

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS  
INSTITUTO DE COMPUTAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INFORMÁTICA

**Abordagem de Atribuição de Canais Baseada em Múltiplos Fatores  
para Redes Locais sem Fio**

Laura Michaella Batista Ribeiro

Manaus - Amazonas  
Abril de 2014

Laura Michaela Batista Ribeiro

**Abordagem de Atribuição de Canais Baseada em Múltiplos Fatores  
para Redes Locais sem Fio**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Informática da Universidade Federal do Amazonas como requisito para obtenção do grau de Mestre em Informática.

Área de Concentração: Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo James Pereira Souto

## Ficha Catalográfica

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

R484a Ribeiro, Laura Michaella Batista  
Abordagem de atribuição de canais baseada em múltiplos fatores para redes locais sem fio / Laura Michaella Batista Ribeiro. 2014  
96 f.: il. color; 31 cm.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo James Pereira Souto  
Dissertação (Mestrado em Informática) - Universidade Federal do Amazonas.

1. Espectro 2,4 GHz. 2. Algoritmos de alocação de canal. 3. Redes 802.11 (Wi-Fi). 4. Redes Centralizadas. I. Souto, Prof. Dr. Eduardo James Pereira II. Universidade Federal do Amazonas III.  
Título



PODER EXECUTIVO  
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS  
INSTITUTO DE COMPUTAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INFORMÁTICA



## FOLHA DE APROVAÇÃO

**"Abordagem de Atribuição de Canais Baseada em Múltiplos Fatores para Redes Locais sem Fio"**

**LAURA MICHAELLA BATISTA RIBEIRO**

Dissertação defendida e aprovada pela banca examinadora constituída pelos Professores:

PROF. EDUARDO JAMES PEREIRA SOUTO – PRESIDENTE

PROF. CARLOS MAURÍCIO SERÓDIO FIGUEIREDO – MEMBRO

PROF. JOSÉ LUIZ DE SOUZA PIO – MEMBRO

Manaus, 07 de abril de 2014

*Para glória de Deus e a todos que sempre acreditaram em  
mim*

# Agradecimentos

Primeiramente a Deus, que sempre esteve ao meu lado auxiliando-me com sabedoria e força para tornar possível a conclusão deste trabalho, sem a ajuda d'Ele nada disso teria sido feito.

Aos meus pais Sérgio Roberto R. Silva e Mirtes B. Ribeiro pela educação, por seu amor incondicional e por serem exemplos de luta e determinação, que me motivaram a ser como eles, verdadeiros guerreiros! A minha irmãzinha Laís Bianca B. Ribeiro que com seu olhar doce sempre me trouxe alegria, amor puro e abraço carinhoso. Quero agradecer a Clicia Michelle Rolim da Costa por seu companheirismo, amor, carinho e por fazer parte dos meus sonhos.

Ao meu orientador, Prof. Eduardo Souto, por compartilhar seus conhecimentos e pela oportunidade de me permitir conhecer alguém tão qualificado e dedicado à carreira acadêmica; por todos os riquíssimos ensinamentos e orientações que fizeram a minha escrita ser um pouco melhor hoje; por todos os õpuxões de orelhaõ, õpalavra amigaõ que recebi em função das minhas inconstâncias vividas; pela paciência e crédito; por toda a motivação e palavras decisivas de incentivo, tão importantes para que eu concluísse este trabalho.

Aos meus amigos da Prefeitura Municipal de Manaus, em especial Carlos Alberto Farias, que me possibilitou cursar as disciplinas obrigatórias (2011). Aos meus amigos Sandro, Valter e Bruno pelo aprendizado proporcionado. Aos meus amigos da Embratel, em particular, Raimundo Amancio e Leopoldo Lustosa que me possibilitaram cursar as demais disciplinas do curso em (2012), por seu apoio, palavras motivadoras e ações que me fizeram crescer como profissional.

Aos amigos que fiz durante a estada no curso de Mestrado Elda Carvalho, David Lima e Janainny Sena por serem sempre motivadores, pelas palavras de conforto, pelos momentos de descontração vividos e por trazerem mais felicidade e um sentimento de õpoder contarõ para minha vida. Aos também meus amigos tardios no percurso do Mestrado, porém que contribuíram com conhecimentos preciosos na implementação e teste desse trabalho: Wesllen Silva, Alex Monteiro e Flávio Montenegro. A Elienai, por todo o apoio administrativo e atenção sempre oportuna.

Ao CNPq (Bolsa Reuni) e a FAPEAM na figura dos projetos: PROTI ó AMAZÔNIA ó APOIO A PROJETOS DE PESQUISA - EDITAL 016/2013 (Título do Projeto: Triplo-S: Sistema de monitoramento e controle inteligente de redes sem fio heterogêneas) e PROTI-AMAZÔNIA ó MOBILIDADE - EDITAL 015/2013 (Título do Projeto: Monitoramento e controle de redes sem fio heterogêneas) por acreditarem neste trabalho.

A Banca Examinadora deste trabalho por suas contribuições.

Ao PPGI, pela oportunidade; e a todos que contribuíram para realização deste trabalho.

ÕE você aprende que realmente pode suportar... que realmente é forte, e que pode ir muito mais longe depois de pensar que não se pode mais. E que realmente a vida tem valor e que você tem valor diante da vida! Nossas dúvidas são traidoras e nos fazem perder o bem que poderíamos conquistar se não fosse o medo de tentar.Ö

*O menestrel ó William Shakespeare*

# Resumo

Com a utilização significativa das redes Wi-Fi como um dos principais meios de comunicação e transmissão de dados, problemas relacionados à confiabilidade no tráfego dessas redes foram surgindo. O uso não planejado de pontos de acesso (do inglês, Access Point - AP), aliado com as interferências decorrentes da coexistência de outras tecnologias compartilhando o mesmo espectro de frequências 2,4GHz, tem constantemente afetado o desempenho das redes sem fio. Com o intuito de propor uma solução para o problema de interferência entre redes sem fio 802.11, este trabalho descreve uma abordagem para atribuição de canais baseada em múltiplos fatores como a indicação da intensidade do sinal recebido, a relação sinal-ruído, a qualidade de link e o fator de sobreposição de canais. Esta abordagem, denominada de MFDCA (*Multi-Factor Dynamic Channel Assignment*) é composta pelos módulos de detecção de interferências e de seleção e atribuição de canais. A abordagem atribui de forma dinâmica canais de operação nas redes 802.11, considerando as características presentes no ambiente espectral onde cada AP está inserido. A MFDCA foi projetada para operar em pontos de acesso de baixo custo, desde que suportem a instalação de um *firmware* baseado em Linux. Os resultados dos testes realizados em uma rede piloto mostram que a MFDCA é capaz de beneficiar as redes como um todo, incluindo redes não administradas, proporcionando um aumento na vazão de dados e a diminuição das taxas de perdas de pacotes.

Palavras-chave: Espectro 2,4 GHz; Algoritmos de Atribuição de Canais; Redes Wi-Fi.

# Abstract

With the significant utilization of the Wi-Fi networks as one of the main mass media and transmission of data, some problems of traffic reliability have been related and increasing day by day. The unplanned use of Access Points ó AP, chained to the interferences resulting from coexistence of other technologies occupying the same frequency spectrum 2.4GHz, has constantly affected the performance of these networks. In order to propose a solution to interferences problem between networks 802.11, this work describe an approach of attribution of channels based in many aspects such as received signal strength indicator, signal-to-noise ratio, link quality and channels overlap factor. This approach, named MFDCA (Multi-Factor Dynamic Channel Assignment) is composed by detection interferences modules, as well as selection and attribution of channels. The approach attributes in a dynamic way operation of channels in the networks 802.11, considering the characteristics noted in the spectral environment where which AP is inserted. The MFDCA was developed so that to operate in low cost of access points, as long as they withstand an installation of a firmware based in Linux. The results of the tests accomplished in a pilot network show that a MFDCA is able to benefit the network as a whole, including non-administered networks, by increasing its throughput and decreasing the rate losses of packages.

Key words: Spectrum 2.4GHz; Channel Assignment Algorithms; Wi-Fi Networks.

# Sumário

<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>XII</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	<b>XIV</b>
<b>LISTA DE EQUAÇÕES</b> .....	<b>XV</b>
<b>LISTA DE ACRÔNIMOS</b> .....	<b>XVI</b>
<b>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO</b> .....	<b>18</b>
1.1 MOTIVAÇÃO.....	20
1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO.....	22
1.3 CONTRIBUIÇÕES .....	23
1.4 ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO .....	23
<b>CAPÍTULO 2 - CONCEITOS E TRABALHOS RELACIONADOS</b> .....	<b>25</b>
2.1 O PADRÃO IEEE 802.11 .....	25
2.1.1 - Componentes IEEE 802.11.....	26
2.1.2 - Topologias .....	27
2.1.3 - Canais Disponíveis 802.11.....	29
2.2 INTERFERÊNCIA E COEXISTÊNCIA EM REDES 802.11 .....	31
2.3 A ALOCAÇÃO DE CANAIS .....	36
2.4 TRABALHOS RELACIONADOS .....	38
2.4.1 - Algoritmos de CA Para redes Centralizadas.....	39
2.4.2 - Algoritmos de CA Para redes Distribuídas .....	43
2.5 DISCUSSÃO .....	46
<b>CAPÍTULO 3 - ATRIBUIÇÃO DE CANAIS BASEADA EM MÚLTIPLOS FATORES</b> .....	<b>50</b>
3.1 MFDCA .....	50
3.2 MÓDULO DE DETECÇÃO DE INTERFERÊNCIA.....	52
3.2.1 - Etapa 1 – Sensoriamento do Espectro .....	53
3.2.2 - Etapa 2 – Módulo de Detecção de Interferência .....	54

3.2.3 - Etapa 3 – Relatório APRs.....	61
3.2.4 - Etapa 4 – Envio SSH para NCC.....	62
3.2.5 - Pseudocódigo – Módulo de Detecção de Interferência .....	63
3.3 ALGORITMO DE ATRIBUIÇÃO DE CANAL .....	65
3.3.1 - Lógica de Seleção e atribuição de canal .....	65
3.3.2 - Pseudocódigo – Controlador Central de Rede.....	68
<b>CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E TESTES.....</b>	<b>71</b>
4.1 EXPERIMENTOS <i>VERSUS</i> OBJETIVOS DO TRABALHO .....	72
4.2 CENÁRIOS DE EXPERIMENTAÇÃO.....	73
4.3 CONFIGURAÇÃO DO CENÁRIO 1.....	74
4.4 RESULTADOS OBTIDOS NO CENÁRIO 1 .....	77
4.4.1 - Vazão da Rede .....	77
4.4.2 - Taxa de Perda de Pacotes.....	78
4.4.3 - Estabilidade .....	79
4.5 CONFIGURAÇÃO DO CENÁRIO 2.....	81
4.6 RESULTADOS OBTIDOS NO CENÁRIO 2 .....	82
4.6.1 - Vazão da Rede .....	82
4.6.2 - Taxa de Perda de Pacotes.....	84
4.6.3 - Tempo de Resposta na Troca de Canal .....	86
4.6.4 - Tempo de Varredura .....	87
4.6.5 - Vazão por APR .....	88
<b>CAPÍTULO 5 – CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>89</b>
5.1 TRABALHOS FUTUROS.....	91

# Lista de Figuras

FIGURA 2.1. UMA TÍPICA REDE LAN 802.11 COMPOSTA POR BSS, ESS E DS [BREEZE WIRELESS COMMUNICATIONS LTD. 2012] .....	26
FIGURA 2.2. CONSTITUIÇÕES DE IBSS E ESS [BREEZE WIRELESS COMMUNICATIONS LTD. 2012]. .....	27
FIGURA 2.3 CANAIS 802.11 DISPOSTOS NA BANDA ISM, DESTACANDO OS CANAIS NÃO SOBREPOSTOS 1,6 E 11. OS CANAIS SOBREPOSTOS PODEM SER VISUALIZADOS POR MEIO DAS LINHAS PONTILHADAS [SILVA & REZENDE 2006]. .....	30
FIGURA 2.4. ESQUEMAS DE COMPARTILHAMENTO MÉTODO CSMA/CA [VILLEGAS & ASPAS 2009]. .....	33
FIGURA 2.5 DISTRIBUIÇÃO DO ESPECTRO 2,4GHZ PARA DIFERENTES PADRÕES [BAID ET AL. 2011]. .....	35
FIGURA 2.6 GRAFO DE INTERFERÊNCIA CRIADO PELO CONTROLADOR SCIFI, UTILIZANDO INFORMAÇÕES DE VARREDURA ESPECTRAL COLETADA PELOS APs CONTROLADOS, VISTO EM [BALBI ET AL. 2012] .....	40
FIGURA 2.7 CENÁRIO DE INTERFERÊNCIA GERADA ENTRE CLIENTES DA REGIÃO X (ENTRE AP1 E AP2) E ENTRE CLIENTES DA REGIÃO Y (AP2 E AP3, VISTO EM [MISHRA ET AL. 2005] .....	41
FIGURA 2.8 PRODUTIVIDADE AO LONGO DO TEMPO, OBSERVADA POR CADA CANAL 2,4GHZ 802.11, ONDE A LARGURA DAS PISTAS REPRESENTA A LARGURA DE BANDA DOS CANAIS E CADA VEÍCULO É UM PACOTE ENVIADO POR ESTE PADRÃO VISTO EM [RUCKUS WIRELESS 2011] .....	42
FIGURA 3.1. ARQUITETURA DE REDE UTILIZADA PELO MFDCA.....	51
FIGURA 3.2. FUNCIONAMENTO DO MFDCA EXEMPLIFICANDO TRÊS APs QUE POSSUEM O MÓDULO DE DETECÇÃO DE INTERFERÊNCIA (ATUANDO DE FORMA EMBARCADA) E ENVIANDO RELATÓRIOS PARA O ALGORITMO DE ATRIBUIÇÃO DE CANAL OPERANDO SEPARADAMENTE NO CONTROLADOR DA REDE .....	52
FIGURA 3.3 AMBIENTE ESPECTRAL CAPTURADO POR UM APR IDENTIFICADO COMO APR 1.....	54
FIGURA 3.4. CANAIS QUE CONSISTEM PADRÃO IEEE 802.11B/G [AIRMAGNET INC 2008]. .....	54
FIGURA 3.5. ESBOÇO DAS ETAPAS PARA DEFINIÇÃO DO MCU (ETAPA 1: SENSORIAMENTO E ELABORAÇÃO DA MATRIZ DE MAPEAMENTO, ETAPA 2: VERIFICA LQ DE CADA AP DETECTADO E ETAPA 3: ELABORA A MATRIZ SOMA DA QUALIDADE DE LINK).....	57
FIGURA 3.6. ESBOÇO DAS ETAPAS PARA DEFINIÇÃO DOS MCNUS.....	61
FIGURA 3.7. GERANDO RELATÓRIOS PARA O NCC .....	62
FIGURA 3.8 PSEUDOCÓDIGO MÓDULO DE DETECÇÃO DE INTERFERÊNCIA. ....	64
FIGURA 3.9. ETAPAS 1 E 2 DA IMPLEMENTAÇÃO DO ALGORITMO DE ATRIBUIÇÃO.....	66

FIGURA 3.10 ETAPA 3 DA ANÁLISE DA LISTA DE ATRIBUÍDOS, EXEMPLIFICANDO UMA LISTA DE MELHORES CANAIS RECEBIDA CONTENDO OS CANAIS 1, 8 E 11. ....	67
FIGURA 3.11 PSEUDOCÓDIGO CONTROLADOR CENTRAL DE REDE. ....	70
FIGURA 4.1 CENÁRIO DE TESTES. ....	75
FIGURA 4.2 ESPECTRO PRESENCIADO NO LABORATÓRIO DE TECNOLOGIAS EMERGENTES DA UFAM. CADA LINHA CORRESPONDE A UM AP, PODENDO VERIFICAR AS SUAS RESPECTIVAS POTÊNCIAS DE SINAL EM UMA ESCALA DBM, OBTIDAS ATRAVÉS DOS CANAIS WI-FI QUE ESTÃO ATRIBUÍDOS. ....	76
FIGURA 4.3 VAZÃO MÉDIA DE DADOS OBSERVADA POR MEIO DE UM TRÁFEGO UDP A PARTIR DOS NÓS CLIENTES VINCULADOS AOS APRs. ....	78
FIGURA 4.4 TAXA DE PERDA DE PACOTES (%) POR CADA APR DA REDE ....	79
FIGURA 4.5 QUANTIDADE DE REQUISIÇÕES DE TROCA DE CANAL REALIZADAS EM 1200 (s) ....	80
FIGURA 4.6 CENÁRIO DE TESTES 2 UTILIZANDO UMA ÁREA MAIOR DE DISTRIBUIÇÃO DE APRs AO LONGO DE DOIS BLOCOS DO INSTITUTO DE COMPUTAÇÃO ....	81
FIGURA 4.7 COMPARATIVO DE MÉDIAS AGREGADAS DE VAZÃO POR CADA ATRIBUIÇÃO REALIZADA. ....	83
FIGURA 4.8 TAXA MÉDIA DIÁRIA DE PERDA DE PACOTES OBTIDA PELOS APRs 1, 2, 3 E 4 ....	85
FIGURA 4.9 TAXA MÉDIA DIÁRIA DE PERDA DE PACOTES OBTIDA PELOS APRs 5, 6 E 7. ....	86
FIGURA 4.10. VAZÃO AGREGADA DA REDE EM MBITS(S), CONSIDERANDO TODOS OS 07 PONTOS DE ACESSO. NA AMOSTRA 200s FORAM INDUZIDAS TROCAS DE CANAIS PARA VERIFICAÇÃO DO DESEMPENHO DA REDE ....	87
FIGURA 4.11. VAZÃO MÉDIA DA REDE EM MBITS(S) POR CADA AP GERENCIADO. ....	89

# Lista de Tabelas

TABELA 2.1 COMPARATIVO ENTRE AS EXTENSÕES IEEE 802.11 .....	31
TABELA 2.2: SUMARIZAÇÃO DAS ABORDAGENS DE CA PARA REDES SEM FIO .....	48
TABELA 4.1 ESPECTRO DETECTADO.....	74
TABELA 4.2 ATRIBUIÇÕES DE CANAL REALIZADAS PARA O TESTE DE VAZÃO.....	82
TABELA 4.3. TEMPO MÉDIO EM SEGUNDOS QUE UM APR UTILIZA PARA A VARREDURA ESPECTRAL E ENVIO DO RELATÓRIO PARA O CONTROLADOR CENTRAL DA REDE (NCC).....	88

# Lista de Equações

EQUAÇÃO 3.1 DEFINE MATRIZ $C$ GERADA PELO MAPEAMENTO DE $J$ APs EM RELAÇÃO A $K$ CANAIS .....	55
EQUAÇÃO 3.2 DEFINE MATRIZ $V$ GERADA PELO VALOR DE $LQ$ (QUALIDADE DE LINK) DE CADA AP $J$ DETECTADO .....	56
EQUAÇÃO 3.3 INSERINDO VALORES NA MATRIZ $L$ CONSTITUÍDA PELA SOMA DA QUALIDADE DE LINK (PROPAGADO POR CADA CANAL) .....	56
EQUAÇÃO 3.4 CÁLCULO DO FATOR DE SOBREPOSIÇÃO POR CANAL.....	57
EQUAÇÃO 3.5 DEFININDO O MCU PARA CANAL BASE DO CÁLCULO DE FATOR DE SOBREPOSIÇÃO .....	59
EQUAÇÃO 3.6 ANALISANDO AS SOBREPOSIÇÕES ADJACENTES A PARTIR DE UM CANAL BASE MCU .....	59
EQUAÇÕES 3.7 CONSTITUINDO A MATRIZ $OLF$ (FATOR DE SOBREPOSIÇÃO) DE UM CANAL [BURTON 2002] .....	59
EQUAÇÃO 3.8 ANALISANDO FATOR DE SOBREPOSIÇÃO EM RELAÇÃO A UM CANAL BASE $L_k$ .....	60

# Lista de Acrônimos

ACK	<i>Acknowledgment</i>
AP	<i>Access Point</i>
BSS	<i>Basic Service Set</i>
CA	<i>Channel Assignment</i>
CRC	<i>Cyclic Redundancy Check</i>
CSMA/CA	<i>Carrier sense multiple access with collision avoidance</i>
DCA	<i>Dynamic Channel Assigment</i>
DCS	<i>Dynamic Channel Selection</i>
DIFS	<i>Distributed Inter-Frame Space</i>
DS	<i>Distribution System</i>
ERB	Estações Rádio Base
ESS	<i>Extended Service Set</i>
BSA	<i>Basic Service Area</i>
IBSS	<i>Independent Basic Service Set</i>
ESSID	<i>Extended Service Set Identifier</i>
FCA	<i>Fixed Channel Allocation</i>
FS	Fator de Sobreposição
GPS	<i>Global Positioning System</i>
ISM	<i>Industrial, Scientific and Medical</i>
LAN	<i>Local Area Networks</i>
LBA	<i>Load Balance Agent</i>
LCCS	<i>Least Congested Channel Search</i>
LLC	<i>Logical Link Control</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
LQ	<i>Link Quality</i>
MAC	<i>Medium Access Control</i>
MCNU	Melhor Canal Sem Uso
MCU	Melhor Canal em Uso
MFDCA	<i>Multi-Factor Dynamic Channel Assignment</i>

MSDU	<i>MAC Service Data Units</i>
NCC	<i>Network Central Controller</i>
OSI	<i>Open Systems Interconnect</i>
PHY	<i>Physical layer</i>
RSSI	<i>Received Signal Strength Indicator</i>
RX	Recepção
SINR	<i>Signal to Interference- plus-Noise Ratio</i>
SNR	<i>Signal-to-Noise Ratio</i>
SO	Sistema Operacional
SSH	<i>Secure Shell</i>
STA	<i>station</i>
TX	Transmissão
UDP	<i>User Datagram Protocol</i>
U-NII	<i>Unlicensed National Information Infrastructure</i>
WLAN	<i>Wireless Local Area Networks</i>
WPAN	<i>Wireless Personal Area Networks</i>

# Capítulo 1

## Introdução

O uso de produtos tecnológicos que apresentam interfaces de acesso sem fio vem se tornando cada vez mais comum. Atualmente, a maioria dos dispositivos móveis comercializados como notebooks, celulares e *tablets* é equipada com mais de uma interface de comunicação sem fio. Recentemente, uma pesquisa de mercado, estimou que dos 80 milhões de brasileiros que acessam a Internet no Brasil, 56% do acesso ocorre através de telefones móveis incluindo *smartphones* e *tablets*, dos quais se estima que 80% são equipados com tecnologias de comunicação como Bluetooth e Wi-Fi [Digital 2012].

Essas tecnologias permitem o acesso a uma variedade de serviços concedidos pela Internet em qualquer lugar e a qualquer tempo, com flexibilidade e mobilidade aos usuários. Entretanto, o baixo custo dessas tecnologias tem contribuído para a intensiva utilização do espectro ao longo da faixa de frequência de 2,4 GHz pertencente à banda ISM (*Industrial, Scientific and Medical*). Muitos dispositivos de comunicação, comumente empregados em WLANs (*Wireless Local Area Networks*) e WPANs (*Wireless Personal Area Networks*), operam nessa faixa de transmissão, incluindo rádios que utilizam tecnologias como Bluetooth [Bluetooth SIG 2014], Wi-Fi [Wi-Fi Alliance 2014] e Zigbee [Z. Alliance 2014].

A banda ISM, inicialmente alocada para usos não comerciais, foi concedida para abrigar frequências provindas de máquinas industriais, como o transmissor de ondas curtas aplicado na diatermia<sup>1</sup> e o fogão eletrônico utilizado em embarcações militares [Union 1947]. Com o advento do forno micro-ondas uma discussão foi iniciada para permissão de mais serviços, surgindo à ideia de disponibilizar a faixa espectral 2,4 GHz também para uso civil [FCC 1947]. Deste modo, várias tecnologias foram projetadas para explorar esse espectro como redes de sensores (915 MHz e 2,450 GHz), LANs (*Local Area Networks*) (2,450 GHz, e 5,800 GHz) e telefones sem fio (915 MHz). Assim, a banda ISM por ser de livre operação, passou a ser altamente concorrida, uma vez que possui a característica de não existir recursos de alocação garantidos [ITU 2009],[Goldberg et al 1987].

---

<sup>1</sup> Diatermia é o uso de um transmissor de ondas curtas (HF) em clínicas de fisioterapia com o objetivo de provocar o aquecimento de tecidos internos do corpo.

A inexistência de licenciamento para sua utilização tem gerado um consumo desordenado, pois o espectro atribuído é utilizado aleatoriamente, contribuindo para o aumento de interferências entre os canais em utilização.

Para agravar esse problema, os rádios atuais utilizam, em sua grande maioria, uma abordagem de alocação estática do espectro como forma de distribuir canais livres para comunicação. Essa abordagem não funciona de maneira satisfatória quando uma grande quantidade de dispositivos é inserida dinamicamente no ambiente [ITU 2009]. O compartilhamento da mesma faixa de frequência conduz a constantes congestionamentos e afeta o desempenho das redes sem fio. Tal fato levou à necessidade de lidar com coexistência de tecnologias que exploram o espectro 2,4 GHz para transmissão de dados.

Tecnologias sem fio são ditas "coexistentes" se puderem ser alocadas dentro de um mesmo espectro sem afetar significativamente seu desempenho [IEEE Std 802.15-99 1999]. A coexistência pode também ser definida como a capacidade de um sistema para realizar uma tarefa em um dado ambiente compartilhado por outros sistemas, que podem ou não estar usando o mesmo conjunto de regras [Sikora & Groza 2005],[Kamerman 2000].

O compartilhamento do espectro pode levar a dois tipos de interferências: inter-rádio (entre tecnologias diferentes) e intrarrádio (mesma tecnologia), as quais podem ocasionar a indisponibilidade do serviço de transmissão de dados [Villegas & Aspas 2009],[Silva & Rezende 2006].

Diversas abordagens têm sido propostas para solucionar esses problemas. Kamerman [2000] e Golmie et al. [2003] analisam o impacto das tecnologias Bluetooth e Wi-Fi sugerindo algumas técnicas para promover a coexistência entre esses padrões. Outros trabalhos propõem o emprego de algoritmos de alocação dinâmica de canais (do inglês, *Channel Assignment - CA*) como questão básica para lidar com as interferências e/ou coexistências entre tecnologias [Braga et al. 2014],[IEEE Std 802.15-99 1999],[Sikora & Groza 2005],[Weisheng et al. 2010]. Existem também, abordagens que sugerem alterações ou adições de novos módulos no *kernel* dos SOs (Sistemas Operacionais) para suportar o chaveamento entre diferentes interfaces de redes e melhorar o seu desempenho pelo uso compartilhado da largura de banda disponibilizadas por estas interfaces [Balbi et al. 2012],[Chiochan et al. 2010].

Essas abordagens, em sua maioria, tratam somente um dos dois grupos de canais: os canais sobrepostos ou os canais não sobrepostos [Wi-Fi Alliance 2014 2014],[Sikora & Groza 2005]. Tal fato é usualmente causado pela distinção no tratamento a esses grupos de canais, o que conduz a uma divisão dos trabalhos que objetivam a análise do espectro gerado pelo padrão 802.11.

Outra característica observada nas soluções que propõem abordagens para atribuição de canais é o processo de tomada de decisão. Algumas soluções são projetadas de forma centralizada com um controlador central de rede realizando a distribuição de canais, e outras de forma distribuída, onde cada ponto de acesso é responsável por validar e atribuir seu canal.

Além disso, a maioria das soluções propostas na literatura é elaborada e testada em ambiente simulado. Em geral, são utilizados simuladores de rede como o NS [Berkeley 1989], OPNET [Opnet Inc 1986] e OMNET++ [Varga 1993] para formular e testar redes. A vantagem no uso de simuladores vem do fato de poder testar a escalabilidade da solução permitindo analisar o comportamento da rede em cenários constituídos por vários nós clientes e APs. Entretanto, testes em ambientes reais possibilitam validar a solução mediante problemas implementacionais, tais como: incompatibilidade, dependências do SO, falhas na rede física, dentre outros, o que permite realizar testes mais próximos da utilização final, além de tornar possível a coleta de métricas provindas a partir do uso e exposição da rede às características reais de interferências.

Para superar estes problemas, este trabalho propõe uma nova abordagem para a seleção e atribuição de canais, denominada MFDCA (*Multi-Factor Dynamic Channel Assignment*). Esta abordagem considera em sua atribuição todos os canais do padrão IEEE 802.11 aplicando um módulo de detecção de interferência e algoritmos de seleção e atribuição de canais avaliando os canais em uso e os canais que não estão em uso, tornando automática a gerência e configuração dos pontos de acesso da rede.

A abordagem MFDCA pode ser aplicada em redes domésticas e institucionais de forma a facilitar a sua gerência e contribuir para minimizar a ocorrência de interferências intrarrádio e inter-rádio, ao considerar as características dinâmicas desse ambiente sem fio na definição de melhores canais a atribuir para cada ponto de acesso da rede.

## 1.1 Motivação

Com a utilização significativa das redes Wi-Fi como um dos principais meios de comunicação e transmissão de dados, problemas relacionados à confiabilidade no tráfego dessas redes foram surgindo. O uso não planejado de pontos de acesso, aliado com as interferências decorrentes da coexistência de outros equipamentos que ocupam o espectro de frequências 2,4GHz, tem constantemente afetado o desempenho destas redes.

Embora uma rede bem projetada e dimensionada permita um bom mapeamento da região e uma distribuição satisfatória de canais, a tecnologia sem fio possui características intrínsecas que

tornam difícil a tarefa de alcançar uma distribuição fixa de canais que implique em desempenhos favoráveis de rede.

Um bom exemplo corresponde aos APs 802.11 vendidos comercialmente. Em geral, estes APs apresentam uma configuração pré-estabelecida de fábrica nos canais não sobrepostos (canais 1, 6 e 11), os quais se usados no mesmo ambiente compartilham o mesmo canal, resultando no aumento dos níveis de interferências geradas por propagações de mesmo canal. Assim, podemos concluir que a atribuição estática de canais, não é adequada para ambientes com alto nível de interferência, principalmente em redes institucionais compostas por muitos APs.

Outra característica intrínseca das redes Wi-Fi está relacionada à variedade de dispositivos de transmissão e recepção sem fio, a exemplo, os *smartphones*, que por meio de aplicativos podem apresentar comportamento semelhante a um AP, gerando novas redes com uma concentração variável de nós clientes. Desta forma, passam a existir pontos de acesso móveis que utilizam das redes constituídas por APs fixos para redistribuir o sinal, reforçando a necessidade dos pontos de acesso da rede a continuamente se adequarem as características dinâmicas do ambiente.

Na tentativa de propor soluções que permitam essa adequação ao ambiente de modo que múltiplas redes sem fio coexistam de forma satisfatória, algumas soluções foram propostas, como por exemplo: o uso de técnicas de seleções de taxas de TX (transmissão) e de RX (recepção) [Braga et al. 2014], a realização de balanceamento da rede a partir da sobrecarga detectada em um canal [Faganello 2012], a aplicação de algoritmos de alocação dinâmica de canais de frequência [Balbi et al. 2012],[Gramacho et al. 2013] e o controle de intensidade gasta de energia por parte de um canal [Gibilini 2006].

Atualmente, fabricantes de dispositivos de redes sem fio (roteadores e pontos de acesso) disponibilizam soluções empresariais para instituições com alta demanda de usuários e cobertura. Essas soluções são constituídas por pontos de acesso de alto desempenho ou por pontos de acesso que transferem parte de suas funcionalidades para um controlador central, que utiliza técnicas avançadas para aumentar o alcance e a quantidade de clientes suportada [Balbi et al. 2012].

Contudo, estas soluções são significativamente onerosas e inviáveis de serem utilizadas em ambientes domésticos (pequenos escritórios). A grande desvantagem das soluções de baixo custo existentes, nesse caso, é a carência de coordenação entre pontos de acesso e dificuldade de configuração e gerenciamento [Cisco, S. 2006].

Apesar desses esforços e contribuições das abordagens propostas, a interferência recebida por transmissões em redes sem fio ainda é facilmente detectada e a sua confiabilidade questionável, dada a constante inserção de novas tecnologias que compartilham dessa faixa de frequências e em

virtude de constantes interrupções causadas por altos índices de ruído presenciados.

Desta forma é indicada assim a existência de um amplo campo de pesquisas nesta área e uma excelente oportunidade de aplicar soluções de baixo custo, utilizando algoritmos de seleção e atribuição de canais, a fim de obter melhores resultados no desempenho dessas redes e tornar disponível uma solução aplicável também em ambientes domésticos.

Por essas razões, este trabalho tem como foco as abordagens de alocação dinâmica de canais, propondo e avaliando uma nova abordagem centralizada para gerência de redes 802.11. A solução proposta, denominada de MFDCA, atribui dinamicamente canais desse padrão, obtendo um gerenciamento perspicaz e sem intervenção humana, de forma a maximizar o uso dos canais em busca da confiabilidade e melhoria de desempenho no tráfego por essas redes.

A abordagem MFDCA utiliza *firmwares* de arquitetura aberta, como o OpenWrt [OpenWrt 2004], tornando essa proposta aplicável não somente em instituições públicas ou privadas, mas em residências, condomínios e apartamentos que utilizam redes infraestruturadas centralizadas ou simplesmente que possuam um computador conectado ao ponto de acesso.

## 1.2 Objetivos do Trabalho

O objetivo deste trabalho é desenvolver e avaliar uma abordagem de seleção e alocação dinâmica de canais para redes padrão 802.11, que operam na banda ISM (2,4GHz), por meio de algoritmos de seleção e atribuição de canal utilizando em suas decisões, um módulo de análise de interferência baseada em múltiplos fatores. A abordagem define canais de operação sem fio para APs, buscando uma melhoria na confiabilidade e no desempenho dessas redes.

Para atingir o objetivo acima, foi necessário:

- Desenvolver um algoritmo que permite sensoriar o espectro 2,4 GHz de redes Wi-Fi por meio do recebimento de quadro *beacon*, baseado na detecção da qualidade de enlace (do inglês, *link*) provinda dos diferentes dispositivos que possuem como tecnologia de acesso esse padrão.
- Elaborar um módulo para medir e avaliar o nível de interferência entre os canais por meio da análise de múltiplos fatores, definindo a intensidade de interferência recebida, proveniente de diferentes APs que ocupam o mesmo ambiente espectral buscando caracterizar o cenário de interferência existente.

- Avaliar algoritmos de seleção e alocação dinâmica de canais em um ambiente real, visando testar a viabilidade da abordagem em um contexto de interferências reais e em situações cotidianas de uso, permitindo a identificação dos melhores canais, incluindo os sobrepostos e não sobrepostos, em propagação ou não, buscando uma melhor distribuição dos canais, uma melhor qualidade e desempenho do sinal propagado por essas redes.

### 1.3 Contribuições

A partir do desenvolvimento dos objetivos definidos neste trabalho foi possível realizar as seguintes contribuições:

- Um método de análise de interferência que verifica canais sobrepostos e não sobrepostos IEEE 802.11g/n baseado em múltiplos fatores como qualidade do enlace, fator de sobreposição e potência do sinal recebido e relação sinal ruído.
- Um algoritmo de atribuição dinâmica de canais que realiza a seleção de canais com base nas informações fornecidas pelo método de análise de interferência proposto.
- Um sistema de sensoriamento de redes 802.11 capaz de exibir características como a qualidade de *link*, quantidade de APs que compartilham o canal e potência de sinal, com o intuito de disponibilizar métricas para avaliação do espectro.

### 1.4 Organização do Documento

O restante desta dissertação está organizado como segue:

- O Capítulo 2 fornece informações necessárias para o entendimento deste trabalho. São detalhados os conceitos básicos de redes padrão 802.11, a definição dos algoritmos de atribuição de canal e apresentadas algumas soluções para o problema de interferência em redes 802.11. O capítulo também apresenta uma visão geral sobre alguns trabalhos relacionados encontrados na literatura que utilizam algoritmos de CA para selecionar e atribuir canal destas redes, como soluções para o problema de gerenciar e mitigar interferência em redes sem fio.
- O Capítulo 3 detalha as etapas de elaboração da abordagem proposta MFDCA e sua composição, apresentando a sua arquitetura de forma ilustrativa e os pseudocódigos referentes aos algoritmos empregados.

- O Capítulo 4 descreve o cenário experimental e os resultados obtidos, além da definição das métricas utilizadas para avaliação da abordagem, analisando e discutindo os resultados através da sua utilização em um ambiente real.
- Por último, o Capítulo 5 apresenta um resumo dos resultados alcançados e as conclusões obtidas no emprego da nova abordagem, além de algumas direções para futuras propostas.

# Capítulo 2

## Conceitos e Trabalhos Relacionados

Neste Capítulo, inicialmente são apresentados alguns conceitos do padrão IEEE 802.11 com o intuito de facilitar o entendimento deste trabalho. Estas concepções são relacionadas à constituição de redes Wi-Fi quanto: aos seus componentes, a topologia empregada e aos canais disponíveis para sua utilização, destacando os sobrepostos e não sobrepostos. Tais conceitos servirão de base para o entendimento da abordagem desenvolvida no Capítulo 3.

Em seguida, são abordados os problemas de interferência ocasionados pela coexistência dessas redes, ao compartilhar o espectro 2,4 GHz com outras tecnologias, destacando os seus tipos e causas. Desta forma, será definido o princípio da alocação de canais como solução para o problema, citando a sua origem, os seus tipos e o uso de soluções pagas para esta finalidade salientando o porquê do avanço de pesquisas nesta solução.

Por fim, são apresentados alguns trabalhos relacionados ao emprego de diferentes algoritmos de alocação de canal (CA) para redes sem fio, expondo algumas propostas existentes na literatura separadas quanto ao tipo de gerência empregada: centralizada ou distribuída, exibindo ao término um quadro sumarizando tais abordagens.

### 2.1 O Padrão IEEE 802.11

As redes Wi-Fi são constituídas pelo padrão IEEE 802.11 e suas extensões (a,b,g,n), o qual é um conjunto de normas estabelecido para tornar possível a comunicação entre computadores pertencentes à redes locais sem fio. Desenvolvido pelo IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) através do comitê de padrões LAN/MAN [IEEE Std 802 2002], o objetivo desse padrão é definir componentes MAC (*Medium Access Control*) e PHY (*Physical Layer*) para diversas especificações de conectividade sem-fio existente, por parte de dispositivos fixos ou móveis chamados de estações STAs (do inglês, *station*).

Tal como acontece com outros protocolos baseados no IEEE 802 (por exemplo, 802.3 e 802.5), o serviço primário do padrão 802.11 é entregar MSDUs (do inglês, *MAC Service Data*

*Units*) entre pares de entidades de controle de *link* lógico LLC (do inglês, *Logical Link Control* ó LLC), estabelecendo comunicações de transmissão e recepção.

### 2.1.1 - Componentes IEEE 802.11

As redes locais sem fio são caracterizadas por utilizar como meio para envio de dados, ondas de rádio-frequência ou comunicações via infravermelho, dispensando o uso de cabos conforme é definido pelo IEEE [IEEE Std 802.11 2012]. As redes sem fio foram baseadas em arquiteturas celulares, onde o sistema é subdividido em células chamadas de BSS (*Basic Service Set*), são controladas por uma estação base chamada de ponto de acesso (AP). De forma simples, os pontos de acesso são um tipo especial de estação que podem exercer diversas funções possibilitando a comunicação entre estações sem fio e entre sem fio e cabeadas [Gast 2005].

Apesar de comumente existir redes LAN sem fio formadas por uma única célula possuindo um único ponto de acesso (ou até mesmo sem um ponto de acesso), muitas instalações são formadas por várias células, onde os APs são conectados através de alguns tipos de *backbone*, chamados de sistema de distribuição DS (do inglês, *Distribution System* ó DS). Este componente realiza a interligação entre os pontos de acesso possibilitando a troca de dados entre eles, assim sua utilização ocorre quando há mais de um ponto de acesso na rede.

Este sistema de distribuição é comumente constituído por redes Ethernet, entretanto redes de outros padrões até mesmo sem fio podem ser usadas para exercer esta função. Todos esses componentes interligados em uma rede WLAN, incluindo as diferentes células, seus respectivos pontos de acesso e o sistema de distribuição são vistos como uma única rede 802 para as camadas superiores do modelo OSI (*Open Systems Interconnection*) e recebe o nome de ESS (*Extended Service Set*). O diagrama visto na Figura 2.1, a seguir mostra uma típica LAN 802.11, incluindo os componentes descritos acima:

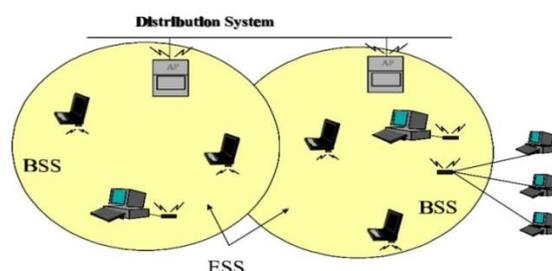


Figura 2.1. Uma típica rede LAN 802.11 composta por BSS, ESS e DS [Breeze Wireless Communications Ltd. 2012].

### 2.1.2 - Topologias

Usando as BSSs como blocos de construção de uma LAN IEEE 802.11 e a área na qual a comunicação é estabelecida entre estas, conhecidas como BSAs (*Basic Service Area*) é possível compor duas topologias diferentes de rede: IBSS (Independent Basic Service Set) e ESS (Extended Service Set), conforme representado na Figura 2.2:

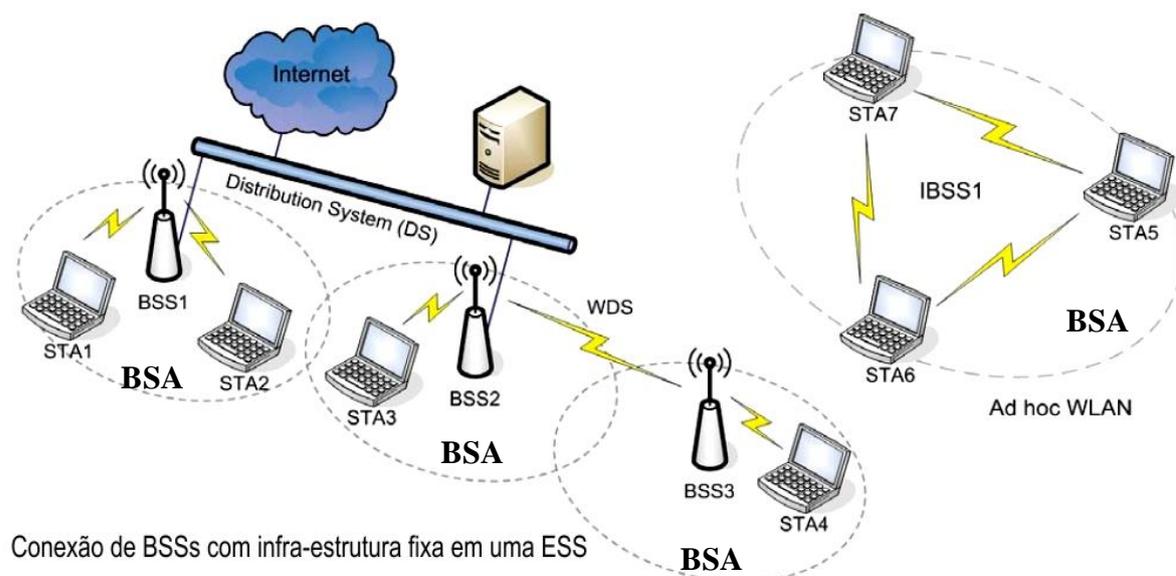


Figura 2.2. Constituições de IBSS e ESS [Breeze Wireless Communications Ltd. 2012].

Vale ressaltar que as BSAs são dadas em função das características de propagação do meio, que podem variar dinamicamente e de forma imprevisível. Portanto, pequenas mudanças na posição ou direção dos dispositivos, bem como a movimentação de pessoas e objetos, podem resultar em grandes variações no nível de sinal recebido [Balbi et al. 2012]. Em uma mesma sala, por exemplo, a variação do nível de sinal em cada posição pode chegar a 50dB [IEEE Std 802.11 2012]. Desta forma, os diagramas circulares pontilhados vistos na Figura 2.2 que esboçam a área de cobertura dos pontos de acesso são apenas aproximações.

Redes formadas por topologia IBSS são compostas por uma BSS formada através de uma rede que apresenta autocontenção, não possuindo infraestrutura e acesso para um DS disponível. Estas redes também são conhecidas como redes *ad hoc* padrão IEEE 802.11. Nestas, qualquer STA pode estabelecer uma comunicação direta com qualquer outro STA pertencente ao mesmo BSS, sem a necessidade de usar um ponto intermediário centralizado atuando como um AP, para o funcionamento adequado deste modo, todas as STAs devem estar ao alcance das outras [Villegas &

Aspas 2009].

A topologia ESS também vista na Figura 2.2 consiste em múltiplas BSSs que utilizam do mesmo sistema de distribuição para prover comunicação entre elas, assim uma ESS é vista pela subcamada LLC como uma BSS única. Desta maneira estas redes são ditas infraestruturadas de modo que um ponto de acesso é utilizado como origem ou destino de todas as transmissões, inclusive para intermediar a comunicação entre as estações sem fio [IEEE Std 802.11 2012].

Uma das vantagens desta topologia é que não há restrição de distância entre as estações, mas apenas entre a estação e o ponto de acesso. Além disso, a complexidade desta topologia é menor, dado que as estações não necessitam guardar informações sobre seus vizinhos, mas apenas sobre o ponto de acesso. Outra vantagem é relacionada à mobilidade dos STAs, que podem estabelecer comunicação por intermédio das diferentes BSSs pertencentes a uma mesma ESS. Todos os APs que compartilham da mesma ESS são definidos de acordo com uma identificação comum do ESS, o ESSID (*Extended Service Set Identifier*, também referido de SSID) que é um parâmetro que representa o nome da rede para as estações clientes [IEEE Std 802.11g/n 2012].

Para que as estações da ESS possam se comunicar entre elas e trafegar entre diferentes BSSs, os pontos de acesso devem operar em camada 2 (enlace) como *bridges*, e o *backbone* também deve ser de camada 2, podendo englobar a utilização de *hubs*, *switches* ou de VLANs [Balbi et al. 2012],[Villegas & Aspas 2009].

Após definidos os pontos de acesso e o *backbone* da rede para operar em camada 2, as estações necessitam realizar uma associação e uma autenticação em determinado ponto de acesso para que a comunicação entre eles possa ser realizada. Este processo é iniciado pela estação, também conhecida como cliente, cabendo ao ponto de acesso aceitar ou rejeitar uma associação.

O modo de operação infraestruturado é o mais difundido e utilizado em aplicações de redes 802.11 por requerer menor esforço e conhecimento técnico por parte dos usuários para sua utilização e gerência. Grande parte do trabalho de configuração de uma rede infraestruturada está no AP, 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 na difusão das redes IEEE 802.11 no modo infraestruturado fazendo com que elas sejam cada vez mais utilizadas em centros comerciais, residências, grandes empresas e escritórios [Silva & Rezende 2006].

O sistema apresentado nesta dissertação foi desenvolvido para operar em redes 802.11 infraestruturadas ao inserir a figura de um controlador central conforme visto em Balbi et al 2012. Este controlador possui a função de determinar os canais que serão utilizados pelos pontos de acesso da rede. Para tanto, ele se comunica com os APs através de rede IP (camada 3) para ordenar que certas funções sejam executadas, dados sejam coletados e parâmetros de configuração sejam definidos.

### **2.1.3 - Canais Disponíveis 802.11**

Em geral, ambientes de redes sem fio fazem uso de espectros não licenciados para transmissão de dados utilizando comumente duas frequências básicas da banda ISM: 2,4 GHz e 5 GHz. Diferentes domínios regulatórios definem quais frequências e quais canais podem ser utilizados através dessas faixas.

Estas definições são sempre passíveis de alterações de país para país, devido a regulamentos diferentes de atribuição do espectro de rádio [Villegas & Aspas 2009]. Em particular, enquanto a maioria dos países europeus permitem que os canais de 1 até 13 sejam utilizados pelos padrões 802.11g/n, os países da América do Norte, Central e do Sul só permitem até o canal 11 . No Japão, todos os 14 canais são permitidos [Teleco 2012].

Atualmente no Brasil, esses dois espectros não licenciados estão disponíveis para o padrão IEEE 802.11. Extensões desse padrão 802.11g e 802.11n [IEEE Std 802.11g/n 2012] coordenam a operação de dispositivos na faixa de frequência 2,4GHz, fornecendo taxas de transmissão de até 54 Mbps (no caso do 802.11g) e até 300 Mbps, em relação ao 802.11n (considerando a utilização de um único canal).

O espectro de 2,4 GHz, utilizado por esses padrões foco desta dissertação, definem para o Brasil 11(onze) canais de operação, tendo largura de banda de aproximadamente 20 MHz e uma separação entre suas frequências centrais de 5 MHz. A única diferença entre o padrão 802.11g e o padrão 802.11n é que este último pode trabalhar também com largura de banda de 40MHz ao ocupar dois canais do espectro alcançando taxas de transmissão maiores. A Figura 2.2 apresenta um esquema com os onze canais definidos pelas normas 802.11 g/n sobre a banda ISM.

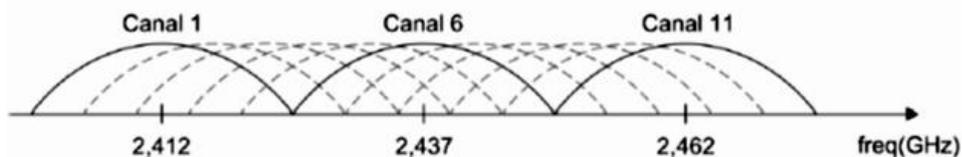


Figura 2.3 Canais 802.11 dispostos na banda ISM, destacando os canais não sobrepostos 1, 6 e 11. Os canais sobrepostos podem ser visualizados por meio das linhas pontilhadas [Silva & Rezende 2006].

Os canais não sobrepostos correspondem aos canais 1, 6 e 11, podendo ser utilizados ao mesmo tempo por redes distintas de uma determinada região reduzindo a ocorrência de fenômenos de interferência.

Na Figura 2.3, também é possível observar que os canais adjacentes apresentam certo nível de sobreposição espectral uns dos outros. Logo, como os canais não são completamente isolados no espectro de frequência, as redes 802.11 que utilizam canais com algum nível de sobreposição são mais susceptíveis a problemas de interferência. Contudo, caso esses canais sejam atribuídos de forma a considerar todo o espectro da rede é possível reduzir esta susceptibilidade de interferência, obtendo qualidade na propagação de forma semelhante à obtida por um canal não sobreposto, como é visto através dos resultados obtidos pela abordagem proposta no Capítulo 4.

No tocante a faixa referente a 5 GHz, conhecida como banda U-NII (*Unlicensed National Information Infrastructure*), utilizada pelo padrão IEEE 802.11a [IEEE Std 802.11 2012], surgiu apresentando esquemas de modulação permitindo taxas de transmissão de até 54 Mbps, disponibilizando nesta banda 12 (doze) canais distintos de operação que não apresentam sobreposição espectral e podem ser utilizados sem a presença de interferência entre canais adjacentes.

Infelizmente, mesmo com essa característica de apresentar mais canais não sobrepostos, esse padrão não conquistou espaço por muito tempo, em virtude de não ser compatível com os dispositivos 802.11b que já estavam em ascensão no mercado, além do surgimento do novo padrão 802.11g que possui compatibilidade à extensão 802.11b, fornecendo as mesmas taxas de transmissão a custos mais baixos.

Na Tabela 2.1 é apresentado um comparativo entre as principais características e definições das extensões do padrão IEEE 802.11 [IEEE Std 802.11 2012].

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 limita o número de redes que podem coexistir na

mesma região sem a geração de interferência mútua. Desta forma, abordagens que visam maximizar o uso do espectro contribuem para um melhor aproveitamento dos canais disponíveis, auxiliando na melhoria de tráfegos concorrentes através de um mesmo canal.

**Tabela 2.1 Comparativo entre as extensões IEEE 802.11**

<b>Padrão</b>	<b>802.11b</b>	<b>802.11a</b>	<b>802.11g</b>	<b>802.11n</b>
<b>Frequência</b>	2400-2483,5GHz (2,4GHz)	5150-5250 GHz 5250-5350 GHz 5725-5825 GHz (5,7 GHz)	2400 ó 2483,5GHz (2,4 GHz)	2,4GHz e 5GHz
<b>Banda</b>	ISM	UNII	ISM	ISM, UNII
<b>Alocação de Banda</b>	83,5 MHz	300 MHz	83,5 MHz	83,5 MHz e 300 MHz
<b>Número de canais não sobrepostos</b>	3	12	3	Mesmo 802.11b/a/g
<b>Largura de banda</b>	20 MHz	20 MHz	20 MHz	20 MHz ou 40 MHz
<b>Taxa máxima de transmissão</b>	11 Mbps	54 Mbps	54 Mbps	144 Mbps até 600 Mbps
<b>Throughput</b>	< 5 Mbps	< 32 Mbps	< 32 Mbps	< 80 Mbps < 160 Mbps
<b>MAC</b>	CSMA/CA	CSMA/CA	CSMA/CA	CSMA/CA
<b>Tecnologia de Modulação</b>	DSSS	OFDM	OFDM DSSS	OFDM/OFDMA com MIMO
<b>Vantagens</b>	Custo reduzido e intervalo de frequência satisfatória.	Rápido, menos propenso a interferência.	Rápido, intervalo de frequência satisfatória.	Taxas de envio de dados elevadas, intervalo aprimorado.
<b>Desvantagens</b>	Lento, propenso a interferência.	Custo mais elevado, intervalo de frequência mais curto.	Propenso a interferência de outras tecnologias que funcionam na faixa de 2,4 Ghz.	Se usar a frequência de 2,4 GHz, pode apresentar os mesmos problemas de interferência da 802.11b. Este protocolo ainda está sendo finalizado e alguns requisitos podem mudar.

## 2.2 Interferência e coexistência em redes 802.11

Apesar da relativa simplicidade de operação e utilização, as redes IEEE 802.11 necessitam de cuidados em sua implementação, pois uma rede composta por vários APs dispostos de forma desordenada podem causar impactos em seu desempenho geral implicando em baixa vazão, taxas altas de perda de pacotes e até a ausência de sinal.

A disposição de forma desordenada ocorre quando a atribuição de canais para os APs da rede é realizada de forma aleatória, não levando em consideração a característica espectral do ambiente no qual o ponto de acesso foi inserido. De acordo com o padrão IEEE 802.11, o canal utilizado pelos dispositivos de uma mesma rede é fixo e único, assim devido a essa característica, interferências surgem facilmente quando um mesmo canal ou canais parcialmente sobrepostos são compartilhados por diversos dispositivos.

Segundo Villegas & Aspas [2009], a interferência nas redes 802.11 pode se manifestar de duas formas distintas: interferência de compartilhamento da capacidade do canal e interferência co-canal, as quais são caracterizadas a partir da dependência do nível de sinal interferente que atinge o receptor e do método de acesso ao meio empregado nestas redes, ambos caracterizam tipos de interferências intrarrádio.

Conforme visto na Tabela 2.1, as redes 802.11 utilizam em todas as suas extensões o método de acesso ao meio CSMA/CA (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*). De acordo com esse método, sempre que uma estação 802.11 desejar transmitir um quadro, primeiramente precisará ouvir o meio à procura de outras transmissões. Caso o meio permaneça livre durante um intervalo de tempo predeterminado DIFS (do inglês, *Distributed Inter-Frame Space* - DIFS), a estação inicia a transmissão do seu quadro em espera. Se durante o intervalo em que a estação passou ouvindo o meio for detectado alguma outra transmissão, a estação deve esperar o seu término antes de iniciar a sua transmissão [IEEE Std 802 2002]. 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 CSMA/CA permite que as estações 802.11 próximas compartilhem o acesso ao meio evitando transmissões simultâneas. Entretanto, este método também faz as estações de redes distintas, que estão suficientemente próximas, compartilharem da capacidade do meio de comunicação ao utilizar o mesmo canal, dentre os canais sobrepostos ou não sobrepostos [IEEE Std 802.11g/n 2012].

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 [Villegas & Aspas 2009]. 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 este limiar passam a compartilhar o acesso ao meio e dividir a capacidade do canal por elas utilizado.

Villegas & Aspas 2009 define que 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 de forma considerável a capacidade das estações. Considerando duas estações em plena carga como, por exemplo, durante uma transferência de longa duração de um arquivo extenso, é possível dizer que a capacidade individual de cada uma das duas estações é reduzida pela metade se elas compartilham o acesso ao meio.

A Figura 2.4 mostra um exemplo onde os *ranges* (alcance) de detecção de portadora e o *range* de recepção da estação 1 estão em destaque. O *range* de recepção é uma característica que depende do nível de energia do sinal recebido e da sua relação sinal/ruído SINR (*Signal to Interference plus Noise Ratio*), a qual é constituída pela razão entre a potência do sinal de interesse pela soma da potência de sinal interferente mais potência de ruído de fundo.

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, as transmissões da estação 2 serão recebidas corretamente pela estação 1, pois a estação 2 se encontra dentro do seu alcance de recepção.

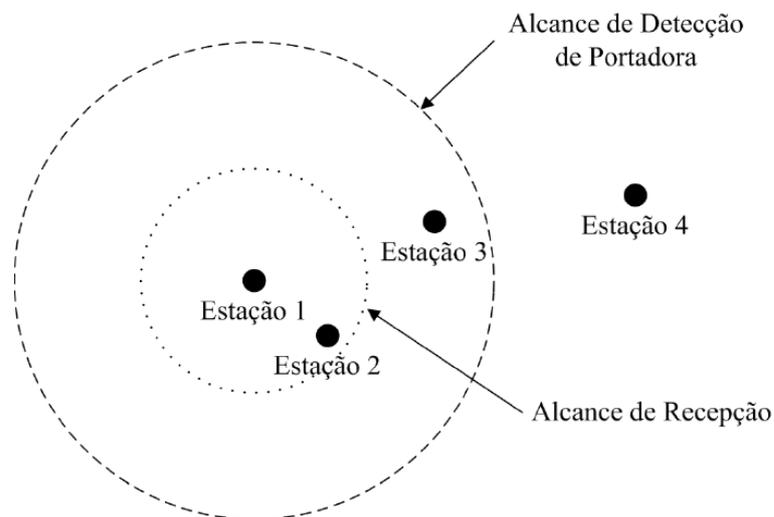


Figura 2.4. Esquemas de compartilhamento método CSMA/CA [Villegas & Aspas 2009].

Na Figura 2.4, também é possível perceber que a estação 4 está fora do *range* 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 [Villegas & Aspas 2009].

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 já existente, 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 destas redes em modo infraestruturado, esses tipos de interferência podem se manifestar em diferentes situações, tanto nos APs como nas estações clientes, por exemplo, o pior caso surge quando dois APs atribuídos ao mesmo canal são postos dentro dos *ranges* de detecção de duas estações, assim mediante a utilização de forma concorrente dessas redes será gerada uma interferência de compartilhamento da capacidade do meio. Este é o pior dos cenários de interferência, pois todas as demais comunicações gerenciadas por este AP podem ser afetadas.

As interferências inter-rádio surgem devido à faixa de frequência 2,4GHz não ser de uso exclusivo para operação das redes 802.11, podendo ser compartilhada com vários outros dispositivos tais como: rádios comunicadores, telefones sem fio, redes *Bluetooth*, fornos de micro-ondas, etc. Estes dispositivos também utilizam da banda ISM para transmitir e receber dados podendo durante essas transmissões, gerar interferências nas redes 802.11 g/n, haja vista que para utilizar essa banda é necessário atender somente algumas restrições de largura de banda e potência de transmissão [Golmie et al. 2003a].

O compartilhamento da banda ISM por padrões diferentes é denominado coexistência, que pode ser definida como a capacidade de um sistema para realizar uma tarefa num dado ambiente compartilhado por outros, que utilizam ou não o mesmo conjunto de regras [Sikora & Groza 2005],[IEEE Std 802.15-99 1999]. Assim, a utilização da banda ISM por outros dispositivos (não-802.11) é visualizada pelas redes 802.11 como fontes de interferência em sua propagação, dada as diferenças na distribuição de canais do espectro 2,4GHz e sua concorrência pelo mesmo espectro.

Na Figura 2.5 é visualizada a distribuição de canais realizada sobre a banda ISM para os padrões IEEE 802.15 (Redes Bluetooth) e IEEE 802.15.4 (Redes Zigbee) em comparação ao padrão 802.11b/g.

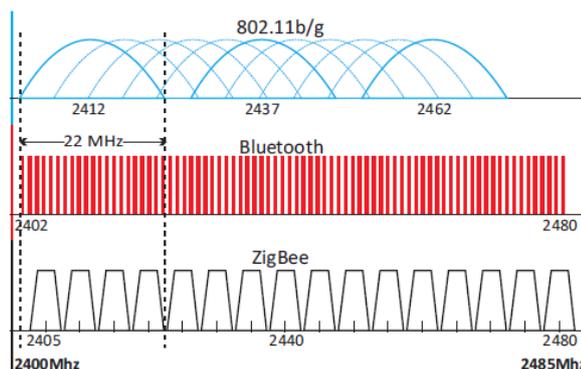


Figura 2.5 Distribuição do espectro 2,4GHz para diferentes padrões [Baid et al. 2011].

É fácil visualizar que as interferências inter-rádio são mais complexas de solucionar visto que, por exemplo, o canal 1 do padrão 802.11, corresponde a cerca de 20 canais do padrão 802.15 e a quatro canais do padrão 802.4, o que tornaria necessário analisar a rede sob o contexto das diferentes tecnologias com o intuito de avaliar o impacto causado de uma transmissão sobre a outra. Por exemplo, diversos trabalhos analisam o impacto das redes Bluetooth na presença de redes 802.11b/g sugerindo algumas técnicas para promover a coexistência entre esses dois padrões, [Kamerman 2000],[Golmie et al 2003c].

De acordo com estes diferentes cenários de interferência em redes 802.11 é verificada a importância de realizar uma atribuição inteligente dos canais desse padrão, passando a considerar o meio em que cada AP foi inserido no processo de alocação de canal. Portanto, fica evidente que as técnicas e mecanismos propostos para a alocação de canal devem conseguir captar pelo menos um dos tipos de interferência mencionados no processo de atribuição de canal.

Desta forma, neste trabalho é proposto um módulo de detecção de interferência que compõe a abordagem de atribuição dinâmica de canais apresentada no Capítulo 3. Este módulo realiza a detecção das interferências intrarrádio obtidas pela rede 802.11, com o intuito de definir a melhor distribuição de canais para essas redes, contribuindo também de forma indireta para a redução das interferências inter-rádio (este tipo de interferência não é foco deste trabalho), em virtude de rearrumar o espectro para o padrão 802.11 sendo possível liberar mais canais para as demais tecnologias.

A próxima seção apresenta os princípios de alocação de canal e trabalhos relacionados a esforços já existentes na literatura para solucionar o problema da alocação de canal em redes IEEE 802.11.

## 2.3 A alocação de canais

Ao se instalar uma rede sem fio é recomendado que pontos de acesso vizinhos possam ser configurados para trabalhar em canais não sobrepostos, de forma a dificultar a interferência entre eles. No entanto, muitas vezes o reuso de canais é necessário devido à escassez desse tipo de canais do padrão 802.11. Neste caso, técnicas de alocação de canais podem ser utilizadas para determinar uma configuração dessas faixas minimizando a interferência entre os dispositivos, surgindo assim técnicas de alocação de canais [Balbi et al. 2012].

Essas técnicas se dividem em dois tipos: alocação estática e alocação dinâmica de canais. A forma tradicional é a alocação estática de canais, onde de igual modo a um tronco telefônico, um canal é compartilhado entre vários usuários concorrentes, dividindo a sua capacidade através de esquemas de multiplexação como o FDM (Frequency Division Multiplexing). Desta forma se existem  $N$  usuários, a largura de banda é dividida em  $N$  partes do mesmo tamanho e a cada usuário é atribuída uma parte para seu uso. Quando existe apenas um número pequeno e constante de estações na rede, como em rádios FM, cada estação recebe uma parte da banda FM e através de um fluxo constante a utiliza para transmitir sinais [Tanenbaum & J. Wetherall 2011].

Entretanto, quando o número de transmissores é grande e continuamente variável, ou até mesmo quando o tráfego ocorre em rajadas, esta alocação apresenta alguns problemas. Se o espectro for dividido em  $N$  regiões e menos de  $N$  estações estabelecerem comunicação, neste momento, uma grande parte desse espectro concorrido estará sendo desperdiçado e, se porventura também mais de  $N$  estações requisitarem canais, algumas delas terão acesso negado ao meio por falta de largura de banda para transmitir, mesmo que caso para algumas destas a banda de frequência alocada não esteja sendo utilizada.

Os mesmos argumentos que se aplicam à FDM também se aplicam a outros métodos de dividir o canal estaticamente, por exemplo, utilizando o método TDM (Time Division Multiplexing) para realizar uma atribuição de cada estação em cada  $n$  óésimo slot de tempo, e ainda se uma determinada estação não utilizar o slot alocado, este será simplesmente desperdiçado. Assim, para ambientes com alto número de estações que em geral caracterizam os ambientes de redes 802.11 não é recomendável a utilização de alocação estática de canais, sendo necessário o emprego de alocação dinâmica de canais.

O conceito da alocação dinâmica de canais surgiu da necessidade das redes celulares, devido a sua característica móvel, de realizar constantes alterações de canais em suas ERBs (Estações Rádio Base) para sua adequação ao meio, de acordo com a densidade de usuários, características de

relevo e níveis de potência de transmissão, além de ter como objetivo a minimização de interferência entre células com o menor número possível de canais [Gibilini 2006].

O processo de alocação de canais em redes celulares é de menor complexidade em relação as redes 802.11 dado que redes Wi-Fi são geralmente utilizadas em ambientes indoor, o que ocasionam irregularidades em sua área de cobertura. Além disso, em um mesmo ambiente muitas redes pertencentes a diferentes domínios administrativos podem coexistir, conforme mencionado na seção 2.2, tornando mais difícil o seu planejamento.

Tendo em vista estas diferenças e o fato de que geralmente, em uma rede celular, canais diferentes são utilizados para os tráfegos de dados e controle, o que não ocorre em uma rede 802.11, técnicas criadas para o primeiro sistema não se aplica diretamente ao segundo [Balbi et al. 2012], dado que conforme foi apresentado na seção 2.2, o problema de interferência nas redes 802.11 pode ser encontrado ao compartilhar a capacidade do meio ou adquirida da forma co-canal, fazendo com que seja necessário levar em consideração estes dois fenômenos no processo de alocação de canal.

Em redes domésticas, o canal de operação dos pontos de acesso é definido de acordo com técnicas dadas pelos fabricantes. A escolha do canal pode ser baseada em alguma métrica ou pode ser apenas aleatória. Um exemplo de técnica comumente utilizada é a LCCS (Least Congested Channel Search) [Achanta 2004].

Segundo [Chiochan et al. 2010], este mecanismo é empregado atualmente em muitos pontos de acesso da Cisco [Cisco 2006] que funcionam sem um controlador central. Nesta técnica, cada AP coleta beacons provenientes de APs vizinhos em todos os canais, através dos quais informações sobre o número de clientes associados podem ser obtidas. Os campos extras criados para carregar as informações necessárias para o funcionamento do LCCS são proprietários da *Cisco*. O AP então escolhe o canal com menor número de clientes para operar, assumindo que cada cliente consome a mesma banda. Em uma segunda abordagem, também descrita em [Achanta 2004], informações sobre o tráfego de cada cliente associado são enviadas através dos *beacons*, possibilitando que cada AP escolha o canal de menor tráfego para operação caso não exista um canal não sobreposto livre.

A seleção de canais para alocação tem efeito sobre a transmissão de todos os elementos de uma rede 802.11 (APs e nós clientes), podendo ser feita tanto de forma centralizada, em contexto coordenado em redes que se relacionam, ou distribuída (descentralizada) de forma independente em contextos não coordenados nos quais os APs operam em redes não relacionadas.

Alguns trabalhos relacionados à alocação dinâmica de canais em contexto centralizado e distribuído serão descritos na próxima seção.

## 2.4 Trabalhos Relacionados

As abordagens propostas para alocação dinâmica de canais e sua classificação podem ser categorizadas quanto ao tipo de arquitetura de rede empregada: centralizada ou distribuída segundo [Weisheng et al. 2010],[Mishra et al. 2005],[Silva & Rezende 2006].

Na abordagem centralizada, os canais de redes sem fio são atribuídos aos APs gerenciados conforme definição provinda de um nó controlador, que detêm informações do comportamento da rede através das informações da situação espectral em qual estes pontos de acesso foram inseridos. Na abordagem distribuída, todos os nós que constituem a rede, tomam decisões independentes quanto à definição de qual canal utilizar baseados unicamente nos dados coletados de sua varredura espectral e de seus APs vizinhos, dispensando o uso de um controlador [Wi-Fi Alliance 2014].

A abordagem centralizada apresenta como vantagem sobre a distribuída a facilidade ao gerenciar a rede, possibilitando coletar dados de desempenho e verificar comportamentos da rede, tais como: susceptibilidade a interferências, quantidade de clientes associados, taxas de TX e RX média da rede, além de atribuir canais considerando uma melhoria de qualidade e velocidade no tráfego de dados para rede como um todo. Outra vantagem ocorre no fato de que para realizar mudanças de topologias e novas configurações nos pontos de acesso da rede basta somente alterar no controlador central da rede e não de forma pontual com geralmente ocorre na arquitetura distribuída.

Outra vantagem das redes centralizadas é que as configurações e atualizações de rede podem ser efetuadas por parte do controlador, independente das distâncias entre APs e entre AP e controlador. Nas incidências de falsos ruídos que aparentemente sobressaiam o sinal de interesse de um AP é possível também filtrar quanto aos que efetivamente impactarão na rede, por exemplo.

Um estudo realizado por Weisheng et al. [2010] apresentou o resultado da avaliação de onze importantes trabalhos propostos na literatura, realizando essa classificação quanto à arquitetura de rede empregada. Este estudo demonstrou que grande parte das abordagens propostas é relacionada a atribuições de canais relacionadas a uma única tecnologia IEEE 802.11, com o princípio de que as demais passam a ser consideradas de forma indireta na escolha dos canais, além de ser um dos padrões mais utilizados atualmente para disponibilizar o acesso em massa à Rede Mundial de Computadores.

Neste trabalho é utilizada uma abordagem centralizada, que em termos gerais, trata-se da mais comumente encontrada e utilizada em instituições públicas, privadas e em domicílios.

### 2.4.1 - Algoritmos de CA Para redes Centralizadas

Alguns algoritmos de atribuição de canal (CA) são aplicados em redes infraestruturadas que apresentam arquitetura centralizada, assim estas técnicas tratam de redes que possuem um ponto central onde são tomadas todas as decisões de rotas e alterações/definições de canais da rede, isto é, trata-se do uso de um nó concentrador que possui o domínio e comunicação com todos os APs/hosts da rede. Este nó aqui denominado de NCC (*Network Central Controller*) pode ainda realizar tarefas de gerenciamento de rede executando ações diretamente nos nós clientes, sendo o responsável por definições atuais e futuras de redistribuição do canal. Assim, esses algoritmos de CA são implementados diretamente nesses pontos onde são tomadas as decisões de realocação de canais.

Balbi et al. (2012) e Mähönen (2004) propõem soluções de baixo custo para o problema, obtendo resultados decorrentes da aplicação das soluções em ambientes reais, alcançando uma melhoria satisfatória no desempenho das redes sem fio, por meio da utilização de algoritmos de CA baseados em grafos, de modo a salientar o potencial dessas abordagens de CA para redistribuição do espectro.

O SCIFI (Sistema de Controle Inteligente para redes sem Fio), o qual trata-se de um sistema executado a partir de um nó controlador central (computador com o sistema instalado) onde através deste são enviados sinais SSH (*Secure Shell*) com comandos de troca de canais para todos os pontos de acesso (APs) da rede. Nestes equipamentos foram embarcados firmwares *open source* como o OpenWrt, de forma a tornar sua configuração automática e dinâmica, facilitando o seu gerenciamento. Para isso é utilizado um algoritmo que tem como objetivo a alocação de canais, modelando a rede em um grafo de interferências transformando o problema de seleção de canais em um problema de coloração de vértices [Balbi et al. 2012].

Conforme visto na Figura 2.6, uma rede 802.11 pode ser representada por um grafo, onde os vértices representam os APs, as cores representam os canais de operação e as arestas que interligam os vértices representam a comunicação de rádio entre os pontos de acesso. As arestas direcionais (arcos) de comunicação entre os vértices exibem a interferência entre os pontos de acesso de forma que, caso um ponto de acesso seja capaz de receber sinal de outro, um arco ponderado, cujo valor representa a qualidade do sinal recebido, é criado.

O objetivo desses algoritmos de CA é definir um conjunto de canais para os APs controlados que se aproxime do ideal em termos de minimização da interferência gerada por APs vizinhos, podendo levar em consideração a interferência de redes não controladas.

Uma vez que o grafo de interferência é construído, técnicas de coloração de grafos são utilizadas para realizar a coloração de seus vértices. 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. Testes de vazão foram realizados mostrando que embora seja realizada uma distribuição estática considerada eficaz (composta somente de canais não sobrepostos). Estes canais não estão bem distribuídos quando é considerada a operação de APs vizinhos não controlados. A avaliação dos resultados mostrou que a rede como um todo, incluindo redes vizinhas não gerenciadas, pode ser beneficiada com a utilização desse algoritmo baseado em grafos.

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 [Mähönen 2004],[Mishra et al. 2005]. Portanto, não existe, ou simplesmente ainda não foi descoberto, um algoritmo capaz de solucionar este problema de coloração em tempo polinomial.

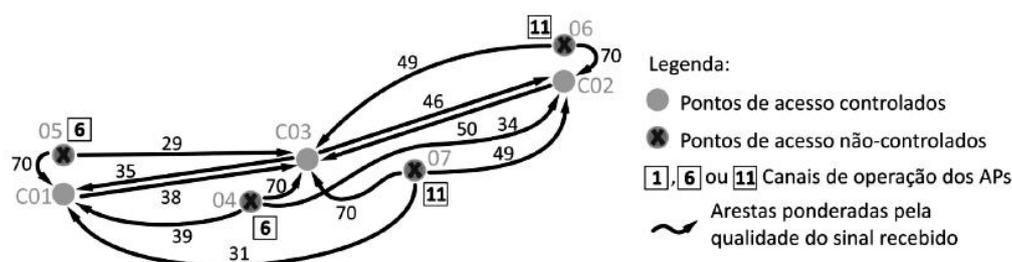


Figura 2.6 Grafo de Interferência criado pelo controlador SCIFI, utilizando informações de varredura espectral coletada pelos APs controlados, visto em [Balbi et al. 2012].

Mähönen (2004) propõe 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 & Kim (2003) desenvolvem uma heurística capaz de buscar soluções para o problema da alocação de canal levando em conta as demandas de tráfego de cada AP.

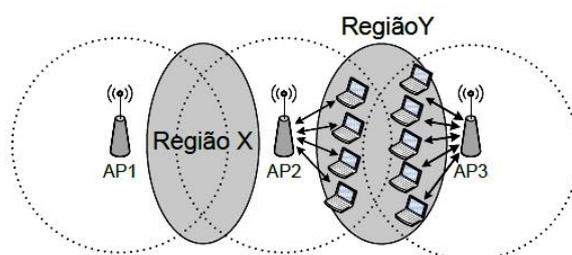
Hills & Schlegel (2004) propõem uma ferramenta para o auxílio no planejamento do posicionamento e na alocação de canais de redes sem fio 802.11, denominada *Rollabout*, que consiste de um dispositivo móvel (um carrinho) equipado com um *laptop* e um sistema de posicionamento (GPS). Medições são realizadas 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.

Segundo, Silva & Rezende (2006) ao modelar o problema da interferência como um grafo é considerado como interferência apenas o fenômeno da interferência de 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.

Na tentativa de tratar as interferências co-canal é possível encontrar soluções que visam o balanceamento de carga da rede, através da distribuição de nós clientes entre os APs por meio da utilização de dados coletados por estes. O objetivo desses algoritmos é fazer com que o maior número de clientes não sofra interferência de outros dispositivos (APs ou clientes) que estejam operando no mesmo canal.

Conforme ilustrado na Figura 2.7, os APs não interferem entre si, mas clientes associados a eles localizados na região X e Y podem sofrer interferência mútua. Desta forma, o algoritmo empregado em [Mishra et al. 2005] trabalha com balanceamento de carga onde é empregado o modelo teórico de definição com base em coloração de conflitos. O termo conflito é definido a partir de cenários onde ocorrem interferências entre os APs clientes, devido à associação desordenada de clientes aos pontos de concentração que se traduz em redução da vazão de rede. Assim, o balanceamento é realizado no momento da definição dos canais de forma que cada cliente seja associado ao AP concentrador que minimize a sua interferência.



*Figura 2.7 Cenário de interferência gerada entre clientes da Região X (entre AP1 e AP2) e entre clientes da Região Y (AP2 e AP3, visto em [Mishra et al. 2005].*

A vantagem desse tipo de abordagem é que revela cenários de interferência que não poderiam ser coletados apenas pelos pontos centrais de acesso, considerando tanto a interferência causada pelos APs pertencentes a rede quanto a causada por redes vizinhas revelando informações inclusive de densidade de nós clientes (representados na Figura 2.7 por laptops) atribuídos à rede. A

desvantagem é que são abordagens de difícil implementação, necessitando de alterações nos dispositivos clientes da rede, ou seja, é necessário realizar tratativas em todos os possíveis *hosts* para que seja possível distribuir a carga.

Dentre as soluções centralizadas existem também as baseadas em fluxo de rede, um exemplo desse tipo de abordagem é o sistema *ChannelFly*, produto da Ruckus Wireless, Inc [Ruckus Wireless 2011], uma solução paga que utiliza algoritmos genéticos para realizar a atribuição dinâmica de canais [Lee et al. 2009] selecionando o melhor canal com base em valores históricos de ocupação de banda.

Esses algoritmos genéticos conhecidos por DCAs (*Dynamic Channel Assigment*) são muito empregados em redes celulares, onde nesta solução foram adaptados para o contexto de redes 802.11 utilizando as médias de capacidade obtidas em todos os canais do padrão. Para isso é necessário o uso de um *hardware* específico da empresa constituído por uma antena adaptável para detecção do espectro 802.11 [Ruckus Wireless 2011]. Para seleção do melhor canal o fator utilizado é a definição de produtividade ao longo do tempo, a qual é dada pela capacidade de rede, definida como a velocidade ou a taxa máxima que pode ser acomodada dentro de canal da tecnologia Wi-Fi (single radio), conforme visto na Figura 2.8.

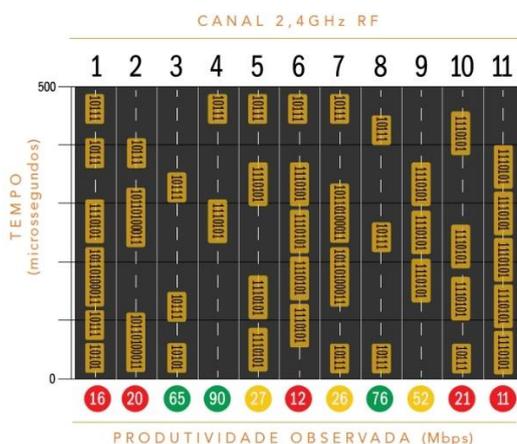


Figura 2.8 Produtividade ao longo do tempo, observada por cada canal 2,4GHz 802.11, onde a largura das pistas representa a largura de banda dos canais e cada veículo é um pacote enviado por este padrão visto em [Ruckus Wireless 2011].

Esta solução apresenta a vantagem de ouvir constantemente os canais de forma a obter informações em tempo real de erros CRC (verificação de redundância cíclica) e sinais de confirmação de recebimento de pacotes (ACK) produzindo estatísticas. Assim, o *ChannelFly* sabe constantemente a capacidade de cada canal determinando qual o canal que oferecerá a maior

capacidade de transmissão para os APs, criando e mantendo um histórico de tendências de capacidade e da interferência obtida em todos os canais.

De forma que, caso ocorra uma queda significativa na capacidade do canal atual, o sistema poderá reagir rapidamente e alternar para um canal melhor. Essa abordagem utiliza o protocolo 802.11h [IEEE Std 802.11h 2003] para comunicação com os dispositivos de rede, assegurando transições simples de um canal para outro, tanto para os clientes quanto para os pontos de acesso. Contudo, essa solução é onerosa, pois além de um *hardware* específico para varredura do espectro é necessário também o uso de APs que suportem o protocolo 802.11h, o que torna inviável a sua implantação em ambientes domésticos.

Portanto, o grande desafio das propostas de soluções para a alocação de canal em redes 802.11 é encontrar algoritmos que forneçam soluções mais próximas de soluções ótimas, em termos de escala polinomial, buscando minimizar as interferências nessas redes através de uma distribuição de canal considerando o ambiente espectral de toda a rede. Encontrar soluções que representem de maneira eficiente os prejuízos causados pela interferência é outro desafio das propostas existentes na literatura.

#### **2.4.2 - Algoritmos de CA Para redes Distribuídas**

Esses algoritmos atribuem dinamicamente canais para redes infraestruturadas que trabalham de forma independente e distribuída, ou seja, as decisões de distribuição de canais ou quaisquer configurações são realizadas entre os APs e seus respectivos vizinhos sem que haja ponto de concentração comum a todos conforme mencionado por [Silva & Rezende 2006].

Dessa forma, sem uma autoridade central para decidir ou aplicar uma regra de alocação, os APs dispostos desta maneira podem se deparar com altas taxas de degradação causadas por interferências, tornando necessário o desenvolvimento de mecanismos de alocação de canais para a melhoria do desempenho dessas redes.

Na abordagem de Silva & Rezende (2006) foi proposto um novo mecanismo de atribuição de canal para redes infraestruturadas 802.11, operando em cenários descentralizados e funcionando de modo que o AP selecione o canal de operação automaticamente, não exigindo comunicação entre os pontos. Para atingir esse objetivo, essa abordagem utiliza características propostas no padrão IEEE 802.11k [IEEE Std 802.11k 2011] que prevê a possibilidade de estações requererem a outras que realizem varredura espectral e reportem quais estações vizinhas foram encontradas, além de trazer meios para que a associação ocorra de forma consciente.

O algoritmo de seleção implementado nos APs utiliza parâmetros e mensagens do padrão 802.11k a fim de desencadear e coletar medidas. Assim, o AP envia periodicamente solicitações de mensagens para as estações-cliente eleitas com o intuito de realizar a tarefa de detecção de canais. Estas estações devem realizar medições simultaneamente em todos os possíveis canais não sobrepostos. Analisar os nós é um importante passo desse algoritmo, que propõe medidas que se realizam em todas as estações-cliente uma vez que este gera uma visão ampla do problema de interferência. Desta forma, o algoritmo obtém o retorno dos parâmetros de todas as estações que gerem a sua execução e utiliza os valores médios desses relatórios recebidos para analisar níveis de carga e ruído.

A desvantagem dessa abordagem é a sobrecarga gerada por cada estação-cliente com o intuito de gerar os parâmetros de canal ocupado para cada janela de execução do algoritmo. É importante salientar que a sobrecarga gerada por esta medição, só se torna significativa quando a duração e periodicidade dessas medições são elevadas. Esse algoritmo trabalha com duas matrizes, uma com valores de carga do canal (proporção entre o tempo médio que o canal transmitiu e o tempo em que ficou ocioso) e outra com valores de ruído do canal.

Dentre as técnicas das abordagens distribuídas que se aplicam ao cenário de redes sem fio, é possível citar também o balanceamento de carga proposto por [Haidar et al. 2008]. Esta técnica consiste em reduzir a interferência excessiva da associação desordenada de clientes para APs que implicam em uma diminuição da vazão da rede. Assim, de acordo com uma métrica definida pela rede, os clientes são associados e desassociados aos APs definidos, sendo as novas associações controladas.

Silva & Rezende (2006) e Haidar et al. (2008) mostram que a busca por balancear a carga no momento de atribuição de canal para os clientes que estão associados a um determinado AP mostrar resultados em sua diminuição de interferência. O balanceamento de carga é uma solução interessante porque se aplica diretamente nos clientes de forma a obter vastas informações da rede, aumentar as garantias de rendimento e, conseqüentemente, melhoria na qualidade de sinal. Mas, esta solução é pouco usual, pois exige mudanças nos dispositivos clientes.

Gibilini (2006) utiliza técnicas de aprendizagem de máquina para alocar canais dentro de uma área composta por propagações de redes móveis. Esse trabalho defende que a implementação de alocação dinâmica com uso de técnicas computacionais clássicas melhora a utilização dos recursos disponíveis, mas necessita de ajustes periódicos para se adequar a novos cenários. Para isso, é necessária a construção de um sistema mais flexível e adaptável, utilizando técnicas de

Inteligência Artificial de modo a gerar um modelo combinatório de diversas teorias de aprendizagem de máquina para realocação de canais.

Neste modelo as células compostas por uma estação rádio base e clientes tem como objetivo acompanhar a demanda existente de solicitações por parte dos nós clientes, com intuito de evitar pedidos de dispositivos que não utilizarão a rede levando a um desbalanceamento desnecessário da rede, reduzindo a capacidade total da prestação de serviços. Existem pedidos de conexão que podem ser enviados a uma célula com a única intenção de criar congestionamentos reduzindo a quantidade de recursos nas células vizinhas (chamados de ataques de negação de serviço). Desta forma, dependendo da configuração de rede, diversas realocações podem ocorrer acarretando a transferência de um vasto número de canais para a célula atacada. Com isso, a célula atacada não consegue atender aos usuários legítimos, degradando o desempenho de outras células.

Faganello (2012) afirma que é possível utilizar algoritmos de aprendizado por reforço chamados de *Q-Learning* [Akyildiz et al. 2008] utilizando rádios cognitivos, onde foi adicionado à essa implementação pequenas modificações no modo como é calculado o *valor-Q* dessa técnica, culminando em uma nova versão desse algoritmo denominada *Q-Learning Plus*. Nesta versão, o cálculo do *valor-Q* de cada canal foi definido levando em consideração não somente o histórico de sucesso das últimas transmissões, mas também a qualidade com que elas foram realizadas.

A grande vantagem adquirida através dessa alteração proposta é que o ruído médio entre as transmissões foi consideravelmente menor. Este resultado significa que é possível aumentar a qualidade na transmissão de um usuário secundário ao selecionar um algoritmo adequado para realização da Seleção Dinâmica de Canal - DCS (*Dynamic Channel Selection*), sem que haja perda significativa no desempenho.

A desvantagem desse algoritmo projetado está na inexistência de uma modelagem para caracterizar as interferências, pois esse algoritmo produzirá constantes variações de acordo com a ocupação do espectro relacionados a taxa de aprendizado necessária para prover a solução e ao número de tentativas de transmissão, causando impacto no desempenho dessa implementação.

Petrova et al. (2005) propõem um mecanismo de seleção de canais que surgiu a partir da modelagem da rede em um grafo de interferências, transformando o problema de seleção de canais em um problema de coloração de vértices. Como solução, é proposta a utilização do algoritmo de coloração *DSATUR* [Brèlaz 1979] sem alterações atuando de forma descentralizada e determinística. Assim, um esquema de balanceamento de carga para células sobrepostas é executado por agentes LBAs (*Load Balance Agent*) em cada ponto de acesso. Esses agentes são os responsáveis por definir o nível de carga de cada AP.

Em APs sobrecarregados, os usuários serão dissociados de seus APs correspondentes e serão associados a APs menos sobrecarregados (definidos pelo LBA). No entanto, essa solução mostrou que o uso de algoritmos de coloração de grafos para definir o canal menos congestionado somente pode ser aplicado de forma satisfatória em redes WLAN que apresentam tamanho estático não funcionando para redes com alta escalabilidade de rede.

Em Gramacho et al. (2013) é visto que o canal definido como melhor é o capaz de propiciar, a maior velocidade de comunicação. Para tal, foi utilizado um modelo de interferência, considerando contenções de transmissão (TX) e degradação da recepção.

O uso desta perspectiva permitiu levar em consideração diferentes perfis de interferência de clientes em relação ao APs. No entanto, nesta abordagem foi empregada a utilização de um componente auxiliador chamado de NMON (um componente de software independente (aplicação), capaz de acessar as APIs de redes sem fio, solicitar medições de varredura, executar o algoritmo de seleção de canal e comandar a troca de canal no AP associado), o objetivo deste emprego é não efetuar alterações no *firmware* proveniente de fábrica dos APs o que caracteriza a vantagem dessa abordagem.

Contudo, este trabalho acarreta a existência de um computador para cada AP gerando uma dependência maior de *hardware* pois a solução necessita de um componente externo ao ponto de acesso para realizar o processamento de seus algoritmos, além de utilizar como métrica principal a relação SINR baseada em potência de sinal podendo gerar uma certa instabilidade na definição de canais em um ambiente altamente ruidoso.

## 2.5 Discussão

Com exceção dos trabalhos Balbi et al. (2012), Gramacho et al. (2013) e o já produto Ruckus Wireless (2011), todos os demais trabalhos foram testados de forma simulada com a utilização de ferramentas como NS, OPNET e OMNET++. Tais trabalhos possibilitam de forma mais simples, a realização de testes das heurísticas propostas mediante a um número vasto de APs e nós clientes, porém testes realizados em ambientes reais apresentam resultados mais precisos ao testar a solução mediante as interferências reais considerando possíveis problemas na implementação prática.

Nas abordagens de atribuição de canal em gerências distribuídas [Gibilini 2006],[Mähönen 2004],[Gramacho et al. 2013] temos como vantagem a independência de cada AP na escolha do canal, o que permite uma maior flexibilidade na troca de canal e um consumo de processamento

menor visto que este é diluído entre os APs da rede. Em compensação, o que pode ser melhor para um determinado ponto, pode não ser o melhor para o grupo. O esquema não coordenado em redes de larga escala pode produzir instabilidade, fazendo com que todos os APs realizem excessivas trocas de canal, causando instabilidade nas conexões dos nós clientes [Gopalakrishnan & GaneshKumar 2012].

Para as abordagens centralizadas [Balbi et al. 2012],[Mishra et al. 2005],[Leung & Kim 2003] os APs e seus nós clientes associados são geridos por uma entidade central, que busca uma melhor definição de canais de acordo com as informações coletadas por varreduras do espectro realizadas pelos pontos de acesso na rede. Nessa abordagem, os dados coletados são analisados, afim de que a entidade central defina uma atribuição levando em consideração todos os APs da rede. Dessa forma as decisões na atribuição de canal analisam todo o contexto dinâmico, permitindo uma melhor gerência.

Este trabalho possui como diferença principal a característica de realizar varreduras espectrais distribuídas e efetivar a atribuição a partir de uma decisão centralizada. Assim, um AP analisa o espectro no qual foi inserido considerando todos os APs vizinhos e envia essa informação para um controlador central da rede, que determina o melhor canal para uso. Deste modo, os APs vizinhos pertencentes à rede e também os APs desconhecidos são levados em consideração na escolha do melhor canal.

Essa característica auxilia na definição de uma distribuição de canais, onde cada AP obterá o melhor canal para sua propagação, ou seja, o que possui menor incidência de ruídos em sua transmissão de sinais. Assim quando todos os membros do sistema não percebem mais oportunidades para aumento do seu desempenho, o sistema deve convergir para um estado estável. A Tabela 2.2 sumariza algumas soluções discutidas nesta seção.

O estudo bibliográfico realizado demonstra que muitas metodologias já foram empregadas para mitigar o problema de interferência e atribuição dinâmica de canal em redes sem fio. Entretanto, este problema ainda não possui uma solução definida que atenda a todos os aspectos dinâmicos das redes. Com o objetivo de apresentar uma nova alternativa na busca de soluções para o problema, este trabalho apresenta uma nova abordagem que utiliza múltiplos fatores para seleção dos melhores canais, sendo apresentado em detalhes no Capítulo 3.

Tabela 2.2: Sumarização das abordagens de CA para redes sem fio

Publicação	Técnicas Usadas	Cenário Avaliado	Resultado/Métrica	Tipo de Abordagem
[Balbi et al. 2012]	Algoritmo de coloração DSATUR com alterações	7 APs e 7 clientes (Ambiente real)	Aumentou em mais de 29% a vazão agregada da rede / <i>Throughput</i>	Centralizada
[Mishra et al. 2005a]	Algoritmos de Coloração de Vértices utilizando LCCS ( <i>Least Congested Channel Search</i> ) e $H_{min}$ , $H_{max}$ e $H_{sum}$	20 APs (Simulações NS-2)	Reduziu a interferência entre 45,5% e 56 % em topologias densas considerando apenas os 3 canais não sobrepostos / utiliza métricas próprias $L_{max}$ , $L_{sum}$ , e $L_{num}$	Centralizada
[Mishra, Banerjee, et al. 2005b]	Grafo de Conflitos e de Balanceamento de Carga	50 APs e 200 clientes (Simulações NS-2)	Aumentou em 50% ou em até 3 vezes em relação as métricas comparadas/ <i>Throughput</i> , <i>Per-packet delay</i> , <i>MAC-level Collisions</i> e <i>Better Fairness</i> .	Centralizada
[Ruckus Wireless 2011]	FCA e DCA ( <i>Fixed and Dynamic Channel Assignment</i> )	80 APs (Ambiente real)	Melhoria significativa da capacidade observada em ambientes congestionados (25 - 50%) / <i>Throughput</i> e Produtividade	Centralizada
[Hills & Schlegel 2004]	Algoritmos de coloração	4APs móveis (Ambiente real)	Apresentou melhor adaptabilidade em ambientes altamente dinâmicos no entanto só atende a pequenas quantidades de APs / <i>Throughput</i>	Centralizada
[Silva & Rezende 2006]	Alterações no protocolo IEEE 802.11k e NOAH* ( <i>No Ad-Hoc Routing Agent</i> )	13 unidades de BSSs (Simulações NS-2)	Apresentou melhoria de 60% no <i>Throughput</i> Médio de Rede / Média de Troca de Canais e <i>Channel Measuring Time</i> (Tempo de escuta do espectro antes da efetiva atribuição)	Distribuída
[Haidar et al. 2008]	Algoritmos de Balanceamento de Carga	Simulações com cargas variadas (Simulações NS-2)	Apresentou melhoria de 80% no <i>Throughput</i> Médio de Rede e 20% na Perda de Pacotes / <i>Throughput</i> e Perda de Pacotes em tráfego <i>UDP</i>	Distribuída
[Gibilini 2006]	Algoritmos de Aprendizagem de Máquina	30 células atendidas por uma estação rádio base (Simulações OPNET)	A rede em teste apresentou uma taxa de bloqueio de chamadas, em média 18% menor que uma rede sem o algoritmo/ Bloqueio de Chamadas	Distribuída
[Faganello 2012]	Aprendizado por Reforço ó Q- Learning	34 ERBs (Estações Rádio Base) (Simulações OMNET)	Aumento de 20 a 25dB / Relação sinal-ruído (SNR), Taxa de Aprendizado, Número de Canais, Tentativas de TX, Coeficiente de Exploração **	Distribuída
[Mähönen 2004]	Algoritmos de coloração de vértices	5 APs (Ambiente Real)	Melhoria na relação sinal-ruído (SNR)	Distribuída

[Gramacho et al. 2013]	Algoritmo guloso não coordenado, baseado no cliente	8 redes sem fio (cada uma com 1 AP e 1 NMON) (Ambiente Real)	Foram alcançadas velocidades em torno de 65 Mbps / Velocidade de TX e RX (Recepção), Fairness***, Velocidade Média, Quantidade de Troca de Canais	Distribuída
------------------------	---	---	---	-------------

\*NOAH - <http://icapeople.epfl.ch/widmer/uwb/ns-2/noah/>

\*\* Combinação da estratégia  $\epsilon$ -greedy, que seleciona sempre a transição com maior valor-Q associado, com uma ação de exploração, onde é escolhida uma ação aleatória de acordo com uma probabilidade  $\epsilon$ . Além disso, é adicionada um parâmetro  $\delta$  de estabilidade ao algoritmo. Esse parâmetro define um limiar onde a troca de canal só ocorre caso o novo valor-Q possua uma diferença de no mínimo  $\delta$  em relação ao maior valor-Q. Em resumo, probabilidade de, ao invés de executar de acordo o valor-Q, ocorra à exploração de um canal aleatoriamente.

\*\*\* Fairness: Intervalo de justiça de acessos entre os APs.

# Capítulo 3

## Atribuição de Canais Baseada em Múltiplos Fatores

Este Capítulo detalha a abordagem proposta para a seleção e atribuição de canais em redes 802.11 bem como descreve o que a constitui: módulo de detecção de interferência e os algoritmos de atribuição de canais envolvidos na elaboração da proposta. Neste são detalhados os múltiplos fatores utilizados para definir a alocação de canal.

### 3.1 MFDCA

A abordagem de atribuição dinâmica de canais por fatores múltiplos, denominada MFDCA (*Multi-Factor Dynamic Channel Assignment*) tem por objetivo realizar uma distribuição de canais em redes padrão IEEE 802.11, de modo que todos os APs da rede recebam uma melhor configuração de canal baseada em características obtidas por meio da análise de alguns fatores, aqui denominados como múltiplos visto que a qualidade do enlace (um dos fatores) é constituída por mais de uma métrica. Esse conjunto de características é obtido através da análise de todos os canais desse padrão, pertencentes a faixa de frequência 2,4 GHz.

Conforme Figura 3.1, a arquitetura de rede utilizada pelo MFDCA é composta por:

- APRs: são os pontos de acesso pertencentes à rede, os quais geram suas WLANs utilizadas para permitir comunicação entre os nós clientes e prover comunicação com a Internet, recebendo sinais de controle provenientes de um controlador central de rede (NCC). Estes APs são de baixo custo e apresentam o requisito de operar com o sistema operacional embarcado de código aberto OpenWRT [OpenWrt 2004];
- AP desconhecido: ponto de acesso não pertencente à rede, porém detectado pelos APRs, podendo impactar em sua comunicação;
- Nó cliente: utilizam das redes sem fio providas dos APRs, podendo estabelecer comunicação com os demais nós ou acessar a Internet;

- NCC (*Network Central Controller*): representado por um computador, o qual realiza a gerência da rede centralizada, enviando e recebendo sinais de controle, podendo estabelecer comunicação com os APRs. Possui a visão da rede como um todo e define quais os melhores canais a serem utilizados pelos pontos de acesso de acordo com os algoritmos do sistema;
- Um switch (ou um equipamento de camada 2) que interliga os pontos de acesso e o controlador central através da rede cabeada, possibilitando a comunicação entre eles;

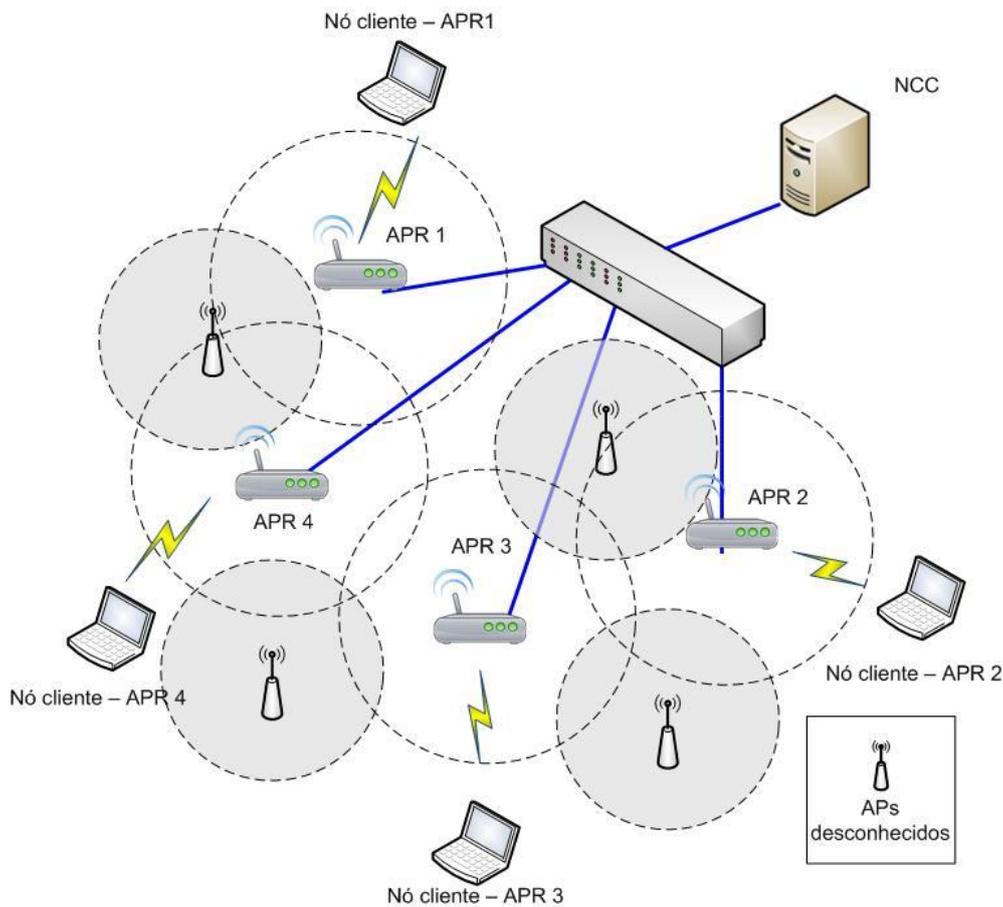


Figura 3.1. Arquitetura de rede utilizada pelo MFDCA.

A MFDCA possui dois componentes principais: um módulo de detecção de interferência e um algoritmo de atribuição de canal. O módulo de detecção de interferência é responsável por analisar o contexto espectral no qual determinado APR está inserido, considerando os fatores definidos. Assim, cada APR realiza uma varredura do espectro para coletar os parâmetros (qualidade do *link*, potência do sinal recebido e canais em uso) definindo a partir desses, os fatores a serem utilizados para determinar o nível de interferência entre os canais. Tais informações são enviadas para um controlador central de rede, denominado de NCC que emprega um algoritmo de atribuição de canal para avaliar os fatores obtidos e realizar a melhor distribuição dos canais.

A Figura 3.2 ilustra o funcionamento da MFDCA, que inclui as seguintes etapas: sensoriamento do espectro, detecção de interferência, elaboração de relatórios nos APRs, envio/coleta de relatórios pelo controlador central da rede, definição de prioridade de atribuição dos APRs, seleção de canais e a efetiva atribuição de canais.

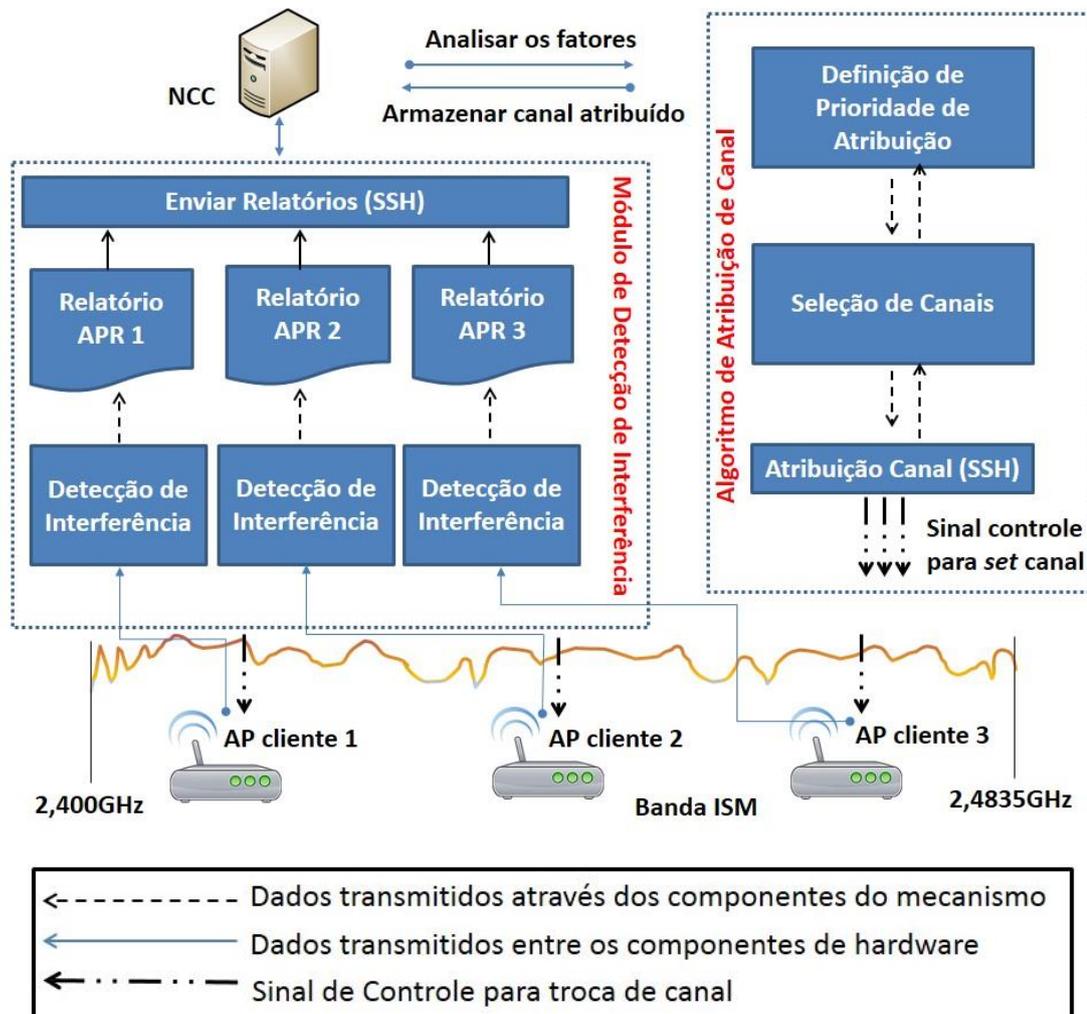


Figura 3.2. Funcionamento do MFDCA exemplificando três APs que possuem o módulo de detecção de interferência atuando de forma embarcada e enviando relatórios para o algoritmo de atribuição de canal operando separadamente no controlador da rede.

### 3.2 Módulo de Detecção de Interferência

Como exibido na Figura 3.2, o módulo de detecção de interferência é constituído pelas seguintes etapas:

- Etapa 1: Sensoriamento do espectro, onde serão coletadas as informações para análise;
- Etapa 2: Detecção de Interferência, utilizando algoritmos que realizam a análise das informações coletadas do espectro para detectar quanto a existência de interferência;
- Etapa 3: Elaboração de relatórios nos APRs, que se constitui da forma como o NCC obtém os dados do ambiente espectral detectado por cada AP;
- Etapa 4: Efetivo envio/coleta de relatórios pelo controlador central da rede, através do protocolo SSH (*Secure Shell*) para realizar ações de coleta e armazenamento de relatório no NCC;

### 3.2.1 - Etapa 1 ó Sensoriamento do Espectro

Nesta etapa, os APRs coletam informações do meio de transmissão através de uma execução de varredura espectral. Através desta, quadros de beacon<sup>2</sup>, contendo informações relativas ao sinal proveniente de pontos de acessos vizinhos, são capturados. O processo de varredura espectral é realizado após intervalos de tempo pré-definidos, onde novos quadros são capturados de modo que o espectro é avaliado continuamente quanto ao nível de interferência dos canais. Após a realização da coleta, os dados são tratados pelo algoritmo de detecção de interferência que os classifica na condição de múltiplos fatores.

A Figura 3.3 exemplifica uma situação em que um AP da rede (APR1) captura quadros beacons de dois APs desconhecidos e quadros provenientes de outros APs da rede (APR 2 e APR 3), tais informações são utilizadas para determinar o nível de interferência do meio utilizando o algoritmo de detecção de interferência.

Este nível de interferência é obtido analisando cada canal em uso (canais em propagação). No caso dessa proposta, esta informação é usada também para avaliar os canais sem uso (sem propagação) através do cálculo de sobreposição de canais. Detalhes sobre o modelo de detecção de interferências são apresentados na seção seguinte.

---

<sup>2</sup> Também conhecidos como beacon frames, são quadros enviados regularmente pelo ponto de acesso para a rede, normalmente a cada 100 ms, o objetivo principal é divulgar a rede (SSID) e algumas características do ponto de acesso, como os canais suportados por ele e tecnologia que usa na camada física.

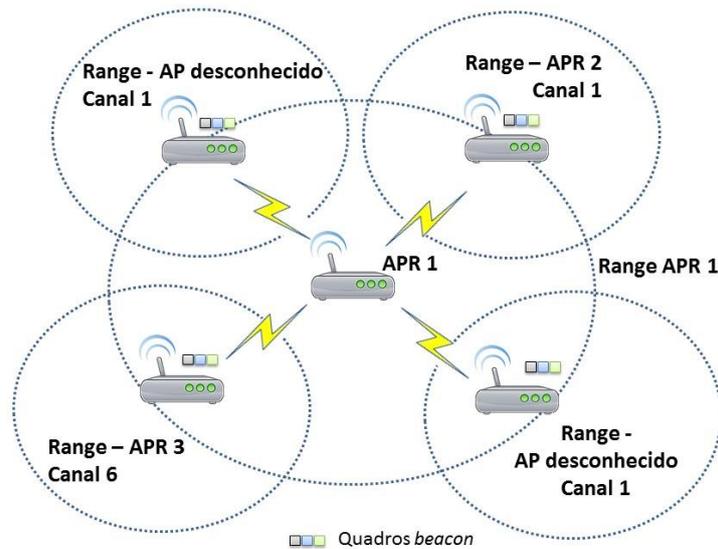


Figura 3.3 Ambiente espectral capturado por um APR identificado como APR 1.

### 3.2.2 - Etapa 2 ó Módulo de Detecção de Interferência

Após o sensoriamento do espectro, o módulo de detecção de interferência utiliza as informações capturadas para calcular o nível de interferência sobre os  $K$  canais, conforme distribuição e largura de banda do padrão IEEE 802.11 exibidos na Figura 3.4.

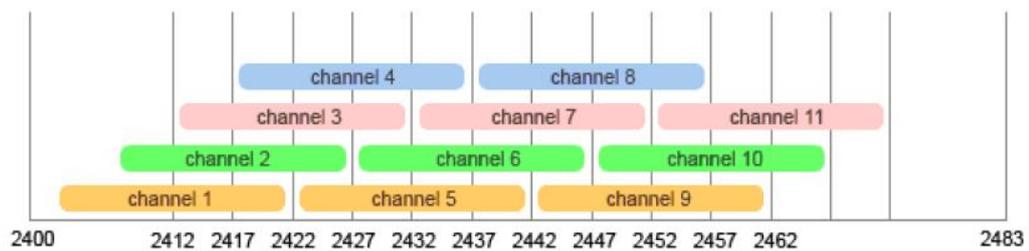


Figura 3.4. Canais que consistem padrão IEEE 802.11b/g [AirMagnet Inc 2008].

Como mencionado no Capítulo 2, o padrão IEEE 802.11 define onze canais ao longo da banda ISM (padrão americano) sendo que cada canal da extensão  $g$  e  $n$  apresentam aproximadamente 20MHz de largura de banda. A definição da existência e intensidade de interferência nesses canais é baseada nos seguintes fatores:

- Indicador de Potência de Sinal (RSSI): é uma medida relativa a força de propagação de um sinal de rádio, conforme medido por uma interface de rede sem fio comum;

- Relação Sinal/Ruído (SINR): definida como a razão entre a potência de um sinal e a potência de um ruído sobreposto a este sinal (potência interferente + potência de ruído de fundo), assim quanto menor seu valor menor a quantidade de ruídos incidindo sobre o sinal de interesse;
- Qualidade do enlace (LQ): é uma caracterização da intensidade e/ou qualidade do pacote recebido. A medição representa a relação sinal ruído média calculada para os últimos quadros recebidos a partir do RSSI [Balbi et al. 2012]. O valor da LQ deve ser relatado como um número inteiro que varia de 0x00 para 0xFF mediante ao tipo de interface sem fio utilizada. No caso deste trabalho, sua escala abrange valores de 0 até 70 determinados pela API Ath9k utilizadas pelas interfaces de rede sem fio para reconhecimento e funcionamento no SO [Linus 2008];
- Fator de Sobreposição (FS): indica o percentual de sobreposição da largura de banda de um canal em relação aos demais de um determinado padrão. Detalhes sobre o cálculo do fator de sobreposição de canais serão apresentados na seção 3.2.2.2.

A análise do nível de interferência ocorre em duas etapas: análise dos canais em uso e análise dos canais sem uso, de forma a considerar os canais sobrepostos e não sobrepostos pertencentes ao padrão 802.11. O objetivo é analisar quanto à questão de menor ou maior incidência de interferência em todos os canais definidos pelo padrão IEEE ao longo da Banda ISM. Assim na análise dos algoritmos a serem apresentados, os canais em propagação serão chamados aqui de canais USED e os canais que não possuem propagação serão chamados de canais NOUSED.

### 3.2.2.1 Análise dos Canais em Uso ó USED

A análise dos canais em uso é executada em três etapas, considerando todos os APs detectados por um APR. Na primeira etapa, cada APR identifica os canais em utilização de cada AP detectado, gerando uma matriz  $C$  (AP/Canal). A matriz  $C$  é formalmente descrita pela Equação 3.1,

$$\sum_{k \in K} c_{kj} = 1, \forall j \in J \quad (\text{Equação 3.1})$$

onde  $c_{kj}$  é uma variável de decisão que assume valor 1, quando o canal ( $k$ ) está atribuído para um AP ( $j$ ) e recebe 0 caso contrário, dado o conjunto de APs detectados ( $J$ ) por um APR.  $K$  é o conjunto

de canais que estão em uso (conforme visto anteriormente, esse número pode variar de acordo com os padrões americano, europeu e japonês).  $C$  é a matriz de elementos  $\mathbb{Q}_{\text{AP}}^{\text{canal}}$ , onde  $\mathbb{Q}_{\text{AP}}^{\text{canal}}$  é um vetor linha de  $C$ . Assim, todos os canais do padrão são percorridos através dessas matrizes, de modo a fazer o mapeamento (AP/Canal).

Em seguida, na segunda etapa, para cada AP identificado pela matriz  $C$  é coletado o valor da qualidade do *link* ( $LQ$ ) correspondente, gerando a matriz  $V$  (AP/LQ). A matriz  $V$  é formalmente descrita através da Equação 3.2,

$$\sum_{j \in J} v_{jk} = LQ_j, \forall j \in J \quad (\text{Equação 3.2})$$

onde o  $\mathbb{Q}_{\text{AP}}^{\text{canal}}$  recebe o valor da qualidade de link de um AP ( $j$ ) atribuído ao canal ( $k$ ) sendo  $V$  a matriz conjunto de  $\mathbb{Q}_{\text{AP}}^{\text{canal}}$  e cada  $\mathbb{Q}_{\text{AP}}^{\text{canal}}$  é um vetor linha de  $V$ .

Por último, na terceira etapa é gerada a matriz  $L$  constituída pela soma total da qualidade de *link* de cada canal, definida por

$$L_i = \sum c_{kj} \cdot v_{jk}, \forall k \in K \quad (\text{Equação 3.3})$$

sendo  $I$  o conjunto da soma de LQ recebida por cada canal (essa soma varia de acordo com o intervalo de tempo definido para sensoriamento) e  $L$  a matriz linha constituída pela soma total da qualidade de link em  $I$ .

Portanto, as Equações 3.1, 3.2 e 3.3 são responsáveis pela elaboração das matrizes de múltiplos fatores que avaliam os níveis de interferência obtidos através dos canais em uso do padrão 802.11, sendo formadas por valores coletados através dos APs detectados dentro da área de alcance dos APRs.

A exemplo, suponha que o APR 1 realiza uma *varredura* no espectro como a vista na Figura 3.3, onde é exibido o ambiente espectral capturado por um APR. Neste caso, esse ponto de acesso detectou 4 (quatro) APs em seu ambiente, sendo: 3 (três) atribuídos ao canal 1 e 1 (um) atribuído ao canal 6 e supondo ainda que cada propagação é detectada um valor de  $LQ = 30$  por este APR.

Assim, dos canais USED o pior canal seria o canal 1, pois  $L_1 = 30 + 30 + 30 = 90$  de qualidade de *link* propagado sobre o APR 1. Logo, se o APR assumisse também o canal 1 a interferência seria maior, visto que o novo tráfego iria concorrer por essa *fatia* do espectro já utilizada por 3 outros APs existentes, pertencentes ou não a rede. Em contrapartida o canal 6 compreendido apresenta  $L_6$

= 30 propagado por apenas um AP atribuído a este canal [Balbi et al. 2012].

Desta forma, o melhor canal em uso (MCU) seria o canal 6 em razão de mostrar o menor índice de qualidade de *link* propagado sobre o APR e em consequência apresenta uma relação sinal ruído maior (SINR). A Figura 3.5 exibe de forma ilustrativa as etapas 1,2 e 3 que compõe a análise dos canais USED, definindo assim o MCU.

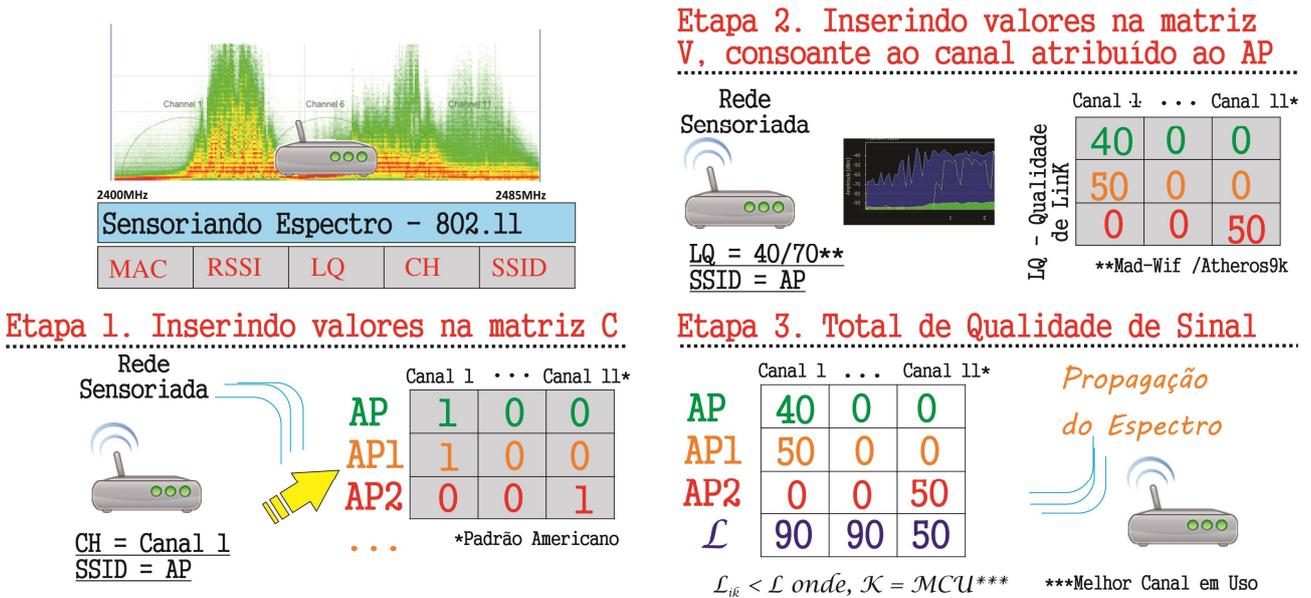


Figura 3.5. Esboço das etapas para definição do MCU (Etapa 1: Sensoriamento e elaboração da matriz de mapeamento, Etapa 2: Verifica LQ de cada AP detectado e Etapa 3: Elabora a matriz soma da qualidade de link).

### 3.2.2.2 Análise dos Canais sem Uso ó NOUSED

A análise dos canais NOUSED (ou sem propagação) é baseada no cálculo do fator de sobreposição de canais proposto por [Burton 2002]. Esse cálculo emprega uma matriz gerada através da relação de sobreposição entre os canais adjacentes, ou seja, a porcentagem de intersecção entre os canais.

De forma simples, o fator de sobreposição (FS) é calculado a partir da divisão entre a largura da faixa de intersecção (LI) entre os canais, dividido pela largura de banda do canal (lbc), descrito na Equação 3.4:

$$FS_k = LI_k / lbc \quad (\text{Equação 3.4})$$

A faixa de intersecção é calculada subtraindo o limite lateral superior (LLS) do canal base

pelo limite lateral inferior (*LLI*) do canal adjacente a ser analisado. Por exemplo, o Canal 1 está na faixa de frequência 2,401 GHz - 2,423 GHz, assim seu  $LLS = 2,423$  e  $LLI = 2,401$ .

Desta forma, a faixa de interseção entre Canal 1 (2,401 GHz - 2,423 GHz) e Canal 2 (2,406 GHz - 2,428 GHz) é dada por  $LLS(\text{canal1}) \text{ ó } LLI(\text{canal2}) = 17$  MHz e o fator de sobreposição obtido é  $FS_{(1,2)} = 17 / 20 = 0,772$ .

Ao realizar o mesmo cálculo para cada canal em relação aos demais é possível construir uma matriz fator de sobreposição de canais. Deste modo, o fator de sobreposição de um determinado canal em relação a ele mesmo é igual a 1, assim caso duas redes utilizem o mesmo canal a sobreposição será de 100% em relação a sua ocupação.

A primeira conclusão geralmente chegada é que uma vez que esses canais estão sem uso (ou seja, sem propagação) todos esses canais, se utilizados, não gerariam interferência em sua utilização, em virtude de não haver concorrência pela porção do espectro vinculada àquele determinado canal, não havendo portando consumo em sua largura de banda.

Entretanto, os canais NOUSED, em sua maioria, são canais sobrepostos (conforme mostrado no Capítulo 4). Esses canais são mais susceptíveis a receber interferências de outros canais justificando a ideia de sua menor utilização. Canais sobrepostos são caracterizados por maior probabilidade de interferir em vários desses canais ou pelo menos em 2 canais adjacentes, mediante a qualquer eventual ocupação do espectro.

Com tal característica, os canais NOUSED em sua condição de atribuição de forma aleatória são mais susceptíveis a ruído, podendo apresentar a condição de  $FS = 1$  (largura de banda totalmente sobreposta por outros canais) ou parcialmente sobreposto apresentando  $FS \sim 1$ . Por esse motivo é que os atuais fabricantes de APs produzem esses equipamentos, com a condição de atribuição a algum canal não sobreposto (canais 1, 6 e 11 do padrão americano) em virtude de apresentar maior confiabilidade no tráfego de informações e por possuírem menor probabilidade a interferências.

Portanto, não podemos afirmar que qualquer canal sem propagação é o melhor para utilizar, uma vez que o melhor canal é o que se obtém maior qualidade, melhores índices de desempenho e menor susceptibilidade às interferências. Assim, a atribuição dos canais NOUSED requer a análise de outros parâmetros como o fator de sobreposição que fornece parâmetros probabilísticos de interferência por meio de modelos matemáticos [Burton 2002],[Zhou & Liu 2012].

Para analisar esse fator foram definidas as Equações 3.5, 3.6, 3.7 e 3.8 como resultado para verificação do melhor canal, incluindo os canais sobrepostos e não sobrepostos:

$$l_{ik} < L_i, \forall l \in L \quad (\text{Equação 3.5})$$

A Equação 3.5 define como melhor canal em uso (MCU), o canal que apresentar a menor soma da qualidade ( $l_{ik}$ ), dada a matriz ( $L$ ) formada pela soma (LQ por Canal) em propagação sobre um APR. Esse canal definido será utilizado como canal base para verificação dos melhores canais NOUSER. Logo, esse canal será o utilizado para consultar uma matriz fator de sobreposição  $olf$ , conforme definido em [Burton 2002]. Essa matriz, gerada pelas equações 3.6 e 3.7, foi atualizada atender o padrão IEEE 802.11g.

$$k_0 := \int_{2400}^{2483} \text{sobreposicao}(1, 1, x) dx, \text{ onde } k_0 = L I_k \quad (\text{Equação 3.6})$$

Na Equação 3.6, a integral de 2400 até 2483 permite incluir todo o espectro existente na Banda ISM 2,4 GHz, a partir disso é possível na variável  $x$  determinar um canal, o qual será utilizado como canal base para determinar através da função *sobreposição* os valores correspondentes ao fator de sobreposição referente a cada canal em relação ao canal base. Na Equação 3.7,

$$olf_k := \frac{1}{k_0} \int_{2400}^{2483} \text{sobreposicao}(1, k + 1, x) dx, \text{ onde } k=1...11 \text{ (canais)} \quad (\text{Equação 3.7})$$

É verificado que a variável  $k$  pode assumir quaisquer valores dentre os canais IEEE 802.11 definidos pelo padrão sem fio adotado. Assim, a partir da definição de um canal base é verificado o percentual de sua sobreposição em relação aos demais, variando o valor de  $k$  na equação e atribuindo a  $k_0$  o canal base.

O resultado é verificado na matriz  $K$  e  $olf$  considerando para exemplo canal base igual a um, ou seja,  $k_0 = 1$ . Esses valores de FS foram calculados considerando largura de banda de 20 MHz.

$$K = \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \\ 8 \\ 9 \\ 10 \\ 11 \end{bmatrix} \quad \text{olf} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0,7272 \\ 0,2714 \\ 0,0375 \\ 0,0054 \\ 0,0008 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

A matriz *olf* é composta por fatores de sobreposição já previamente definidos calculados tomando como base todos os canais IEEE 802.11 (padrão americano), conforme visto nos trabalhos [Burton 2002],[Zhou & Liu 2012].

Assim, todos os valores de sobreposição dessa matriz são considerados na avaliação dos canais do padrão 802.11, excluindo o canal definido como base, pois ele será a referência para o cálculo da faixa de intersecção resultando na Equação 3.8,

$$FS_k = l_k \cdot (olf_k^T - l_k), \forall k \in K \quad (\text{Equação 3.8})$$

Portanto, os melhores canais NOUSER são definidos pelos canais que apresentam valor de  $FS = 0$  (zero) em relação ao canal base (melhor canal em uso). Assim, os melhores canais sem uso (MCNUs) se utilizados apresentarão maior garantia de um baixo índice das interferências de compartilhamento do meio e as interferências co-canais, vistas na seção 2.2.

O resultado final do módulo de detecção de interferências é a lista de melhores canais para cada APR, onde o primeiro elemento é o melhor canal em uso seguido pelos canais que apresentaram fator de sobreposição iguais a zero (MCNUs). Finalmente, o relatório é disparado para o controlador central da rede (NCC) que definirá qual canal atribuir ao APR a partir desta lista, considerando na escolha os relatórios enviados pelos outros APRs da rede.

A Figura 3.6 ilustra o processo de definição dos melhores canais sem uso, o qual é composto pela definição do MCU como canal base para o cálculo do fator de sobreposição (Etapa 4) e o processo para listar os MCNUs (Etapa 5).

Etapa 4. Definindo MCU como canal base e calculando Fator de Sobreposição (FS)

Etapa 5. Definição MCNU - Melhores Canais sem Uso

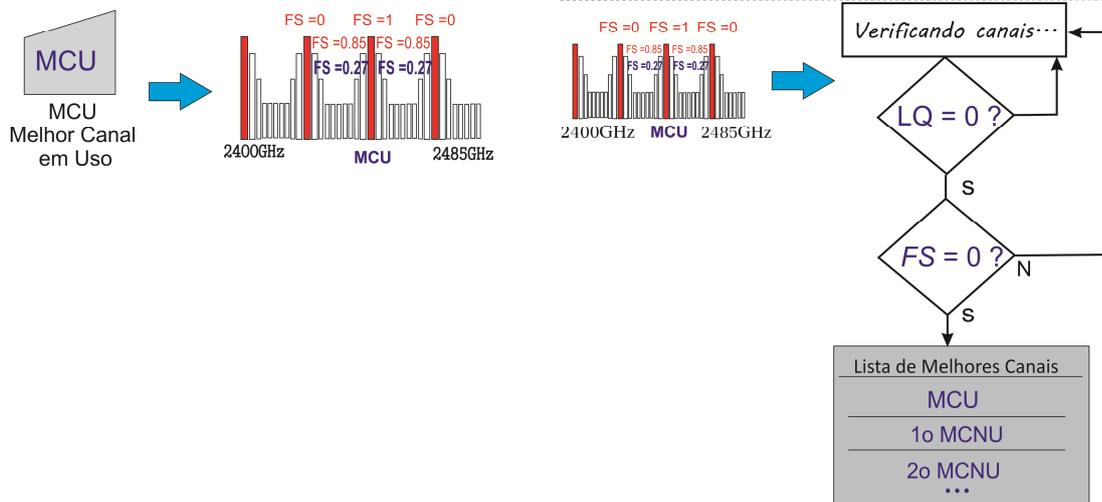


Figura 3.6. Esboço das etapas para definição dos MCNUs.

### 3.2.3 - Etapa 3 ó Relatório APRs

Após a definição do melhor canal em uso (MCU) e dos melhores canais sem uso (MCNUs) para um determinado APR, essas informações são enviadas para o controlador central da rede (NCC) que tomará a decisão de atribuição. Tais informações são enviadas por meio de relatórios produzidos por cada ponto de acesso e armazenados no NCC para seu uso.

A ideia desse relatório é tornar o espectro, no qual o ponto de acesso foi inserido, conhecido pelo NCC que aplicará algoritmos de seleção de modo a considerar todos os relatórios enviados pelos APRs e realizar uma distribuição mais próxima mais eficiente.

Além dessas informações, o relatório também contém outras métricas como densidade e saturação do espectro, endereço IP, MAC e canal atual utilizado pelo APR, as quais são utilizadas pelo NCC para tornar suas decisões mais precisas. A Figura 3.7 ilustra o processo de elaboração desse relatório.

A métrica densidade refere-se a quantidade de redes detectadas por um APR em seu espectro. Esta métrica é usada pelo NCC para visualizar o nível de concorrência das redes pelo espectro em qual o APR está inserido. Como a inserção e a remoção de APs na rede é dinâmica foi definido um limiar para atualização dos relatórios enviados ao NCC. O relatório é atualizado somente quando um AP desconhecido permanecer ou desaparecer do ambiente após  $n$  leituras do espectro. Esse fator é usado para tornar as decisões do NCC mais estáveis.

### Etapa 6. Cálculo da Densidade de Rede e Saturação de Canais

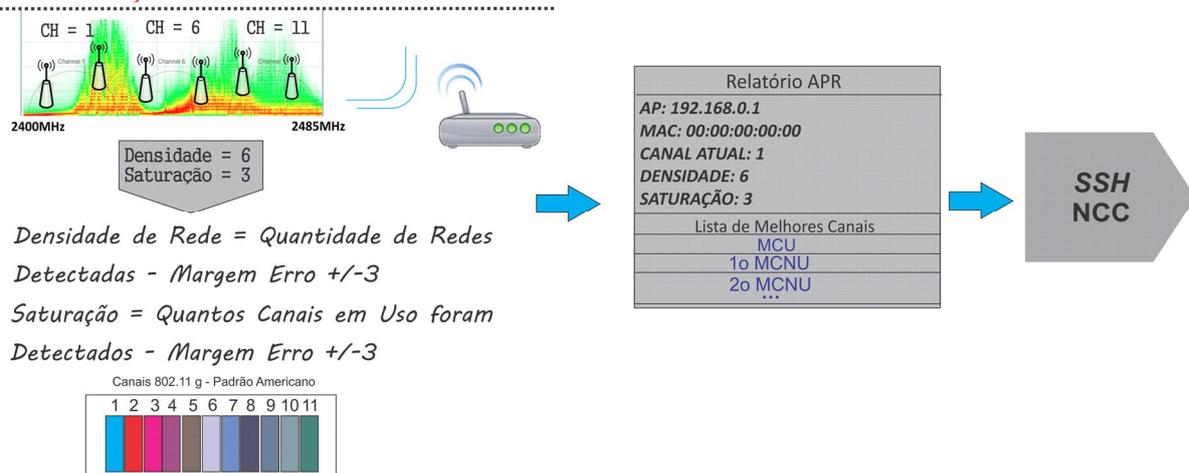


Figura 3.7. Gerando relatórios para o NCC.

A métrica saturação define a diversidade de canais em propagação. Esta métrica é utilizada para caracterizar o espectro quanto as possíveis faixas de interferência entre sinais. A saturação também possui um limiar de atualização semelhante ao descrito para a métrica densidade.

Assim o módulo de detecção de interferência deve ficar em observação constante, principalmente no caso dos fatores (métricas) adotados neste trabalho, como por exemplo, a métrica qualidade de *link* que se caracteriza por ser altamente variável devido à sensibilidade a alterações provenientes de outras tecnologias sem fio próximas.

#### 3.2.4 - Etapa 4 ó Envio SSH para NCC

Ao término da elaboração de um relatório APR, essas informações são coletadas em um intervalo  $t$  definido pela abordagem para realização das coletas dos arquivos nos APRs. Essas coletas são realizadas por comandos de *Secure Shell* (SSH).

Esses comandos em geral são de cópia dos arquivos gerados e salvos nas memórias dos APRs para uma pasta definida para consulta no NCC (comandos *scp* - Linux).

A partir dessas informações, o NCC analisará as métricas coletadas para realizar as atribuições de canais aos APRs empregando o algoritmo de atribuição de canal.

### 3.2.5 - Pseudocódigo ó Módulo de Detecção de Interferência

A Figura 3.8 apresenta o pseudocódigo da operação da solução proposta para o módulo de detecção de interferência apresentado. Esta lógica após sua codificação estará funcionando de forma embarcada nos pontos de acesso da rede.

Em sua execução, são utilizadas informações de varredura espectral coletadas previamente de cada AP.

Para melhor compreensão o código foi marcado em estágios segundo a sua função, assim:

- É Estágio 1: o AP da rede realiza sensoriamento do espectro na busca das métricas RSSI, Endereço MAC, LQ e canal atual dos APs conhecidos e desconhecidos detectados dentro do seu range (função *ordö*);
- É Estágio 2: O módulo realiza o agrupamento por canal em uso pelas redes detectadas;
- É Estágio 3: Cria as matrizes  $J$  do conjunto de APs detectados por canal e  $V$  qualidade de sinal recebida por estes;
- É Estágio 4: Gera a matriz soma de LQ por cada canal, definindo o melhor canal em uso (MCU);
- É Estágio 5: Com o MCU definido, este será utilizado como canal base para definição da matriz *olf* a qual será constituída pela porcentagem de sobreposição dos demais canais em relação ao canal base. Desta forma, é possível obter os melhores canais sem uso (MCNUs);
- É Estágio 6: É definida a lista dos melhores canais contendo os MCUs e os MCNUs ;
- É Estágio 7: É realizado o cálculo de densidade e saturação, além da construção do relatório para envio ao controlador central da rede.

Com base nesses pressupostos e usando a terminologia definida acima foi descrito o algoritmo do modelo de detecção de interferência na Figura 3.8.

#### Algoritmo 1 ó Modelo de Detecção de Interferência

```
// obtendo a varredura espectral de  $n \in N$ , onde  $N$  é o conjunto de APs gerenciados, e  $j \in J$  é o conjunto de APs detectados
```

```
Selecionar_melhores_canais (lt_date_ap_spec,n) {
```

```
rd = sensoriando (lt_date_ap_espec, n) // Estágio 1
```

```
  for  $\forall j \in J$  detectado por  $n$ 
```

```
    obtendo matriz  $C(rd)$ ; // Estágio 2
```

```
    obtendo as matrizes  $J(rd)$  e  $V(rd)$ ; //Estágio 3
```

```
  end for
```

```
  for  $\forall k \in K$  //canais disponíveis no padrão utilizado
```

```

         $L(i) \leftarrow \text{total\_quality}(k)$  //Estágio 4
    end for
insertion_sort ( $L(i)$ ); // Realiza a ordenação da matriz linha  $L$ 
MCU = primeiro(insertion_sort( $L_{ord}(k)$ ));
    for  $\forall k \in K$  // Estágio 5
        FS  $\leftarrow$  fator_sobreposição(MCU);
        if FS = 0 then
            MCNU[]  $\leftarrow$   $k$ ; // canais com FS = 0 serão atribuídos a lista de melhores canais
        Else
            Este canal possui maior probabilidade de sofrer alta interferência
        end if
    end for
Lista_de_melhores_canais[]  $\leftarrow$  melhores_canais(MCU,MCNU); // Estágio 6
// cálculo da densidade e saturação (Estágio 7);
densidade  $\leftarrow$  verifica_qtd_ap_detect( $rd$ );
saturacao  $\leftarrow$  verifica_canais_prop( $rd$ );
Envia_relatório_NCC(Lista_de_melhores_canais, densidade, saturacao, $n$ ) // Envia relatório NCC
}

```

Figura 3.8 Pseudocódigo Módulo de Detecção de Interferência.

As informações de varredura espectral coletadas são representadas pela lista "lt\_date\_ap\_espec[]" e, através dela, é possível determinar, para cada AP gerenciado representado por  $\tilde{m}$  quais são seus vizinhos interferentes, incluindo APs não gerenciados. Neste Estágio 1, os pontos de acesso controlados trabalham em um canal que será alterado ao final do algoritmo. No Estágio 2, o pseudocódigo analisa a matriz booleana  $C$  onde os elementos assumem valor  $\tilde{1}$  (verdadeiro) para o canal que o AP  $j$  encontra-se atribuído.

No Estágio 3, o módulo através das informações colhidas em  $\tilde{r}$  atribuí a matriz  $J$  o AP detectado de acordo com o seu canal, ou seja, a matriz é constituída dinamicamente por (AP detectado/Canal) além de atribuir também à matriz  $V$  o valor correspondente à qualidade de *link* proveniente de cada um desses APs.

No Estágio 4, para cada canal pertencente ao padrão 802.11 adotado existirá um elemento  $\tilde{i}$  da matriz  $L$  responsável por armazenar o total da qualidade de sinal propagado por este calculado pela função  $\tilde{total\_quality}$ . Em seguida é aplicado o método de ordenação *insertion sort* na matriz  $L$  através da função  $\tilde{insertion\_sort}$  para encontrar o menor valor de qualidade de sinal.

O método de ordenação *insertion sort* foi definido para uso neste caso, pois ele é considerado um algoritmo eficiente para ordenação de um número pequeno de elementos, apresentando em seu melhor caso custo  $O(n)$  [Unicamp 2013]. Tal método é aplicável ao contexto da dissertação, uma vez que o número máximo de elementos é 14 (quatorze), quantidade de canais do padrão japonês, que possui a maior quantidade de canais para a tecnologia padrão 802.11 em

2,4GHz [Teleco 2012].

Assim, o melhor canal em uso  $\text{MCU}$  é definido pelo canal correspondente ao primeiro elemento da matriz linha ordenada  $L_{ord}$  (que conterá o menor valor da qualidade de sinal). A função que atribuirá este canal a variável  $MCU$  é  $\text{primeiro}$ . A partir do Estágio 5 são definidos os  $MCNU$ s (melhores canais sem uso), para análise de todos os canais pertencentes ao padrão é necessário obter o fator de sobreposição de cada um em relação ao canal base ( $MCU$ ). Esta função  $\text{fator\_sobreposição}(MCU)$  calcula a porcentagem de sobreposição desses canais.

Caso o  $FS$  seja igual a zero, este canal é considerado como melhor e entra para a lista de melhores canais sem uso  $MCNU[]$ . Desta forma é construída através da função  $\text{melhores\_canais}(MCU,MCNU)$ , a lista de melhores canais que será armazenada em  $\text{Lista\_de\_melhores\_canais}[]$ .

Por fim, a partir das informações de varredura espectral inicial  $ord$  são definidos os valores de densidade e saturação para o determinado AP e disparado o envio do relatório com todas essas informações para o controlador central da rede  $\text{Envia\_relatório\_NCC}()$ .

### 3.3 Algoritmo de Atribuição de Canal

#### 3.3.1 - Lógica de Seleção e atribuição de canal

Nesta seção será exibida a lógica de seleção e atribuição de canal ilustrando as etapas que o compõe e esboçando sua lógica por meio de Figuras. Salientando que, esse algoritmo será utilizado somente pelo NCC visto que a abordagem foi elaborada para redes com gerência centralizada.

O algoritmo de seleção e atribuição funciona em 3 etapas:

- Etapa 1: Recepção dos relatórios dos APRs;
- Etapa 2: Definição de prioridade de atribuição;
- Etapa 3: Análise da lista de canais atribuídos e atribuição de canal;

Na Figura 3.9 é exibida a lógica utilizada na implementação do algoritmo de atribuição para as etapas 1 e 2:

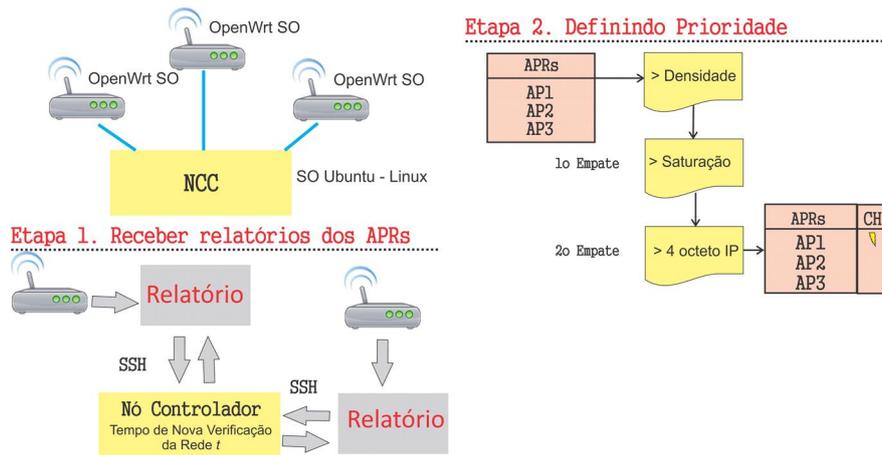


Figura 3.9. Etapas 1 e 2 da implementação do algoritmo de atribuição.

Conforme visto na Figura 3.9, a etapa 1 consiste no recebimento dos relatórios providos dos APRs. Nesta etapa, as informações coletadas são armazenadas em memórias dinâmicas e em arquivos, de modo a guardar esses dados para as operações do algoritmo. Essa coleta (leitura dos arquivos via SSH) irá ocorrer em instantes de tempo  $t$  definidos no algoritmo. Para os testes do projeto definimos intervalos de 20 minutos para validação dos resultados.

A etapa 2 define uma ordem para atribuição de canais nos APRs, ou melhor, definir o APR mais susceptível a interferência para receber primeiramente o novo canal. Assim sendo, primeiramente será atribuído um canal ao APR que apresentar maior densidade, uma vez que quanto maior a densidade maior a probabilidade de uma baixa relação sinal ruído, ou seja, o APR foi inserido em um ambiente altamente concorrido em termos de propagação. Em segundo plano, caso haja empate na primeira métrica, é verificado a divergência de canais em uso presente no espectro (saturação) em virtude de quanto maior a saturação maior as oscilações de propagação nos diferentes canais do espectro. Caso ocorra um terceiro empate, a preferência será do menor número correspondente ao último octeto do endereço IP dos APRs.

Na Figura 3.10 é possível visualizar a etapa de atribuição de canal (etapa 3). Nesta etapa são verificadas as listas de melhores canais e definido qual canal será o atribuído efetivamente ao APR.

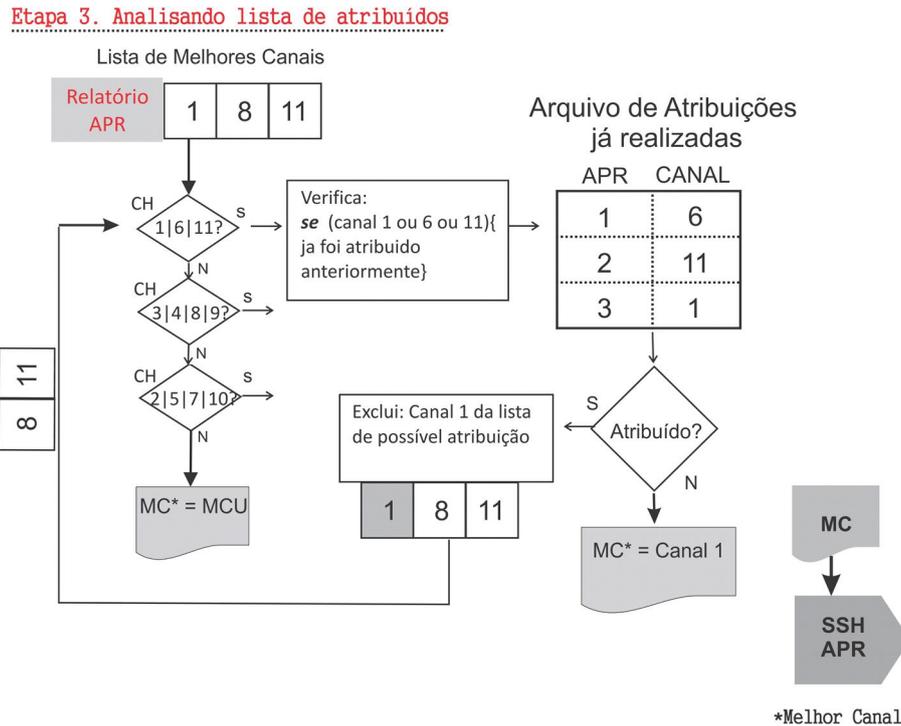


Figura 3.10 Etapa 3 da análise da lista de atribuídos, exemplificando uma lista de melhores canais recebida contendo os canais 1, 8 e 11.

Nesse algoritmo, a lista de melhores canais é consultada para verificar a existência de canais por ordem de porcentagem de sobreposição. Desta maneira inicia-se a consulta pelos canais não ortogonais (1, 6 e 11) ditos não sobrepostos, em seguida os canais com índice menores de sobreposição (3, 4, 8, 9) e assim sucessivamente. A ideia é se aproximar o máximo possível de uma solução ótima para uma atribuição de canais, aproveitando todos os canais do padrão IEEE 802.11.

Após detectar se na lista existem os canais 1, 6 e 11 e constatando sua existência, é realizada uma consulta ao arquivo de atribuição para verificar se este foi atribuído a algum APR, conforme exemplo da Figura 3.10.

Neste exemplo é verificado que no relatório de um determinado APR constam os canais 1, 8 e 11, assim como a primeira condição (Existe 1 | 6 | 11 ?) é verdadeira, o NCC verifica se o canal encontrado está na lista de canais atribuídos. Caso seja verdadeiro, o canal encontrado é removido da lista de melhores canais. Caso contrário, o canal encontrado é atribuído a variável melhor canal (MC) para efetivar a atribuição de um novo canal no APR.

Assim, supondo que para uma determinada rede com altas quantidades de APRs em que todos os canais já tenham sido atribuídos, logo o canal a ser atribuído passará a ser o melhor canal em uso (MCU) aos novos APRs, causando a reutilização dos canais presentes na lista de atribuídos.

### 3.3.2 - Pseudocódigo ó Controlador Central de Rede

Neste trabalho foi proposta uma abordagem de gerência centralizada, dada a sua usual utilização em instituições como universidades, aeroportos, e empresas, nas quais um sistema de controle central se encarrega da configuração dos pontos de acesso pertencentes ao mesmo domínio administrativo. Essa abordagem possibilita uma implementação mais simples, permitindo a visualização da rede como um todo no momento da definição dos parâmetros de controle. Assim, a abordagem apresentada nesta proposta foi desenvolvida para operar de forma centralizada, possuindo um controlador responsável por esta operação (NCC).

Através da função `Envia_relatório_NCC(..)` vista na seção anterior são enviados relatórios por cada AP gerenciado, contendo as informações que ajudarão o NCC a tomar as decisões de atribuição de canal, possibilitando que o controlador central possa coletar informações de todos os pontos de acesso da rede e as utilizar como base para a execução do algoritmo.

A Figura 3.11 apresenta um pseudocódigo elaborado para esboço da lógica implementada no controlador central da rede (NCC).

Primeiramente, conforme visto há uma função responsável por coletar todos os relatórios gerados pelos APs `recebe_relatorio_ap[]`, onde a partir dessas informações o NCC prosseguirá selecionando e atribuindo o canal. Assim sendo, é verificado o tamanho da lista de APs para atribuição `tam_lista_APs_atribuicao[]` para garantir que existem APs da rede propagando no meio e em comunicação com o NCC de forma que após cada análise de AP esse tamanho é subtraído de um `tam_lista_APs_atribuicao [] ó`.

Em seguida são extraídas as informações de canal atual `vet_ch_atual[n]` dos APs com o intuito de evitar as reatribuições desnecessárias do mesmo canal que já fora definido anteriormente. Os vetores `Dens[n]`, `Sat[n]` e `Oct[n]` serão utilizados para definir prioridades de atribuição conforme já citado na seção 3.3.1 e executado pela função `Ordenar_prioridade[]` do pseudocódigo, o resultado da ordenação será atribuído a uma lista `Lista_Ordem []`.

Esta lista será percorrida atribuindo à variável `AP_select` ao AP da vez que será tratado. Mediante a definição do AP é analisado o parâmetro `status_lista_atrib` para verificar se a lista de canais já atribuídos está vazia, se `vazia = 1` ainda existem canais disponíveis para alocar, caso contrário (`vazia = 0`) significa que todos os canais já possuem APs atribuídos. O objetivo dessa lista é buscar que todos os canais do padrão 802.11 sejam utilizados e mostrar que é possível obter boas condições de rede mesmo utilizando os canais sobrepostos, buscando uma melhor distribuição do espectro.

Desta maneira, caso essa lista não esteja cheia, ou seja, vazia= 1 e  $\tilde{\text{canal\_atrib}}$  permaneça igual a zero definindo que nenhum canal ainda foi definido para este AP, são realizadas as verificações da existência de determinados canais citadas na seção 3.3.1. Essas verificações visam priorizar no primeiro momento os canais não-sobrepostos (1, 6 e 11) ditos com menor probabilidade de interferência já que apresentam fator de sobreposição igual a zero. Em seguida, os canais com somente  $\sim 0,5$  de sobreposição e, por fim, os canais que apresentam sobreposição de  $\sim 0,7$ . Para essas verificações a variável  $\tilde{\text{c}}$  receberá valor 1, 2 e 3 respectivamente.

### Algoritmo 2 Controlador Central de Rede (NCC)

```

// Recebendo relatórios dos APs da rede (n)  $\forall n \in N$ 
recebe_relatorio_ap(ler_relatorio_ap);
seleciona_canal_ap (armazena_relatorio_ap, lista_atrib, n) {

while tam_lista_AP_s_atribuicao[] > 0 {
// Extrai informações para definir ordem de atribuição
vet ch_atual[n]  $\leftarrow$  canal em uso por n;
Dens[n]  $\leftarrow$  densidade de n;
Sat[n]  $\leftarrow$  saturação de n;
Oct[n]  $\leftarrow$  último octeto IP de n;
Lista_Ordem []  $\leftarrow$  Ordenar_prioridade(Den, Sat, Oct, n);
// Esta lista conterá a ordem de atribuição a partir da verificação da maior densidade, em
seguida
da maior saturação e em caso de um terceiro empate o menor ultimo octeto do IP
AP_select  $\leftarrow$  Lista_Ordem [];
// Definindo qual AP a ser verificado de acordo com prioridades
vazia = status_lista_atrib(Lista_de_melhores_canais);

while canal_atrib = 0 && Vazia  $\tilde{N}0$  {
Verifica_1_6_11 (recebe_relatorio_ap (Lista_de_melhores_canais, AP_select)); // c = 1
return c;
Verifica_3_4_8_9 (recebe_relatorio_ap (Lista_de_melhores_canais, AP_select));
return c;
Verifica_2_5_7_10 (recebe_relatorio_ap (Lista_de_melhores_canais, AP_select));
return c;
// Definindo qual canal atribuir ao AP de forma a aproveitar todos os canais 802.11
switch (c) {
case 1 :
// analisa a lista dos canais já atribuídos para verificar se o canal já foi utilizado
canal = recebe_canal_lista (Lista_de_melhores_canais);
teste = analisa_lista_atrib (canal, Lista_de_melhores_canais);
if teste = 1 then
canal_atrib=0;
// exclui canal das possibilidades caso o mesmo já tenha sido atribuído;
exclui_canal_verifica_1_6_11 (canal, Lista_de_melhores_canais);
else if vet ch_atual[n]  $\tilde{N}$ canal then // para evitar re-atribuir o mesmo canal

```

```

        canal_atrib = canal; // caso negativo canal definido para atribuição
    break;
case 2 :
canal = recebe_canal_lista (Lista_de_melhores_canais);
teste = analisa_lista_atrib ( canal, Lista_de_melhores_canais);
    if teste = 1 then
        canal_atrib=0;
        exclui_canal_verifica_3_4_8_9 (canal, Lista_de_melhores_canais);
        else if vet ch_atual[n] Ñcanal then
            canal_atrib = canal;
        break;

case 3 :
canal = recebe_canal_lista (Lista_de_melhores_canais);
teste = analisa_lista_atrib ( Lista_de_melhores_canais);
    if teste = 1 then
        canal_atrib=0;
        exclui_canal_verifica_2_5_7_10 (canal, Lista_de_melhores_canais);
        else if vet ch_atual[n] Ñcanal then
            canal_atrib = canal;
        break;
    } end switch
} end while
if Vazia = 0then
    MCU = consulta_MCU (Lista_de_melhores_canais);
    if vet ch_atual[n] Ñcanal then
        canal_atrib = MCU;
    end if
end if
} end while
atualiza_lista_atrib (canal_atrib); // atualiza o AP com o novo canal atribuído
tam_lista_APs_atribuicao [] ó 1;
set_canal_ap (canal_atrib);
}

```

Figura 3.11 Pseudocódigo Controlador Central de Rede.

Cada caso da função *switch* vista no pseudocódigo da Figura 3.11 irá definir quais canais foram detectados na *Lista\_de\_melhores\_canais* por meio das funções *Verifica x\_y\_z\_k*. Assim a variável *canal* receberá cada canal detectado por vez por estas funções, através de *recebe\_canal\_lista*.

A variável booleana *teste* verifica se o canal foi atribuído a algum AP consultando a lista de atribuídos *lista\_atrib*. Se *teste = 1* então o canal foi atribuído e a variável *canal\_atrib* receberá zero. Esta variável é a que conterà o canal para atribuição. Desta forma o canal é removido das possíveis atribuições *exclui\_canal\_verifica x\_y\_z\_k*, partindo para o próximo detectado pelas funções *Verifica x\_y\_z\_k* até que todos os canais sejam removido, restando a

atribuição do melhor canal em uso (MCU) onde iniciará a alocação de mais de um AP por canal.

Por fim, a lista `lista_atrib` é atualizada e o tamanho da lista de APs que ainda faltam atribuir é reduzido. Assim, é realizado o envio de comando para troca de canal via SSH com o canal para atribuir definido pela variável `canal_atrib` finalizando o processo do algoritmo executado através do controlador central da rede.

# Capítulo 4

## Experimentos e Análise dos Resultados

Este Capítulo apresenta os resultados obtidos com a experimentação da MFDCA em ambiente real. Informações sobre os equipamentos utilizados nos testes, métricas avaliadas e a análise dos resultados serão vistas ao longo deste capítulo.

### 4.1 Experimentos *versus* objetivos do trabalho

Para avaliar a abordagem MFDCA, com intuito de demonstrar os objetivos alcançados dessa pesquisa, foram usadas as seguintes métricas:

- Vazão de dados é usada para analisar se a distribuição de canais realizada pela MFDCA proporciona melhoria e estabilidade às taxas de transmissão e recepção contínua, em redes 802.11, mesmo em ambientes com muita interferência. Serão avaliadas a *vazão da rede*, mensurada a partir da vazão média agregada dos APs pertencentes à rede, e *vazão por APR*, utilizada para avaliar a vazão média de dados obtida a partir de um determinado APR com clientes associados.
- Taxa de perda de pacotes é usada para avaliar a qualidade de transmissão, uma vez que pacotes corrompidos podem acarretar em perda de conexões. Assim, quanto mais próxima de zero (0%) for essa taxa, maior será a confiabilidade na transmissão de dados na rede.
- Estabilidade da solução é usada para medir a estabilidade da solução face ao número de requisições de troca de canal solicitadas pelos APRs.
- Tempo de resposta na troca de canal é definido pelo intervalo de tempo composto: tempo de requisição, tempo de definição do novo canal pelo NCC e tempo da efetiva alocação nos APRs.

- Tempo de varredura espectral  $\tau$  indica o tempo médio necessário que um APR utiliza para análise do meio inserido (*scan*), incluindo o tempo de envio do relatório gerado com os dados da varredura para o controlador central da rede (NCC).

## 4.2 Cenários de Experimentação

Para avaliar o desempenho da abordagem MFDCA foram definidos dois cenários de testes elaborados na Universidade Federal do Amazonas. O primeiro cenário constituído de:

- Quatro roteadores do fabricante Cisco Networks modelo *Linksys* WRT54G [Cisco Systems 2006] funcionando em modo *AP* (ponto de acesso).
- Um controlador central de rede (NCC) com a seguinte configuração: Intel Core 2 Duo 2,9 GHz, 2 GB de RAM e HD 250 GB, com sistema operacional Linux distribuição Ubuntu 12.04 32 bits, executando o algoritmo de seleção e atribuição de canal proposto no Capítulo 3.
- Um *switch* Cisco Networks de 8 portas 10/100/1000 SF300 SRW208-K9 [Cisco Systems 2006], responsável por estabelecer a rede cabeada entre os pontos de acesso e o controlador central da rede.
- Quatro *notebooks* de configurações variadas, para atuarem como nós clientes atribuídos para cada ponto de acesso, possuindo placas de redes sem fio padrão para transmissões de velocidade máxima 54Mbps.

O segundo cenário é composto por:

- Sete roteadores do fabricante TPLINK Modelo TL-WR1043ND (TP\_LINK, 2014) funcionando em modo *AP* (ponto de acesso).
- Dez microcomputadores atuando como nós clientes da rede, utilizando diferentes sistemas operacionais (Windows 7, Mac OS X 10.7 e Ubuntu 12.04) e compostos por placas de rede sem fio de fabricantes variados (Realtek RTL8187B Wireless 802.11b/g 54Mbps, Atheros Ar5bxb63 10/100 e Bcm94311mcg 10/100).
- Dois dispositivos sem fio para também serem utilizados como nós clientes no teste de escalabilidade de clientes, com as seguintes configurações: um smartphone de marca

Samsung Galaxy GRANDUOS e um tablet iPad Mini 16GB, para os testes de escalabilidade gerados na seção 4.4.5

- Os demais componentes (NCC e Switch) permaneceram os mesmos;

Estes dois cenários foram constituídos com o objetivo de avaliar a abordagem de alocação de canais quanto à potência de sinal e qualidade do *link*, por meio de testes de vazão executados em redes montadas para tal finalidade. A taxa de perda de pacotes foi utilizada para quantificar a qualidade dos pacotes enviados, dada uma determinada transmissão. Por fim, a ideia de um segundo cenário de teste, formado por um número maior de pontos de acesso, foi criado para analisar o impacto da solução com a introdução de mais clientes, bem como para avaliar a estabilidade da MFDCA mediante ambientes ruidosos em uma área maior de distribuição física mais ampla.

### 4.3 Configuração do Cenário 1

Este cenário foi elaborado com o intuito de testar a solução em ambientes com característica espectral densa. Assim, o primeiro cenário foi configurado uma distância de 2 a 5 metros entre os APRs, possibilitando que cada APR obtivesse o mesmo conjunto de WLANs sensoriadas, conforme por ser visto na Tabela 4.1.

Desta forma, cada APR detecta os outros da sua rede com um sinal não inferior a -45 dBm (potências de sinais altas) e entre 55 e 65 de qualidade de sinal (alta qualidade de sinal). Estes últimos números inteiros variam de 0x00 até 0xFF, neste caso de 0 até 70 definidos pelas bibliotecas FOSS (*Free and Open Source Software*) Ath9k [Linus 2008] do SO Linux, que permite a comunicação com as interfaces de rede sem fio utilizadas pelos roteadores mais comuns do mercado.

**Tabela 4.1 Espectro Detectado.**

Pontos de Acesso	Densidade	Saturação	Melhor Canal
APR 1	20	9	5
APR 2	16	9	5
APR 3	15	7	6
APR 4	15	8	6

A Figura 4.1 exhibe o cenário utilizado neste primeiro ambiente de teste, constituído por quatro WLANs, sendo cada uma composta por um APR e um cliente (*host*) associado, distribuídos em uma área de 5 x 10 m<sup>2</sup>. Os *firmwares* de fábrica, embarcados nestes roteadores, foram

substituídos pelo sistema operacional *open source*, o OpenWrt [OpenWrt 2004] em sua versão *Backfire 12.09-final*, que por apresentar plataforma livre pode ser empregado em diversos roteadores de baixo custo e possibilita a inserção e execução da MFDCA.

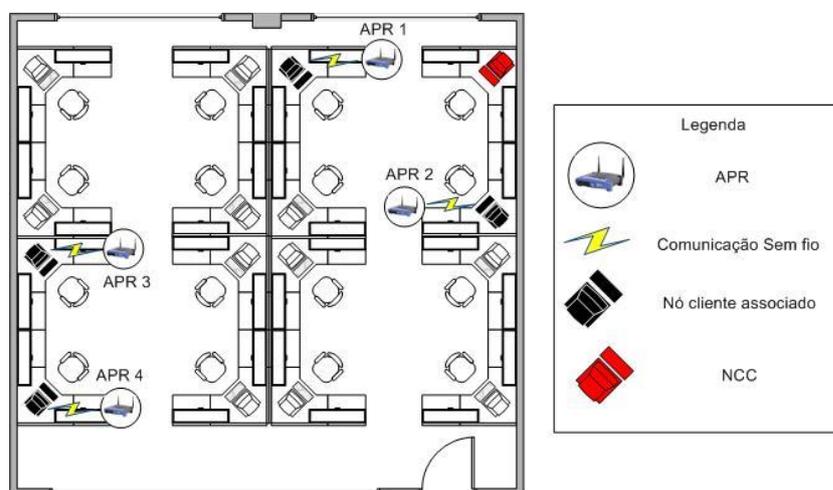


Figura 4.1 Cenário de Testes.

Desta forma, no primeiro cenário foram utilizados roteadores da marca e modelo *Linksys WRT54G* [Cisco Systems 2006], onde a qualidade de *link* representa a relação sinal ruído média calculada sobre os últimos quadros recebidos, conforme explicado no Capítulo 3.

Os roteadores foram configurados para operar no padrão 802.11g na faixa de 2,4 GHz, com largura de banda de aproximadamente 20 MHz. Tais roteadores podem operar em modo *bridge* (para interligarem duas ou mais BSSs), modo AP (prover acesso) e modo *repeater* (para repetir o sinal com o intuito de alcançar distâncias maiores). Para realização dos testes, os roteadores foram configurados em modo AP suportando somente o padrão 802.11 nas extensões b e g. Contudo, o MFDCA também pode ser empregado em pontos de acesso que utilizem o padrão 802.11n.

Como mostrado na Figura 4.1, um NCC é empregado para coletar os relatórios gerados nos APRs e tomar as decisões de atribuição de canal. Além disso, um nó cliente (computador) é associado a cada APR para realizar as requisições de tráfego atuando como nó cliente de cada rede. Estes computadores apresentam placas de redes sem fio modelos comuns padrão 10/100 Mbps, tendo como padrões de redes sem fio suportados IEEE 802.11b/g/n.

Para simulações de tráfego foi utilizada a ferramenta Iperf 2.0.5-2 [Iperf 2010], verificando a transferência de uma imagem de 1470 bytes. Em função do atraso no início do tráfego pela ferramenta Iperf em cada APR e para dar maior confiabilidade aos resultados, as primeiras e últimas amostras coletadas foram descartadas. Cada amostra reportada pelo Iperf representa a vazão média

no intervalo.

A coleta dos dados foi realizada durante dois dias e os resultados apresentados correspondem à média dos valores obedecendo a um Intervalo de Confiança de 95%.

As requisições foram efetuadas durante 1200s (segundos), equivalente a aproximadamente 20 minutos necessários para efetuar o download de cerca de 6 vezes este arquivo. As amostras de vazão média da rede foram coletadas em intervalos de 100s (segundos). Cada APR na rede gerou 1000 amostras. Este tempo é suficiente para simular o surgimento de novos APs móveis e constatar mudanças nas variações de desempenho do APR, uma vez que a métrica utilizada é um fator de alta sensibilidade às variações do meio, a qualidade de *link*.

A Figura 4.2 fornece uma visualização do espectro atual presenciado no Laboratório de Tecnologias Emergentes da Universidade Federal do Amazonas. Esta figura foi extraída a partir de um *smartphone* realizando um *sniffer* no espectro detectando as redes Wi-Fi existentes e alcançadas por sua antena, durante os testes realizados além dos 04 APRs da rede, 15 Aps desconhecidos estiveram presentes durante todos os testes deste cenário. Para a varredura do espectro foi utilizado o aplicativo Wi-Fi Analyser [Farproc 2012] exibindo as suas atuais potências de sinal em uma escala negativa.

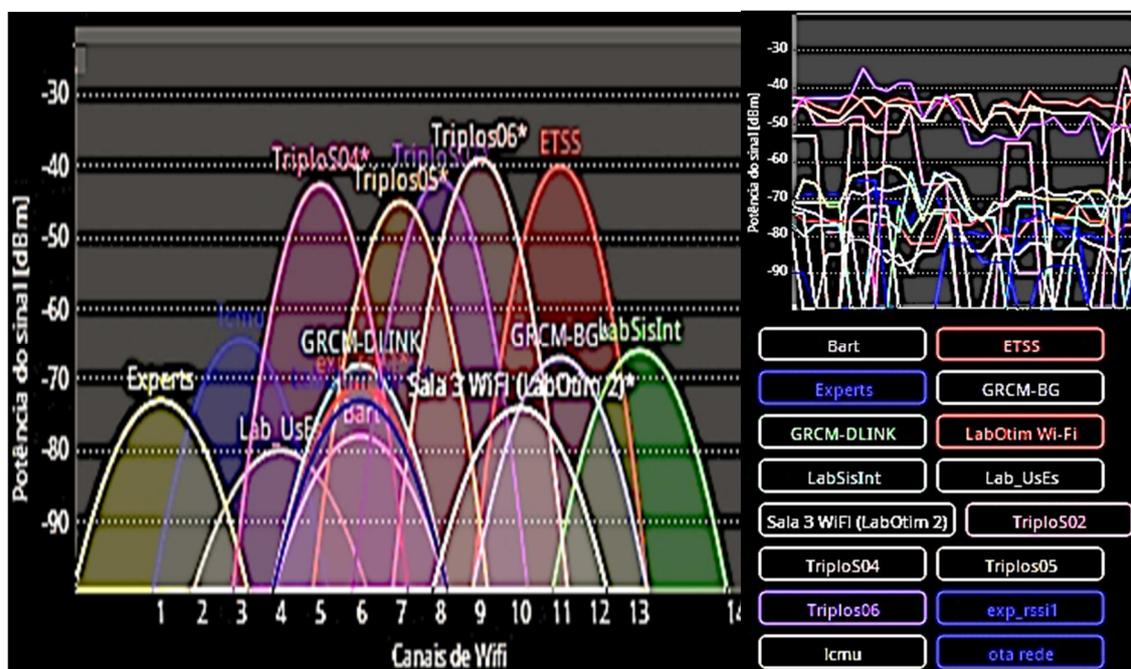


Figura 4.2 Espectro presenciado no Laboratório de Tecnologias Emergentes da UFAM. Cada linha corresponde a um AP, podendo verificar as suas respectivas potências de sinal em uma escala dBm, obtidas através dos canais Wi-Fi que estão atribuídos.

## 4.4 Resultados obtidos no Cenário 1

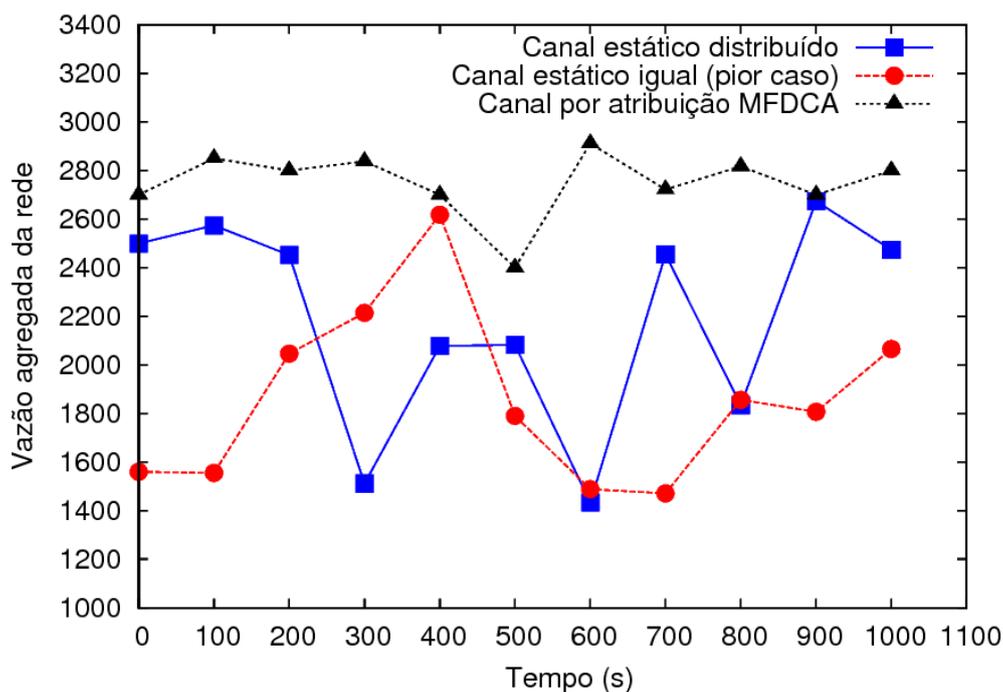
### 4.4.1 - Vazão da Rede

A Figura 4.3 mostra a vazão média de dados obtida pela atribuição de canais sem e com o uso do MFDCA. A atribuição dos canais sem o uso do MFDCA corresponde a dois conjuntos de testes: o primeiro corresponde a distribuição estática de canais, geralmente utilizada e recomendável para evitar interferências. Neste conjunto de teste são atribuídos aos APs um dos três canais não sobrepostos (1, 6 e 11), de modo que os APs mais próximos utilizem canais diferentes. Essa atribuição foi identificada no gráfico da Figura 4.3 como atribuição de canal estático distribuído. O segundo conjunto de testes corresponde ao pior cenário de atribuições de canais, onde todos os APRs da rede são configurados para operarem em um mesmo canal (atribuição *default* de fábrica). Esse conjunto de teste foi denominado atribuição de canal estático igual (pior caso). Tal situação é comumente encontrada em ambientes domésticos, onde usuários inexperientes são responsáveis pelo estabelecimento e atribuição de canais em uma rede sem fio. Por último, a terceira curva no gráfico corresponde à vazão média obtida pela atribuição de canais realizada pelo MFDCA.

A atribuição estática de canais para o primeiro conjunto de testes obedeceu a seguinte distribuição: APR 1 = canal 1, APR 2 = canal 6, APR 3 = canal 11 e APR 4 = canal 1. Na atribuição de canal estático igual (segundo conjunto de testes), todos os APRs são atribuídos ao canal = 6.

Para avaliar o comportamento da MFDCA quanto ao aparecimento de novas redes, dois APs desconhecidos (usando o canal 6) foram inseridos e removidos nos instantes de tempo 300 e 600 segundos, respectivamente.

Conforme observado na Figura 4.3, a atribuição de canais por meio da MFDCA apresenta a melhor taxa de vazão quando comparada com as abordagens estáticas, com média de 2753,8 Kbps. Isso ocorre devido à capacidade do MFDCA de analisar o espectro e configurar o melhor canal onde o APR é inserido. A atribuição estática distribuída (os APRs atribuídos aos canais 1, 6 e 11) obteve a vazão média de 2156,89 Kbps, enquanto a atribuição canal estático pior caso (todos os APRs atribuídos ao canal 6) de 1891,44 Kbps.



*Figura 4.3 Vazão média de dados observada por meio de um tráfego UDP a partir dos nós clientes vinculados aos APRs.*

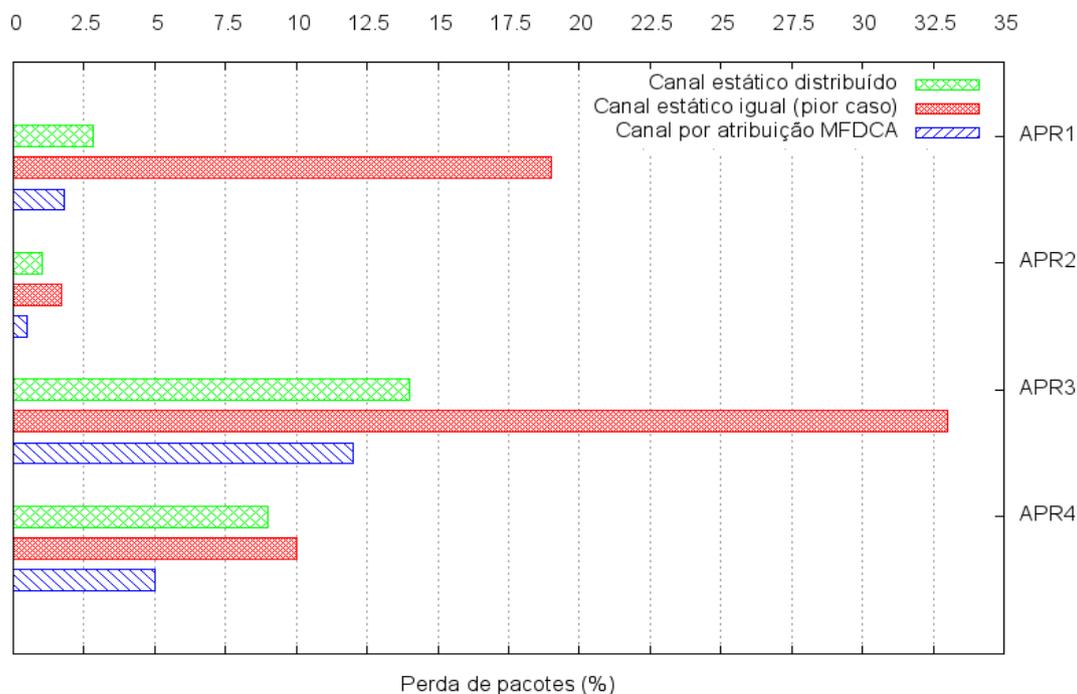
A diminuição da taxa de transmissão de dados no instante de tempo de 300 segundos (momento em que foi inserido o AP no canal 6) foi mais significativa nas abordagens MFDCA e canal estático igual. No MFDCA essa diminuição ocorreu pelo fato de dois APR estavam propagando dados nos canais 8 e 4, os quais são canais sobrepostos ao canal 6. Entretanto, a inclusão desses novos APs fez com que o MFDCA realizasse novas atribuições para os APRs restabelecendo a vazão média da rede, como observado no instante de tempo de 600 segundos. No caso da atribuição estática pior caso, como todos os APRs estavam atribuídos ao canal 6 (mesmo canal do AP inserido) a diminuição nas taxas de vazão foi 302 Kbps. No caso da alocação de canal estática distribuída, a inserção dos novos APs no canal 6 implicou na diminuição de cerca de 1000 Kbps no instante 300s, uma vez que um dos APRs, nesta alocação, foi atribuído ao canal 6. Contudo, nos instantes 400s e 500s houve uma recuperação da vazão de cerca de 400 Kbps o que é justificado por intermitências de consumo do canal 6 pelos APs desconhecidos, o que é constatado também pela diminuição de 600 Kbps no instante 600s e aumento de 1000 Kbps na amostra 700s.

#### 4.4.2 - Taxa de Perda de Pacotes

A Figura 4.4 apresenta a taxa de perda de pacote obtida por cada APR nas diferentes

alocações utilizadas para os testes de vazão da rede.

Esta métrica foi coletada a partir dos nós clientes vinculados a cada um dos APRs, por meio do tráfego gerado correspondente ao *download* sucessivo de um arquivo de 1470 bytes. As atribuições de canais ocorreram de forma semelhante ao primeiro teste de vazão.



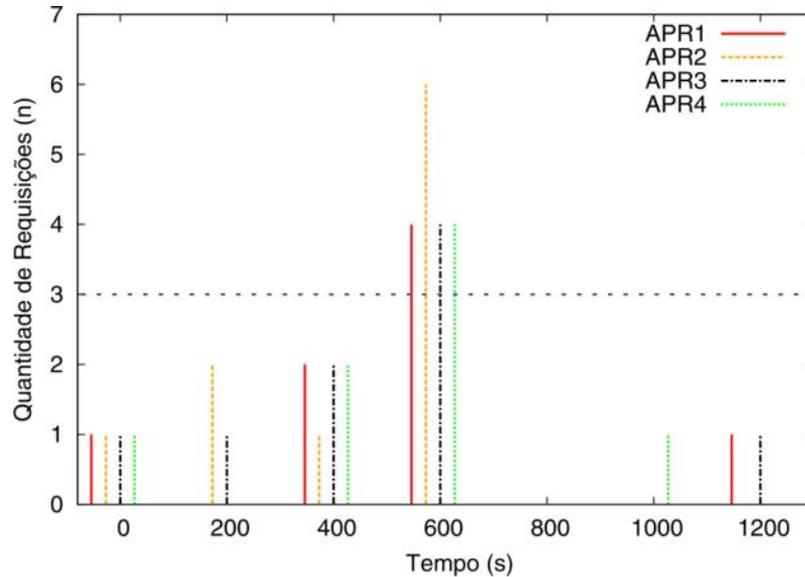
*Figura 4.4 Taxa de perda de pacotes (%) por cada APR da rede.*

A qualidade da transmissão foi verificada a partir da porcentagem de quadros UDP perdidos, visualizados através do gráfico da Figura 4.4. As menores taxas de perda de pacotes foram obtidas em todos os APRs que empregavam os canais alocados pelo MFDCa. O APR 2, por exemplo, apresentou taxas de perda de pacotes inferiores a 1%. Mesmo para os APRs que foram mais afetados com o surgimento dos novos APs no canal 6 (APR 3 e APR 4), as alocações de canais realizadas pela MFDCa apresentaram índices de perda de pacotes inferiores a 12%. Esse aumento nas taxas de perda de pacotes nos APRs 3 e 4 é decorrente ao uso de canais sobrepostos adjacentes ao canal 6 atribuídos pela abordagem MFDCa a estes APRs.

#### 4.4.3 - Estabilidade

A Figura 4.5 apresenta a quantidade de requisição de troca de canais durante um intervalo de tempo de 1200s. Esta métrica foi verificada a partir dos relatórios de avaliação do meio, enviados pelos APRs, para o controlador central da rede. O NCC ao receber os relatórios armazena as

informações contidas para a definição do melhor canal, o qual deve permanecer como o melhor por  $n$  leituras do espectro para a sua efetiva alocação. Para o teste, foi definida  $n = 03$  (três) leituras do espectro.



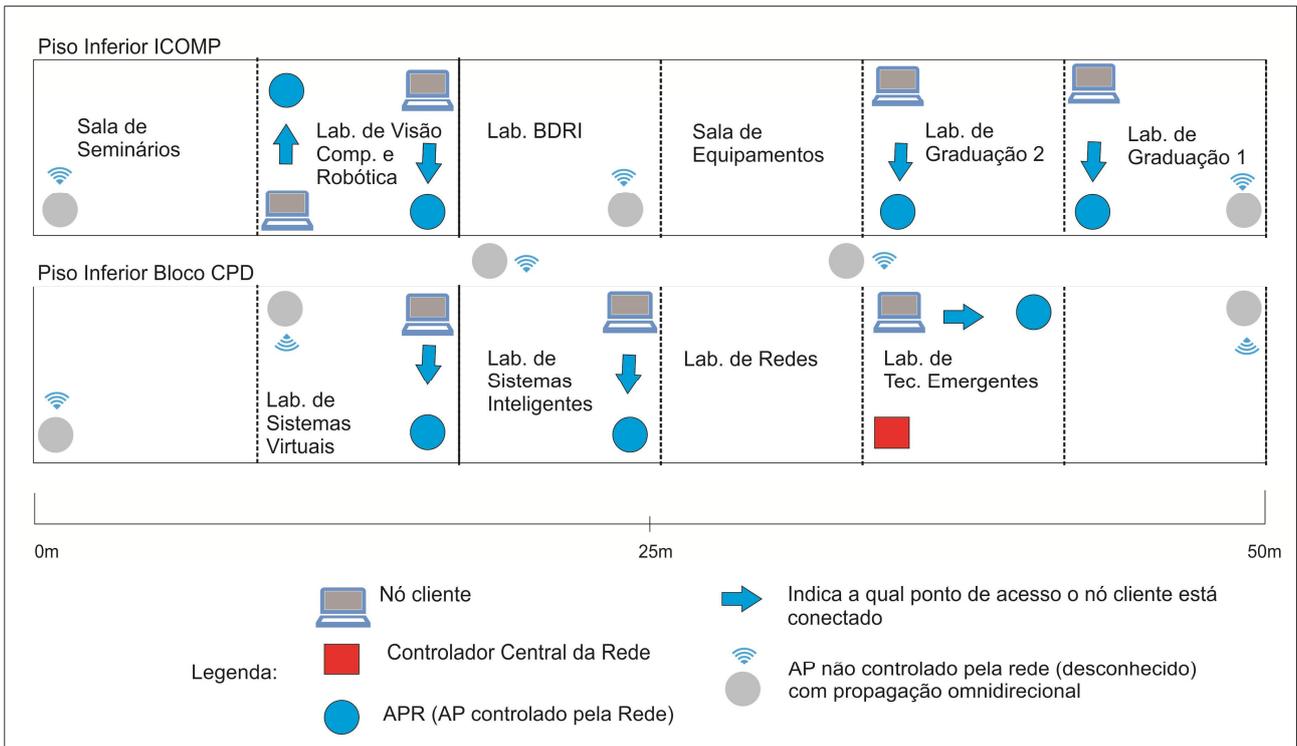
*Figura 4.5 Quantidade de requisições de troca de canal realizadas em 1200s.*

Como observado na Figura 4.5 apenas na amostra 600 segundos foi efetivamente requerida, pelos 04 APRs, novas alocações de canal ( $n \geq 3$ ). Estas requisições foram induzidas com a inserção de dois novos APs desconhecidos na rede, atribuídos ao canal 6 na amostra 400 segundos. Estes APs desconhecidos foram sensorizados pelos 04 APRs a uma intensidade de sinal de  $-40$  dBm de propagação (potência alta de sinal).

Contudo, a MFDCA atribuiu um novo canal apenas ao APR 2, isto foi suficiente para adequar todos os APRs ao novo espectro, onde na amostra subsequente (800 segundos) nenhum APR requisitou troca de canal. Nas amostras 1000 e 1200 segundos, foi requerida apenas uma troca de canal pelos demais APRs, porém não efetivadas, pois não caracterizaram mudanças fixas na rede ( $n \leq 3$ ).

## 4.5 Configuração do Cenário 2

Neste cenário a avaliação do mecanismo MFDCA é realizada observando a distribuição dos APRs em dois blocos (50m linear cada) do Instituto de Computação da Universidade Federal do Amazonas (ICOMP-UFAM). A Figura 4.6 apresenta um esboço da distribuição dos pontos de acesso nestes blocos.



*Figura 4.6 Cenário de testes 2 utilizando uma área maior de distribuição de APRs ao longo de dois blocos do Instituto de Computação.*

Na Figura 4.6, os círculos azuis representam os APRs (total de 07), as setas direcionais indicam a vinculação de um cliente a um APR específico e o quadrado vermelho identifica o controlador central utilizado para coleta das informações geradas nos APRs. Além dos APRs instalados foram detectados 08 pontos de acesso desconhecidos, identificados na figura a partir de círculos cinza com propagação de sinal omnidirecional, totalizando 15 pontos de acesso distribuídos nos dois blocos.

Este segundo conjunto de testes tem como finalidade a avaliação da escalabilidade do sistema, bem como a utilização da abordagem MFDCA em roteadores de diferentes fabricantes, operando com sistema operacional embarcado OpenWRT em sua distribuição *BarrierBreaker* 14.07.

Para compor os nós clientes deste cenário, foram utilizados 07 dispositivos com placas de rede wireless instaladas e de diferentes sistemas operacionais, tais como: Windows 7, MacOS e Linux distribuição Ubuntu 12.04, que estarão conectados por meio das redes sem fio provida pelos APRs, a partir de um raio de distância inferior a 5 metros do ponto de acesso ao qual foi associado. Este cenário de teste representa o ambiente disposto no trabalho visto em [Balbi et al. 2012] com intuito de prover uma comparação das abordagens empregadas.

## 4.6 Resultados obtidos no Cenário 2

### 4.6.1 - Vazão da Rede

O intervalo de tempo escolhido para determinar esta métrica foi de 1800s (30 minutos) registrados por amostras coletadas por cada tipo de atribuição realizada, ao longo de 07 dias. O tempo de avaliação total foi de 37.800s, cerca de 5.400s diários gerando um total de 378 amostras de 100 segundos. Para validação dos resultados, as primeiras e últimas amostras foram descartadas para excluir o tempo de inicialização e finalização da ferramenta Iperf [Iperf 2010].

Os tipos de atribuições de canal foram divididos em: "Sem uso de controladores", "SCIFI" [Balbi et al. 2012] e "MFDCA". Os canais utilizados nessas atribuições foram distribuídos conforme a Tabela 4.2.

**Tabela 4.2 Atribuições de Canal realizadas para o teste de vazão.**

Pontos de Acesso	Atribuição sem o uso de controladores	Canal atribuído por SCIFI	Canal atribuído por MFDCA
APR 1	1	6	4
APR 2	6	1	3
APR 3	11	11	9
APR 4	1	11	9
APR 5	6	1	3
APR 6	11	11	11
APR 7	1	6	8

Para os testes com "Sem uso de controladores", foram atribuídos aos APRs um dos três canais não sobrepostos (1, 6 e 11), de modo que os APs mais próximos utilizem canais diferentes.

Para os testes SCIFI e MFDCA, as atribuições de canais foram realizadas pelos seus respectivos NCCs. Vale ressaltar, no entanto, que o SCIFI trabalha somente atribuindo canais não sobrepostos IEEE 802.11 g/n (1,6,11 ó padrão utilizado no Brasil), ou seja, esta é uma das principais diferenças em relação a abordagem MFDCA, a qual considera todos os canais sobrepostos e não sobrepostos.

As atribuições realizadas pelo MFDCA não apresentaram variação em trocas de canal, uma vez que as redes desconhecidas (detectadas pelos APRs) permaneceram as mesmas ao longo dos testes. Assim, as métricas saturação (quantidade de canais em uso no espectro) e densidade (quantidade de APs detectadas pelo APR) não apresentaram alterações, apenas as induzidas pelos testes realizados.

O gráfico comparativo da vazão média em Mbits/s obtida por cada tipo de atribuição, pode ser visualizado na Figura 4.7.

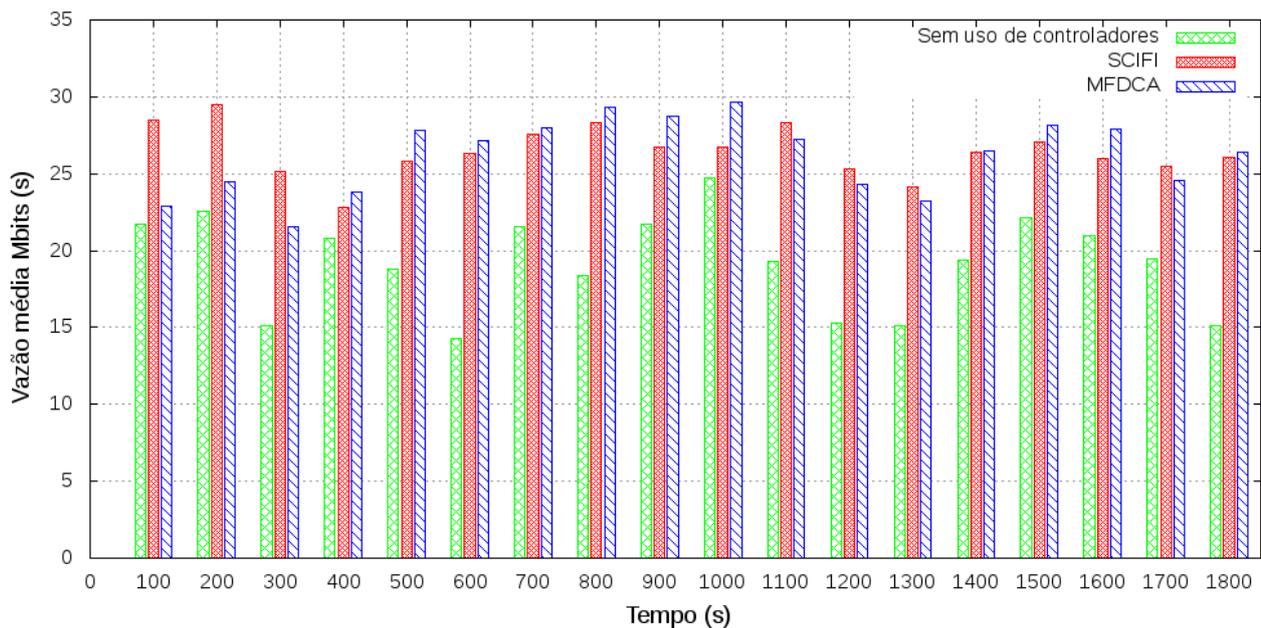


Figura 4.7 Comparativo de médias agregadas de vazão por cada atribuição realizada.

Com os resultados da vazão média da rede pode-se perceber que, de maneira geral, ambos os controladores de seleção e atribuição de canal (SCIFI e MFDCA) asseguram taxas maiores de vazão da rede em relação à atribuição sem uso de controladores. Isto ocorre devido, na atribuição dinâmica de canais, o espectro em que um determinado AP está inserido é analisado para otimizar o uso dos canais de transmissão 802.11 g/n.

Nas amostras iniciais (100-300 segundos) é possível verificar um desempenho inferior da abordagem MFDCA em relação ao controlador SCIFI, apresentando uma diferença média na vazão de 4,33 Mbits/s entre eles. Isto ocorre porque o MFDCA utilizou canais sobrepostos entre os canais

alocados que apresentam características de frequências compartilhadas, apresentam uma maior instabilidade em suas primeiras transmissões. No entanto, para as amostras subseqüentes, a vazão média obtida pela abordagem MFDCA foi de 23,5 Mbits/s e para o SCIFI foi de 21,8 Mbits. Essa melhora é decorrente do fato de que a abordagem MFDCA usar todos os canais (sobrepostos e não sobrepostos) no seu processo de alocação. Neste caso, a abordagem SCIFI é mais afetada pela concorrência dos APs desconhecidos, que também usam somente canais não sobrepostos.

#### **4.6.2 - Taxa de Perda de Pacotes**

A Figura 4.8 apresenta a taxa de perda de pacotes obtida a partir de um tráfego UDP (1470 bytes) gerado em 04 APRs, ao longo de 05 dias. A análise dos resultados mostra que as atribuições realizadas por controladores apresentaram taxas de perda de pacotes inferiores à atribuição sem o uso de controladores, o que era um comportamento esperado. As taxas médias diárias de perdas de pacotes das abordagens MFDCA e SCIFI foram muito próximas. Usando a abordagem MFDCA, os roteadores obtiveram taxas médias diárias de perdas de 8,7%, 4,7% , 5,3% e 3,3%, para os APRs 1, 2 , 3 e 4 respectivamente. Enquanto que com o uso da abordagem SCIFI, as taxas médias diárias de perdas foram de 7,9% (APR1), 4,8% (APR2), 4,5% (APR3) e 3,2%(APR4).

Para avaliar a taxa média de perda de pacotes mediante um cenário dinâmico que necessite uma troca de canal foram inseridos no terceiro dia dois novos APs de forma controlada, sendo um atribuído ao canal 11 e outro atribuído ao canal 1.

A Figura 4.9 apresenta a taxa média de perda de pacotes nos 3 APRs que estavam próximos aos APs inseridos, os quais obtiveram um índice de sobreposição de sinal de aproximadamente de 80% sobre a sua propagação. Utilizando a abordagem MFDCA, esses roteadores obtiveram taxas médias diárias de perdas de 10,41%, 10,57%, 3,36% para os APRs 5, 6 e 7 respectivamente. Enquanto que com o uso da abordagem SCIFI, as taxas médias diárias de perdas foram de 9,54% (APR5), 10,42% (APR6) e 4,5% (APR7).

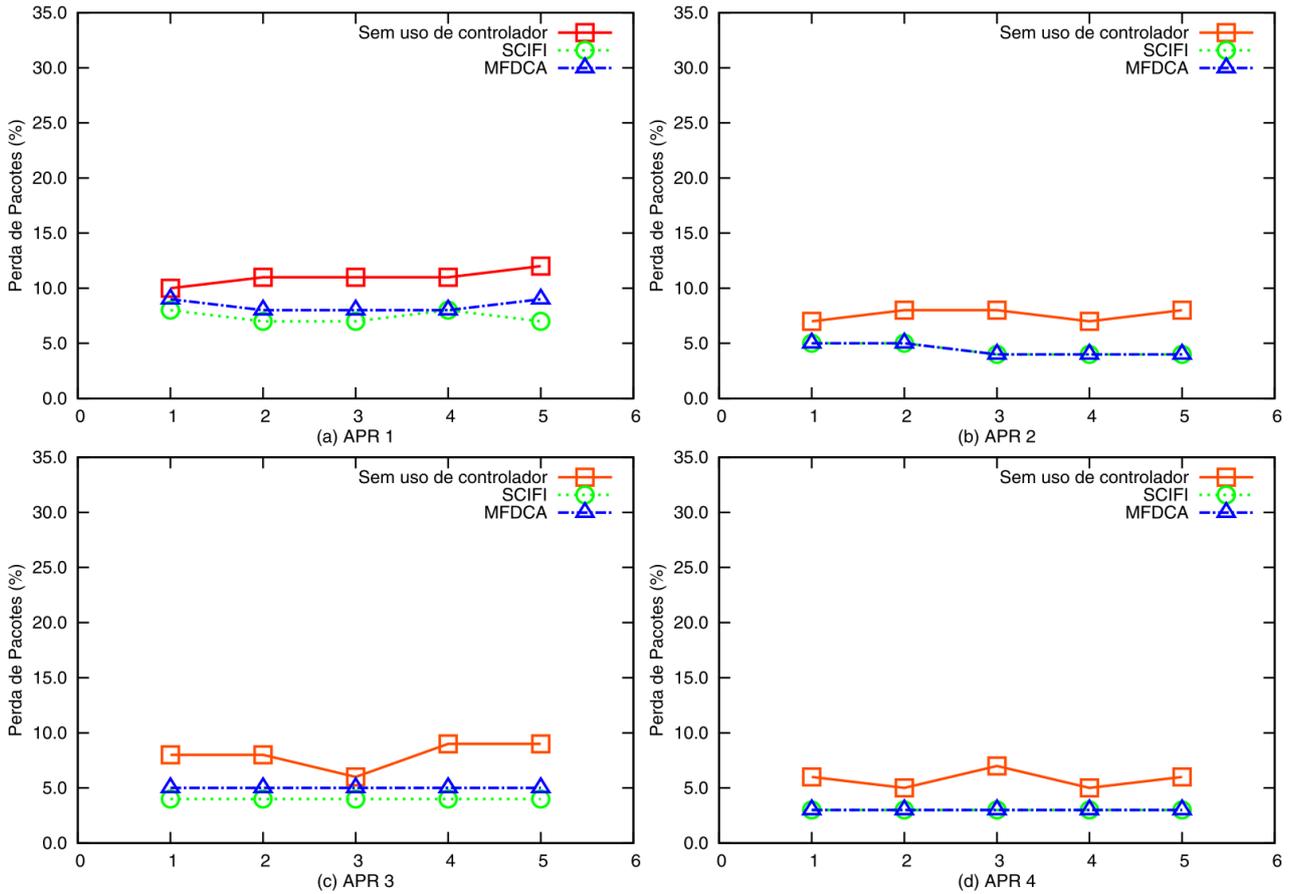


Figura 4.8 Taxa média diária de perda de pacotes obtida pelos APRs 1, 2, 3 e 4.

Os APRs 5 e 6 apresentaram índices maiores de perda de pacotes na abordagem MFDCA em relação a atribuição realizada pelo controlador SCIFI. Isto ocorreu porque o APR 5 foi atribuído pela MFDCA ao canal 3 (em sua primeira atribuição) o qual apresenta seu canal de espectro sobreposto em relação ao canal 1 (canal de um dos novos APs inseridos).

Em relação ao APR 6, que foi atribuído pela MFDCA ao canal 11, foi verificado um compartilhamento de canal com o outro novo AP desconhecido inserido (que estava no canal 11). No entanto, a inserção desse novo AP no terceiro dia conduziu a uma nova atribuição de canal pela MFDCA para readequar ao meio, gerando uma redução na taxa de perda de pacotes, conforme mostrado na Figura 4.9(b).

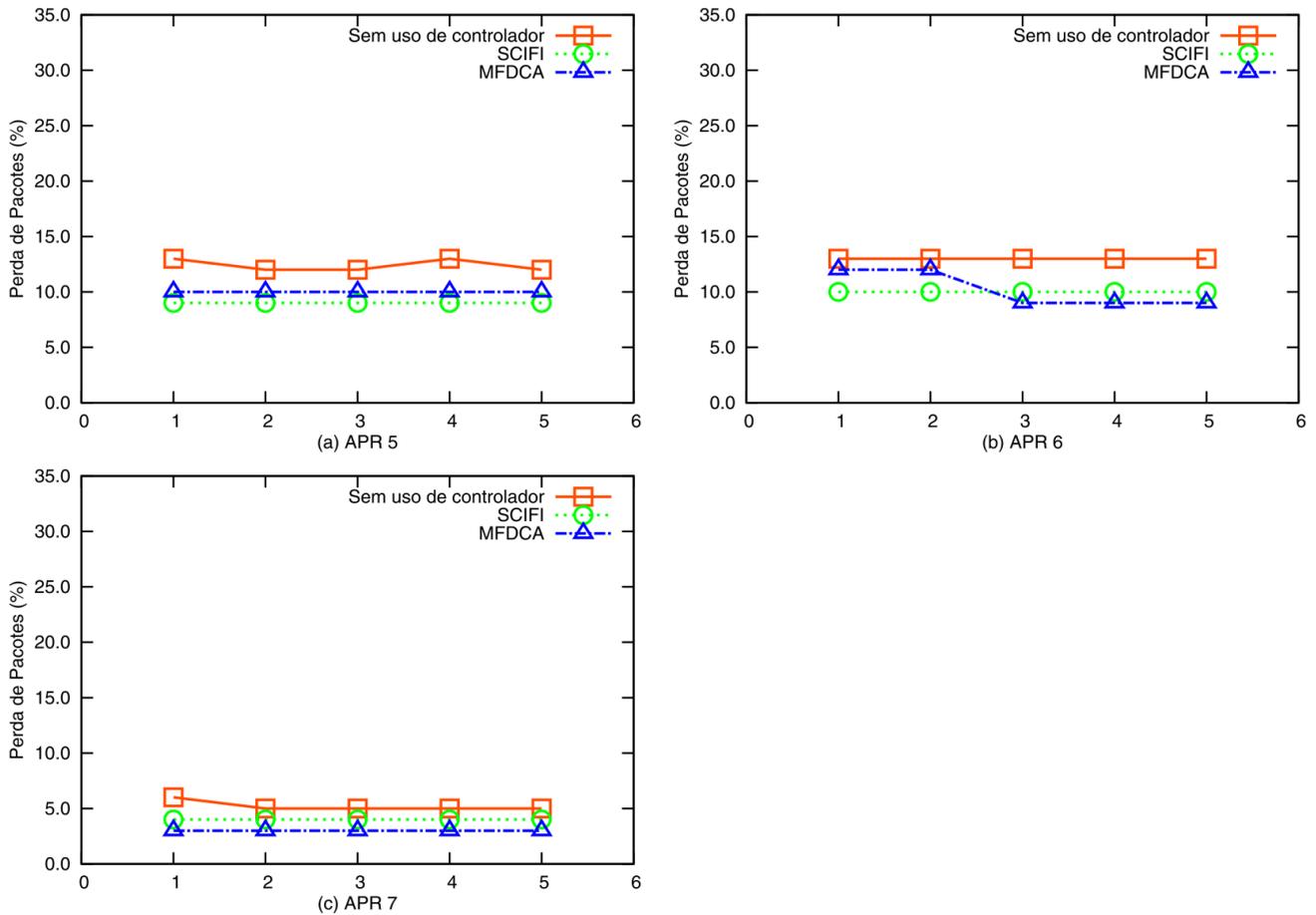


Figura 4.9 Taxa média diária de perda de pacotes obtida pelos APRs 5, 6 e 7.

#### 4.6.3 - Tempo de Resposta na Troca de Canal

O tempo de resposta será analisado considerando o tempo de requisição e troca de canal nas abordagens MFDCA e SCIFI. O objetivo é analisar o desempenho da rede considerando o processo de atribuição de canal por um controlador.

Para realizar estes testes, foram efetuadas trocas de canais em todos os APRs (07 no total) no instante de tempo de 200 segundos, conforme exibida na Figura 4.10.

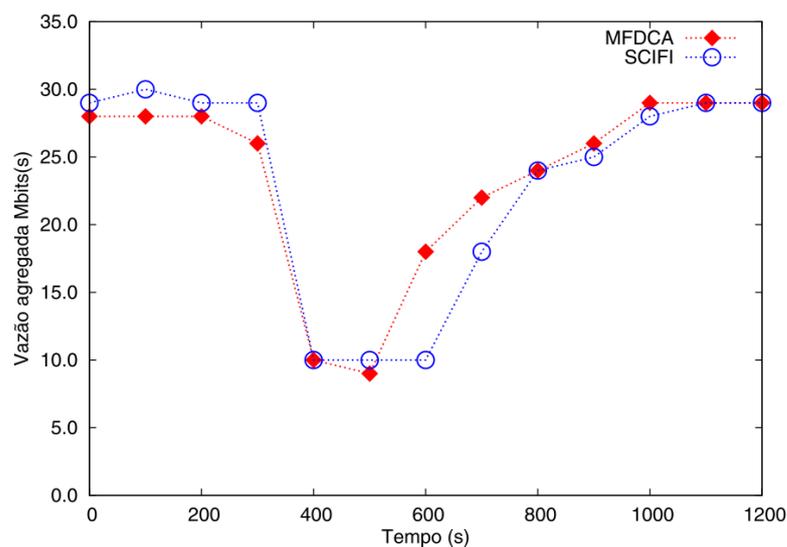


Figura 4.10. Vazão agregada da rede em Mbits/s, considerando todos os 07 pontos de acesso, onde na amostra 200 foi induzida trocas de canais nos APRs para verificação do desempenho da rede.

A Figura 4.10 mostra a vazão agregada dos 07 APRs no tempo de 1200 segundos. Como esperado a vazão decresce para ambas as abordagens a partir do instante de 200 segundos, tempo inicial do processo de troca de canal por todos os APRs da rede. Contudo, a recuperação da vazão de rede pela abordagem MFDCA é mais rápida que o controlador SCIFI, a qual apresenta na amostra 600s uma recuperação na taxa de vazão de 18 Mbits/s contra 10 Mbit/s do SCIFI. Entretanto, o tempo maior de resposta do SCIFI é decorrente do tempo de processamento das diferentes métricas usadas na definição de canais para alocação.

#### 4.6.4 - Tempo de Varredura

A Tabela 4.3 exibe o tempo médio que um APR utiliza para análise do meio incluindo o tempo de envio do relatório gerado com os dados da varredura para o controlador central da rede. As amostras de tempo exibidas correspondem à faixa de tempo utilizada a partir da inserção de cada ponto de acesso.

Os tempos médios de varredura das abordagens MFDCA e SCIFI foram de 6,704 s e 6,986 s respectivamente. Portanto, o tempo de varredura da abordagem MFDCA é em média 282 ms inferior ao obtido pela abordagem SCIFI.

**Tabela 4.3. Tempo médio em segundos que um APR utiliza para a varredura espectral e envio do relatório para o controlador central da rede (NCC).**

Nº de APRs inseridos	SCIFI (s)	MFDCA (s)
1	6,400	5,889
2	6,740	6,100
3	7,080	6,400
4	7,390	6,949
5	7,060	7,060
6	7,100	7,140
7	7,130	7,390
<b>Tempo Médio</b>	<b>6,704s</b>	<b>6,986s</b>

#### 4.6.5 - Vazão por APR

Esta seção apresenta a vazão média a partir da associação de cinco clientes a cada APR da rede. O objetivo é verificar o desempenho da rede a partir da associação de novos clientes. Para a abordagem MFDCA foi configurada para atribuir somente canais sobrepostos. A ideia é comparar a vazão média obtida pelo MFDCA com o SCIFI que utiliza somente canais não sobrepostos.

A Figura 4.11 exibe a vazão média de dados de cada APR a partir de cinco clientes associados durante 2 dias. Cada cliente realizava repetidamente um download de uma imagem de 1470 bytes.

A primeira alocação de canais realizada pelas abordagens foi mantida estática durante todo o experimento, seguindo a seguinte distribuição: MFDCA - (APR 1 ó canal 4), (APR 2 ó canal 3), (APR 3 ó canal 10), (APR 4 ó canal 9), (APR 5 ó canal 3), (APR 6 ó canal 10), (APR 7 ó canal 8) e SCIFI - (APR 1 ó canal 6), (APR 2 ó canal 1), (APR 3 ó canal 11), (APR 4 ó canal 11), (APR 5 ó canal 1), (APR 6 ó canal 11), (APR 7 ó canal 6).

As taxas médias de vazão da rede por cada APR a partir das abordagens MFDCA e SCIFI foram de 21,36 e 22,05 Mbits (s), respectivamente. Como observado, a diferença de vazão obtida por meio do uso de canais sobrepostos em relação aos não sobrepostos foi de apenas 0,69 Mbits (s), demonstrando que é possível obter taxas médias de vazão favoráveis ao uso através de canais sobrepostos.

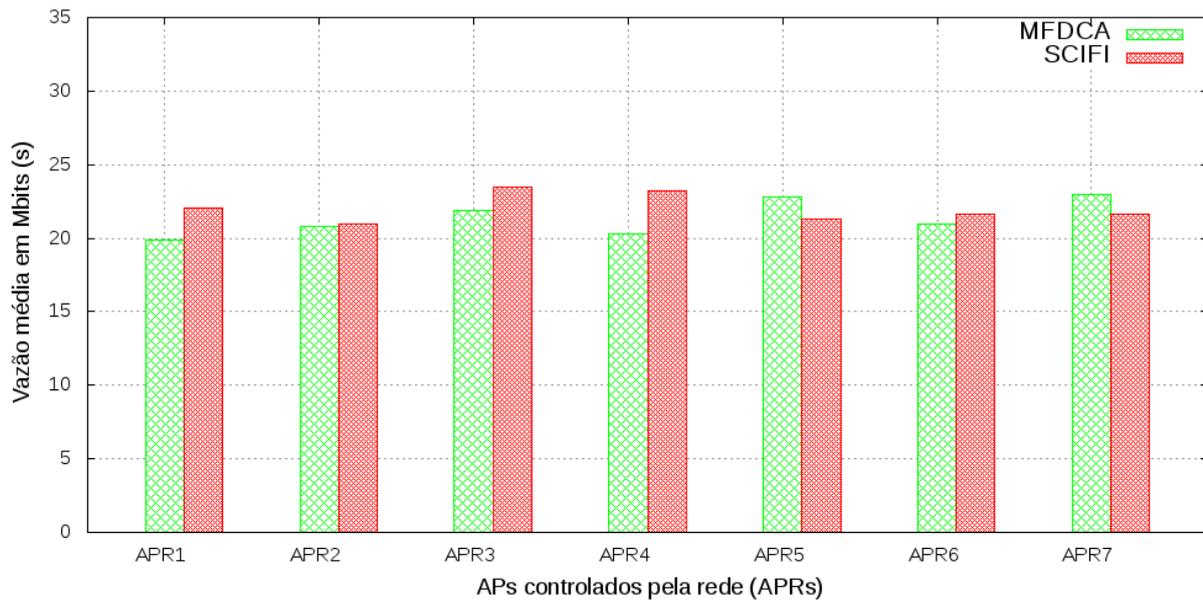


Figura 4.11. Vazão média da rede em Mbits(s) por cada AP gerenciado.

# Capítulo 5

## Conclusões e Trabalhos Futuros

Este trabalho apresentou a MFDCA, uma abordagem dinâmica de atribuição de canais para redes Wi-Fi baseada em múltiplos fatores. A MFDCA é capaz de sensoriar o espectro coletando os múltiplos fatores utilizados na detecção do nível de interferência dos canais, como: qualidade de *link* (LQ), potência de sinal (RSSI), relação sinal ruído (SINR) e fator de sobreposição. As interferências detectadas foram caracterizadas como interferência de compartilhamento de canal, a mais comumente encontrada nessas redes, conforme visto na seção 2.2.

Esses fatores foram usados na definição do melhor canal em uso (MCU), ou seja, aquele que apresentar menor soma da qualidade de sinal propagado sobre o AP em análise, o qual será utilizado também como frequência central para definir os melhores canais sem uso (MCNU).

A abordagem de seleção e atribuição de canais proposta tem como objetivo distribuir canais 802.11 a partir de uma lista de melhores canais coletadas nos APs da rede, ou seja, os canais são atribuídos pelo controlador de rede a partir de várias possibilidades definidas como as melhores, de forma a considerar a rede como um todo.

A abordagem MFDCA surgiu a partir da necessidade de uma solução voltada para realizar uma gerência de redes Wi-Fi em ambientes com muitos APs, bastante comum no contexto atual. A MFDCA pode ser facilmente embarcada em APs de baixo custo comumente encontrados no mercado. Os únicos requisitos são que os APs tenham pelo menos 4MB de memória de armazenamento (requisito comum na maioria dos APs comercialmente vendidos) e permitam alterações em seu *firmware*.

A solução proposta foi avaliada em dois cenários. No primeiro cenário a abordagem é comparada com atribuições estáticas de canais. Nesse cenário foram avaliados a vazão da rede, análise da porcentagem de perda de pacotes e percentual de requisição de troca de canais. A ideia foi verificar a solução em ambientes com alto nível de interferência, onde todos os APRs estão uns dentro do alcance dos outros. Estes testes foram aplicados considerando três casos: todos os APRs atribuídos a um mesmo canal (pior caso), APRs atribuídos a canais não sobrepostos (uma distribuição básica eficaz para um pequeno número de APs) e, por fim a atribuição realizada pelo

MFDCA.

Os testes realizados nesse cenário mostraram que a abordagem MFDCA apresentou sempre as melhores taxas de vazão quando comparadas com as abordagens estáticas. Além de oferecer taxas de perdas de pacotes inferiores a 12%, mesmo usando canais sobrepostos em sua alocação de canais. A análise da estabilidade do mecanismo proposto mostrou que apesar de ocorrerem constantes requisições de troca de canais por todos APRs, o NCC somente atendeu as requisições quando os relatórios gerados pelos APR permanecerem inalterados durante 03 amostras espectrais, conforme especificação do mecanismo.

Um segundo cenário foi definido para realizar testes em um ambiente real com uma área maior de distribuição dos pontos de acesso e um número maior de clientes na rede. Para este cenário de testes a abordagem MFDCA é comparada com a abordagem SCIFI. Foram realizadas análises de vazão de dados, qualidade de propagação (a partir da perda de pacotes), tempo de resposta na troca de canal e tempo de varredura espectral.

Os testes foram realizados a partir de três rotinas de ensaios: Canal atribuído sem uso de controladores, Canal atribuído pela abordagem SCIFI e Canal atribuído pela abordagem MFDCA. Os resultados mostraram que ambos os controladores (NCCs) das abordagens SCIFI e MFDCA asseguram taxas maiores de vazão quando comparados com atribuição sem uso de controladores. A abordagem MFDCA obteve uma taxa média de vazão de 22,5 Mbits/s e SCIFI de 21,8 Mbits/s. A análise de vazão realizada por APR comprovou que canais sobrepostos podem obter taxas de vazão semelhantes às obtidas pelos canais não sobrepostos.

A análise do procedimento de troca de canal mostrou que o tempo tomado pela abordagem MFDCA para efetivar uma troca de canal é inferior ao da abordagem SCIFI. Essa diferença de tempo é decorrente da quantidade de métricas analisadas e coletadas durante o procedimento de varredura do espectro.

## **5.1 Trabalhos Futuros**

O presente trabalho mostrou que ainda restam muitas adições e testes a serem realizados. Durante a execução do projeto foram identificadas diversas soluções que podem contribuir para a melhoria deste trabalho. Um possível trabalho futuro seria a comparação de outros diferentes trabalhos existentes com a implementação realizada, uma vez que, neste trabalho foi utilizada apenas comparações com atribuições estáticas e com apenas um controlador, o SCIFI.

Seria interessante também adicionar algumas funcionalidades aplicáveis através de

contextos de gerência de consumo de energia ao liberar os canais atribuídos a APs ociosos, reaproveitando ainda mais o espectro dada à escassez de canais. Outra possibilidade seria a realização de rotinas de reconhecimento automático de APR, de modo a facilitar o controle das redes. Por fim, é desejado aprimorar a solução para analisar a interferência de outros padrões coexistentes com o padrão 802.11, como por exemplo, o padrão 802.15.1 (Bluetooth) e o padrão 802.15.4 (Zigbee) que compartilham do mesmo meio (2,4GHz) para transmitir dados. De forma que, uma vez coexistindo com as redes 802.11 podem gerar interferências inter-rádio apresentando um comportamento mútuo de interferência.

# Referências

- Achanta, Murali. "Method and apparatus for least congested channel scan for wireless access points". U.S. Patent Application n. 10/959,446 de 5 out. 2004.
- AirMagnet Inc. AirMagnet. Disponível em: [http://www.airwisecommunity.com/assets/documents/AM\\_11n\\_Reference.pdf](http://www.airwisecommunity.com/assets/documents/AM_11n_Reference.pdf), 2008.
- Akyildiz I.F., Won-Yeol L., Vuran M.C. e Mohanty S., "A Survey on Spectrum Management in Cognitive Radio Networks" em IEEE Communication Magazine, vol. 46, no. 4, pp. 40-48, 2008.
- Alliance, Wi-Fi. Disponível em: <http://www.wi-fi.org/>, 2014.
- Alliance, Z. Zigbee Alliance. Disponível em: <https://www.zigbee.org/>, 2014.
- Baid A., Mathur S., Seskar I., Paul S., Das A., e Raychaudhuri D., "Spectrum MRI: Towards diagnosis of multi-radio interference in the unlicensed band", em IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), pp. 534-539, 2011.
- Balbi H., Souza F. R. E, Carrano, R. C., Albuquerque C., Muchaluat-saade D., Magalhaes L. C. S. "Algoritmo de seleção de canais centralizado para redes IEEE 802.11 com controlador", em Workshop de Redes de Acesso, em conjunto com Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos, WRA/ SBRC, vol. 1, pp. 73-86, 2012.
- Berkeley, U. of, 1989. The Network Simulator - NS-2. Disponível em: <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>, 2011.
- Bluetooth SIG I. Bluetooth Alliance. Disponível em: <https://www.bluetooth.org/en-us>, 2014.
- Braga D. , Figueiredo G. B. , Sampaio L. N. "Um Algoritmo de Alocação de Largura de Banda para Tráfegos Elásticos em Redes de Circuito Dinâmico", em Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos, SBRC, vol. 1, pp. 1-14, 2014.
- Breeze Wireless Communications Ltd. IEEE 802.11 Technical Tutorial Introduction. Breezecom, 2012.
- Brèlaz D. "New methods to color the vertices of a graph", em Magazine Communications ACM, vol. 22, pp.251-256, 1979.
- Burton M. "Channel Overlap Calculations for 802.11b Networks". White Paper em Cirond Technologies Inc, 2002.
- Chiochan S., Hossain E., e Diamond J., "Channel assignment schemes for infrastructure-based 802.11 wlans: A survey", em IEEE Communications Surveys and Tutorials, vol. 12, pp. 124-136, 2010.
- Cisco Systems Networks. Linksys WRT54G. Disponível em: <http://support.linksys.com/pt-latam/support/routers/WRT54G>, 2006.
- Digital, C. "Para 56% dos brasileiros, acesso à Internet é por smartphones e tablets". Disponível em: <http://convergenciadigital.uol.com.br/cgi/cgilua.exe/sys/start.htm?infoid=30382&sid=8#.Ux9pBPldVn4>, 2012.
- FCC. Thirteenth Annual Report of the FCC, June 30, p.8, 1947.

- Faganello L., 2012. Q-Noise: um algoritmo de alocação dinâmica de canal para rádio cognitivo. Trabalho de conclusão de graduação da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Informática. Curso de Engenharia de Computação, 2012.
- Farproc. Wi-Fi Analyser. Disponível em: [https:// play.google.com/store/apps/details?id=com.farproc.analyzer&hl=pt\\_BR](https://play.google.com/store/apps/details?id=com.farproc.analyzer&hl=pt_BR), 2012.
- Gast M., 802.11 Wireless Networks: The Definitive Guide, 2nd Edition. Editora: O'Reilly Media. ISBN: 978-0-596-10052-0, 2005.
- Gibilini D., 8Aplicação de Técnicas de Inteligência Artificial na alocação dinâmica de canais em redes sem fio. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica de São Paulo (USP), 2006.
- Goldberg, D. e Kuo, C. "Genetic Algorithms in Pipeline Optimization." Journal ASCE Library American Society of Civil Engineers, 10.1061/(ASCE)0887-3801(1987)1:2(128), vol. 1, Issue 2, pp. 128-141, 1987.
- Golmie N., Rebala O. e Chevrollier N., "Bluetooth Adaptive Frequency Hopping and Scheduling", em Proc. IEEE Military Communications Conference (MILCOM), vol. 5, pp. 1138-1142, 2003a.
- Golmie N., Van Dyck, R. E., Soltanian, A., Tonnerre, A. e Rebala O. 8Interference evaluation of Bluetooth and IEEE 802.11 b systems. Journal Wireless Networks, vol. 9, Issue 3, pp. 201-211, 2003b.
- Golmie N., Chevrollier N. e Rebala O. "Bluetooth and WLAN Coexistence: Challenges and Solutions". IEEE Wireless Communications Magazine, vol. 10, Issue 6, pp. 22-29, 2003c.
- Gopalakrishnan S. e GaneshKumar P. 8Channel Assignment Mechanism for Wireless Local Area Networks (WLANs)-A Survey. International Journal of Modern Engineering Research (IJMER), vol. 2, Issue 5, pp.304363045, 2012.
- Gramacho S. L. D. L, Araujo M., Figueiredo G. B. 8Dinâmica de seleção de melhores canais em redes IEEE 802.11 com modelo de interferência CCA/SINR. em Workshop de Redes de Acesso em Banda Larga, WRA/SBRC, vol. 1, pp. 1-12, 2013.
- Haidar M. , Ghimire R., Al-Rizzo H., Akl R. e Chan Y. 8Channel Assignment in an IEEE 802.11 WLAN Based on Signal-to-interference Ratio. em IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, CCECE, vol. 1, pp. 001169 - 001174, 2008.
- Hills A. & Schlegel E. J. 8Rollabout: a wireless design tool. em IEEE Communications Magazine, vol.42, Issue 2, pp. 132-138, 2004.
- IEEE Std 802. 8802a-2003-IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks: Overview and Architecture - Amendment 1: Ethertypes for Prototype and Vendor-Specific Protocol Development. em IEEE Std. 802-2001 (Revision of IEEE Std 802-1990), pp. 1-5, 2002.
- IEEE Std 802.11. 8IEEE Standard for Information technology 8 Telecommunications and information exchange between systems 8 Local and metropolitan area networks 8 Specific requirements. em IEEE Std 802.11-2012 (Revision of IEEE Std 802.11-2007), 2012.
- IEEE Std 802.11g/n. 8Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. em IEEE Std. 802.11-2012, pp. 1 ó 5229, 2012.
- IEEE Std 802.11h. 8802.11h-2003 - IEEE Standard for Information Technology - Telecommunications and Information Exchange Between Systems - Local and Metropolitan Networks - Specific Requirements - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY). em IEEE Std. Computer Society, pp.1659, 2003.

- IEEE Std 802.11k. IEEE Standard for Information technology-- Local and metropolitan area networks-- Specific requirements-- Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment 1: Radio Resource Measurement of Wireless, em IEEE Std. Computer Society, pp.16244, 2011.
- IEEE Std 802.15-99. Coexistence, Interoperability and Other Terms, em IEEE Std. Computer Society, pp.1612, 1999.
- Iperf. iPerf The network bandwidth measurement tool.. Disponível em: <http://iperf.sourceforge.net>, 2010.
- ITU. ARTICLE 1 - Terms and Definitions, em International Telecommunication Union (ITU) Library & Archives Service. Radio Regulations, vol. 1.15, 2009.
- Kammerman, A. Coexistence between Bluetooth and IEEE 802.11 CCK: Solutions to avoid mutual interference, em IEEE 802.11 Working Group Contribution, IEEE P 802.11- Wireless LANs, 2000.
- Lee J. H., Han B. J., Lim H. J., Kim, Y. D., Saxena, N., & Chung T. M. Optimizing access point allocation using genetic algorithmic approach for smart home environments, em The Computer Journal, vol. 52, Issue 8, pp.938-949, 2009.
- Leung K. K. & Kim B. J. J. Frequency assignment for IEEE 802.11 wireless networks, em Vehicular Technology Conference (VTC 2003-Fall). 2003 IEEE 58th, Vol. 3, pp. 1422-1426, 2003.
- Linus.Ath9k. Disponível em: <http://wireless.kernel.org/en/users/Drivers/ath9k>, 2008.
- Mähönen, P., Riihijärvi, J., & Petrova, M. Automatic channel allocation for small wireless local area networks using graph colouring algorithm approach, em Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, PIMRC 2004 - 15th IEEE International Symposium, vol. 1, pp. 536-539, 2004.
- Mishra A., Rozner E., Banerjee S. & Arbaugh W. Exploiting partially overlapping channels in wireless networks: Turning a peril into an advantage, em Proceedings of the 5th ACM SIGCOMM conference on Internet Measurement, pp. 29-29, 2005.
- Mishra A., Banerjee S. & Arbaugh W. Weighted coloring based channel assignment for WLANs. ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review, vol. 9, Issue 3, pp. 19-31, 2005.
- OpenWrt. OpenWrt Wireless Freedom. Disponível em: <https://openwrt.org/>, 2004.
- Opnet Inc, T. Network Simulation (OPNET Modeler Suite). Disponível em: <https://www.opnet.com/>, 1986.
- Petrova M. & Petri M. Frequency allocation for WLANs using graph colouring techniques, em Wireless on Demand Network Systems and Service - International Conference, WONS 2005, vol 1, pp. 216-222, 2005.
- Ruckus Wireless. ChannelFly - The Industry's First Predictive Capacity Management Technology. 2005-2016 Ruckus Wireless, INC. World rights reserved, 2011.
- Sikora A. & Groza V. F. Coexistence of IEEE802. 15.4 with other Systems in the 2.4 GHz-ISM-Band, em Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2005, IMTC 2005, Proceedings of the IEEE, Vol. 3, pp. 1786-1791, 2005.
- Silva M. & De Rezende J. F. A dynamic channel allocation mechanism for IEEE 802.11

- networksö, em Telecommunications Symposium International, vol. 1, pp. 225-230, 2006.
- SSH, C.S. Secure Shell Communications Security. Disponível em: <http://www.ssh.com/>, 2000.
- Tanenbaum A.S. & Wetherall, J. D. õRedes de Computadores 5ª ediçãoö. Editora: Pearson Prentice Hall, ISBN: 9788576059240, 2011.
- Teleco. Teleco Tutoriais. Disponível em: [www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialwlanman1/pagina3.asp](http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialwlanman1/pagina3.asp), 2012.
- Unicamp. Insertion Sort. Disponível em: [www.ft.unicamp.br/liag/siteEd/definicao/insertion\\_sort.php](http://www.ft.unicamp.br/liag/siteEd/definicao/insertion_sort.php), 2013.
- Union, I.T. õDocuments of the International Telecommunications Conferenceö, vol.28, pp. 466, 1947.
- Varga A. OMNeT++. Disponível em: <http://www.omnetpp.org/>, 1993.
- Villegas G.E. & Aspas P.J. õSelf-Optimization of Radio Resources on IEEE 802.11 Networksö. PhD Thesis. Wireless Networks Group (WNG) ô Telematics Department Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), 2009.
- Weisheng S., Selvakennedy S., Zomaya A. Y. õAn overview of Channel Assignment methods for multi-radio multi-channel wireless mesh networksö, em Journal of Parallel and Distributed Computing, Vol. 70, Issue 5, pp. 505-524, 2010.
- Zhou H. & Liu C. õWLAN Channel Assignment Based on Channel Overlap Factorö, em Instrumentation, Measurement, Computer, Communication and Control (IMCCC), Second International Conference, vol. 2, pp.2496251, 2012.