrições impostas por este tipo de cenário. Além disso, foi mostrado que, neste tipo de cenário, é importante que a alocação de canal seja dinâmica e distribuída. Visando este objetivo, será proposto um mecanismo de seleção automática e dinâmica de canal para as redes 802.11 independentes, denominado SDC (Seleção Dinâmica de Canal).

O mecanismo SDC é executado no AP e utiliza apenas informações locais, obtidas dentro do próprio BSS. As mesmas são obtidas através de medições e da troca de mensagens padronizadas pela norma 802.11k. Com isso, o AP pode decidir qual canal é o mais indicado para o uso. Além disso, o mecanismo de seleção é dinâmico, permitindo que a alocação de canal seja adaptável às possíveis mudanças nas demandas dos BSSs e às mudanças de topologia das redes. O seu funcionamento é relativamente simples, mas existe uma série de detalhes importantes a serem discutidos para um perfeito entendimento da proposta e para a sua adequada operação. A operação do mecanismo SDC pode ser descrita em três etapas (Figura 3.1):

1. **Obtenção das informações sobre capacidade e qualidade dos canais disponíveis para a alocação** - inicialmente é necessário que sejam obtidas informações a

respeito da capacidade e qualidade dos canais disponíveis para o uso. Tais informações irão fornecer uma base para o SDC decidir qual o melhor canal a ser utilizado. Esta tarefa é realizada através das medições e da troca de mensagens padronizadas pela norma 802.1k, descrita na seção 3.1.

2. **Escolha do canal de operação** - uma vez que o SDC obteve informação suficiente sobre o atual estado dos canais disponíveis, um algoritmo de seleção de canal escolherá o canal a ser utilizado. O algoritmo utiliza uma heurística que visa escolher os canais de acordo com seus níveis de interferência.
3. **Atribuição do canal selecionado** - uma vez que o novo canal de operação da rede foi definido pelo SDC, é necessário que a decisão seja informada aos clientes do AP. Com isso, as estações cliente podem passar a se comunicar com o AP no novo canal selecionado.

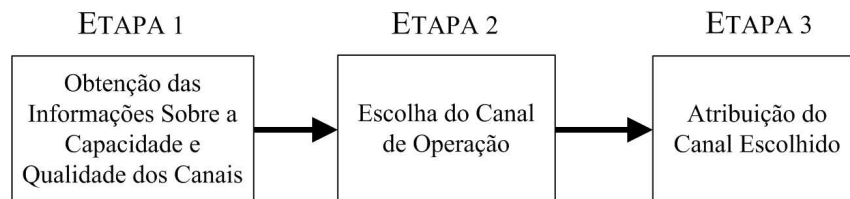


Figura 3.1: Diagrama esquemático do mecanismo de seleção dinâmica de canal (SDC).

O primeiro passo do mecanismo é responsável por obter as informações necessárias ao algoritmo de seleção de canal. Essas informações devem ser capazes de representar os problemas de interferência que afetam cada nó do BSS em questão. Como já foi explicado na seção 2.1.2, a interferência se manifesta de duas formas distintas e afeta tanto os APs, quanto os clientes. Portanto, cada nó da rede deve ser capaz de detectar os dois tipos de interferência que afetam o seu desempenho. Para realizar esta tarefa de detecção serão utilizados dois tipos de medição especificados pela norma 802.11k: a medição do nível de carga e do nível de ruído no canal.

A medição do nível de ruído fornecerá informação sobre a qualidade do canal aferido em relação à quantidade de interferência co-canal existente. Quanto maior for o nível de interferência co-canal presente na região, maior será o nível de ruído medido. Segundo

a especificação da norma 802.11k, a medição do nível de ruído presente em um canal é realizada nos intervalos de tempo em que o meio permaneceu livre durante o período de medição. Portanto, um nó só é capaz de medir o nível de ruído presente no meio nos intervalos em que não está transmitindo ou que a sua detecção de portadora não indica nenhuma transmissão.

Os resultados para as medições do nível de ruído em um canal são fornecidos na forma de um histograma. Entretanto, o algoritmo de seleção de canal, que será explicado ainda nesta seção, necessita do nível médio do ruído medido em cada canal. A Figura 3.2 apresenta um exemplo de histograma genérico de valores entre zero e cinco. Neste exemplo, as letras representam o número de ocorrências em cada faixa de valor assinalada abaixo dos blocos. A obtenção do valor médio para valores fornecidos na forma de histograma do exemplo da Figura 3.2 é uma operação simples que pode ser realizada utilizando-se a equação 3.1.

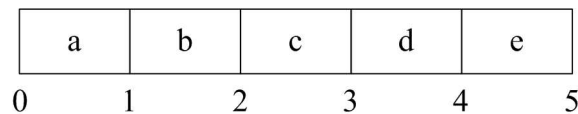


Figura 3.2: Exemplo de histograma.

$$Média = \frac{1 \times a + 2 \times b + 3 \times c + 4 \times d + 5 \times e}{a + b + c + d + e} \quad (3.1)$$

A medição da carga no canal, especificada pela norma 802.11k, informa a porcentagem de tempo em que o canal permaneceu ocupado durante o período de medição. Esta medição contabiliza a quantidade de tempo em que o canal permaneceu ocupado de acordo com a detecção da portadora ou com o NAV. Neste caso será utilizada a detecção da portadora, pois assim as estações serão capazes de detectar a porcentagem de tempo em que o meio permaneceu ocupado devido às transmissões das outras estações que compartilham a capacidade do meio.

Realizando as duas medições descritas anteriormente, um nó 802.11 é capaz de informar o nível de ruído presente no canal medido e o grau de compartilhamento no acesso ao meio existente. Essas informações fornecerão uma idéia dos níveis de interferência

co-canal e de interferência gerada pelo compartilhamento da capacidade do canal, que são os dois tipos de interferência que afetam as redes IEEE 802.11.

O mecanismo SDC, executado pelo AP, irá requisitar estes dois tipos de medição para as suas estações cliente. Segundo a norma 802.11k, essas medições podem ser requisitadas com uma única mensagem e podem ser realizadas paralelamente pelas estações medidoras. Para obter as informações necessárias ao algoritmo de seleção de canal, as medições devem ser realizadas em todos os canais disponíveis para a alocação. Assim, uma visão geral da qualidade de todos os canais será utilizada pelo algoritmo de seleção de canal. As medições do nível de ruído e do nível de carga são coordenadas pelo AP que, a cada execução do mecanismo, requisita a todas as suas estações cliente medições de todos os canais disponíveis para a alocação. Cada estação vai realizar algo muito parecido com uma varredura passiva dos canais disponíveis para fazer as medições. Com esta tarefa, as estações serão capazes de medir o nível de ruído e carga em todos os canais e ao término da varredura enviar uma mensagem de relatório com os resultados obtidos com as medições. A Figura 3.3 apresenta um exemplo de como se dá o processo de medição.

Diferentes abordagens poderiam ser aplicadas no que diz respeito a quais estações devem realizar as medições. Existem basicamente três tipos de solução: medições apenas no AP; medições apenas nas estações cliente; ou medições no AP e nos clientes. Fica evidente que a última solução é a mais completa por ser a única que cobre os casos de interferência que podem ocorrer em uma rede infra-estruturada. Entretanto, em redes com muitos clientes ou com algum cliente não muito distante do AP, é provável que a segunda solução já ofereça uma solução satisfatória. Neste trabalho serão empregadas medições apenas com as estações cliente, entretanto, esta é uma característica flexível da proposta.

Os valores de carga e ruído nos canais são passados para o algoritmo de seleção na forma de dois vetores, um para a carga e outro para o ruído. Cada posição em cada vetor representa o valor médio para a carga ou ruído em um canal específico. Para organizar as informações dessa maneira, o mecanismo SDC calcula a média dos vários resultados de medição para a carga e ruído de cada canal fornecidos pelos seus clientes.

Uma vez que o mecanismo SDC, executado pelo AP, obtém as informações sobre a capacidade e qualidade dos canais disponíveis para a alocação com os seus clientes, o

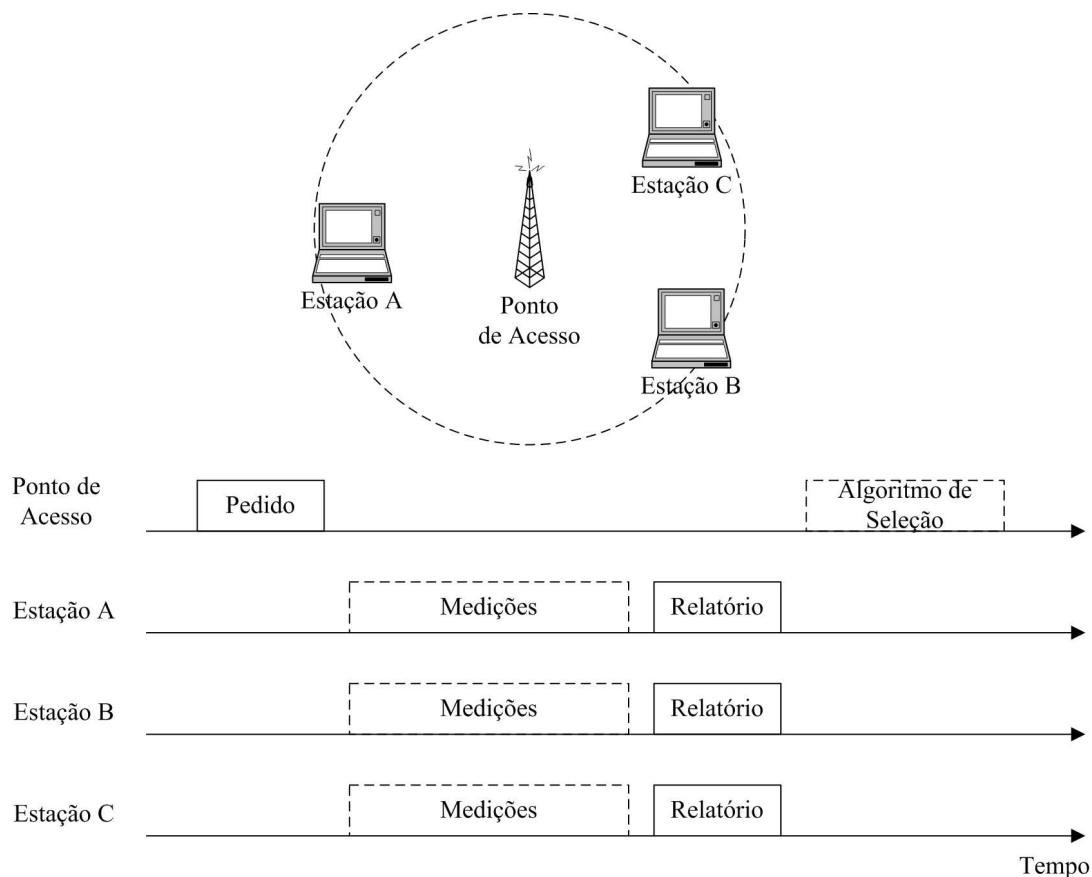


Figura 3.3: Linha do tempo do processo de medição dos canais disponíveis.

mesmo pode dar início à execução do algoritmo de seleção de canal. O algoritmo, como foi citado anteriormente, é uma heurística que procura um canal de operação com menores níveis de utilização, de acordo com a informação do nível de carga, e menores níveis de interferência co-canal, de acordo com a informação do nível de ruído.

Em cada BSS i , utilizando o canal c_i , existirá um vetor O_i com os valores de ocupação média e um vetor R_i com os valores de ruído médio em cada canal disponível. Estes são os vetores de carga e ruído obtidos através das medições explicadas anteriormente. Inicialmente o algoritmo verifica, na linha 1, se o nível de ocupação no canal de operação atual $O_i(c_i)$ ultrapassa um limiar de tolerância a ocupação α . Se o valor for maior que α , considera-se que existe muito compartilhamento do canal e que é necessária uma busca por um canal menos ocupado. Se o nível de carga não ultrapassa o limiar de tolerância α , considera-se que uma mudança de canal é desnecessária. O parâmetro α controla diretamente o quão agressiva será a operação do mecanismo de SDC, impedindo que

pequenos compartilhamentos de canal façam um BSS procurar um novo canal.

Quando a condição da linha 1 é satisfeita, o algoritmo executa as linhas 2 e 3. Na linha 2 seleciona-se, dentre os canais disponíveis para a alocação de canal existentes em N_i , os n canais com menores níveis médios de ocupação de acordo com a informação presente em O_i . Depois disso, dentre os n canais selecionados na linha 2, escolhe-se aquele com o menor nível de ruído de acordo com a informação presente em R_i . Desta forma, procura-se um canal com baixos níveis de ocupação e ruído, onde conseqüentemente existirão baixos níveis de compartilhamento do acesso ao meio e de interferência co-canal.

Algoritmo de Seleção de Canal do SDC

Notação:

i = identificador do BSS

c_i = canal do BSS(i)

O_i = vetor dos níveis médios de ocupação medidos pelos nós do BSS i

R_i = vetor dos níveis médios de ruído medidos pelos nós do BSS i

N_i = vetor dos canais disponíveis para a alocação no BSS i

Algoritmo no BSS i :

1: **se** $\{O_i(c_i) > \alpha\}$ **faça**

2: Seleciona em N_i os n canais com menor ocupação segundo O_i

3: Dentre os n canais selecionados, escolhe-se aquele com menor ruído segundo R_i

4: **caso contrário**

5: Mantenho o canal atual

6: **fim se**

Portanto, o algoritmo de seleção de canal possui três etapas básicas. Primeiro, ele verifica se a ocupação no canal de operação atual do BSS ultrapassa o limite de tolerância ao compartilhamento. Se a ocupação ultrapassa a tolerância, o algoritmo entra na etapa dois, onde seleciona os n canais com menores níveis de ocupação, incluindo na busca o canal atual. Por fim, na etapa três, dos n canais selecionados o algoritmo escolhe aquele com o menor nível de ruído.

Assim, como foi previsto na proposta inicial, a idéia é selecionar canais com menores níveis de carga e menores níveis de ruído. Entretanto, existe um problema na tarefa de medição do nível de carga que causaria incoerência no funcionamento do algoritmo. Como foi apresentado, o nível de carga indica a porcentagem de tempo que o canal permaneceu ocupado durante o período de medição. Esta medição não distingue o tráfego de outros BSSs do que é gerado pelas estações do BSS do nó medidor. A carga gerada dentro do próprio BSS não representa interferência entre BSSs distintos, que é o alvo do mecanismo de seleção de canal. Portanto, modificamos o cálculo realizado para a obtenção da carga com o objetivo de minimizar o problema. Para isto, durante a medição, o nó medidor deve verificar o identificador do BSSs presente nos pacotes que ele consegue decodificar, se o tráfego é originado no seu próprio BSS, ele não contabiliza o mesmo para o cálculo da ocupação. Desta forma, pelo menos o tráfego da rede que pode ser decodificado não é contabilizado como interferência.

Deve-se ressaltar que esta solução apenas minimiza o erro na medição da carga, pois é possível que o tráfego gerado por uma estação cliente não consiga ser decodificado por outras estações do mesmo BSS. Entretanto, este tipo de problema irá ocorrer apenas em alguns casos particulares, onde as estações estão posicionadas de lados opostos do AP. Além disso, o parâmetro α do algoritmo de seleção de canal pode ser ajustado para tolerar estes possíveis erros na medição.

De acordo com o diagrama da Figura 3.1, uma vez que o canal de operação é selecionado pelo algoritmo, o mesmo precisa ser informado às estações cliente. O AP realiza esta tarefa utilizando uma mensagem de *beacon* indicando o novo canal a ser utilizado por suas estações cliente. Ao receber a mensagem, os clientes realizam a mudança de canal acompanhando a decisão do seu AP.

A mudança de canal não é uma tarefa instantânea, portanto, pode representar algum impacto no desempenho de um determinado nó 802.11 devido ao tempo gasto para a transição de canal. Este tempo é muito dependente do tipo de *hardware* utilizado pelo dispositivo 802.11 e é oriundo do tempo de resposta dos circuitos eletrônicos responsáveis pela re-configuração do rádio com a mudança de canal. A Tabela 3.1 apresenta o tempo gasto por uma mudança de canal em diferentes tipos de *chipsets* 802.11 [2].

Fabricante	<i>Chipset</i>	<i>Driver</i>	Latência
ZoomAir	Prism 2.5	hostap	20 ms
Cisco	Aironet	airo_cs	10 ms
Netgear	Atheros	madwifi	6 ms
Intel	Intel	ipw	200 μ s

Tabela 3.1: Tempo gasto em uma mudança de canal para diferentes *chipsets* 802.11.

Pode-se perceber que há uma grande variação do tempo gasto nas mudanças de canal pelos diferentes dispositivos 802.11. Entretanto, no caso do mecanismo SDC estes valores ficam relativamente pequenos devido à periodicidade utilizada pelo mecanismo de SDC. A idéia da proposta é a mesma apresentada em [19], de que o mecanismo seja executado em intervalos de tempo da ordem de minutos. Isto torna os tempos perdidos pelas mudanças de canal realizadas para a medição e re-alocação de canal desprezíveis. Portanto, não ocasionam um grande impacto no desempenho da rede.

Com o término da execução do mecanismo SDC, o BSS terá escolhido o melhor canal de operação de acordo com as informações sobre o compartilhamento e ruído. A execução do mecanismo de seleção deve ser periódica visando uma adaptação dinâmica às mudanças de topologia e demanda presentes no cenário em questão. Esta idéia inicial do mecanismo SDC é interessante por ser capaz de se adaptar dinamicamente às mudanças de topologia e demanda de tráfego com a sua execução periódica. Entretanto, ela não é capaz de cobrir variações rápidas na demanda de tráfego dos BSSs devido ao seu intervalo de execução da ordem de minutos. Com isso, variações bruscas das demandas de tráfego podem não ser captadas causando interferência indesejável nas comunicações.

Pensando neste problema, foi proposta uma versão alternativa para o mecanismo SDC. O processo de obtenção de informação sobre os canais disponíveis e parte do algoritmo de seleção de canal foram modificados para responder mais rapidamente às mudanças nas demandas de tráfego e topologia. Este novo mecanismo foi denominado SDCD (Seleção Dinâmica de Canal Disparada) e será apresentado na próxima seção.

3.3 Mecanismo de Seleção Dinâmica de Canal Disparada (SDCD)

Nesta variação do SDC, duas mudanças foram aplicadas ao mecanismo: uma no processo de obtenção da interferência presente nos canais disponíveis; outra no algoritmo de seleção de canal. Estas mudanças permitem que uma maior quantidade de informação sobre o canal que está sendo utilizado atualmente pelo BSS seja obtida e utilizada pelo mecanismo de seleção de canal.

O processo de medição agora é uma tarefa constante nos nós de cada BSS. Uma vez que medições do nível de ocupação presente no canal não influenciam a comunicação dos nós de cada rede, o mecanismo SDC faz com que os nós clientes de todos os APs gerem relatórios mais freqüentes com a informação sobre a ocupação presente no canal de operação atual. Portanto, em um intervalo de tempo pequeno, da ordem de alguns poucos segundos, as estações cliente irão gerar relatórios sobre o nível de ocupação no canal de operação.

A informação sobre a ocupação no canal de operação atual era utilizada durante o primeiro passo do algoritmo SDC, que decidia se era necessário realizar uma mudança de canal de acordo com a ocupação do canal de operação atual. Antes, esta informação era obtida imediatamente antes da execução do algoritmo de seleção de canal, com uma periodicidade da ordem de minutos. Com isto, ela refletia apenas o estado do canal de operação durante um pequeno intervalo de tempo em que se realizava a varredura dos canais disponíveis para a alocação. Agora, a medição da carga no canal atual de operação da rede pode ser mais freqüente, e a informação utilizada para decidir a necessidade de realizar uma mudança de canal, mais precisa.

A Figura 3.4 mostra o processo de operação do mecanismo SDCD. Pode-se perceber que o canal de operação fica sendo constantemente medido pelos nós da rede que reportam ao AP a carga no canal durante a última janela de medição. Ao receber os relatórios, o AP verifica então se a ocupação média do canal ultrapassou o limiar de tolerância α . Somente quando o limiar é ultrapassado é que o AP envia os pedidos de medição de carga e ruído de todos os canais disponíveis para a alocação e executa o algoritmo de seleção de canal.

Neste caso, uma nova versão do algoritmo de seleção de canal é utilizada, onde apenas as linhas dois e três do algoritmo utilizado pelo SDC precisam ser executadas.

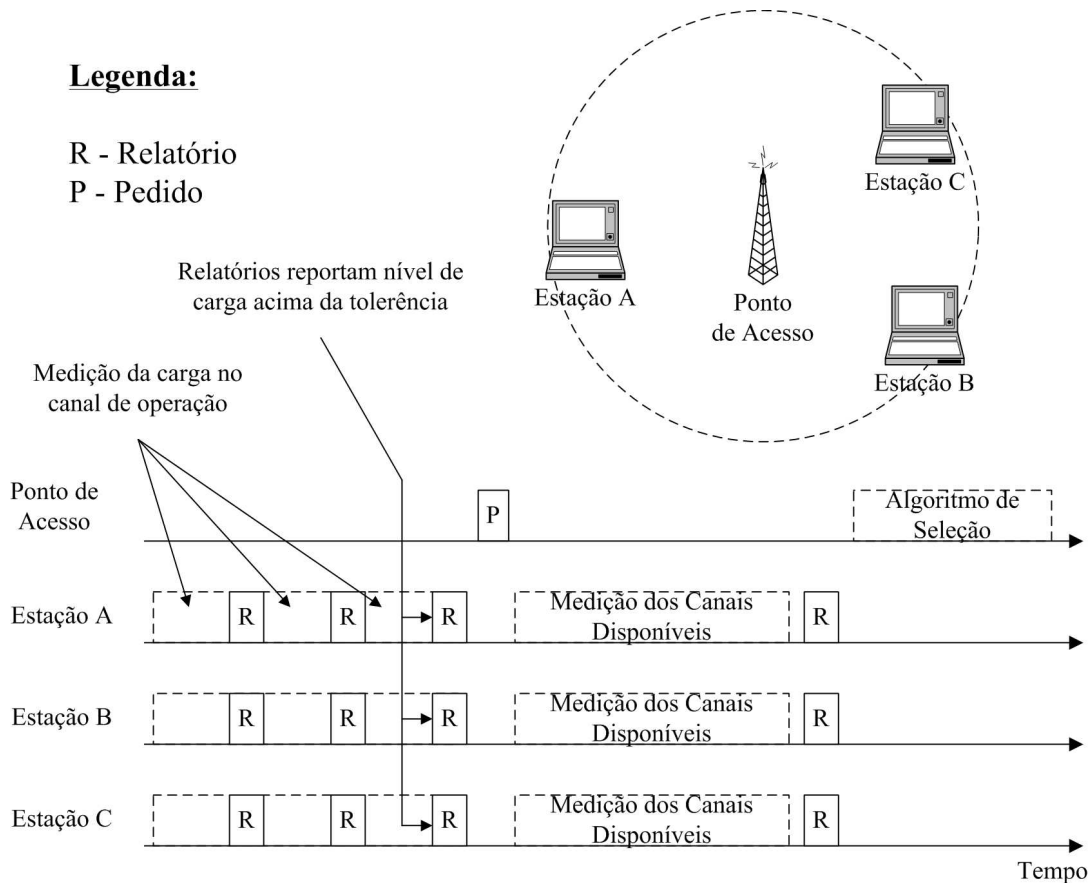


Figura 3.4: Linha do tempo da operação do SDCD.

O objetivo desta modificação no mecanismo SDC é permitir que mais informações sobre o canal de operação atual da rede sejam obtidas. Assim, a varredura de todos os canais disponíveis para a alocação de canal, que faz os nós do BSS saírem do canal de operação da rede para realizar medições, só é necessária quando se detecta que o nível de ocupação no canal atual de operação da rede é ultrapassado. Desta forma, quando um BSS escolhe um canal onde a interferência por compartilhamento do acesso ao meio com outros BSSs fica abaixo do limiar de tolerância α , não é necessária a busca por um novo canal de operação. Além disso, é possível também que as mudanças nas demandas de tráfego sejam captadas mais rapidamente pelas medições constantes e mais frequentes do canal de operação atual da rede.

A avaliação de desempenho dos dois mecanismos propostos foi realizada através de

Algoritmo de Seleção de Canal do SDCD

Notação:

i = identificador do BSS

c_i = canal do BSS(i)

O_i = vetor dos níveis médios de ocupação medidos pelos nós do BSS i

R_i = vetor dos níveis médios de ruído medidos pelos nós do BSS i

N_i = vetor dos canais disponíveis para a alocação no BSS i

Algoritmo no BSS i :

1: Selecciona em N_i os n canais com menor ocupação segundo O_i

2: Dentre os n canais seleccionados, escolhe-se aquele com menor ruído segundo R_i

experimentos com simulador de redes ns-2 [20]. O ns-2 é uma ferramenta poderosa para a análise e simulação de redes, baseia-se em um escalonador de eventos discretos e na simulação de redes no nível de pacotes. Entretanto, para a avaliação dos mecanismos propostos e para a comparação com os outros existentes na literatura, várias modificações foram inseridas no simulador com o objetivo de tornar a operação dos mecanismos possível e os resultados mais realistas.

3.4 Implementação no NS-2

Algumas funcionalidades precisaram ser inseridas no simulador de redes ns-2 para que a realização dos testes que serão apresentados no capítulo 4. A primeira modificação necessária foi a inserção dos efeitos gerados pela interferência co-canal entre estações. Esses efeitos nocivos foram adicionados fazendo com que os nós fora do alcance de detecção da portadora do nó transmissor contabilizassem a contribuição de potência gerada pelo pacote interferente durante a sua transmissão. Desta forma, permitiu-se que transmissões gerassem interferência co-canal nos nós fora do seu alcance de detecção de portadora, elevando o nível de ruído presente no canal durante a sua transmissão e diminuindo a SINR nas comunicações dos nós interferidos.

A implementação do 802.11 presente no ns-2 é destinada a cenários com redes *ad hoc*. Para simular uma rede 802.11 infra-estruturada, todo o tráfego gerado pelos protocolos de roteamento *ad hoc* foi eliminado utilizando-se o módulo NOAH (*NO Ad Hoc routing*) [27]. Este módulo permite apenas a comunicação direta com os vizinhos imediatos de cada nó, ele impede a comunicação de múltiplos saltos. Além disso, ele não gera nenhum tipo de mensagem de controle como os outros protocolos de roteamento existentes para as redes 802.11 no modo *ad hoc*. Logo, com este módulo habilitado, pode-se garantir que nenhum tráfego indesejado seja gerado.

Com o simulador ns-2 também não é possível realizar a troca do canal de operação durante a execução de uma simulação. Esta é uma das tarefas essenciais para a implementação das propostas de seleção dinâmica de canal. Além da mudança propriamente dita, devido à operação dos mecanismos de seleção de canal, também é necessário que os nós da rede possam mudar de canal para a realização das medições requisitadas pelos mecanismos de seleção de canal. Por isso, a possibilidade de mudança de canal também foi inserida no simulador ns-2. Vale ressaltar que nesta implementação, não foi levado em conta o tempo de transição existente na prática, e apresentado na Tabela 3.1. Na implementação realizada, as transições de canal ocorrem instantaneamente.

Outra característica essencial para a avaliação das propostas de seleção de canal implementadas no simulador foi a capacidade de obter as informações oriundas das medições nos canais disponíveis. Foram criados módulos para a medição de carga e ruído, empregadas na proposta deste trabalho, e para a detecção de estações de outros BSSs, utilizada pela proposta [19]. Estas medições atendiam a todas as restrições citadas no capítulo 2 e neste capítulo.

Além dessas funcionalidades apresentadas, também foram implementadas as duas propostas apresentadas neste trabalho, SDC e SDCD, e a proposta distribuída apresentada em [19]. A versão distribuída da proposta presente em [19] foi inserida no simulador de acordo com as especificações e definições presentes no artigo em questão. Para os mecanismos SDC e SDCD, as suas implementações seguiram as descrições das Seções 3.2 e 3.3, e os valores dos parâmetros utilizados em cada um deles serão apresentados no capítulo 4 juntamente com os resultados e discussões sobre os testes realizados.

Capítulo 4

Resultados e Discussões

Este trabalho mostrou que existe uma demanda de técnicas e ferramentas para o problema da alocação de canal em redes IEEE 802.11 independentes. Visando esta demanda, foram propostos dois mecanismos de seleção automática e dinâmica de canal para estas redes. Tais mecanismos têm o objetivo de solucionar o problema da alocação de canal em cenários com redes independentes, e atendem às restrições impostas por este tipo de cenário.

De posse das propostas e de suas implementações no simulador de redes ns-2, foi possível a realização de simulações para a avaliação do desempenho dessas propostas. Os resultados obtidos com as simulações para a avaliação dos diferentes mecanismos de seleção dinâmica de canal implementados no ns-2 e as discussões a respeito são o escopo deste capítulo que, inicialmente, apresenta as principais características das simulações realizadas e da metodologia empregada na obtenção dos resultados. Em seguida, serão apresentadas as simulações realizadas com os três diferentes tipos de mecanismo de seleção automática de canal implementados no ns-2: as duas propostas de seleção dinâmica de canal deste trabalho, SDC e SDCD, e a proposta distribuída apresentada em [19] e discutida na seção 2.2.2, denominada *Hminmax*.

4.1 Ambiente de Simulações e Metodologia

Para realizar a avaliação de desempenho dos mecanismos de seleção de canal para redes independentes, utilizou-se o simulador de redes ns-2 [20]. Esta ferramenta é capaz de simular a operação de diversos tipos de rede, como as redes 802.11. Para isto, ele utiliza um escalonador de eventos discretos que agenda os eventos do funcionamento de uma rede pacote a pacote, permitindo que simulações com certo nível de detalhamento sejam realizadas. Entretanto, foram necessárias mudanças ao código original do simulador para a avaliação correta dos efeitos gerados pelas diferentes alocações de canal analisadas. Para isto, as modificações descritas na seção 3.4 foram inseridas buscando fornecer maior realismo às simulações e também permitindo a correta implementação dos mecanismos de seleção de canal.

Além disto, para avaliar os mecanismos de seleção de canal em cenários com redes 802.11 independentes, foi necessário reproduzir cenários com características típicas dessas redes. Para realizar esta tarefa, os nós, APs e clientes, foram posicionados aleatoriamente dentro de uma área retangular de 1000 metros por 4000 metros, respeitando as três restrições descritas na seção 2.1.2: distância mínima entre APs; distância máxima entre clientes e AP; e distância mínima entre clientes. Desta forma, buscou-se criar cenários parecidos com os que ocorrem na prática nos casos onde existem redes independentes. Foram realizados alguns testes variando os três parâmetros de posicionamento citados anteriormente. Entretanto, eles não causaram um impacto significativo nos resultados obtidos. Por isto, os seus valores foram mantidos fixos nos valores apresentados na Tabela 4.1.

Em cada experimento foi variada a quantidade de BSSs presentes dentro da área retangular de 1000 metros por 4000 metros. A variação deste parâmetro é importante, pois uma das características dos cenários com redes independentes é a diversidade na densidade de BSSs presentes em cada região [1, 2]. Portanto, foram gerados cenários com diferentes quantidades de BSSs, como descrito na Tabela 4.1 e, com isso, foi possível avaliar o desempenho dos mecanismos de alocação de canal para diferentes densidades. Para cada quantidade de BSSs foram criados 50 cenários diferentes obedecendo as regras de posicionamento descritas na seção 2.1.2. Isto possibilitou a execução de vários expe-

Parâmetros Gerais	
Duração da simulação	300 s (FTP) e 600 s (HTTP)
Tipo de tráfego	FTP ou HTTP
Tipo de alocação	Mesmo canal, Aleatória, <i>Benchmark</i> , Hminmax, SDC e SDCD
Parâmetros do 802.11	
Número de canais	3 canais não sobrepostos
Taxa de dados	11 Mbps
Taxa básica	1 Mbps
Ruído de fundo	10^{-13} Watts
Limiar de RTS	3000 bytes
Parâmetros da Topologia	
Área de teste	1000 x 4000 metros quadrados
Quantidades de BSS por cenário	4, 6, 8, 10, 12 e 14 BSSs
Estações por BSS	5 estações
Distância mínima entre APs	150 metros
Distância mínima entre STAs	50 metros
Distância máxima entre STA e AP	150 metros
Parâmetros do Tráfego	
Tamanho do pacote TCP	1500 bytes
Parametrização do tráfego HTTP	Tabela 4.2
Parâmetros dos Mecanismos	
Medição de cada canal (Durante varredura)	150 ms
Intervalos de execução do SDC	60 s em média
Parâmetro α do SDC e SDCD	20%
Parâmetro n do SDC e SDCD	1, 2 e 3 canais
Intervalo entre relatórios periódicos no SDCD	5 segundos

Tabela 4.1: Parâmetros de simulação.

rimentos para cada densidade de BSSs e a apresentação dos resultados com intervalos de confiança de 95%.

Buscou-se garantir intervalos de confiança suficientemente pequenos nos experimentos realizados. Para isto, foi executado um número de cenários de simulação para cada configuração de densidade de BSSs que garantisse intervalos de confiança menores que 5% do valor médio das amostras. Este resultado foi obtido verificando-se o intervalo de confiança das amostras já obtidas a cada rodada de uma mesma configuração dos experimentos. O valor do intervalo de confiança tende a diminuir devido ao aumento do número de cenários diferentes executados e porque os resultados obtidos possuem uma tendência a um determinado valor médio. Assim, quando o intervalo de confiança ficava abaixo de 5% do valor médio das amostras, encerrava-se a simulação daquela configuração, dando prosseguimento às outras configurações pendentes. Foi garantido um mínimo de 20 e permitido um máximo de 50 rodadas de simulação para cada quantidade de BSSs simulado.

Foram realizados experimentos utilizando dois tipos de tráfego diferentes: FTP e HTTP. A simulação do tráfego FTP consistiu da abertura de uma conexão TCP durante toda a simulação entre cada cliente e seu respectivo AP. O tráfego foi gerado no sentido do AP para o cliente (*downlink*) representando um *download* de um arquivo grande durante todo o experimento. O objetivo do uso deste tipo de tráfego foi atingir o máximo da capacidade de utilização da rede em cada BSS, já que o protocolo TCP é capaz de atingir toda a capacidade da rede com algumas flutuações. Desta forma é possível maximizar os efeitos de interferência mútua entre BSSs, tornando possível a avaliação do aproveitamento dos recursos da rede.

O uso do outro tipo de tráfego, o HTTP, permitiu a avaliação do desempenho dos mecanismos de seleção de canal em cenários onde a carga de tráfego de cada BSS é bastante variável. Foi utilizado o módulo de geração de tráfego *web cache* do ns-2, que foi parametrizado com as distribuições apresentadas na Tabela 4.2 [28]. Este modelo utiliza os seguintes parâmetros: tamanho dos objetos de cada página, que define através de uma distribuição lognormal truncada o tamanho dos objetos de cada página; quantidade de objetos por página, que define com uma pareto truncada a quantidade de objetos de cada página; e os tempos de processamento e leitura de cada página, que define através de

distribuições exponenciais o tempo gasto no processamento e na visualização de cada página que foi baixada.

Parâmetros do Tráfego HTTP		
Parâmetro	Distribuição	Características
Tamanho dos Objetos	Lognormal Truncada	Média = 7758 bytes Desvio = 126168 bytes Mínimo = 50 bytes Máximo = 2 Mbytes
Objetos por Página	Pareto Truncada	Média = 5,64 Máximo = 53
Tempo de Leitura	Exponencial	Média = 30 segundos
Tempo de Processamento	Exponencial	Média = 0,13 segundos

Tabela 4.2: Parametrização do tráfego http.

As simulações utilizando o tráfego HTTP ocorreram de duas maneiras distintas. Em uma delas, foi utilizada uma sessão HTTP em cada cliente de cada BSS durando todo o experimento. Na outra, além da seção HTTP em cada cliente de cada BSS, também foi inserido um fluxo de tráfego FTP em um dos clientes de cada BSS. O tráfego HTTP é uma aplicação típica em redes 802.11 e, como foi dito no capítulo 2, a variação da demanda nos BSSs também influencia na alocação de canal, porque modifica os efeitos causados pela interferência nos BSSs.

Além dos parâmetros de simulação citados anteriormente, a Tabela 4.1 também apresenta as demais configurações que não foram variadas nos experimentos que serão apresentados neste trabalho. As próximas seções deste capítulo apresentam os resultados e as discussões a respeito de cada teste realizado. Estes experimentos permitirão a avaliação dos mecanismos de seleção de canal e seus parâmetros de configuração mais importantes.

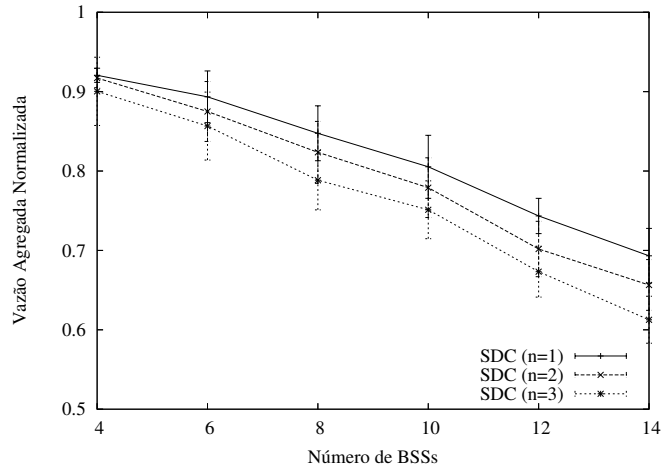
4.2 Avaliação do Parâmetro n

Um parâmetro dos algoritmos de seleção de canal, que é utilizado nos mecanismos SDC e SDCD, avaliado neste trabalho é o parâmetro n . Ele indica a importância que será dada à interferência co-canal durante a seleção de canal. Com um valor de n muito baixo, prioriza-se apenas os efeitos do compartilhamento do acesso ao meio no momento da seleção do canal de operação. Com um valor mais alto, permite-se que os efeitos da interferência co-canal também sejam contabilizados durante a seleção.

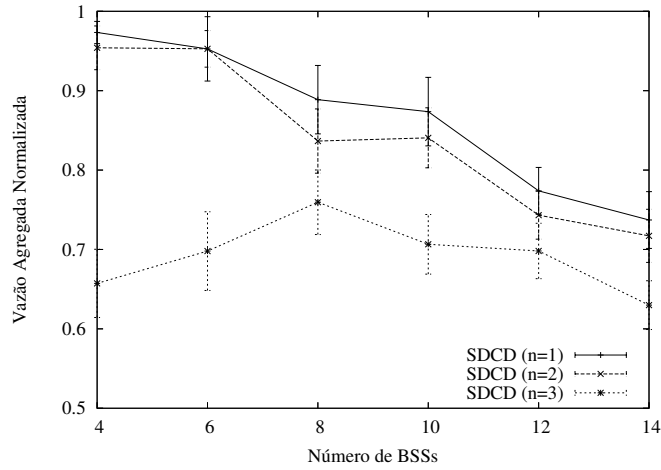
Para avaliar o efeito do parâmetro n , foram realizadas simulações com tráfego FTP e os diferentes valores de n permitidos para o caso do uso de três canais de operação. Desta forma, com n igual a um, apenas os efeitos do compartilhamento do acesso ao meio são levados em consideração pelo algoritmo de seleção de canal. Entretanto, com n igual a três apenas os efeitos da interferência co-canal eram contabilizados na escolha do canal de operação.

A Figura 4.1 apresenta os resultados para a vazão agregada normalizada com os diferentes valores de n nos mecanismos SDC e SDCD. A vazão agregada, como foi descrita na seção 2.1.2, é o somatório de todas as vazões de todos os fluxos de tráfego presentes em cada simulação, e representa o nível de utilização da capacidade agregada do meio.

Os resultados de vazão agregada foram normalizados em relação ao desempenho de um único BSS isolado. Este valor foi obtido através de simulações com um único BSS utilizando tráfego FTP de longa duração para cada cliente. Foram realizadas 50 rodadas de simulação de cenários com um único BSS e o resultado obtido foi uma vazão média de 4,5483 Mbps com um intervalo de confiança de 95% em 0,0038 Mbps. Este valor representa a capacidade máxima que pode ser atingida por um BSS quando não existe nenhum fenômeno de interferência entre BSSs prejudicando o desempenho. Desta forma, este valor foi utilizado para normalizar os resultados de acordo com a equação 4.1, onde: k é o número de BSSs no cenário; V_{BSSi} é a vazão do BSS i ; e $V_{BSSisolado}$ é o valor de vazão obtido experimentalmente para um BSS isolado. Quanto mais próximo de um estiver o resultado obtido, menor terá sido a interferência que afetou o BSS.



(a) Mecanismo SDC



(b) Mecanismo SDCD

Figura 4.1: Vazão Agregada Normalizada variando-se n .

$$Vazão\ Agregada\ Normalizada = \frac{\sum_{i=1}^k V_{BSSi}}{k \times V_{BSSi\text{isolado}}} \quad (4.1)$$

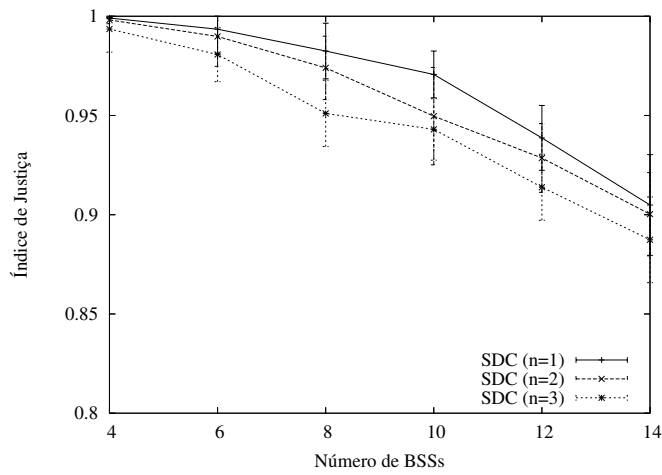
Com os resultados para vazão agregada pode-se perceber que, de maneira geral em ambos os mecanismos de seleção de canal, o aumento da densidade gerou uma diminuição na vazão agregada normalizada. Isto ocorre, pois o aumento da quantidade de BSSs em uma determinada região faz com que ocorra um aumento da interferência e, com isso, uma redução no desempenho. Além disso, os mecanismos SDC e SDCD apresentaram, na média, melhor desempenho com valores de n igual a um. Como o parâmetro n indica

o grau de relevância que se dá a cada um dos dois tipos de interferência, este resultado mostra que, para a vazão agregada, o parâmetro que mais influenciou no desempenho foi o compartilhamento do acesso ao meio. Outra característica que pode ser observada no resultado para vazão agregada do mecanismo SDCD é que com a utilização de n igual a três, os resultados ficaram bem abaixo dos outros valores de n em quase todos os pontos. Isto evidencia que, quando o SDCD utilizou valores de n maiores aumentando o peso da informação a respeito da interferência co-canal, as escolhas de canal foram piores, provocando uma queda de desempenho.

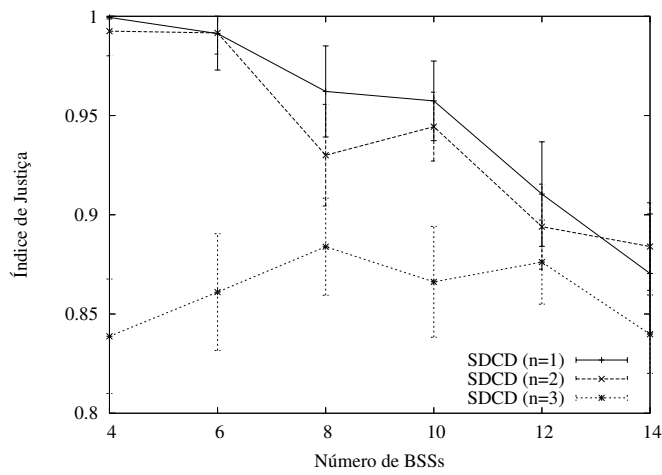
A Figura 4.2 apresenta os resultados para o índice de justiça entre as vazões médias dos BSSs. Como foi descrito na seção 2.1.2, esta métrica indica se houve justiça no compartilhamento da capacidade do meio entre os BSSs. Pode-se perceber que, assim como no caso da vazão agregada, o SDC e o SDCD apresentam, na média, melhor desempenho para o índice de justiça quando utilizam n igual a um. Os resultados obtidos para esta métrica mostram que, para um compartilhamento justo de banda entre os BSSs, é melhor escolher o canal de operação levando em conta os efeitos do compartilhamento da capacidade.

Outra métrica avaliada foi o número de mudanças de canal, que indica o número total de trocas de canal realizadas em cada experimento. De acordo com os resultados obtidos (Figura 4.3), de maneira geral, quando os mecanismos SDC e SDCD utilizaram n igual a um, foram necessárias menos mudanças de canal. Isto ocorreu porque as decisões de mudança de canal tomadas a partir das informações de compartilhamento do acesso ao meio foram mais corretas e, portanto, menos mudanças foram necessárias em cada cenário.

Estes resultados mostram que para os cenários avaliados é mais importante que se priorizem os efeitos do compartilhamento do acesso ao meio durante a seleção de canal. Isto porque, os efeitos da interferência co-canal não chegam a prejudicar o desempenho das redes nestes cenários testados. Desta forma, nos próximos testes realizados, o parâmetro n dos algoritmos de seleção de canal SDC e SDCD será configurado em um, fazendo com que apenas os efeitos da interferência gerada a partir do compartilhamento do canal sejam levados em conta pelo algoritmo de seleção de canal. Entretanto, isto não implica



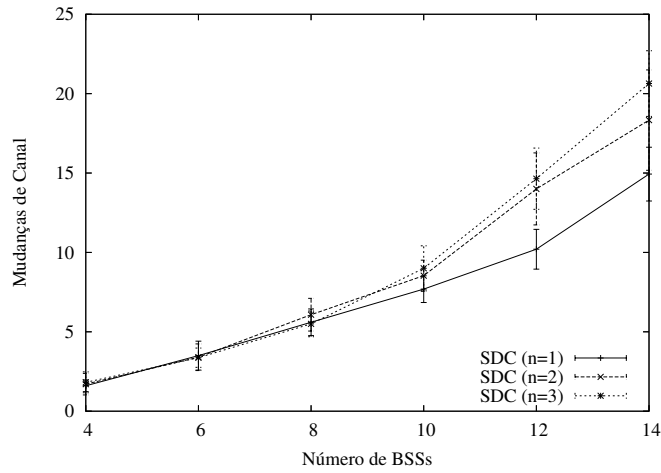
(a) Mecanismo SDC.



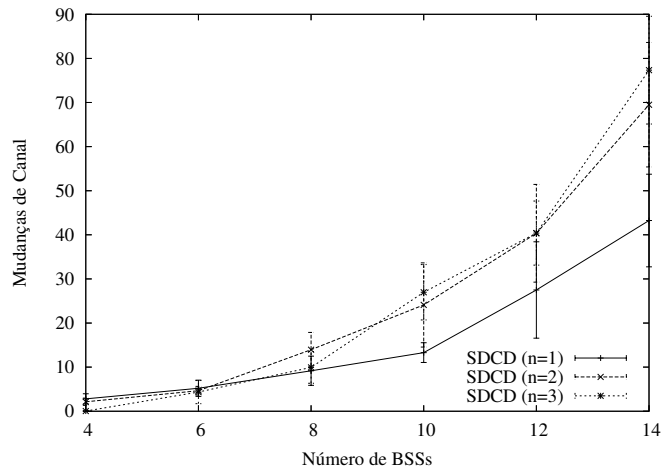
(b) Mecanismo SDCD.

Figura 4.2: Índice de justiça entre as vazões médias dos BSSs variando-se n .

que em outros cenários a interferência co-canal não seja um fator relevante no processo de alocação. Pode existir cenários onde a interferência co-canal também represente uma ameaça para o desempenho das redes.



(a) Mecanismo SDC.



(b) Mecanismo SDCD.

Figura 4.3: Número total de mudanças de canal variando-se n .

4.3 Comparação dos Mecanismos de Seleção de Canal com Tráfego FTP

O experimento mais importante deste trabalho é aquele que permite comparar o desempenho das diferentes propostas de mecanismos de seleção de canal implementados no ns-2. A comparação apresentada nesta seção foi realizada utilizando-se tráfego FTP de longa duração em cada cliente durante todos os 300 segundos de cada experimento. As Figuras 4.4, 4.5 e 4.6 apresentam, respectivamente, os resultados para as métricas de: vazão agregada normalizada, índice de justiça e número de mudanças de canal.

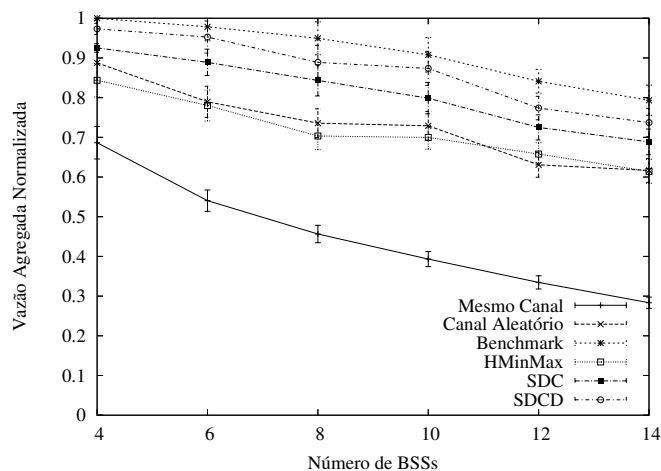


Figura 4.4: Vazão agregada normalizada para os diferentes mecanismos de alocação de canal com tráfego FTP.

De acordo com os resultados para vazão agregada (Figura 4.4), pode-se perceber que os mecanismos SDC e SDCD foram os que obtiveram desempenho mais próximo da ferramenta *benchmark*, que fornecia uma alocação de canal ótima. Estes resultados mostram que os mecanismos propostos neste trabalho cumprem o objetivo proposto para a vazão agregada, que é utilizar melhor os recursos do meio de comunicação. Além disso, percebeu-se um melhor desempenho, na média, do mecanismo SDCD, que apresentou ganhos de até 18% no melhor caso em relação ao mecanismo *Hminmax* e de até 48% em relação à alocação do mesmo canal nos BSSs. Isto ocorreu, porque este mecanismo consegue responder mais rapidamente aos problemas de interferência do que o SDC. O SDCD, de acordo com a sua configuração pode detectar e resolver um problema de interferência com um intervalo máximo de 5 segundos, enquanto o SDC, devido à sua periodicidade, pode levar até 60 segundos para resolver uma interferência. Com isso, quando os BSSs utilizam o SDCD podem chegar mais rapidamente a uma alocação de canal satisfatória.

O mecanismo *Hminmax* obteve resultados para a vazão agregada apenas, na média, um pouco acima dos apresentados pela simples alocação aleatória, ficando com um desempenho inferior ao SDC e SDCD. Uma das limitações da proposta *Hminmax*, que foi o fator responsável pelo baixo desempenho na vazão agregada, é a ineficiência em captar os problemas de interferência durante a montagem do grafo de interferência. Para montar o grafo de interferência, as estações de cada BSS levam em conta apenas os pacotes

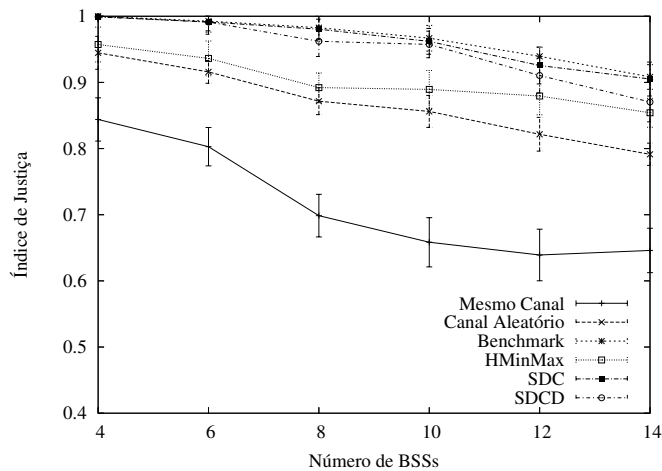


Figura 4.5: Índice de justiça entre as vazões médias dos BSSs para os diferentes mecanismos de alocação de canal com tráfego FTP.

interferentes que conseguem ser decodificados. Assim, toda a interferência gerada pelos nós presentes na região de detecção da portadora é negligenciada. Portanto, ao utilizar um grafo que não representa a realidade dos problemas de interferência que afetam cada BSS, o *Hminmax* consegue um desempenho inferior ao obtido pelas propostas SDC e SDCD.

As mesmas características apresentadas na vazão agregada são percebidas nos resultados do índice de justiça entre as vazões médias dos BSSs (Figura 4.5). Neste caso, ao resolver os problemas de interferência, os mecanismos SDC e SDCD tornam também a divisão dos recursos do meio de comunicação mais justa. Pode-se perceber, nos valores médios, ganhos de até 30% em relação à alocação do mesmo canal nos BSSs. Já o mecanismo *Hminmax* fica com um desempenho um pouco inferior por não ser capaz de detectar todos os tipos de interferência. Os mecanismos SDC e SDCD fornecem desempenho, na média, até 10% superior ao *Hminmax* nesta métrica. Assim, alguns BSSs, que sofrem interferência que não conseguem detectar, ficam com um desempenho inferior, enquanto outros BSSs, que sofrem apenas interferência detectável pelo *Hminmax*, apresentam um desempenho superior e o compartilhamento dos recursos torna-se injusto.

Com o resultado para o número de mudanças de canal (Figura 4.6) também podem ser obtidas algumas conclusões interessantes. Os mecanismos *Hminmax* e SDC são os que apresentam o menor número de mudanças de canal, comparados ao SDCD. Isto ocorreu,

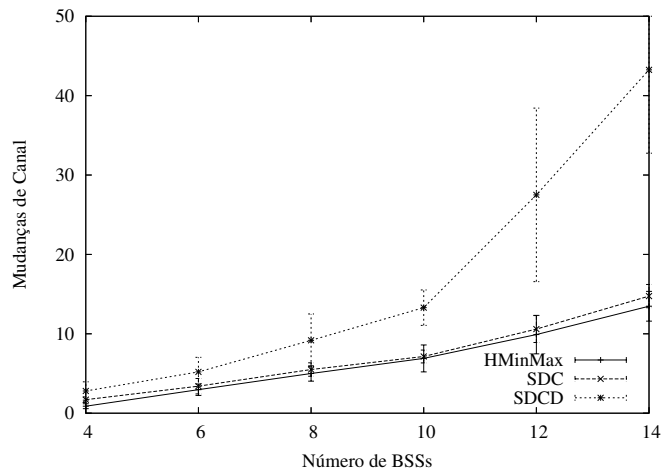


Figura 4.6: Número de mudanças de canal para os diferentes mecanismos de alocação de canal com tráfego FTP.

principalmente, porque com o SDCCD é maior a possibilidade de mudanças de canal, pois o mesmo verifica esta necessidade mais vezes do que o *Hminmax* e o SDC. Além disso, o tráfego TCP gerado pelas aplicações FTP nos clientes de cada BSS apresenta pequenas flutuações, e as mesmas, dependendo do parâmetro α , podem ser captadas pelo SDCCD, que procura uma alocação de canal que se adapte melhor às pequenas variações.

4.4 Comparação dos Mecanismos de Seleção de Canal com Tráfego HTTP

O desempenho dos mecanismos de alocação de canal também foi comparado utilizando tráfego HTTP, simulando nós cliente navegando na *Web*. O objetivo deste teste é de comparar o desempenho dos diferentes tipos e mecanismos de alocação de canal com a utilização de tráfego HTTP, que é uma das principais aplicações das redes 802.11. Este teste forneceu resultados muito próximos para todos os tipos de mecanismos de alocação de canal para a vazão agregada e índice de justiça. Com isso, os gráficos obtidos foram omitidos.

Este comportamento muito próximo dos mecanismos de alocação de canal demonstra

como as demandas de tráfego de cada BSS influenciam na questão da alocação de canal. Quando se utilizou tráfego HTTP nas simulações dos diferentes tipos de alocação de canal, pode-se perceber que elas não influenciaram nos resultados para vazão agregada e índice de justiça. Isto ocorreu porque o fator prejudicial para o desempenho das redes 802.11 é a interferência e, quando a carga de tráfego é muito baixa como a do tráfego HTTP, muito pouca interferência é gerada entre os BSSs. Com isto, os possíveis ganhos de desempenho com o emprego de mecanismos e técnicas de alocação de canal tornam-se desprezíveis.

Entretanto, esta constatação também favorece os mecanismos de alocação dinâmica de canal, uma vez que eles são capazes de captar essas mudanças nas demandas de tráfego e modificar a alocação automaticamente, visando sempre reduzir os prejuízos criados pela interferência fornecendo melhores condições de utilização da capacidade do meio.

4.5 Comparação dos Mecanismos de Seleção de Canal com Tráfego HTTP+FTP

Para conseguir verificar o desempenho dos mecanismos de seleção automática de canal com a utilização de tráfego variável com o tráfego HTTP, foi utilizado em conjunto ao tráfego HTTP um fluxo FTP em cada BSS. Neste novo experimento, o tráfego FTP de fundo foi inserido para gerar interferência entre os BSSs permitindo que os mecanismos de seleção de canal passem a exercer um papel importante no desempenho dos cenários avaliados.

A Figura 4.7 mostra os resultados para a vazão agregada normalizada obtida pelo tráfego HTTP combinado com o FTP de fundo. Neste caso, a vazão agregada das seções HTTP de cada cenário foi normalizada pelo valor de vazão agregada atingida por um BSS isolado sob as mesmas condições de tráfego. Assim como foi descrito na seção 4.2, utilizou-se a equação 4.1.

De acordo com os resultados apresentados na Figura 4.7, pode-se perceber que os mecanismos SDC e SDCC são os que obtêm desempenho mais próximo do obtido com

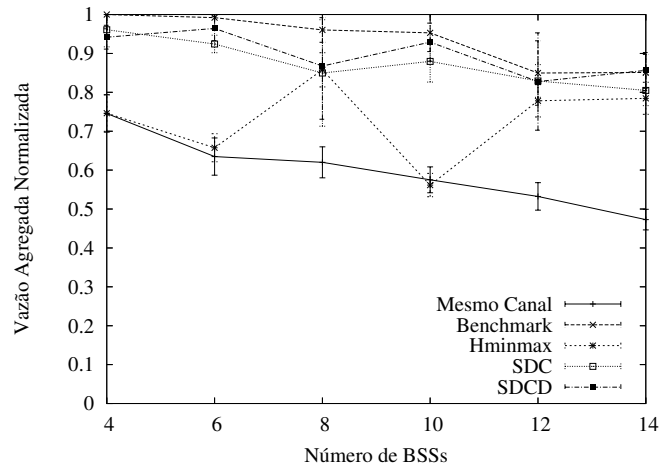


Figura 4.7: Vazão agregada normalizada para os diferentes mecanismos de alocação de canal com tráfego HTTP.

a alocação de canal fornecida pela ferramenta *Benchmark*. Pode-se perceber também que o mecanismo *Hminmax* apresentou um desempenho inferior na média aos mecanismos SDC e SDCD. Foram obtidos ganhos de até 30% com o SDCD em relação ao *Hminmax* e de até 40% em relação ao uso do mesmo canal. Isto é resultado da montagem incorreta do grafo de interferência realizada pelo BSS que utiliza o mecanismo *Hminmax*, que só consegue captar os BSSs interferentes dentro do alcance de recepção.

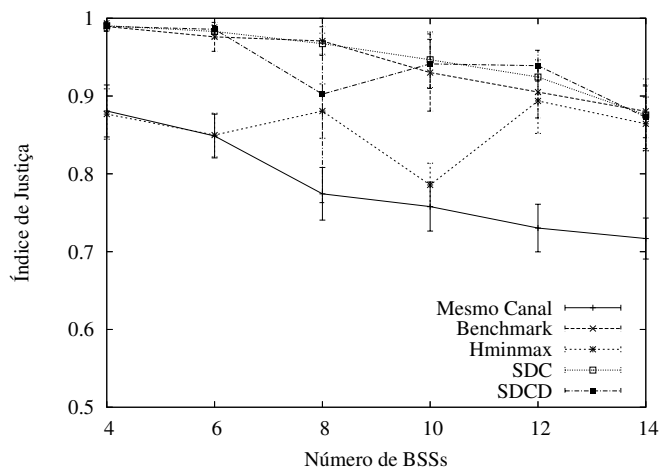


Figura 4.8: Índice de justiça entre as vazões médias dos BSSs para os diferentes mecanismos de alocação de canal com tráfego HTTP.

Já para o caso do índice de justiça entre as vazões agregadas dos BSSs, obteve-se o

gráfico da Figura 4.8. Para esta métrica pode-se perceber praticamente o mesmo desempenho verificado para os resultados de vazão agregada: os mecanismos SDC e SDCD apresentam desempenho próximo ao *Benchmark* e superior ao mecanismo *Hminmax*. Foram obtidos ganhos de até 15% na média em relação ao *Hminmax* e de até 20% em relação ao uso do mesmo canal.

4.6 Resumo dos Resultados

De acordo com os resultados que foram apresentados neste capítulo, foi possível comprovar a superioridade das propostas desenvolvidas no trabalho. O mecanismo SDCD, que obteve melhor desempenho, apresentou ganhos para a vazão agregada com tráfego FTP de até 18% em relação aos resultados obtidos com o *Hminmax* e de até 48% em relação a alocação do mesmo canal de operação nos BSSs. Para o índice de justiça, o SDC e o SDCD apresentaram resultados até 10% melhores que o *Hminmax* e até 30% em relação à alocação do mesmo canal nos BSSs. Ao utilizar tráfego HTTP combinado com tráfego FTP de fundo, os mecanismos SDC e SDCD apresentaram resultados parecidos. Ambos obtiveram desempenho próximo ao obtido com a alocação de canal fornecida pela ferramenta *Benchmark* e superior ao mecanismo *Hminmax*, tanto para vazão agregada, quanto para índice de justiça. Foram obtidos ganhos de até 30% para a vazão agregada e de até 15% para o índice de justiça em relação ao *Hminmax* e de 40% para vazão agregada e de até 20% para o índice de justiça em relação ao uso do mesmo canal nos BSSs.

Estes ganhos de desempenho comprovam a eficácia dos mecanismos de alocação de canal propostos neste trabalho e, além disso, motivam ainda mais o desenvolvimento e aprimoramento das técnicas de alocação de canal.

Capítulo 5

Conclusões e Trabalhos Futuros

A falta de uma alocação de canal apropriada em redes IEEE 802.11 pode trazer grandes prejuízos de desempenho. Problemas como o compartilhamento do acesso ao meio e a interferência co-canal podem reduzir a capacidade agregada das redes e a justiça na alocação de recursos. Estes problemas ainda se agravam em cenários onde existem redes 802.11 independentes, que não possuem uma administração centralizada responsável pela tarefa da alocação de canal. Nestes cenários, que vêm se tornando cada vez mais comuns devido ao aumento do uso das redes 802.11, o problema da alocação de canal é um desafio ainda maior.

Apesar dos cenários com redes 802.11 independentes serem muito comuns, poucos dos mecanismos e técnicas de alocação de canal para redes 802.11 são aplicáveis. Portanto, este trabalho teve o objetivo de propor e avaliar novos mecanismos de alocação automática e dinâmica de canal para as redes 802.11 independentes. Estas propostas foram desenvolvidas levando em conta as restrições impostas por este tipo de cenário e buscando melhorar a utilização dos recursos disponíveis no meio de comunicação.

Este capítulo apresenta as conclusões obtidas com o desenvolvimento e a avaliação das propostas de mecanismos de seleção dinâmica de canal. Além disso, discute os possíveis encaminhamentos da pesquisa em questão, apresentando os trabalhos que ainda se pretende realizar.

5.1 Conclusões

O estudo da alocação de canal em redes 802.11 levantou alguns pontos importantes sobre os problemas que afetam o desempenho das redes IEEE 802.11 independentes operando no modo infra-estruturado. Em primeiro lugar, as fortes restrições impostas pelas características dos cenários com redes 802.11 independentes. Nestes cenários não se pode prever nenhum tipo de comunicação entre os BSSs vizinhos ou até mesmo entre os seus administradores. É muito comum que cada rede possua um administrador diferente e que seja propriedade de instituições distintas. Logo, as técnicas de alocação de canal usuais, que dependem de informações sobre todas as redes de uma região, não se aplicam às redes 802.11 independentes.

O estudo do problema da alocação de canal também envolveu uma pesquisa sobre os diferentes tipos de interferência que afetam as redes 802.11: o compartilhamento da capacidade do meio e a interferência co-canal. Este estudo mostrou como eles podem influenciar no desempenho das redes 802.11 e como é importante que os mecanismos de alocação de canal consigam detectar os mesmos corretamente durante o processo de alocação de canal. Entretanto, de acordo com os resultados obtidos na seção 4.2, percebeu-se que a interferência co-canal não representa uma grande ameaça, pelo menos nos cenários criados para as simulações. Portanto, o uso dos efeitos da interferência co-canal na seleção do canal de operação foi retirado dos mecanismos SDC e SDCD.

A caracterização dos diferentes cenários em que a interferência pode ocorrer em redes 802.11 independentes também foi importante. Mostrou-se que a interferência pode afetar tanto os APs quanto os clientes de cada BSS. Portanto, é importante que a alocação de canal leve em conta, tanto os APs, quanto as estações, no processo de alocação de canal. Além disso, também foi mostrado que a interferência é um parâmetro muito dependente dos padrões de tráfego dos BSSs. A interferência ocorre quando duas estações realizam transmissões simultâneas ou quando ficam impedidas de transmitir por detectarem o meio ocupado. Portanto, quanto menor a carga de tráfego, menor será a probabilidade de transmissões concorrentes e, com isso, menor a probabilidade de interferência.

Visando os problemas caracterizados com o estudo do problema da alocação de canal

em redes IEEE 802.11 independentes, este trabalho propôs dois mecanismos de alocação de canais, o SDC e o SDCD, que são capazes de operar com todas as limitações impostas pelas redes 802.11 e pelos cenários que possuem BSSs independentes. Ambos os mecanismos utilizam funcionalidades do novo padrão IEEE 802.11k, que permite a medição e a troca de diversas características dos canais de operação e do rádio 802.11, para obter as informações necessárias sobre os problemas de interferência e selecionar automaticamente o canal de operação que minimiza tais interferências. Além disso, estes mecanismos operam de maneira dinâmica, permitindo que a alocação de canal seja adaptável às mudanças de topologia e demandas de tráfego, tão comuns em cenários com redes independentes. O SDC e o SDCD representam a contribuição deste trabalho para o problema da alocação de canal em redes 802.11 independentes.

A avaliação dos dois mecanismos de seleção de canal propostos neste trabalho, SDC e SDCD, mostrou que eles atingiram desempenho superior a uma outra proposta existente na literatura (*Hminmax*), e bem próximo do que foi obtido com a ferramenta *Benchmark*. Este foi um resultado bastante favorável para os mecanismos propostos neste trabalho, que utilizando apenas informação local, conseguiram alcançar desempenho bem próximo da alocação fornecida pelo *Benchmark*, que utilizava informação centralizada e global da rede para fornecer a alocação de canal ótima. Além dos ganhos de desempenho, os mecanismos SDC e SDCD ainda possuem a vantagem de fornecerem uma alocação de canal dinâmica e adaptável às constantes mudanças de topologia e demanda de tráfego, muito comuns nos cenários com redes independentes.

5.2 Trabalhos Futuros

Para dar continuidade a este trabalho pretende-se realizar ainda alguns estudos e experimentos:

- utilização de técnicas de *wardriving* para estimar o posicionamento de APs e, com isso, obter cenários de simulação mais realistas;
- comparação de desempenho do SDC e SDCD com outras propostas de seleção

automática de canal presentes na literatura;

- desenvolvimento de protótipos dos mecanismos propostos para realizar experimentos em ambientes reais;
- desenvolvimento de versões centralizadas do SDC e SDCD que obtenham melhor desempenho utilizando informação global;
- busca de uma possível adaptação dos mecanismos de alocação automática de canal para o modo de operação ad hoc das redes 802.11.

Referências Bibliográficas

- [1] AKELLA, A., JUDD, G., SESHAN, S., E STEENKISTE, P. Self-management in chaotic wireless deployments. In *International Conference on Mobile computing and networking (MOBICOM)* (agosto de 2005).
- [2] MISHRA, A., AGRAWAL, D., SHRIVASTAVA, V., BANERJEE, S., E GANGULY, S. Distributed channel management in uncoordinated wireless environments. In *International Conference on Mobile computing and networking (MOBICOM)* (setembro de 2006).
- [3] WIGLE. WIGLE - Wireless Geographic Logging Engine - Plotting WiFi on Maps, 2006.
<http://wagle.net> - último acesso em 07/11/2006.
- [4] 802.11B. Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: Higher-Speed Physical Layer Extension in the 2.4GHz Band. IEEE Standard, 1999.
- [5] 802.11G. Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: Further Higher Data Rate Extension in the 2.4GHz Band. IEEE Standard, 2003.
- [6] SILVA, M. W. R., E REZENDE, J. F. Um mecanismo para a seleção dinâmica de canal em redes IEEE 802.11 infra-estruturadas. In *XIV Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores (SBRC)* (maio de 2006).

- [7] SILVA, M. W. R., E REZENDE, J. F. A dynamic channel allocation mechanism for IEEE 802.11 networks. In *VI International Telecommunications Symposium (ITS)* (setembro de 2006).
- [8] RODRIGUES, R. C., MATEUS, G. R., E LOUREIRO, A. A. F. Optimal base station placement and fixed channel assignment applied to wireless local area network projects. In *IEEE International Conference on Networks (ICON)* (setembro de 1999).
- [9] RODRIGUES, R. C., MATEUS, G. R., E LOUREIRO, A. A. F. On the design and capacity planning of a wireless local area network. In *Network Operations and Management Symposium (NOMS)* (abril de 2000).
- [10] HILLS, A. Large-scale wireless LAN design. *IEEE Communications Magazine* 39 (novembro de 2001).
- [11] HILLS, A., E SCHLEGEL, J. Rollabout: a wireless design tool. *IEEE Communications Magazine* 42 (fevereiro de 2004).
- [12] HILLS, A., E FRIDAY, B. Radio resource management in wireless LANs. *IEEE Communications Magazine* 42 (dezembro de 2004).
- [13] LEUNG, K. K., E KIM, B.-J. Frequency assignment for IEEE 802.11 wireless networks. In *IEEE Vehicular Technology Conference* (outubro de 2003).
- [14] LING, X., E YEUNG, K. L. Joint access point placement and channel assignment for 802.11 wireless LANs. In *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)* (março de 2005).
- [15] LEE, Y., KIM, K., E CHOI, Y. Optimization of ap placement and channel assignment in wireless LANs. In *Local Computer Networks (LCN)* (novembro de 2002).
- [16] PARK, S. Optimal access point selection and channel assignment in IEEE 802.11 networks. Tese de Mestrado, University of North Texas, dezembro de 2004.
- [17] MAHONEN, P., RIIHIJARVI, J., E PETROVA, M. 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* (setembro de 2004).

- [18] MISHRA, A., BRIK, V., BANERJEE, S., SRINIVASAN, A., E ARBAUGH, W. A client-driven approach for channel management in wireless LANs. In *IEEE Conference on Computer Communications (INFOCOM)* (2006).
- [19] MISHRA, A., BANERJEE, S., E ARBAUGH, W. Weighted coloring based channel assignment for WLANs. In *Mobile Computing and Communications Review* (julho de 2005).
- [20] NS-2. The network simulator - ns-2, 2005.
<http://www.isi.edu/nsnam/ns/> - último acesso em 10/10/2006.
- [21] FCC FEDERAL COMMUNICATION COMISSION. Code For Federal Regulations - Title 47 - Part 15 , agosto de 2006.
<http://www.fcc.gov/oet/info/rules/part15/part15-8-14-06.pdf> - último acesso em 15/11/2006.
- [22] 802.11A. Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: High-speed Physical Layer in the 5GHz Band. IEEE Standard, 1999.
- [23] JAIN, R., CHIU, D., E HAWKES, W. A quantitative measure of fairness and discrimination for resource allocation in shared computer systems. Relatório Técnico Report TR-301, DEC Research, setembro de 1984.
- [24] MISHRA, A., ROZNER, E., BANERJEE, S., E ARBAUGH, W. Exploiting partially overlapping channels in wireless networks: Turning a peril into an advantage. In *Internet Measurement Conference (IMC)* (outubro de 2005).
- [25] MISHRA, A., SHRIVASTAVA, V., BANERJEE, S., E ARBAUGH, W. Partially overlapped channels not considered harmful. In *Joint International Conference on Measurement and Modeling of Computer Systems (SIGMETRICS)* (2006).
- [26] 802.11K. Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: Radio Resource Measurement. IEEE Draft Standard, 2005.
- [27] NOAH. No ad hoc routing agent (noah), 2005.
<http://icapeople.epfl.ch/widmer/uwb/ns-2/noah/> - último acesso em 25/11/2006.
- [28] 802.20. Draft 802.20 Permanent Document: Traffic Models for IEEE 802.20 MBWA System simulations. IEEE Draft Document, 2003.