



Adaptação Cognitiva da Taxa de Transmissão em Redes IEEE 802.11n

Bruno Guimarães de Castro

JUIZ DE FORA

ABRIL, 2013

Adaptação Cognitiva da Taxa de Transmissão em Redes IEEE 802.11n

BRUNO GUIMARÃES DE CASTRO

Universidade Federal de Juiz de Fora

Instituto de Ciências Exatas

Departamento de Ciência da Computação

Bacharelado em Ciência da Computação

Orientador: Luciano Jerez Chaves

JUIZ DE FORA

ABRIL, 2013

ADAPTAÇÃO COGNITIVA DA TAXA DE TRANSMISSÃO EM REDES IEEE 802.11N

Bruno Guimarães de Castro

MONOGRAFIA SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA, COMO PARTE INTEGRANTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO.

Aprovada por:

Luciano Jerez Chaves
Mestre em Ciência da Computação

Marcelo Ferreira Moreno
Doutor em Ciência da Computação

Eduardo Pagani Julio
Mestre em Ciência da Computação

JUIZ DE FORA
1 DE ABRIL, 2013

Dedico este trabalho aos meus pais, por todo o amor e dedicação para comigo, por terem sido a peça fundamental para que eu tenha me tornado a pessoa que hoje sou.

À minha família pelo carinho e apoio dispensados em todos os momentos que precisei.

Resumo

As redes sem fio são indispensáveis nos dias atuais, e a maioria dos dispositivos escolheram para esta tecnologia o padrão IEEE 802.11. Com o passar dos anos foram acrescentadas novas melhorias e novos aperfeiçoamentos, chegando à versão atual IEEE 802.11n. Para se adaptar ao meio de transmissão o padrão prevê a utilização de várias taxas de transmissões, pois trabalhos anteriores revelaram que é mais eficiente utilizar taxas baixas nos momentos de baixa qualidade do meio, e taxas altas quando houver pouca interferência e ruído. Entretanto, o IEEE apenas exige que os dispositivos possam se comunicar utilizando diversas taxas, deixando livre para os fabricantes a definição de um algoritmo que faça a escolha dinâmica da melhor taxa em determinado momento da transmissão. Para o problema em questão, foi proposto por Chaves et al [2013] um algoritmo chamado *Cognitive Transmission Rate Adaptation* (CogTRA), projetado para redes IEEE 802.11a/b/g. Entretanto, devido as novas funcionalidades do padrão IEEE 802.11n, a simples portabilidade do mecanismo não alcança o melhor desempenho. Por isto, é proposto neste trabalho o CogTRA-HT: uma implementação baseada no CogTRA que realiza a escolha dinâmica da taxa de transmissão considerando as características específicas das redes IEEE 802.11n.

Palavras-chave: Algoritmos cognitivos, Adaptação de taxa de transmissão, Redes sem fio IEEE 802.11.

Abstract

Wireless networks are essential nowadays, and IEEE 802.11 is the chosen standard for almost all wireless devices. Over the years, new improvements and enhancements were included in this standard, resulting in the IEEE 802.11n supplement. To adapt to changes in wireless channels, these interfaces support multiple transmission data rates, since previous studies have shown that it is more efficient to use lower data rates when the wireless signal quality is poor, and use higher rates when there is little interference and noise. However, the IEEE 802.11 standard does not define how to dynamically select the appropriate data rate; instead, manufacturers can design and implement their own algorithms. To tackle these challenges, Chaves et al [2013] introduced an algorithm called Cognitive Transmission Rate Adaptation (CogTRA), designed to IEEE 802.11a/b/g networks. However, due to the new features introduced by the IEEE 802.11n supplement, the simple portability of this mechanism into these new networks does not achieve the best performance. Therefore, this work proposes the CogTRA-HT: an IEEE 802.11 driven CogTRA implementation to dynamically select the transmission data rate, taking into account the specific characteristics of IEEE 802.11n networks.

Keywords: Cognitive algorithms, Transmission rate adaptation, IEEE 802.11 wireless networks.

Agradecimentos

Agradeço ao meu professor orientador que teve paciência e que me ajudou bastante a concluir este trabalho. Agradeço também aos meus professores e amigos de turma. Obrigado a todas as pessoas que contribuíram para meu sucesso e para meu crescimento.

Don't be evil

Paul Buchheit/Google

Sumário

Lista de Figuras	7
Lista de Tabelas	8
1 Introdução	9
1.1 Motivação e justificativa	11
1.2 Objetivos e contribuições	13
1.3 Estrutura	14
2 Fundamentação Teórica	16
2.1 O padrão IEEE 802.11	16
2.1.1 Subcamada MAC	19
2.1.2 Camada física	20
2.2 O padrão IEEE 802.11n	23
2.2.1 Principais modificações	23
2.2.2 Taxas de transmissão	26
2.3 Redes cognitivas	28
2.3.1 O arcabouço cognitivo CogProt	29
2.4 OpenWRT	31
3 Adaptação da Taxa de Transmissão	33
3.1 Adaptação de taxa para SISO WLANs	34
3.1.1 CORA: COgnitive Rate Adaptation	36
3.1.2 CogTRA: Cognitive Transmission Rate Adaptation	38
3.2 Adaptação de taxa para MIMO WLANs	40
4 O Algoritmo Cognitivo CogTRA HT	46
4.1 CogTRA_HT	47
4.1.1 Interoperabilidade com os padrões .11a, .11b e .11g	47
4.1.2 Índices MCSs	48
4.1.3 Número de fluxos de dados N_{ss}	49
4.1.4 Agregação de quadros na camada MAC	51
4.2 Ambiente de implementação	52
4.2.1 Compilação do OpenWRT	52
4.2.2 Inserção do CogTRA	53
4.2.3 Inserção do CogTRA_HT	54
4.2.4 Configurações do OpenWRT	54
4.2.5 Interface do código com o OpenWRT	55
4.3 Ambiente de testes	56
4.3.1 Descrição dos experimentos	58
4.3.2 Resultados dos experimentos	58
5 Conclusão	62
Referências Bibliográficas	64

Lista de Figuras

1.1	Hierarquia de padrões de redes sem fio especificadas pelo IEEE	9
1.2	Evolução do padrão IEEE 802.11 ao longo dos anos	10
2.1	Canais da faixa de frequência 2.4GHz	17
2.2	Diferentes tipos de redes sem fio IEEE 802.11	18
2.3	Arquitetura OSI e as camadas especificadas pelo IEEE 802.11.	19
2.4	Modo de acesso de uma rede IEEE 802.11 utilizando o DCF	20
2.5	Etapas para a transmissão de dados na camada física.	23
2.6	Sistema MIMO utilizando multiplexação espacial com dois fluxos.	24
2.7	Técnica de <i>Channel Bounding</i> usada nas redes 802.11n.	25
2.8	O ciclo de otimização OODA	29
2.9	O ciclo de otimização OODA do CogProt	30
3.1	Curvas normais com mesmo μ e diferentes valores de σ	39
3.2	Direções de busca pelo MCS no algoritmo ARFHT	42
3.3	Busca crescente pelo MCS no algoritmo MIRA	45
3.4	Busca decrescente pelo MCS no algoritmo MIRA	45
4.1	Escolha do valor de N_{ss} feita pelo CogTRA_HT.	50
4.2	<i>Overhead</i> introduzido pelas transmissões nas redes 802.11.	51
4.3	Sequência na chamada de funções do CogTRA_HT.	57
4.4	Resultados dos experimentos com o CogTRA_HT.	59
4.5	Evolução no desempenho alcançado pelas melhorias do CogTRA_HT.	60
4.6	Tabela de utilização das taxas do CogTRA_HT ao final de uma transmissão.	61
4.7	Tabela de utilização das taxas do Minstrel_HT ao final de uma transmissão.	61

Lista de Tabelas

2.1	Técnicas de espalhamento espectral, modulação digital e taxa de codificação.	22
2.2	Relação dos MCSs mandatórios nas redes IEEE 802.11n.	27
3.1	Tabela MRR do Minstrel.	35
3.2	Tabela MRR do CogTRA.	39
4.1	Comparação do atributo <code>.idx</code> entre taxas e índices MCSs	48

1 Introdução

Nos últimos anos as tecnologias para conexão de equipamentos em rede evoluíram bastante, e umas das principais evoluções foi a possibilidade de conectar diversos dispositivos sem depender de uma infraestrutura cabeada, gerando uma maior mobilidade e comodidade para os usuários. Para tentar melhor dividir os estudos nesta área das comunicações sem fio, o *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) foi um dos responsáveis por padronizar a especificação de diversas redes. Para um melhor estudo e desenvolvimento, o IEEE criou uma hierarquia de padrões baseados na dimensão que estas redes podem alcançar. Esta hierarquia vai desde as redes pessoais (como é o caso das redes *bluetooth*), passando pelas redes locais e até chegar nas redes metropolitanas. A Figura 1.1 ilustra essa classificação, apresentando os logotipos e nomes comerciais dessas tecnologias, além a informação de alcance aproximado para cada uma delas.

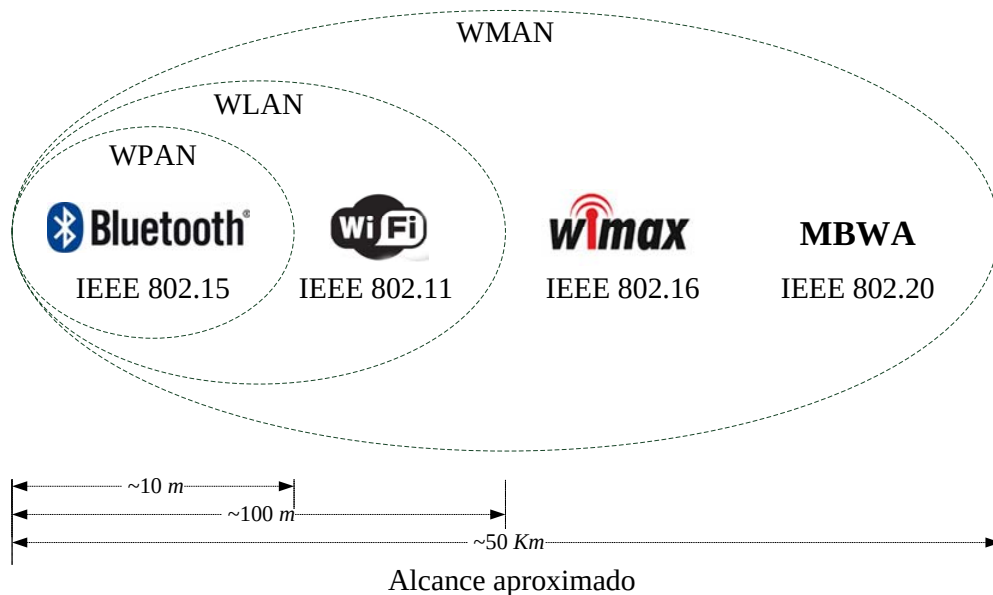


Figura 1.1: Hierarquia de padrões de redes sem fio especificadas pelo IEEE [Chaves, 2010].

O padrão mais conhecido e utilizado pelos usuários residenciais para a criação de redes locais sem fio (WLANs) é o IEEE 802.11 [2007], comercialmente chamado de Wi-Fi. Ele é capaz de conectar computadores, celulares e diversos outros dispositivos que implementam seus protocolos em redes de pequeno e médio porte com grande facilidade. Seu uso está relacionado a distâncias de ambientes domésticos, corporativos, acadêmicos

e em locais públicos (bares, lanchonetes, shoppings, livrarias, aeroportos, etc.).

O padrão 802.11 estabelece as normas para a criação e também para o modo de uso dessas redes, garantindo assim a interoperabilidade principalmente entre dispositivos de diferentes fabricantes. A transmissão de informações neste tipo de rede é feita por sinais de radiofrequência, que se propagam pelo ar e podem cobrir áreas de até centenas de metros. Como existem inúmeros serviços que podem utilizar sinais de rádio, é necessário que cada um opere de acordo com as exigências estabelecidas pelo governo de cada país. Esta é uma maneira de evitar problemas, especialmente as interferências.

A primeira versão do padrão 802.11 foi lançada em 1997, atualmente conhecida por IEEE 802.11 *legacy*. Ela operava na frequência de 2.4 GHz, e sua velocidade teórica era de no máximo 2 Mbps. Buscando cada vez mais um melhor desempenho das redes sem fio, novos estudos foram realizados pelo órgão e também pela comunidade acadêmica, e assim o IEEE foi divulgando, de tempos em tempos, novas revisões do padrão com diversas modificações a fim de garantir maior segurança, conectividade e, principalmente, maiores velocidades nas transferências. A Figura 1.2 apresenta a linha de evolução do padrão IEEE 802.11 durante os últimos anos.

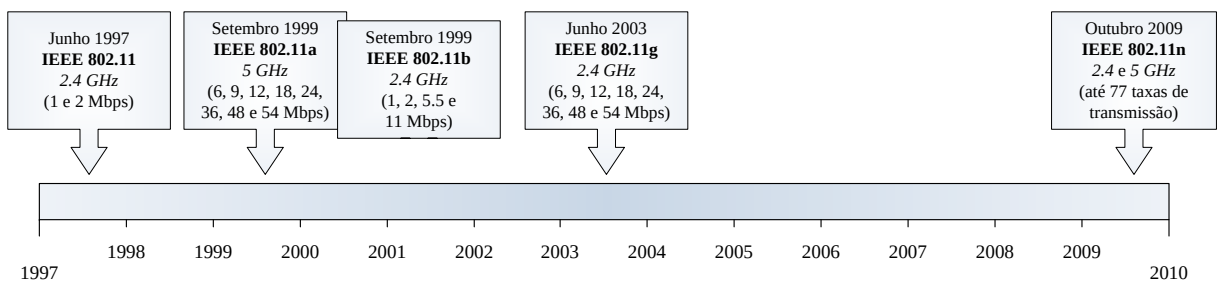


Figura 1.2: Evolução do padrão IEEE 802.11 ao longo dos anos [McCann, 2012].

A última geração completamente desenvolvida é o padrão IEEE 802.11n [2009]. Iniciada em 2004 e finalizada em setembro de 2009, este padrão tem como principal característica o uso de um esquema de transmissão com múltiplas antenas chamado *Multiple-Input Multiple-Output* (MIMO), capaz de aumentar consideravelmente a quantidade de taxas de transferência e a velocidade final de dados por meio da combinação de várias vias de transmissão.

1.1 Motivação e justificativa

A velocidade de transmissão de dados praticada em ambientes que utilizam tecnologia sem fio deve ser razoável, já que de nada adiantaria a disponibilidade e flexibilidade desses ambientes sem manter a tradicional funcionalidade das redes fixas conhecidas e utilizadas há tanto tempo. Para isso, os padrões especificam o suporte à diversas taxas de transmissão de dados. As taxas de transmissões são atingidas utilizando uma combinação de técnicas de codificação, técnicas de modulação e técnicas de espalhamento espectral. Variando essas três dimensões se alcança um número diverso de taxas de transmissão, partindo da possibilidade de taxas mais baixas até taxas mais altas, que podem ser utilizadas a qualquer momento pelas redes sem fio.

A taxa atual de transmissão de um determinado dispositivo sem fio reflete na velocidade real com o que ele envia os dados através das ondas eletromagnéticas. Essa velocidade real é conhecida como *throughput*. Contudo, nem sempre as maiores taxas são as que provêm os melhores resultados. Devido às propriedades físicas do canal de comunicação, existe uma relação direta entre a taxa de transmissão e a qualidade do sinal necessária para suportar a transmissão [Awerbuch et al, 2006]. Dentre os fatores que influenciam na qualidade do sinal podemos citar a distância entre o transmissor e o receptor. Se o meio sem fio estiver com muito ruído ou interferência, uma taxa de transmissão alta fará com que muitos dados cheguem ao receptor com erros. Assim, apesar da taxa ser alta, irão acontecer várias perdas de quadros e pedidos de retransmissão, diminuindo o *throughput*.

Por conta disso, a razão para a possibilidade de operar em várias taxas de transmissão é de permitir que o dispositivo possa melhor se adequar ao ambiente inserido, pois não existe uma taxa que seja ótima em todos os cenários e, em muitos casos, o uso de uma taxa mais baixa pode vir a aumentar a vazão real dos dados. Segundo Xia et al [2009] um esquema de transmissão dinâmica é necessário para maximizar a utilização das redes sem fio. Joshi et al [2008] define a adaptação da taxa de transmissão como o processo de ajustar a taxa de transmissão de acordo com o meio, a fim de maximizar a vazão dos dados na rede. Esta adaptação é um processo fundamental para aumentar o desempenho dos dispositivos que implementam o padrão IEEE 802.11 [Hou et al, 2008; Kim et al,

2006a; Joshi et al, 2008].

Apesar de grande relevância para o bom funcionamento da rede, o padrão não especifica nenhum algoritmo que faça esta escolha automática da taxa de transmissão, pois o IEEE deixa a cargo dos fabricantes de equipamentos o desenvolvimento e implementação de seus próprios algoritmos [Makhlouf et al, 2011]. Dentre os diversos algoritmos de adaptação disponíveis na literatura, existe um algoritmo cognitivo para adaptação da taxa de transmissão em sem fio que foi proposto em Chaves et al [2009] e aperfeiçoado em Chaves [2010] e em Chaves et al [2013]. Esse algoritmo, atualmente denominado por *Cognitive Transmission Rate Adaptation* (CogTRA), usa os princípios de redes cognitivas para equipar as estações de rede sem fio com as funcionalidades de autoconfiguração e auto-otimização da taxa de transmissão, de acordo com as condições atuais da rede. O mecanismo CogTRA foi implementado e validado no âmbito das redes 802.11a/b/g, e será melhor detalhado no Capítulo 3.

Com o surgimento do padrão IEEE 802.11n, foram implantadas novas características nas subcamadas MAC e na camada física para permitir um melhor desempenho das redes sem fio, aumentando consideravelmente a quantidade de taxas de transmissão disponíveis para uso frente às 12 taxas das redes .11a/b/g, bem como permitido aos nós da rede a troca de informações para auxiliar nesta escolha. No padrão 802.11n a taxa de transmissão passa a ser conhecida por *Modulation and Coding Scheme* (MCS), totalizando 77 MCSs. Entretanto, a taxa de dados não é formada apenas pela escolha das técnicas de codificação, modulação e espalhamento espectral, mas também por novas variáveis decorrentes de suas novas capacidades, como a largura do canal sem fio e o intervalo de guarda entre transmissões de quadros.

No contexto de adaptação de taxa de transmissão, as modificações mais relevantes são o suporte à transmissão e recepção com até quatro fluxos de dados simultâneos em razão das múltiplas antenas, uma maior largura do canal, intervalos entre transmissões mais curtos, e a possibilidade de utilização de novos campos no cabeçalho dos quadros para facilitar o transporte de informações referentes à qualidade do sinal eletromagnético. Estas e outras novas características acrescentaram uma nova complexidade ao problema de adaptação de taxa de transmissão, impondo desta forma dificuldades na utilização direta

dos algoritmos de adaptação de taxa existentes para as redes antigas (802.11a/b/g) nas redes 802.11n [Lakshmanan et al, 2011; Xia et al, 2009; Pefkianakis et al, 2010].

1.2 Objetivos e contribuições

No contexto apresentado, este trabalho tem como objetivo a adaptação, implementação e validação do algoritmo cognitivo de adaptação da taxa de transmissão CogTRA em redes IEEE 802.11n. Atualmente existe apenas uma implementação livre e efetivamente em uso para a adaptação de taxa em redes IEEE 802.11n, denominada Minstrel [Smithies, 2005]. Assim, ainda há espaço para explorar outros mecanismos nessas redes, e a disponibilização do CogTRA como uma segunda solução livre para essas redes pode contribuir consideravelmente para a visibilidade e contribuição inovadora deste trabalho.

O trabalho realizado e apresentado nesta monografia tem um foco prático, considerando a implementação do CogTRA em equipamentos de rede que suportem *firmwares* baseados em distribuições Linux. Os experimentos realizados foram conduzidos em ambientes convencionais, utilizando roteadores em fio e *notebooks* como plataformas de testes.

Para alcançar os objetivos propostos, inicialmente foi realizado um estudo sistemático dos algoritmos de adaptação de taxa de transmissão de rede existentes tanto para as redes .11a/b/g, bem como para as redes .11n. Esse estudo inicial compreendeu tanto a leitura de artigos científicos que apresentam essas propostas, bem como a análise das implementações existentes desses algoritmos. Os principais pontos observados foram: as adaptações necessárias para a implementação do algoritmo CogTRA; a compatibilidade com os diversos padrões de rede sem fio; e o custo computacional quando em funcionamento.

Com este conhecimento específico foi possível identificar as características do CogTRA que precisaram ser adaptadas para o novo padrão. A implementação deste algoritmo foi feita com base na implementação já existente para as redes .11a/b/g, mas considerando também a implementação do Minstrel. Para validar a nova implementação foram conduzidos experimentos em ambientes reais, com o intuito de avaliar o funcionamento do mecanismo e o desempenho alcançado em situações de tráfego saturado.

As principais contribuições deste trabalho são:

- Estudo detalhado das especificações das redes IEEE 802.11n, principalmente no que tange à adaptação da taxa de transmissão;
- Estudo detalhado dos princípios de funcionamento do algoritmo cognitivo para adaptação da taxa de transmissão CogTRA;
- Estudo detalhado do funcionamento da plataforma e do sistema operacional utilizados para a implementação do algoritmo CogTRA: o roteador Ubiquiti RouterStation Pro, equipado com *firmware* OpenWrt [2013];
- Implementação e validação do mecanismo CogTRA no módulo Linux **ath9k** para *chipsets* Atheros com suporte à redes IEEE 802.11n. A implementação é livre e está disponível para uso no CogTRA Website [2013].

1.3 Estrutura

O restante desta monografia está organizado da seguinte maneira:

- O Capítulo 2 contém uma revisão dos assuntos básicos, cujo conhecimento é necessário para a leitura do restante da monografia. Neste capítulo é feita uma introdução ao padrão IEEE 802.11 juntamente com o mais novo padrão 802.11n. Também apresenta os conceitos relacionados à redes cognitivas, o *framework* cognitivo CogProt e o projeto OpenWrt, responsável pelo *firmware* utilizado nos equipamentos de teste.
- O Capítulo 3 descreve os algoritmos de adaptação da taxa de transmissão propostos em outros trabalhos da literatura, bem como o algoritmo central deste trabalho: o CogTRA. São mostrados não somente algoritmos para os padrões antigos, mas também para o recente padrão IEEE 802.11n. Além de apresentar os algoritmos, este capítulo também contém uma avaliação comparativa quanto às principais funcionalidades e deficiências das soluções apresentadas.
- O Capítulo 4 aborda todos os aspectos relacionados à adaptação do algoritmo cognitivo CogTRA para o novo padrão das redes sem fio. Além disso, este capítulo

aborda os detalhes técnicos da implementação prática do algoritmo usando o driver Linux `ath9k` no *firmware* OpenWrt e apresenta os resultados obtidos por experimentos em ambientes reais, que foram utilizados para validar e avaliar a implementação do mecanismo CogTRA para as redes 802.11n.

- Por fim, o Capítulo 5 traz as conclusões obtidas ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

2 Fundamentação Teórica

Esse capítulo aborda alguns conceitos fundamentais sobre os assuntos envolvidos nesta monografia. Primeiramente, na Seção 2.1, são apresentadas as redes sem fio regidas pelo padrão IEEE 802.11 e seus suplementos. Em seguida, a Seção 2.2 descreve especificamente as características das redes 802.11n, destacando aquelas que contribuíram para alcançar uma maior quantidade de taxas de transmissão e, conseqüentemente, um maior *throughput*. Na sequência, a Seção 2.3 apresenta uma introdução aos conceitos e propriedades das redes cognitivas, utilizadas para o desenvolvimento e gerência dos sistemas de comunicação, bem como o *framework* CogProt, utilizado como base para a implementação do algoritmo Cogtra. Por fim, na Seção 2.4 é apresentado o projeto OpenWrt, responsável pela implementação do *firmware* utilizado para a implementação do algoritmo CogTRA.

2.1 O padrão IEEE 802.11

As transmissões sem fio utilizam o espectro eletromagnético como meio de propagação, onde para cada tecnologia é utilizado um certo tipo de ondas eletromagnética. Por exemplo, ondas de infravermelho são utilizadas por controles remotos, a luz visível é utilizada nos *lasers*, e para as transmissões de dados entre computadores com Wi-Fi são utilizadas as ondas de radiofrequência. Como existem inúmeros serviços que podem utilizar sinais de radiofrequência, é necessário que cada um opere de acordo com as exigências estabelecidas pelo governo de cada país. Esta é uma maneira de evitar problemas, especialmente interferências.

No entanto, há alguns segmentos de frequência que podem ser usados sem necessidade de aprovação direta de entidades apropriadas de cada governo: são as denominadas faixas *Industrial, Scientific and Medical* (ISM), que podem operar com nos seguintes intervalos do espectro eletromagnético: 902 MHz – 928 MHz; 2.4 GHz – 2.485 GHz e 5.15 GHz – 5.825 GHz (dependendo do país, esses limites podem sofrer pequenas variações). São justamente estas duas últimas faixas que o padrão IEEE 802.11 utiliza, variando conforme

a versão do padrão. A Figura 2.1 descreve a organização da faixa de frequência 2.4GHz e juntamente com os possíveis canais de transmissão.

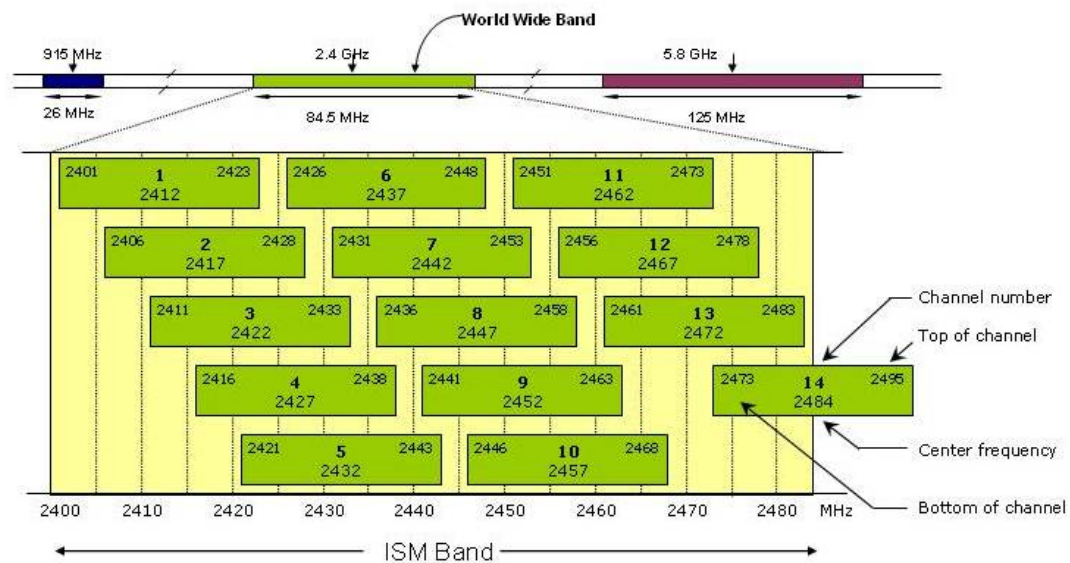


Figura 2.1: Canais da faixa de frequência 2.4GHz

A primeira versão, lançada em 1997, previa o uso da faixa de 2.4 GHz para transmissões com taxas de 1 ou 2 Mbps [IEEE 802.11, 2007]. Logo na sequência foi lançada em 1999 uma atualização que recebeu o nome IEEE 802.11b [1999]. Ainda trabalhando no mesmo intervalo de frequência de 2.4 GHz, conseguiu-se estabelecer conexões nas seguintes velocidades de transmissão: 1, 2, 5.5 e 11 Mbps. O padrão 802.11b foi o primeiro a ser adotado em larga escala, sendo, portanto, um dos responsáveis pela popularização das redes sem fio. Quase na mesma época, foi disponibilizado o padrão 802.11a que, utilizando uma nova técnica de transmissão, foi possível atingir até 8 taxas de transmissão e até 54 Mbps, porém operando na faixa de frequência de 5 GHz [IEEE 802.11a, 1999].

O padrão 802.11g foi disponibilizado em 2003 e é tido como o sucessor natural da versão 802.11b, uma vez que é totalmente compatível com este. Trabalha com taxas de transmissão de até 54 Mbps, assim como acontece com o padrão 802.11a, mas operando com frequência na faixa de 2.4 GHz. O padrão mais novo completamente publicado é o IEEE 802.11n [2009]. Ele é capaz de operar tanto nas faixas de frequência de 2.4 e 5 GHz, oferecendo até 77 taxas de transmissão e alcançando 600 Mbps de velocidade. Ainda em processo de especificação, existe o 802.11ac, que promete alcançar velocidades próximas de 7 Gbps na faixa de 5 GHz.

Independente da versão utilizada, é possível estruturar uma rede sem fio de duas formas. A primeira delas (mais utilizada) é a forma centralizada, também conhecida como rede infraestruturada. Ela é composta de um elemento central chamado de Ponto de Acesso (AP), responsável por controlar o acesso e a comunicação entre os outros elementos da rede. Quando um dispositivo necessita de trocar informações com outro dispositivo, primeiro os dados são enviados para o AP e este retransmite para o destinatário. Por questões de segurança e pela possibilidade de haver mais de um AP em determinado local (por exemplo, duas redes sem fio criadas por empresas diferentes em uma área de eventos), é importante que cada rede sem fio receba uma identificação denominada *Service Set Identifier* (SSID), um conjunto de caracteres que, após definido, é inserido no cabeçalho de cada pacote de dados da rede. Em outras palavras, o SSID nada mais é do que o nome dado à cada rede. Por sua vez, a segunda forma de redes sem fio é distribuída, sendo também conhecida como *ad-hoc*. Essa forma não possui um elemento central para coordenar as transmissões, e os componentes da rede trocam mensagens entre si sem depender de um AP. A Figura 2.2 ilustra essas arquiteturas de redes.

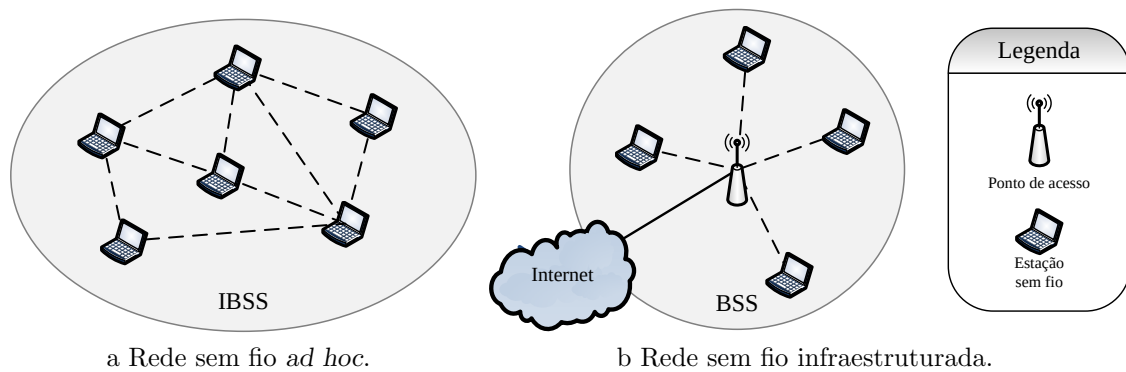


Figura 2.2: Diferentes tipos de redes sem fio IEEE 802.11 [Chaves, 2010].

Comparando ao modelo OSI de rede, o padrão IEEE 802.11 especifica a camada física, responsável pela implementação das técnicas para a transmissão de dados através de ondas de radio frequência, e uma subcamada logo acima, chamada de Controle de Acesso ao Meio (MAC), responsável pela coordenação do envio dos pacotes, evitando conflitos durante a transmissão. A Figura 2.3 ilustra estas camadas, que são detalhadas na sequência.

2.1.1 Subcamada MAC

Como todos os dispositivos sem fio compartilham um mesmo meio para a transmissão dos dados, deve haver uma forma organizada para o envio de quadros. Para este fim, os protocolos utilizados são o *Distributed Coordination Function* (DCF) em conjunto com o *Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance* (CSMA/CA). Antes de enviar um quadro pela rede, o emissor primeiro escuta o meio sem fio a fim de verificar se há alguma outra estação transmitindo informações naquele momento. Quando o meio estiver livre é aguardado duas unidades de tempo antes de realizar a transmissão. A primeira unidade de tempo aguardada é chamada de *Distributed Inter-Frame Space* (DIFS). Este é um valor estático definido pela padronização da rede.

Já a segunda unidade de tempo é uma medida regressiva variável chamada de *backoff*. O *backoff* é um valor aleatório escolhido dentro de uma janela de contenção (CW), janela esta que varia de tamanho de acordo com o número das tentativas de retransmissão de cada quadro. Se durante o tempo do *backoff* ocorrer do meio sem fio ficar ocupado por uma transmissão de outra estação, o contador regressivo do *backoff* é congelado momentaneamente, aguardando até que o meio fique livre novamente para continuar. Quando o contador de *backoff* zerar, significa que chegou a vez da estação transmissora utilizar o canal sem fio e enviar um quadro de dados. Terminado o envio, o emissor aguarda uma confirmação do receptor para ter certeza de que o quadro foi transmitido com sucesso. Esta confirmação é chamada de *Acknowledgement* (ACK). Para transmitir o ACK, o receptor realiza o mesmo procedimento para ganhar acesso ao meio, porém o intervalo de tempo aguardado é o *Short Inter-Frame Space* (SIFS), um intervalo menor a

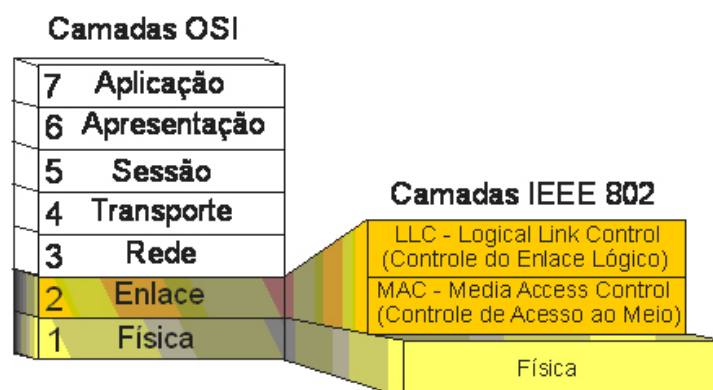


Figura 2.3: Arquitetura OSI e as camadas especificadas pelo IEEE 802.11.

fim de garantir uma certa prioridade aos quadros de confirmação sobre os demais. Se o emissor não receber um ACK depois de um determinado tempo, ele precisa retransmitir o quadro, só que dessa vez usando um *backoff* potencialmente maior, já que a janela de contenção será recalculada com o dobro do tamanho anterior. Se ultrapassar o limite de retransmissão, o pacote é dado como perdido.

A Figura 2.4, retirada de Chaves [2010], ilustra o funcionamento do protocolo CSMA/CA durante a transmissão de um quadro pela estação A em um ambiente onde existem transmissões concorrentes. Nessa figura é possível visualizar a interrupção na contagem regressiva do temporizador de *backoff*.

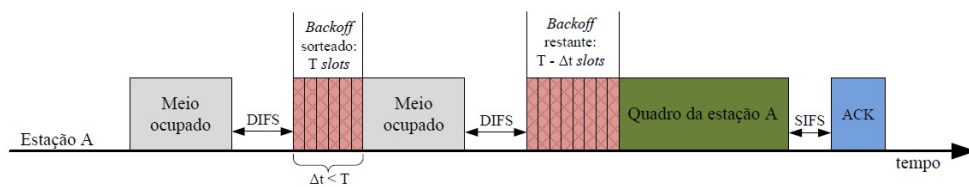


Figura 2.4: Modo de acesso de uma rede IEEE 802.11 utilizando o DCF [Chaves, 2010].

Um aspecto importante ao protocolo CSMA/CA é a desigualdade no tempo de acesso ao meio. Apesar do CSMA/CA garantir, a longo prazo, que todas as estações terão iguais chances de realizar transmissões, não há nenhum tipo de controle de quanto tempo o dispositivo pode reservar o canal para realizar as transmissões. Este é um aspecto importante no contexto da adaptação da taxa de transmissão, já que à medida que a taxa diminui, o tempo gasto para transmitir um quadro de mesmo tamanho aumenta. Heusse et al [2003] identificou esse efeito através de experimentos, e comprovou que quando ao menos um dispositivo com taxa baixa está transmitindo dados pela rede, então a vazão de dados nos dispositivos que estão usando taxas maiores é reduzida. Esse efeito é conhecido como anomalia de desempenho.

2.1.2 Camada física

Por sua vez, a camada física especifica quais tecnologias são utilizadas nas transmissões no meio sem fio. Quando ocorre uma transmissão de dados nestas redes sem fio, o elemento de rede recebe um sinal eletromagnético acompanhado de um ruído de fundo. Neste

contexto de transmissões sem fio, uma medida importante é a razão sinal-ruído (SNR). Um SNR alto significa que a intensidade do sinal é muito superior à do ruído, facilitando o destinatário a extrair o ruído de fundo e recuperar os dados recebidos no sinal [Kurose et al, 2005]. Quando as condições do ambiente não permitem uma transmissão com qualidade, como é o caso de transmissor e receptor distantes ou a presença de fontes de interferência, o SNR diminui, dificultando o processo de decodificação do sinal recebido e, possivelmente, levando à perda dos dados.

Outro problema relacionado à qualidade das transmissão sem fio é conhecido por problema do multicaminho, ou da propagação multivias. Isto se dá devido ao fato de porções da onda eletromagnética tomarem caminhos diferentes ao longo do trajeto, e assim, no momento em que o destinatário recebe os dados ocorre uma sobreposição do sinal. Estes fatores são os principais responsáveis pela necessidade da escolha apropriada da taxa de transmissão.

Em tese, conforme a taxa de transmissão diminui, a imunidade ao ruído aumenta, ou seja, os dados transmitidos se tornam mais robustos. Basicamente, a adaptação de taxa de transmissão consiste em reduzir a taxa de transmissão quando a qualidade do canal (medida em termos do SNR) se torna pior, e elevar a taxa quando a qualidade se torna melhor [Cardoso, 2012]. Entretanto, esta é apenas uma tendência geral, pois como mostrado em Lacage et al [2004], para algumas taxas (como a de 12 Mbps em redes .11a/g) essa relação direta não é verdadeira.

O processo de transmissão sem fio consiste de três etapas básicas na qual é escolhido um método de correção de erros, uma técnica de modulação digital e uma técnica de espalhamento espectral. O padrão IEEE 802.11 prevê que todo dispositivos deve suportar múltiplas taxas de transmissão, e cada taxa é conseguida pela diferente combinação dessas três etapas. Como exemplo, o 802.11b deve prover quatro taxas de transmissão (1, 2, 5.5, e 11 Mbps), enquanto o 802.11a/g deve lidar com mais oito taxas (6, 9, 12, 18, 24, 36, 48, e 54Mbps). A tabela 2.1 resume as possíveis taxas de transmissões para os padrões anteriores ao 802.11n.

A Figura 2.5 exemplifica o processo de transmissão. Uma determinada sequência de dados a ser transmitido chega até a interface de rede (A). Devido ao fato de a trans-

Tabela 2.1: Técnicas de espalhamento espectral, modulação digital e taxa de codificação.

<i>Bit-rate</i> (Mbps)	Padrão	Espalhamento Espectral	Modulação Digital	Bits por símbolo	Taxa de codificação	Símbolos por segundo
1	b	DSSS-BK	BPSK	1	1/11	11×10^6
2	b	DSSS-BK	QPSK	2	1/11	11×10^6
5.5	b	DSSS-CCK	QPSK	1	4/8	11×10^6
11	b	DSSS-CCK	QPSK	2	4/8	11×10^6
6	a/g	OFDM	BPSK	1	1/2	12×10^6
9	a/g	OFDM	BPSK	1	3/4	12×10^6
12	a/g	OFDM	QPSK	2	1/2	12×10^6
18	a/g	OFDM	QPSK	2	3/4	12×10^6
24	a/g	OFDM	QAM-16	4	1/2	12×10^6
36	a/g	OFDM	QAM-16	4	3/4	12×10^6
48	a/g	OFDM	QAM-64	6	2/3	12×10^6
54	a/g	OFDM	QAM-64	6	3/4	12×10^6

missão estar sujeita a interferências, as redes sem fios utilizam mecanismos de codificação para correção de erros. Durante a codificação os dados são modificados e acrescidos de informações extras, que caracterizam um *overhead*. Estas informações extras podem ser utilizadas pelo receptor para correção de pequenos erros por conta de um baixo SNR. Este processo de codificação (B) é regido por uma relação entre a quantidade original de dados e os dados já codificados, expresso por uma taxa de codificação igual a k/n , sendo que cada k *bits* de dados reais serão codificados em n *bits* transmitidos. Depois ocorre o processo de modulação digital, que é quando os *bits* já codificados são transformados em símbolos (C), agrupando h *bits* em um único símbolo, onde h varia de acordo com a técnica de modulação digital. Ao final, cada símbolo é transmitido no meio físico por uma técnica de espalhamento espectral que irá difundir os sinais eletromagnéticos de maneira apropriada para carregar a informação desejada. Cada técnica de espalhamento possui uma taxa t que é a velocidade de transmissão medida em símbolos por segundo. É possível combinar estas três variáveis para atingir diferentes taxas de transmissão, sendo a velocidade nominal da taxa definida por $k/n \times h \times t$ *bits* por segundo (bps) [Halperin et al, 2010].

Antes do padrão 802.11n existiam apenas 12 taxas de transmissão, sendo a maior delas de 54 Mbps nas redes 802.11a/g. Com o aprimoramento e a especificação do padrão 802.11n foi possível alcançar um máximo teórico de 600 Mbps com melhorias tanto na



Figura 2.5: Etapas para a transmissão de dados na camada física.

camada física quanto na camada MAC, resultando em 77 MCSs, com combinações diferentes de modulação e codificação. As principais características deste novo padrão, e os fatores que influenciam diretamente na questão da adaptação da taxa de transmissão são discutidos na sequência.

2.2 O padrão IEEE 802.11n

O desenvolvimento da especificação IEEE 802.11n iniciou em 2004 e foi finalizado em setembro de 2009. Este padrão pode trabalhar tanto na faixa de 2.4 GHz, como na faixa de 5 GHz, o que o torna compatível com os padrões anteriores. Em relação à taxa de transmissão, é capaz de atingir taxas teóricas de até 600 Mbps, graças a um conjunto de melhorias que são detalhadas na sequência.

2.2.1 Principais modificações

As transmissões nessas redes sem fio ocorrem em forma de fluxos de dados, chamados de *Spatial Stream*. O transmissor cria um fluxo de dados com o receptor para que este esteja apto a receber os sinais eletromagnéticos e realizar o processo de decodificação das informações. Nos antigos padrões 802.11a/b/g, o número de *Spatial Stream* (N_{ss}) era fixo em 1. Dessa forma, em uma transmissão os dois dispositivos trocam informações com apenas um fluxo de dados, por um método conhecido como *Single-Input Single-Output* (SISO). O padrão 802.11n avançou de forma que permitisse realizar transmissões em até 4 *Spatial Streams* em paralelos, quadruplicando a capacidade da rede.

Para conseguir obter um N_{ss} maior do que 1, uma única antena não é suficiente. Por isto, uma das características do padrão 802.11n mais notável é a adoção de uma tecnologia conhecida como *Multiple-Input Multiple-Output* (MIMO), permitindo o uso múltiplas antenas no transmissor e no receptor para transmissão e recepção de dados,

viabilizando a criação de mais de um fluxo paralelo de dados entre as duas estações.

O número de antenas está intimamente ligado ao N_{ss} : o número máximo de fluxos possíveis em uma transmissão é o menor número de antenas de um dos dois dispositivos. Por exemplo, se tivermos um AP com 2 antenas e um receptor com 1 antena conseguiremos manter apenas $N_{ss} = 1$, também conhecido por *Single Stream* (SS). Ao contrário, quando temos um receptor com 3 antenas e o AP com 2, por exemplo, podemos manter o $N_{ss} = 2$, chamado também de *Dual Stream* (DS).

Existem duas técnicas para se transmitir com múltiplas antenas: a primeira delas é chamada de *Spatial Diversity* (SD), uma técnica que aumenta a confiabilidade e o alcance da transmissão utilizando duas ou mais antenas para transmitir um mesmo fluxo de dados. Este é o caso exemplificado acima para um AP com duas antenas e um cliente com uma única antena. Neste caso, o AP envia o mesmo fluxo de dados pelas duas antenas, aumentando o SNR percebido pelo cliente no momento da recepção. Note que esta abordagem não aumenta diretamente a vazão de dados na rede, mas melhora a qualidade das transmissões, resultando em menos perdas. A segunda técnica de transmissão é chamada de *Spatial Multiplexing* (SM). O objetivo desta técnica é aumentar o desempenho da rede realizando a transmissão em paralelo de dois ou mais fluxos de dados por antenas independentes [Pefkianakis et al, 2010; Halperin et al, 2010; Ortiz, 2009; Makhoul et al, 2011]. A Figura 2.6 ilustra a transmissão de dados usando SM em DS. Sendo assim, apesar de existir duas ou mais antenas em ambos dispositivos (caracterizando o MIMO), podemos escolher se iremos transmitir usando SD para aumentar a confiabilidade, ou usando SM para aumentar o *throughput*.

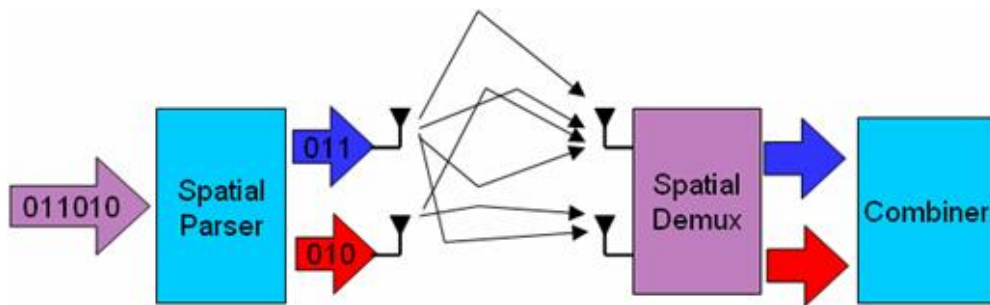


Figura 2.6: Sistema MIMO utilizando multiplexação espacial com dois fluxos.

Outra característica das redes 802.11n é o uso da tecnologia *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM) para a transmissão de dados. O OFDM, que também era

utilizado nas redes .11a/g, particiona a largura de banda do canal em subportadoras, onde múltiplos sinais são enviados em diferentes frequências ortogonais [Ortiz, 2009]. Os padrões .11a/g utilizavam um único canal de 20 MHz dividido entre as subportadoras. Entretanto, com a nova técnica chamada de *Channel Bonding*, o padrão .11n pode, somente na faixa de frequência de 5 GHz, combinar dois canais adjacentes em um único canal de 40 MHz, duplicando a largura de banda disponível e dobrando a capacidade de transmissão teórica máxima [Pefkianakis et al, 2010]. A Figura 2.7 ilustra a composição de dois canais de 20 MHz cada para formar um canal com o dobro da largura.

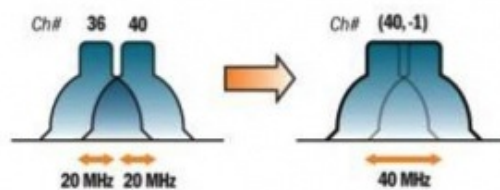


Figura 2.7: Técnica de *Channel Bonding* usada nas redes 802.11n.

Entre duas transmissões de símbolos OFDM é preciso aguardar um pequeno intervalo de tempo chamado de *Guard Interval* (GI). Este o período de tempo adicionado entre o envio de dois símbolos é necessário para minimizar a interferência inter-simbólica (ISI), que dificulta a decodificação dos dados no receptor. Nos padrões anteriores o GI utilizado era de 800 ns, mas com o novo padrão é possível utilizar tanto o GI de 800 ns, como diminuir a espera para 400 ns, se a qualidade do sinal assim permitir, aumentando o tempo disponível para transmissão de dados.

Outra mudança significativa introduzida na camada MAC foi a agregação de quadros. O objetivo é aumentar o *throughput* através do envio de dois ou mais quadros de dados em uma única transmissão. Durante a transmissão de um quadro existe uma quantidade significativa de *overhead*, incluindo os cabeçalhos dos quadros, os contadores do protocolo CSMA/CA, etc. Quando o tamanho do quadro é muito pequeno, esse *overhead* consome mais banda do que os dados propriamente ditos. Neste caso, a solução proposta no 802.11n é agregar os quadros MAC endereçados para um mesmo destino em unidades chamadas de *Aggregated MAC Protocol Data Units* (AMPDU), diminuindo a proporção do *overhead* em relação aos dados, e aumentando a vazão real de dados na rede [Friedrich et al, 2011; Ortiz, 2009; Makhoul et al, 2011].

2.2.2 Taxas de transmissão

Em relação às taxas de transmissão suportadas pelas redes 802.11n, a técnica de espelhamento espectral utilizada nas redes IEEE 802.11n é a OFDM, suportando as modulações digitais BPSK, QPSK, QAM-16 e QAM-64. Com essas modulações são utilizadas as taxas de codificações de 1/2 e 3/4 para BPSK e QPSK e QAM-16. Com o QAM-64 é possível realizar codificação de 2/3 e 3/4, e também de 5/6 com o método de correção de erro *Forward Error Correction* (FEC), introduzindo um *overhead* de apenas 20% [Xia et al, 2009].

Com as modulações e codificações apresentadas acima é possível formar 8 combinações distintas. Além destes fatores, ainda é possível variar o N_{ss} entre 1 e 4 (4 é o número máximo de antenas suportado pelo MIMO utilizado no 802.11n), obtendo um total de 32 combinações diferentes. Devido a esse aumento no número de combinações, o IEEE definiu uma tabela com índices para cada taxa de transmissão, chamado de *Modulation and Coding Scheme* (MCS) [Xia et al, 2009]. A primeira parte da tabela apresenta 4 grupos de 8 índices cada, onde cada grupo representa um número de *Spatial Streams*, que estão relacionados na Tabela 2.2. Além destes 32 MCSs, o padrão também permite combinar diferentes modulações e codificações para cada fluxo de dados (somente nos casos de $N_{ss} > 1$), chegando à um total de 77 MCSs. A tabela completa pode ser consultada em MCS Index [2013]. Apesar da grande quantidade de taxas, os equipamentos implementam na prática apenas os primeiros MCSs (Tabela 2.2), restritos à quantidade antenas. É importante observar que para cada MCS existem quatro valores teóricos de *data rate*. Estes quatro valores são decorrentes da combinação dos dois valores de GI (800 ou 400 ns), e das duas larguras de canal (20 ou 40 MHz) [Nguyen et al, 2011]. Agora, com até quatro antenas independentes e os outros parâmetros apresentados, as taxas variam desde 6.5 Mbps até 600 Mbps [Makhlouf et al, 2011].

Uma outra melhoria prevista pelo padrão 802.11n é o *Fast MCS Adaptation*. Ela define um campo reservado no cabeçalho MAC para carregar informações referentes a qualidade do canal que possam vir a ajudar os algoritmos de adaptação de taxa de transmissão. Apesar de ser uma funcionalidade promissora, a maioria dos dispositivos e *drives* não implementaram os algoritmos necessários para seu real funcionamento, seja

Tabela 2.2: Relação dos MCSs mandatórios nas redes IEEE 802.11n.

MCS	N_{ss}	Modulação	Codificação	Taxa de dados (Mbps)			
				20 MHz		40 MHz	
				800 ns	400 ns	800 ns	400 ns
0	1	BPSK	1/2	6.5	7.2	13.5	15.0
1	1	QPSK	1/2	13.0	14.4	27.0	30.0
2	1	QPSK	3/4	19.5	21.7	40.5	45.0
3	1	16-QAM	1/2	26.0	28.9	54.0	60.0
4	1	16-QAM	3/4	39.0	43.3	81.0	90.0
5	1	64-QAM	2/3	52.0	57.8	108.0	120.0
6	1	64-QAM	3/4	58.0	65.0	121.5	135.0
7	1	64-QAM	5/6	65.0	72.2	135.0	150.0
8	2	BPSK	1/2	13.0	14.4	27.0	30.0
9	2	QPSK	1/2	26.0	28.9	54.0	60.0
10	2	QPSK	3/4	39.0	43.3	81.0	90.0
11	2	16-QAM	1/2	52.0	57.8	108.0	120.0
12	2	16-QAM	3/4	78.0	86.7	162.0	180.0
13	2	64-QAM	2/3	104.0	115.6	216.0	240.0
14	2	64-QAM	3/4	117.0	130.0	243.0	270.0
15	2	64-QAM	5/6	130.0	144.4	270.0	300.0
16	3	BPSK	1/2	19.5	21.7	40.5	45.0
17	3	QPSK	1/2	39.0	43.3	81.0	90.0
18	3	QPSK	3/4	58.5	65.0	121.5	135.0
19	3	16-QAM	1/2	78.0	86.7	162.0	180.0
20	3	16-QAM	3/4	117.0	130.0	243.0	270.0
21	3	64-QAM	2/3	156.0	173.3	324.0	360.0
22	3	64-QAM	3/4	175.5	195.0	364.5	405.0
23	3	64-QAM	5/6	195.0	216.7	405.0	450.0
24	4	BPSK	1/2	26.0	28.8	54.0	60.0
25	4	QPSK	1/2	52.0	57.6	108.0	120.0
26	4	QPSK	3/4	78.0	86.8	162.0	180.0
27	4	16-QAM	1/2	104.0	115.6	216.0	240.0
28	4	16-QAM	3/4	156.0	173.2	324.0	360.0
29	4	64-QAM	2/3	208.0	231.2	432.0	480.0
30	4	64-QAM	3/4	234.0	260.0	486.0	540.0
31	4	64-QAM	5/6	260.0	288.8	540.0	600.0

pela dificuldade em estimar com precisão a qualidade do sinal mas também com o objetivo de garantir a interoperabilidade entre dispositivos, utilizando este campo de maneira mais conveniente [Pefkianakis et al, 2012a].

Considerando que a maior taxa alcançada pelo padrão 802.11a/g é de 54 Mbps e a maior taxa no 802.11n é de 600 Mbps, é possível fazer uma quantificação das melhorias: ocorreu um aumento potencial de aproximadamente 11 vezes. O fator 4 desta quantificação provem da utilização de quatro antenas simultâneas para transmissão de quatro fluxos independentes. Um fator de 2 é devido a utilização de um canal de 40MHz ao invés de 20 MHz. A melhoria restante de 5 vezes é com relação a melhorias nas técnicas de transmissão de dados [Halperin et al, 2010] como, por exemplo, a diminuição do tempo de GI [Makhlouf et al, 2011] e a utilização de um esquema de correção de erros mais eficiente.

2.3 Redes cognitivas

Aplicações avançadas, redes sofisticadas e complexas, e a grande demanda por mobilidade, motiva o uso de tecnologias de redes com um alto desempenho. Entretanto, hoje a gerência dessas redes é uma função trabalhosa, suscetível a erro e dependente da intervenção humana. Um exemplo é o padrão IEEE 802.11n, que se tornou mais robusto e eficiente do que seus antecessores, além de oferecer um número maior de taxas de transmissões. Essas funcionalidades, apesar de positivas, dificultam a gerência dessas redes, tornando mais difícil a tarefa dos algoritmos de escolha da taxa de transmissão. Para lidar com estes e outros desafios de gerência uma nova abordagem foi proposta na qual utiliza-se princípios cognitivos para realizar ajustes dinâmicos na rede.

O conceito de Redes Cognitivas surgiu a partir da observação da natureza. Os seres vivos observam o ambiente em que se encontram, adquirem conhecimentos e então tomam decisões baseadas nestas informações coletas. No contexto de redes, o termo redes cognitivas consiste em redes equipadas com elementos capazes de observar e coletar informações sobre as condições do ambiente, e então utilizar este conhecimento obtido para planejar e tomar ações na qual aperfeiçoam o seu desempenho. Desta forma elas tornam-se redes capazes de auto gerenciar, adaptando-se às eventuais modificações no ambiente inserido. Estes elementos de redes que possuem alguma capacidade de raciocínio,

capacidade de aprendizado e de tomar decisões com intuito de alcançar um objetivo, são definidos como entidades cognitivas [Thomas et al, 2006].

O processo de planejamento e de tomada de decisão segue um ciclo de otimização com o objetivo de modelar o conhecimento aprendido e descrever como interações passadas podem direcionar as atitudes futuras. Este ciclo de otimização, representado pela Figura 2.8, é conhecido por OODA - Observação, Orientação, Decisão e Ação. Durante a etapa de observação, a entidade monitora o ambiente coletando informações e realizando alguns eventuais pré-processamento necessários. Com estas informações inseridas em uma base de conhecimento, a etapa de orientação realiza uma interpretação destes dados, preparando-os para a etapa de decisão, onde é feita a avaliação das alternativas existentes, escolhendo a melhor opção seguindo a métrica de interesse. Por fim, a etapa de ação é responsável por aplicar as modificações necessárias [Boyd, 1995].

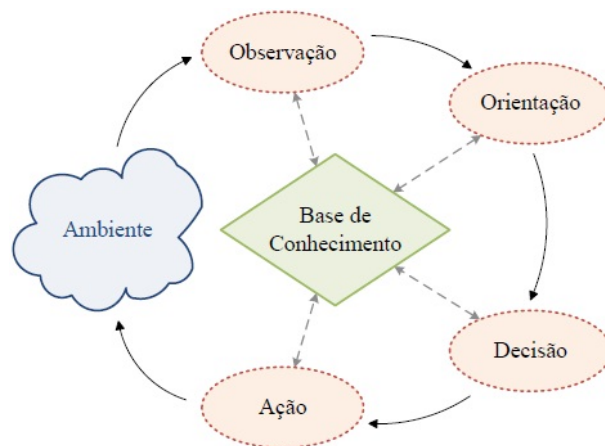


Figura 2.8: O ciclo de otimização OODA [Boyd, 1995].

2.3.1 O arcabouço cognitivo CogProt

Baseado nas redes cognitivas, o CogProt foi desenvolvido como um arcabouço cognitivo para configuração e otimização de protocolos de comunicação [Kliazovich et al, 2009]. Seu objetivo é proporcionar às redes a funcionalidades de autoconfigurar e auto-otimizar seus parâmetros da pilha de protocolos de rede. Para cada parâmetro de interesse o CogProt cria um ciclo de otimização como ilustrado na Figura 2.9, responsável por monitorar o desempenho e executar as ações de reconfigurações, permitindo o parâmetro escolhido convergir para o melhor valor.

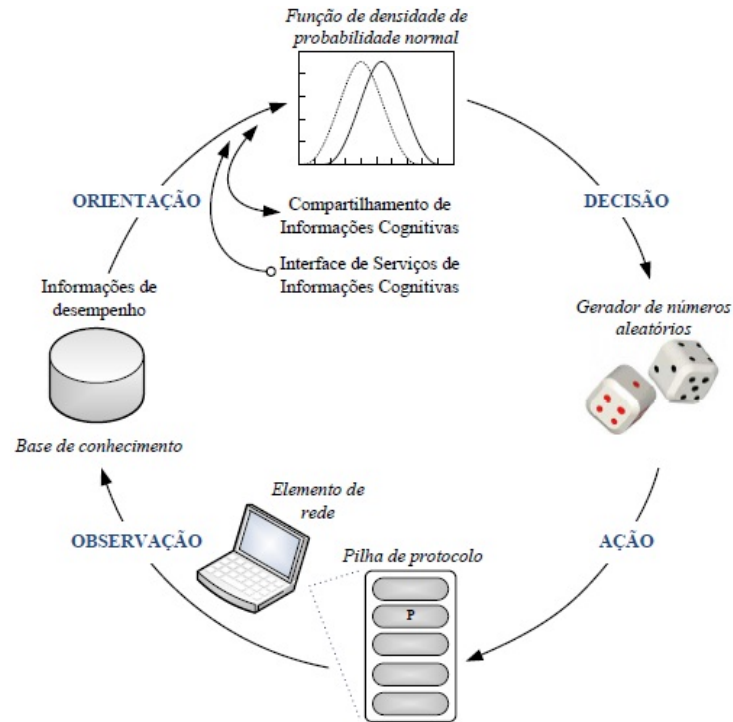


Figura 2.9: O ciclo de otimização OODA do CogProt [Chaves, 2010].

Este ciclo é baseado no ciclo OODA, e é percorrido a cada intervalo I . Durante a etapa de observação são coletadas as informações de desempenho utilizando o valor atual do parâmetro P . Elas são armazenadas em uma base de conhecimento onde conterà informações para cada um dos possíveis valores dos parâmetros P . Na próxima etapa, orientação, é identificado na base de conhecimento o melhor valor para P , e o mesmo é definido como sendo a média para um gerador de números aleatórios que segue uma função de densidade de probabilidade normal (gaussiana). Na etapa de decisão será gerado um novo valor aleatório com base na atual configuração da curva centrada sobre o valor de média com o melhor desempenho, e esse novo valor aleatório vai ser aplicado ao parâmetro P na etapa de ação, começando um novo ciclo.

A proposta de colocar o melhor valor do parâmetro como a média da curva, permite o resultado convergir para o valor ótimo conhecido, sem perder a possibilidade de que qualquer outro valor seja testado, tornando-o assim flexível para identificar qualquer mudança no ambiente. O CogProt foi validado em três estudos de caso: no ajuste de parâmetro da subcamada de acesso MAC; no ajuste do mecanismo de controle do congestionamento do TCP e na adaptação da taxa de transmissão na camada MAC, que é a base deste trabalho.

2.4 OpenWRT

Para validar o CogProt no processo de adaptação da taxa de transmissão nas redes 802.11, o mecanismo foi implementado e avaliado em experimentos reais, envolvendo uso de APs residenciais e notebooks como clientes. Em comparação aos computadores atuais, os APs residenciais (que também atuam como roteadores) possuem recursos computacionais muito limitados como pouca memória e baixo poder de processamento. Devido a essas limitações, há a necessidade da implementação de *softwares* mais específicos que possam aproveitar de maneira eficiente os baixos recursos de *hardware* disponíveis. Essas soluções são conhecidas como *firmware*: programas de propósitos bem definidos com uma relação muito estreita com os componentes da máquina, de modo que sua operação influencia diretamente no desempenho do dispositivo.

Na grande maioria dos casos, os fabricantes de dispositivos lançam seus produtos com *firmwares* proprietários, e os usuários e desenvolvedores possuem pouca ou nenhuma flexibilidade para modificá-lo. Visando esta maior abertura surgiram os *firmwares* desenvolvidos de forma livres, onde o usuário pode modificar o código e assim explorar todos os recursos do *hardware*, como por exemplo, transformar uma interface USB em um servidor de impressão.

Para as implementações e teste do CogProt no processo de adaptação da taxa de transmissão foi utilizado o OpenWrt. Este *firmware* é um projeto de código livre e aberto baseado no GNU/Linux e voltado para dispositivos embarcados, principalmente roteadores. Foi iniciado com a motivação de substituir o *firmware* proprietário da fabricante LinkSys da série de roteadores sem fio WRT. Devido ao sucesso, logo foram aparecendo novas versões, e hoje conta com suporte aos equipamentos dos principais fabricantes como 3Com, Asus, D-Link e Motorola. O desenvolvimento e a manutenção do projeto são feita pela comunidade e concentrados no site do projeto OpenWrt [2013], onde é possível encontrar uma vasta documentação. O site também conta com um fórum que a comunidade utiliza para discussão do projeto. Devido a maturidade adquirida com a colaboração de diversos usuários, o sistema é considerado um ótimo *firmware* em detrimento ao seu desempenho, estabilidade, robustez e extensibilidade.

Assim como as distribuições Linux, o OpenWrt utiliza uma estrutura de paco-

tes controlada pelo *software* OPKG, um programa gerenciador que permitindo instalar, configurar e remover os pacotes do sistema. O OpenWrt conta com um repositório com mais de 2000 pacotes que em geral são os mesmos encontrados nas distribuições GNU/Linux. Muitos deles são aplicativos relacionados com desenvolvimento e aplicações para redes, como o **nmap**, **socat** e **iftop**; porém com certos ajustes para atender a limitada capacidade de armazenamento e de memória da maioria dos roteadores.

Outra semelhança com a plataforma Unix é sua estrutura de diretórios. Como exemplo o diretório **/tmp** é montado sobre a memória RAM, e possui os arquivos voláteis ao sistema, ou seja, os dados serão apagados no momento que o dispositivo desligar. Já o diretório **/etc** armazena todos os arquivos usuais de configurações.

O OpenWrt permite criar soluções bem versáteis, deixando de ser o *software* o grande limitador de recursos. Suas possibilidades variam por configuração de VLANs, redirecionamento de portas, tunelamento IP e implementação de Qualidade de Serviço (QoS) para aplicações como VoIP, jogos e fluxo de dados. Além disso, dispositivos que possuem suporte a USB permitem instalação de um modem 3G, servidor de impressão e até mesmo um servidor de compartilhamento de arquivo. Toda configuração de rede pode ser feita a partir de uma interface gráfica chamada LuCI, e em específico para redes 802.11 é possível a escolha do SSID, tipo de criptografia, potência do sinal, canal e também o modo de operação, seja ela AP, AD-HOC ou *Mesh*.

Diferentemente da imobilidade dos *firmwares* originais de fábrica, o OpenWrt é extremamente ajustável e expansível. O desenvolvimento é mantido em um repositório SVN e atualmente encontra-se na versão Backfire 10.03.1. O *kernel* Linux possui um tamanho variável em função da arquitetura e dos módulos embutidos e, para instalá-lo, pode-se obter os códigos já compilados para uma determinada arquitetura ou baixa-los e compilá-los de maneira personalizada.

3 Adaptação da Taxa de Transmissão

Devido às instabilidades do meio sem fio, o padrão IEEE 802.11 define que as estações devem possuir a capacidade de transmitir dados com diversas taxas. Entretanto, o padrão não possui um algoritmo próprio de adaptação de taxa, deixando essa complexa tarefa a cargo do fabricante do dispositivo.

O processo de escolha da melhor taxa de transmissão pode ser genericamente reduzido em dois grandes passos descritos a seguir. Primeiramente são avaliadas as condições da qualidade do enlace sem fio. Somente depois, na segunda etapa, é selecionada a taxa mais apropriada para uso, com base nas informações coletadas anteriormente. O método usado para conseguir os dados usados para avaliar a qualidade do enlace pode ser feito em uma abordagem conhecida como *Closed-Loop*, onde o receptor retorna métricas para o transmissor de forma que o ajude na escolha da taxa [Makhlouf et al, 2011]; ou pela abordagem chamada de *Open-Loop*, na qual o transmissor infere a qualidade do canal baseado em métricas calculadas a partir da troca normal de pacotes. Com base nestas informações, o transmissor é capaz de selecionar a taxa mais adequada para uso pelo próximo instante.

Até então (com os padrões .11a, .11b e .11g), só era possível realizar transmissões em redes sem fio por uma única antena, no esquema conhecido por SISO. Muitos algoritmos para a adaptação da taxa de transmissão foram propostos nesta categoria, sendo considerada uma área bastante explorada sem muitas possibilidades de melhorias nas soluções existentes. Conforme novos recursos foram surgindo com a evolução do padrão, novos algoritmos foram aparecendo na literatura. Por exemplo, com o surgimento do padrão 802.11n, foi possível a utilização de múltiplas antenas, tanto do lado do transmissor quanto do lado do receptor, característica chamada de MIMO. O MIMO introduz novas variáveis no problema da adaptação da taxa: além de escolher qual combinação de modulação e codificação utilizar, é preciso também definir o valor para o N_{ss} .

Este capítulo contém uma revisão bibliográfica detalhada do assunto abordado. Primeiramente, na Seção 3.1, serão apresentados os algoritmos de adaptação da taxa de

transmissão em dispositivos de uma única antena (SISO), utilizados pelos padrões .11a, .11b e .11g. Em seguida, na Seção 3.2, serão abordadas as soluções existentes para sistemas que suportam múltiplas antenas na escolha da taxa de transmissão.

3.1 Adaptação de taxa para SISO WLANs

Para redes WLANs SISO, um dos primeiros algoritmos desenvolvido foi o *Auto Rate Fallback* (ARF), proposto por Kamerman et al [1997]. Neste algoritmo, o transmissor inicialmente envia os dados com uma taxa de transmissão baixa durante um tempo pré-estabelecido. Caso este tempo esgote ou caso dez transmissões consecutivas sejam confirmadas com sucesso, a taxa imediatamente superior é escolhida para as próximas transmissões e o contador de tempo é reiniciado.

Entretanto, caso duas tentativas de transmissão consecutivas não obtenham sucesso, ou caso a primeira tentativa de transmissão logo após o aumento da taxa falhar, a taxa é reduzida e o processo é reiniciado. Devido a sua simplicidade, este algoritmo foi utilizado como primeira solução prática para o problema em questão. Entretanto, o algoritmo não alcança os melhores resultados ao longo do tempo. Dada certa condição do ambiente, o algoritmo sempre irá tentar realizar transmissões com a taxa mais alta, mesmo em casos que houveram inúmeras tentativas fracassadas. Além disso, em casos que o ambiente é muito instável, o ARF não consegue uma adaptação rápida, pois sua escolha das taxas é feita gradativamente [Chaves, 2010; Xia et al, 2009].

Para solucionar este problema, Lacage et al [2004] propôs utilizar uma abordagem de ajuste exponencial nos parâmetros de limites do ARF denominada *Adaptive ARF* (AARF). Quando ocorre uma falha de transmissão logo após um incremento da taxa, o AARF retorna para a taxa anterior e dobra o tamanho do limitante de incremento da taxa de transmissão, assim retardando a próxima tentativa de aumento da taxa.

Outro algoritmo muito conhecido para redes SISO é o Minstrel [Smithies, 2005]. Seu objetivo é maximizar a vazão de dados mantendo a taxa com melhor desempenho em uso. Para isso ele utiliza um recurso do *hardware* conhecido como *Multi-Rate Retry* (MRR). O MRR é uma tabela com até 4 posições usada pelo dispositivo para saber com qual taxa será transmitido o quadro atual. O dispositivo tenta transmitir de acordo com

a ordem que as taxas estão na tabela. Primeiramente é transmitido com a taxa r_0 . Caso a transmissão seja realizada com sucesso, o *hardware* continuará adiante com uma nova transmissão de quadro. Entretanto, caso a(s) tentativa(s) com a taxa r_0 falhe(m), as próximas tentativas serão realizadas com as taxas indicadas na sequência da tabela (r_1 , r_2 , e r_3), até que esgote as quatro possibilidades ou que a transmissão seja confirmada com sucesso. Cada taxa r_i pode ser utilizada mais de uma vez, antes de ir para a próxima taxa r_{i+1} . A quantidade de tentativas depende da política escolhida pelo algoritmo. O Minstrel, por exemplo, configura essas quantidades de maneira que o tempo total em cada taxa r_i não seja superior à 26 ms. Por padrão, o último índice da MRR é configurado com a taxa de transmissão mais baixa possível, para desta forma aumentar a probabilidade de entrega do pacote.

O Minstrel popula esta tabela com base no *throughput* e na probabilidade de entrega com sucesso de cada taxa. Estas métricas são recalculadas a cada 100 ms, e o Minstrel utiliza 10% dos pacotes para randomicamente testar as taxas para coletar dados. Sendo assim, os pacotes podem ser transmitidos durante uma fase normal (90% do tempo) ou uma fase de busca (10% do tempo). A Tabela 3.1 detalha a tabela MRR do Minstrel.

Tabela 3.1: Tabela MRR do Minstrel.

Taxa	Normal	Busca	
		Aleatória < Melhor vazão	Aleatória > Melhor vazão
r_0	Melhor vazão	Melhor vazão	Aleatória
r_1	2ª melhor vazão	Aleatória	Melhor vazão
r_2	Melhor entrega	Melhor entrega	Melhor entrega
r_3	Menor taxa	Menor taxa	Menor taxa

Durante a fase de transmissão normal, o Minstrel popula a tabela com a taxa de melhor vazão, a taxa com a segunda melhor vazão, a taxa com maior probabilidade de entrega, e a menor taxa disponível (taxa mais robusta). Durante a fase de busca é sorteada uma taxa aleatória para teste. Se a taxa selecionada aleatoriamente é menor que a taxa atual com melhor vazão, então a taxa aleatória é definida como a segunda da tabela. Caso contrário, é escolhida como a primeira. Portanto, taxas aleatórias com velocidade menores somente serão utilizadas pelo transmissor quando a tentativa de envio

com a primeira taxa da tabela falhar. Sendo assim, se a condição do enlace for ideal, todos os pacotes serão enviados com a taxa de maior vazão.

3.1.1 CORA: COgnitive Rate Adaptation

Dentre as diversas soluções de adaptação de taxa para redes SISO, esta seção apresenta uma de especial interesse para este trabalho. O algoritmo *COgnitive Rate Adaptation* (CORA) foi construído sobre o *framework* CogProt com intuito de otimizar o desempenho da camada de enlace através do ajuste automático da taxa de transmissão [Chaves et al, 2009; Chaves, 2010]. Ele utiliza como parâmetro de interesse a taxa de transmissão (T), que é reconfigurada com base em experiências passadas, na direção de maximizar da métrica de desempenho de vazão de dados (V). Para cada taxa de transmissão existente é associado, de maneira ordenada, um número i , onde $min \leq i \leq max$, com $i \in \mathbb{N}$. As taxas T_{min} e T_{max} são aquelas com menor e maior vazão teórica de dados, respectivamente. Além disso, os valores de vazão para cada taxa $T_i \in [T_{min}, T_{max}]$ já conhecidos estão armazenados na base de conhecimento local ($\mathcal{BC}$). De posse destas informações, cada etapa do ciclo de otimização do CogProt é executada como segue:

Observação: Seja T_a a taxa de transmissão atualmente utilizada. Nesta etapa, o algoritmo monitora o comportamento do sistema medindo a vazão de dados na camada de enlace V_a obtida com o uso da taxa T_a durante o último ciclo. Com esta informação, os dados na base de conhecimento são atualizados utilizando uma média móvel exponencialmente ponderada (EWMA), como segue:

$$\mathcal{BC}_a = (1 - \alpha) * \mathcal{BC}_a + (\alpha) * V_a \quad (3.1)$$

onde $\mathcal{BC}_a$ é a informação de vazão já existente na base de conhecimento para a taxa T_a e α é o peso atribuído à informação recentemente mensurada V_a . Em outras palavras, a vazão obtida para a taxa atual é utilizada para calcular um novo valor médio de vazão desta taxa, fazendo com que a base de conhecimento reflita o histórico de desempenho para todas as taxas disponíveis.

Orientação: Durante esta etapa, o mecanismo identifica qual a melhor taxa de trans-

missão conhecida até o momento. Para isso, ele procura na base de conhecimento pela taxa T_i que possui a maior vazão V_i . O índice i é então definido como sendo a média μ de uma distribuição normal $\mathcal{N}(\mu, \sigma^2)$, que será utilizada a seguir.

Decisão: Nesta etapa, o algoritmo vai selecionar qual taxa de transmissão T_n que efetivamente será utilizada pela interface de rede até a próxima iteração deste ciclo. Esta escolha é feita realizando-se um sorteio de $r \in [\min, \max]$, com $r \in \mathbb{R}$, de acordo com a distribuição normal já configurada na etapa anterior. Posteriormente, r é aproximado para o natural n mais próximo (fazendo $n = \lfloor r + 0.5 \rfloor$).

Ação: Para finalizar, a interface de rede tem sua taxa de transmissão alterada para T_n , completando a execução do ciclo de otimização.

Este ciclo é realizado para cada estação da rede a cada intervalo de tempo de 100 ms. O uso da distribuição normal no processo de escolha aleatória da taxa T_n é fundamental para o funcionamento do algoritmo. Sendo a média μ da distribuição o melhor valor conhecido para n , há uma maior probabilidade de que este seja, efetivamente, o valor aleatório sorteado. Entretanto, o algoritmo eventualmente escolherá valores diferentes, permitindo o ajuste da taxa de transmissão frente às mudanças na qualidade do canal.

É importante esclarecer que o mecanismo CORA é executado pelos elementos da rede de maneira independente, onde cada um possui sua própria base de conhecimento. Estas propriedades caracterizam um sistema completamente descentralizado, sem a necessidade de um elemento coordenador. Além disso, é possível que elementos equipados com o CORA operem em uma rede com elementos que executam outro (ou nenhum) algoritmo para adaptação da taxa. Isto é possível porque o CORA não demanda de troca de informações entre estes elementos, nem necessita de alterações na especificação do padrão IEEE 802.11.

O CORA foi implementado em simuladores e também no *firmware* OpenWRT. As simulações geraram resultados positivos [Chaves et al, 2009; Chaves, 2010]; porém, os experimentos em ambientes reais apontaram diversas limitações do algoritmo [Chaves et al, 2013]. Dentre elas, destaca-se o uso desnecessário de recursos computacionais, perdas de quadros devido a uma má escolha da taxa, convergência lenta para a taxa

de transmissão apropriada e a redução de performance em ambientes estáveis, onde a qualidade do sinal era praticamente constante. Para contornar estes problemas e melhorar a solução cognitiva, foi proposto o CogTRA, apresentado a seguir.

3.1.2 CogTRA: Cognitive Transmission Rate Adaptation

O CogTRA é um algoritmo cognitivo construído sob a mesma base do CORA: o *framework* CogProt. Entretanto, ele implementa quatro grandes melhorias para maximizar seu desempenho, que estão detalhadas a seguir.

O CORA executa o ciclo de otimização em intervalos fixo de tempo: 100 ms. Entretanto esta abordagem gera uma sobrecarga computacional desnecessária em períodos que a rede não possui tráfego. Para diminuir esse gasto computacional, o CogTRA implementa uma abordagem baseada no número de pacotes transmitidos, onde foi possível minimizar o processamento do roteador. Tomando por base testes realizados, o número de pacotes Pkt_n necessário para que o intervalo de tempo se aproxime dos 100 ms do método do CORA é de 150 pacotes. Desta forma, o processo de escolha da taxa aleatória é realizado a cada 150 pacote. Assim, em períodos de inatividade da rede é possível reduzir drasticamente a computação realizada pelo mecanismo.

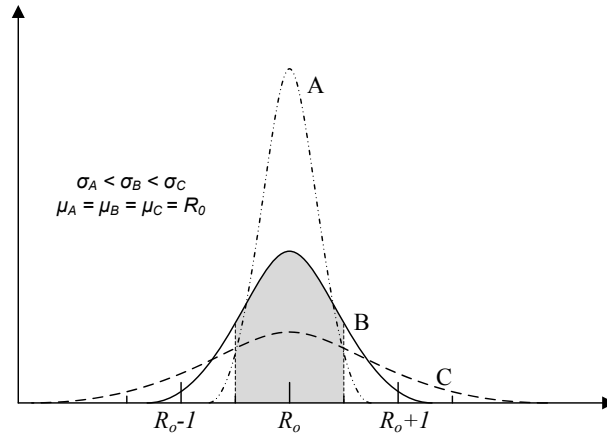
Outra melhoria está relacionada a perda de quadros pela escolha inapropriada da taxa. Diferente do Minstrel, quando o CORA escolhe uma taxa aleatória para uso, essa taxa será utilizada até a próxima iteração do ciclo de otimização. Neste caso, a escolha inapropriada de uma taxa (digamos, uma taxa muito alta que não consiga entregar os pacotes com sucesso) prejudica o algoritmo por um ciclo inteiro. Como muitos dispositivos têm suporte ao MRR, o CogTRA faz uso da funcionalidade para otimizar sua performance. São definidas apenas 2 tentativas com a taxa aleatória, seguida na tabela por outras taxas com desempenho satisfatório já conhecidos. Se estas duas tentativas iniciais falharem, as próximas duas tentativas serão com a taxa de maior vazão, seguida pela taxa de melhor entrega e, por fim, a menor taxa disponível. A Tabela 3.2 ilustra a escolha das taxas para o algoritmo cognitivo.

A terceira melhoria está relacionada com um dos principais parâmetros do CogProt que influencia o comportamento do CORA: o desvio padrão σ , que controla a agres-

Tabela 3.2: Tabela MRR do CogTRA.

Índice	Taxa	Tentativas
r_0	Aleatória (R_r)	$c_0 = 2$
r_1	Melhor vazão (R_b)	$c_1 = 2$
r_2	Melhor entrega (R_p)	$c_2 = 2$
r_3	Menor taxa (R_l)	$c_3 = 2$

sividade dos valores randômicos gerados pela distribuição normal $\mathcal{N}(\mu, \sigma^2)$. A Figura 3.1 ilustra tres curvas normais com mesma média $\mu = T_o$ e diferentes valores para o desvio padrão. Como visto, qualquer valor aleatório $r \in [R_o - 0.5, R_o + 0.5)$ irá resultar no uso da taxa R_o . A área sob a curva reflete esta probabilidade.

Figura 3.1: Curvas normais com mesmo μ e diferentes valores de σ [Chaves, 2010].

Diminuindo o σ , aumenta a probabilidade de sortear uma taxa aleatória R_r próxima da média μ da distribuição, previamente configurada para a taxa com melhor vazão R_b . Já um desvio padrão alto, faz com que o mecanismo possa sortear taxas mais afastadas da melhor taxa conhecida. A baixa agressividade no mecanismo funcionam bem em redes com enlaces estáveis, mas pode elevar o tempo necessário para identificar alguma mudança no canal e trocar de taxa. A alta agressividade pode rapidamente convergir para a melhor taxa, porém diminui o desempenho, pois constantemente analisa outras taxas mesmo durante os períodos estáveis.

Para contornar este problema, o CogTRA implementou o *Aggressiveness Self-Adjustment* (ASA). A ideia principal é aumentar o valor de σ sempre que houver mudanças na qualidade do enlace, e diminui-lo em períodos de estabilidade. Para identificar a mudança de qualidade, o ASA analisa se a vazão atual difere da vazão anterior em mais

de 10%. Quando isto ocorre é possível inferir que houveram mudanças na qualidade do enlace e ajustar o desvio padrão apropriadamente.

Por fim, a quarta melhoria introduzida pelo CogTRA visa solucionar os problemas de desempenho em cenários com enlaces estáveis com alta qualidade de sinal. De acordo com o CORA, mesmo que as condições do ambiente estejam estáveis, o algoritmo utiliza periodicamente uma outra taxa de transmissão diferente da melhor, para assim manter a funcionalidade de ajuste automático. Entretanto quando há momentos em que o enlace está com boa qualidade, muito tempo é desperdiçado testando taxas mais baixas.

Durante o processo de adaptação de taxa do CogTRA, quando é selecionado uma taxa aleatória R_r menor que a melhor taxa conhecida R_b , é muito provável que a transmissão com a taxa R_r ocorra com sucesso logo na primeira tentativa, o que aparentemente seria bom. Entretanto, esta taxa menor gasta mais tempo durante a transmissão, assim reduzindo a vazão. Para contornar este problema, o CogTRA implementa o *Interval Self-Adjustment* (ISA), visando reduzir o número de pacotes Pkt_n necessários para disparar a próxima execução do ciclo de otimização realizar de 150 para 20. Assim, o intervalo de tempo com a taxa aleatória baixa é reduzido, mantendo o princípio de funcionamento do CogProt, mas diminuindo o prejuízo causado pela taxa.

Em Chaves et al [2013] são apresentados resultados de experimentos realizados com o CogTRA. Este mecanismo foi comparado com o Minstrel, e apresentou resultado até 20.8% superiores, demonstrando a eficiência deste mecanismo.

3.2 Adaptação de taxa para MIMO WLANs

Para os dispositivos baseados em múltiplas antenas, uma nova variável foi acrescida no processo de escolha da taxa de transmissão: a escolha do modo de transmissão de MIMO. Conforme visto no capítulo anterior, estas várias antenas podem operar de dois modos:

- *Spatial Diversity* (SD), onde se promove a melhora da qualidade do sinal em ambientes com muito ruído e interferência, através da combinação dos fluxos de cada antena;

- *Spatial Multiplexing* (SM), para aumentar o *throughput* através de múltiplos fluxos simultâneos de dados [Xia et al, 2009].

Apesar do SM conseguir atingir maiores taxas, trabalhos anteriores mostraram que utilizar o máximo de fluxos de dados independentes (SM) é raramente a melhor estratégia para maximizar o *throughput*. A melhor solução é alternar entre os dois modos [Xia et al, 2009]. Na prática, a escolha entre SM e SD está diretamente ligado ao N_{ss} . Quando temos um dispositivo com mais de uma antena e definimos o $N_{ss} = 1$, automaticamente estamos forçando este equipamento a utilizar SD. Assim, podemos simplificar esta escolha entre escolher o valor ideal para N_{ss} .

A observação geral é que regiões de alto SNR, ou seja, regiões com pouco ruído e interferência, nós podemos utilizar N_{ss} maiores para atingir um melhor *throughput*. Em contraste, em momentos que ocorre a deterioração do canal, devemos diminuir o valor do N_{ss} para melhorar a confiabilidade da transmissão [Xia et al, 2009].

O sucesso dos algoritmos de adaptação de taxa de transmissão para os padrões 802.11a/g fizeram com que os fabricantes também desenvolvessem soluções para os dispositivos de padrão 802.11n [Nguyen et al, 2011]. Os novos algoritmos seguem os mesmos princípios dos antigos algoritmos para redes SISO: procuram estimar a qualidade do canal para escolher o índice MCS da taxa de transmissão. Porém, estas abordagens demandam sempre de adaptações para que possam ser aplicadas no contexto das redes com múltiplas antenas. Diversos estudos confirmam que a implementação direta das soluções desenvolvidas para SISO WLANs não apresentam um bom resultado em MIMO WLANs [Lakshmanan et al, 2011; Nguyen et al, 2011; Pefkianakis et al, 2010; Xia et al, 2009].

No que diz respeito à estas adaptações, um primeiro problema verificado é a nova ordenação dos índices MCS nas redes .11n. Antes só haviam oito possibilidade diferentes de taxas, e elas seguiam uma ordem crescente de taxa, de 6 Mbps a 54 Mbps. Porém, agora elas são agrupadas por N_{ss} e, somente dentro de cada grupo as propriedades anteriores se aplicam. Sendo assim, o exemplo, o MCS 7 possui uma vazão de 65 Mbps para canal de 20 MHz e GI=800 ns. Enquanto isso, o MCS 8 possui vazão teórica de 13 Mbps com os mesmos parâmetros. Como muitos algoritmos para SISO foram projetados levando em consideração esta ordenação implícita das taxas, são necessárias adaptações para resolver

este impasse.

Uma solução para este problema é o Minstrel *High Throughput* (Minstrel HT), que estende o Minstrel para redes IEEE 802.11n. Sua principal diferença é na forma de escolha randômica das taxas, devido à maior quantidade de taxas no espaço amostral. Nesta adaptação são construídas duas tabelas com amostras e índices de MCS. Como a possibilidade de escolha de taxas são várias, a tabela de MCS é dividida em 8 subgrupos, de acordo com o N_{ss} e a banda de canal (20 MHz ou 40 MHz). O algoritmo escolhe uma taxa randômica de cada grupo e realiza a fase de brusca assim como no algoritmo original [Nguyen et al, 2011].

O *Auto Rate Fallback for High-Throughput* (ARFHT) [Xia et al, 2009] tem por objetivo maximizar o *throughput* além de estabilizar o FER em até 10%. Para isto, ele realiza o processo de escolha da taxa de transmissão com base em “créditos” que são acumulados pelo histórico. Diferente do caso de redes SISO, o algoritmo trabalha com uma adaptação em duas dimensões: a busca pelo tipo de modulação e codificação na vertical e pelo número de fluxos de transmissão (N_{ss}) na horizontal. A Figura 3.2 representa este espaço de buscas.

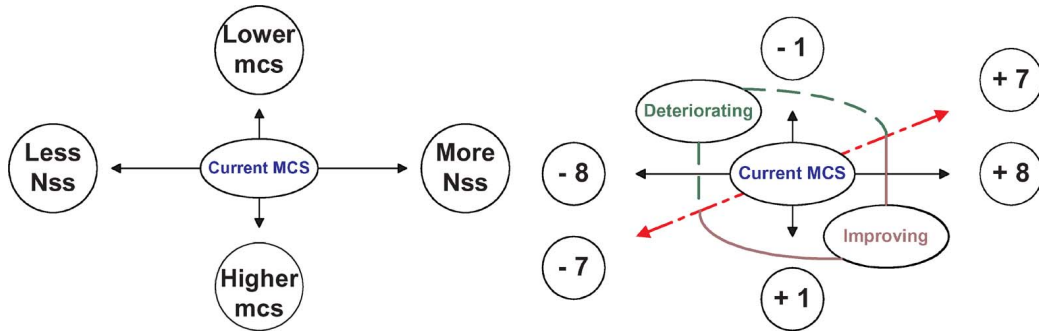


Figura 3.2: Direções de busca pelo MCS no algoritmo ARFHT [Xia et al, 2009].

O algoritmo pode ser dividido em três etapas. A primeira etapa realiza a atualização das variáveis que servirão para direcionar os espaços de busca adicionando ou removendo créditos. Por exemplo, para ajustar os créditos da direção vertical é analisado o número de pacotes ACKs que foram transmitidos com sucesso na primeira tentativa, enquanto a diferença de SNR percebido entre as várias antenas do receptor contribuir para ajustar os créditos do caminho horizontal. A etapa seguinte seleciona uma taxa a ser utilizada pela próxima transmissão. Esta escolha se dá pela posição atual na tabela

acrescida pela direção tomada no espaço de busca bidimensional. O caminho pode ser vertical, horizontal e diagonal; sendo o escolhido através da comparação dos créditos adquiridos na etapa anterior com limitantes previamente definidos. Por último, a terceira etapa ajusta os limitantes que serão utilizados na próxima rodada.

Para simplificar o processo de escolha das taxas para redes 802.11n, o algoritmo *Rate Adaptation for Multi-Antenna Systems* (RAMAS) [Nguyen et al, 2011] divide o problema em duas etapas. Ele categoriza os diferentes tipos de modulações e codificações em uma primeira tabela (com 8 entradas). Em uma segunda tabela são adicionadas as outras variáveis como o N_{ss} , GI, e largura do canal (com 16 entradas). A combinação de uma entrada de cada tabela é mapeada para um índice MCS. Este mapeamento permite adaptar a taxa de forma ordenada, semelhante ao que acontece nos sistemas SISO.

O RAMAS é compatível com as redes existentes, pois utiliza uma abordagem *Open-Loop*, analisando basicamente os pacotes ACKs para deduzir a qualidade do canal. Cada grupo tem suas próprias regras de crescer e diminuir os índices, e são atualizados concorrentemente. Para o primeiro grupo (envolvendo as modulações e codificações), é utilizada uma abordagem similar aos algoritmos das redes SISO: uma contabilidade de quantos pacotes obtiveram sucesso na entrega, falha, ou precisaram ser retransmitido. Esta análise é feita por um período determinado de 100 ms. Passado este período, se o número de pacotes enviados com sucesso for menor que o número de pacotes retransmitidos, ou se o número de pacotes enviados com erro for maior que um parâmetro definido, o índice é diminuído. Caso contrário, uma variável de limite para promoção do índice é acrescida, resultando na escolha do próximo índice se esta variável for maior que um parâmetro pré-definido.

Em relação ao segundo grupo (GI, canal e N_{ss}), se o número de pacotes que necessitam retransmissão for maior que o número de pacotes corretos, o RAMAS deduz que uma ou mais antenas estão com dificuldades para transmitir o pacote. Se isto persistir, o algoritmo diminui o N_{ss} . Porém, o objetivo é tentar utilizar sempre que possível um $N_{ss} > 1$ (utilizar vários fluxos de antenas). Assim, quando a taxa de sucesso por tentativas for maior 90% o índice é acrescido.

Os algoritmos apresentados resolvem o problema de como escolher a taxa dentre as diversas combinações possíveis. Pefkianakis et al [2010] percebeu que além de realizar este ajuste, deve haver uma forma de escolher quando usar o modo SD e o modo SM. Através de experimentos, descobriu-se que quando é considerado todas as possíveis taxas sem levar em consideração os modos de transmissão, não existe uma relação direta entre as perdas e as taxas nos cenários de redes MIMO. Por exemplo, percebeu-se que o *throughput* da transmissão diminuiu no momento que há a troca do MCS 6 para 7 (121.5 SD para 135 SD), logo se acreditava que o MCS 12 (162 SM) iria piorar ainda mais o *throughput*. Entretanto isso não ocorre devido ao fato de o modo de transmissão ser diferente. Contudo, esta relação de crescimento da taxa e aumento da probabilidade de erro continua sendo verdadeira quando não há troca de modo de transmissão.

A causa deste comportamento se dá pelo fato do SD e SM serem baseados em diferentes abordagens de comunicação, e muitos algoritmos implicitamente não consideram esta relação. Por exemplo, os mecanismos de crescer/diminuir as taxas e ajustes baseados na sondagem funciona para dispositivos antigos, mas não para MIMO [Pefkianakis et al, 2010]. Partindo destas descobertas, foi proposto o algoritmo *MIMO Rate Adaptation* (MIRA), que utiliza um esquema para alternar o modo de transmissão de forma oportuna.

O algoritmo, implementado de forma que não necessite de modificações no receptor, procura identificar e ajustar a melhor taxa de transmissão para determinada qualidade do canal. A mudança de taxa ocorre em intervalos de tempo, e utiliza-se a métrica de *throughput* para direcionar a mudança entre os modos de transmissão. A Figura 3.3 ilustra o processo de busca crescente pelo MCS apropriado quando a qualidade do sinal está boa. O MIRA tenta aumentar a taxa dentro de um mesmo modo (na figura, o SS), até perceber que chegou ao máximo daquele modo (taxa 108 SS com *throughput* real de 96.5 Mbps). Neste ponto, o MIRA alterna para o modo DS, iniciando a busca na primeira taxa cuja vazão teórica máxima seja maior do que a vazão real percebida (neste caso, 108 DS que é imediatamente maior do que 96.5 Mbps). A partir deste ponto, o algoritmo continua sua busca interna ao modo DS até encontrar seu pico máximo.

A Figura 3.4 ilustra o processo contrário, quando a busca é por um MCS menor para adequar-se à degradação do enlace sem fio. O processo é análogo: dentro de um

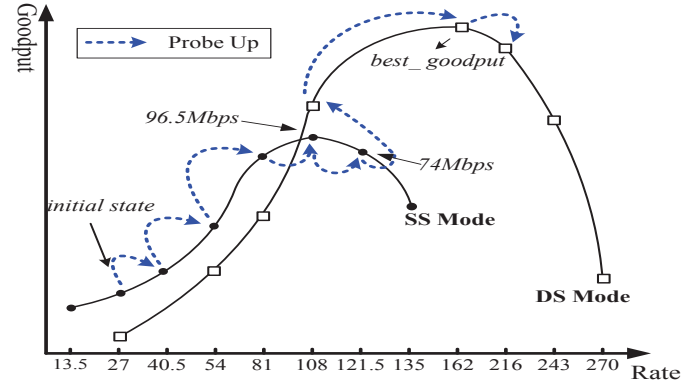


Figura 3.3: Busca crescente pelo MCS no algoritmo Mira [Pefkianakis et al, 2010].

mesmo modo (inicialmente DS), faz-se a busca linear até que se encontre a taxa com melhor desempenho (54 DS com *throughput* real de 29 Mbps). Neste ponto, é feita a troca de modo para o SS, iniciando novamente a partir da taxa cuja vazão teórica máxima seja maior do que a vazão real percebida (neste caso, 40.5 DS que é imediatamente maior do que 29 Mbps).

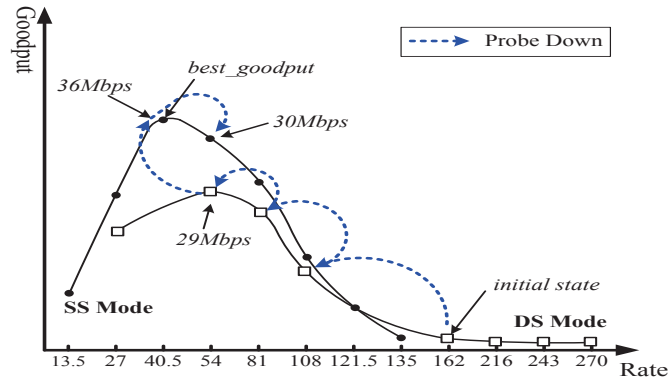


Figura 3.4: Busca decrescente pelo MCS no algoritmo Mira [Pefkianakis et al, 2010].

Com base nos algoritmos apresentados, a proposta deste trabalho é adaptar o algoritmo CogTRA, inicialmente projetado para redes SISO, para que possa funcionar em redes sem fio com MIMO, especificamente as redes 802.11n. As principais alterações serão entorno da escolha do modo de transmissão por SD ou SM, feita em função do parâmetro N_{ss} . Além disso, outras alterações no código serão necessárias para manter a compatibilidade entre o algoritmo e o padrão.

4 O Algoritmo Cognitivo CogTRA HT

Como apresentado na Seção 2.2, as novas funcionalidades das redes IEEE 802.11n permitem que as redes sem fio alcancem velocidades teóricas de até 600 Mbps. Entretanto, para os dispositivos conseguirem atingir estas velocidades, o código do algoritmo de adaptação da taxa de transmissão deve oferecer o suporte às novas funcionalidades, já que ele é o responsável pela configuração dos parâmetros de envio dos pacotes e também pela implementação de qualquer ativação de recursos de *hardware* junto ao *kernel*.

O algoritmo CogTRA utiliza uma abordagem cognitiva para a escolha da taxa de transmissão. Contudo, seu código foi implementado exclusivamente para redes IEEE 802.11abg. Desta forma, só é possível a escolha de taxas nestas redes, sem permitir a utilização de qualquer novo recurso proveniente das redes IEEE 802.11n. Portanto, a finalidade deste trabalho é adaptar o código do algoritmo CogTRA com o propósito de que ele possa ativar a utilização dos principais recursos das redes IEEE 802.11n, e assim realizar transmissões com as velocidades maiores. Apesar destas alterações de código não modificarem a abordagem utilizada pelo algoritmo CogTRA na escolha das taxas, este novo código será referido no decorrer do capítulo como *Cognitive Transmission Rate Adaptation for High Throughput* (CogTRA-HT), com o objetivo de facilitar o entendimento desta monografia.

Este capítulo é iniciado com a Seção 4.1, onde são apresentadas as modificações realizadas para integrar o CogTRA com as redes IEEE 802.11n. A seguir, a Seção 4.2 discute o ambiente utilizado na implementação do CogTRA-HT, incluindo a construção e compilação dos módulos, a instalação do algoritmo no roteador, e as funções que o código mantém para servir de interface com o restante do *kernel* Linux. Por fim, a Seção 4.3 exhibe os testes realizados e os resultados obtidos durante a validação destas modificações.

4.1 CogTRA_HT

O CogTRA_HT é uma versão adaptada da implementação original do CogTRA, com a finalidade de oferecer ao algoritmo o acesso às novas funcionalidades das redes IEEE 802.11n. Para isso, foram implementadas quatro principais modificações:

- Interoperabilidade do novo padrão .11n com os padrões antigos .11a, .11b e .11g;
- Considerar a escolha de índices MCSs ao invés das antigas taxas de transmissão;
- Realizar a escolha apropriada pelo número de fluxos de dados N_{ss} ;
- Oferecer suporte ao envio de quadros agregados.

Estas modificações são apresentadas nas sequência.

4.1.1 Interoperabilidade com os padrões .11a, .11b e .11g

O *kernel* Linux utiliza o algoritmo de adaptação de taxa como a parte do sistema responsável por escolher a taxa de envio do quadro. Para ele existe apenas um algoritmo de adaptação da taxa de transmissão. Sendo assim, não é possível configurá-lo com dois códigos distintos sem uma mudança em seu código fonte.

Uma solução para este problema seria, em um mesmo código, utilizar as rotinas de forma que consiga tratar as taxas de transmissão das redes IEEE 802.11abg e ao mesmo tempo as taxas das redes IEEE 802.11n. Entretanto esta solução é considerada complexa, aumentando o processamento por parte do *hardware* e dificultando a manutenção do código.

Sendo assim, a estratégia escolhida foi manter um código do CogTRA, e um código duplicado do CogTRA com as alterações para as redes IEEE 802.11n, deste ponto em diante referenciado como CogTRA_HT. Para o *kernel*, o código que está configurado como algoritmo de adaptação de taxa é o código do CogTRA_HT. Porém, no momento da alocação de uma nova estação cliente, o CogTRA_HT identifica o tipo de estação e, a partir deste ponto, é feito o redirecionamento de todas as funções que o CogTRA_HT utiliza para a antiga implementação do CogTRA, através da manipulação dos ponteiros para funções.

4.1.2 Índices MCSs

Com a interoperabilidade entre os padrões .11n, .11a, .11b e .11g descritas anteriormente, é preciso adaptar o código de maneira que ele possa escolher adequadamente qual taxa utilizar de acordo com o padrão vigente. O modo de informar ao *hardware* qual taxa será utilizada para a transmissão é através da `struct ieee80211_tx_rate`. O atributo `.idx`, do tipo inteiro, é o identificador da taxa escolhida. Em transmissão nas redes .11a, .11b e .11g, os índices de 0 a 3 correspondem às taxas do padrão .11b (1, 2, 5.5 e 11), enquanto os índices de 4 a 11 são equivalentes as taxas do padrão .11a (6, 9, 12, 18, 24, 36, 48, 54). É importante lembrar que com o padrão .11g é possível transmitir com todas as 12 taxas apresentadas.

Tabela 4.1: Comparação do atributo `.idx` entre taxas e índices MCSs

<code>.idx</code>	<code>.abg</code>	<code>.n</code>
0	1	6,5
1	2	13
2	5,5	19,5
3	11	26
4	6	39
5	9	52
6	12	58,5
7	18	65
8	24	13
9	36	26
10	48	39
11	54	52
12	-	78
13	-	104
14	-	117
15	-	130

Já nas redes .11n as taxas foram reorganizadas de acordo com os índices MCS, e esses índices não estão relacionados com as taxas dos padrões anteriores. Em transmissões do padrão IEEE 802.11n o valor do atributo `.idx` corresponde diretamente ao índice MCS. A Tabela 4.1 mostra como estão relacionados estes índices. Configurando o valor igual

a 6 significa que será transmitido com a taxa indicada no MCS de índice 6 (e não mais com a taxa 12 Mbps). Para poder diferenciar se o atributo `.idx` corresponde a uma taxa do IEEE 802.11abg ou IEEE 802.11n foi atribuído ao atributo `.flag` da `struct ieee80211_tx_rate` o valor `IEEE80211_TX_RC_MCS`. Desta forma o algoritmo diz ao *kernel* que a taxa que será transmitida é uma taxa com índice MCS do padrão IEEE 802.11n.

Nesse contexto, o CogTRA_HT deve ser capaz de diferenciar as estações de acordo com o padrão utilizado e escolher adequadamente os índices MCSs ou a taxa de transmissão.

4.1.3 Número de fluxos de dados N_{ss}

Para realizar transmissões utilizando as taxas do padrão IEEE 802.11n é preciso escolher adequadamente o índice MCS levando em consideração a mudança de N_{ss} . No CogTRA as taxas eram ordenadas de forma que a escolha da taxa aleatória R_r se dava pelo sorteio de uma taxa seguindo uma distribuição normal. Isso era possível porque o número de taxas era de no máximo 12, logo o tempo de convergência era razoável. Entretanto, no padrão IEEE 802.11n, este número pode chegar a 32 taxas, utilizando 4 fluxos de dados (apesar de serem especificadas 77 MCSs, apenas os 32 primeiros são efetivamente utilizados).

Para tanto, foi proposta uma nova abordagem para a escolha da taxa aleatória, que utiliza o conceito de que as taxas do IEEE 802.11n são agrupadas pelo de número de fluxos de dados (N_{ss}). As taxas de índices de 0 à 7 pertencem ao primeiro grupo ($N_{ss} = 1$), as taxas de índice 8 à 15 ao segundo grupo ($N_{ss} = 2$), e assim por diante.

A princípio o funcionamento do CogTRA_HT é semelhante ao do CogTRA. Primeiro é preciso encontrar na base de conhecimento qual é a taxa de maior probabilidade de entrega T_P e a taxa de maior vazão R_b . Uma vez encontradas, estas taxas serão utilizadas como as taxas r_1 e r_2 na tabela MRR (Tabela 3.2). É importante lembrar que a taxa r_3 é sempre escolhida como sendo a menor taxa disponível, neste caso, o MCS 0. Somente depois será escolhida uma taxa aleatória R_r , segundo a distribuição normal de média $\mu = R_b$.

Para o processo da escolha da taxa aleatória R_r o CogTRA_HT deve se preocupar inicialmente com a escolha do grupo g em que a taxa aleatória R_r irá pertencer. Em outras

palavras, primeiro vamos escolher qual vai ser o valor do N_{ss} . Para isto é criada uma nova distribuição normal, ainda com média em R_b , porém com um desvio padrão relativamente maior. Então é realizado o sorteio de uma taxa R_g , que será usada exclusivamente para definir qual grupo g será aquele na qual se encontrará a taxa R_r . O grupo g é, neste caso, o grupo ao qual pertence a taxa R_r . Desta forma é permitido ao algoritmo trocar eventualmente de grupo, porém dando maior preferencia ao grupo da taxa R_b de maior vazão.

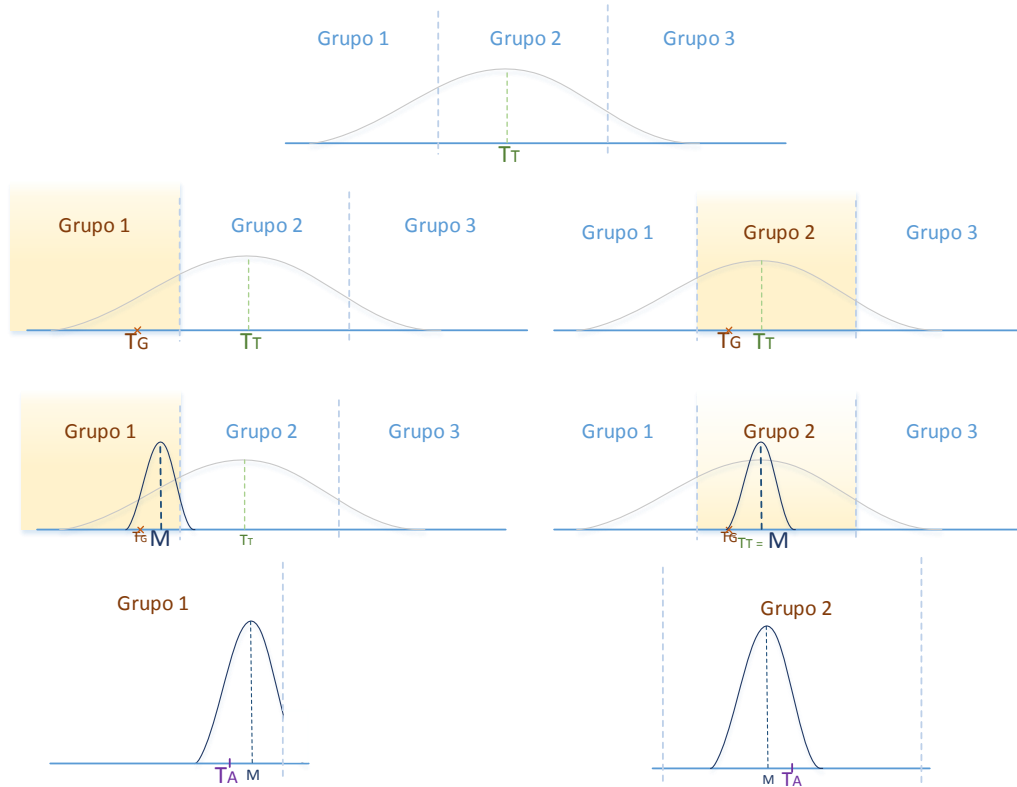


Figura 4.1: Escolha do valor de N_{ss} feita pelo CogTRA_HT.

Uma vez definido o grupo, é realizado a escolha da taxa aleatória R_r usando a já conhecida distribuição normal sobre somente as taxas do grupo g . Caso o grupo g sorteado seja o mesmo grupo pertencente da taxa R_b , a média M desta distribuição será a própria taxa R_b , pois é a taxa com maior *throughput*. Entretanto, caso ocorra uma mudança de grupo, deve-se escolher uma outra média. Para isto, encontra-se a taxa R_m com vazão teórica mais próxima arredondada para cima da taxa R_r , e esta é definida como a média M . Isto é necessário já que as informações de desempenho armazenadas na base de conhecimento para as taxas do outro grupo podem estar desatualizadas, e ainda

assim queremos manter a relação com o desempenho atual. Uma vez com a média M definida, é possível encontrar a taxa aleatória R_r .

Observe que a proposta apresentada consiste em uma “hierarquização” da escolha da taxa, sendo a escolha pelo grupo feita em um nível mais alto, e a escolha pela taxa feita em um nível mais baixo. Todo este processo é ilustrado na Figura 4.1, considerando a taxa com melhor vazão R_b , a taxa de sorteio de grupo R_g , a taxa aleatória R_r e a média da curva normal M .

4.1.4 Agregação de quadros na camada MAC

Durante as transmissões de quadros nas redes 802.11, existe uma quantidade significativa de *overhead* por conta dos cabeçalhos e do próprio protocolo, como ilustra a Figura 4.2. Nas taxas mais altas, este *overhead* pode consumir mais banda que a própria carga útil dos quadros. Para contornar este problema o padrão IEEE802.11n criou a funcionalidade *Frame Aggregation*, na qual é possível agrupar de dois até 64 quadros de dados direcionados ao mesmo destino num único superquadro, chamados de *Aggregate MAC Protocol Data Unit* (AMPDU). O nível de agregação se refere ao número de quadros (MPDUs) agrupados em um único AMPDU. Desta forma, a razão entre o *overhead* e a carga útil de dados é maior, permitindo uma maior vazão dos dados.



Figura 4.2: *Overhead* introduzido pelas transmissões nas redes 802.11.

Apesar de serem transmitidos em um único quadro AMPDU, os MPDUs são reconhecidos individualmente, ou seja, caso um único MPDU de um AMPDU tenha apresentado um erro durante a transmissão, apenas ele será reenviado, e não o restante dos MPDUs. Como os quadros agregados podem gerar um processamento maior para os dispositivos, nem todos implementam essa funcionalidade (ela não é uma funcionalidade mandatória do padrão). A verificação em nível de código para este suporte se dá através da *flag* de *hardware* `IEEE80211_HW_AMPDU_AGGREGATION`.

Sendo possível trabalhar com os AMPDUs, a agregação se torna transparente

para o CogTRA_HT, e a complexidade fica a cargo dos *drivers* do *hardware* que realizará as agregações dos MPDUs, assim como decidir quantos e quais MPDUs serão agregados. Entretanto, diferentes níveis de agregação provocam comportamentos diferentes para as taxas de dados. Em outras palavras, só é possível comparar o desempenho real de uma taxa qualquer R_i com uma taxa maior, digamos R_{i+2} se os valores mensurados estiverem sido obtidos com níveis de agregação próximos.

Neste contexto, para poder realizar as transmissões agregadas deve-se construir o ambiente necessário para trabalhar com as agregações, e também informar ao cliente sobre o envio de AMPDUs. Após a transmissão, já durante a coleta de estatísticas, é possível consultar o nível de agregação do último AMPDU, além da quantidade destes MPDUs que foram transmitidos com sucesso. De posse dessas informações é possível realizar, de maneira apropriada, tanto os cálculos de vazão das taxas de transmissão, como evitar a comparação inapropriada do desempenho das mesmas.

4.2 Ambiente de implementação

Para implementar o CogTRA_HT foi necessário recriar o ambiente de implementação do CogTRA, tarefa esta que foi dividida em três etapas. A primeira etapa foi compilar o *firmware* OpenWrt. A segunda etapa foi compilar o CogTRA dentro do OpenWrt. Por fim, a terceira etapa foi duplicar o CogTRA, agora com o nome CogTRA_HT, e somente então iniciar a implementação das modificações.

4.2.1 Compilação do OpenWRT

Tomando por base o CogTRA, a implementação do CogTRA_HT foi realizado no *firmware* OpenWrt versão Backfire 10.03.1. Os arquivos fonte estão versionados sob o sistema de versionamento Subversion (SVN), localizado em `svn://svn.openwrt.org/openwrt/tag/backfire_10.03.1`. Por tanto, o primeiro passo foi realizar o *checkout* do projeto para uma máquina Linux, utilizada como ambiente de implementação.

Os arquivos baixados consistem no código-fonte do OpenWrt, juntamente com o OpenWrt *Buildroot*: um conjunto de *Makefiles* e *patches* que facilitam a compilação do

código-fonte para o dispositivo específico. Esta ferramenta de compilação é necessária, pois os sistemas embarcados possuem processadores de arquitetura diferente dos processadores utilizados para realizar a compilação, tornando as diretrizes da compilação mais complicadas. Essa capacidade de criar códigos executáveis para outra plataforma que não seja aquela em que o compilador está sendo executado é conhecida por *Cross Compilation*.

Após o *download*, é informado ao OpenWrt *Buildroot* as configurações de compilação desejadas como qual será dispositivo alvo que o OpenWrt irá rodar, os módulos que estarão ativos juntos com o *kernel*, e também alguns pacotes desejáveis para algum tipo de aplicativo ou serviço (*iperf* por exemplo). Para este trabalho, a compilação foi destinada ao mesmo dispositivo que o CogTRA utilizou como ambiente de testes: o roteador Ubiquiti RouterStation Pro, equipado com um *chipset* Atheros AR71xx. Para a rede sem fio é utilizado um Mini-PCI Ubiquiti AR71-A com 3 antenas para transmissão e recepção, suportando redes IEEE 802.11a, .11b, .11g e .11n, tanto na faixa de frequência de 2.4 GHz como 5 GHz.

4.2.2 Inserção do CogTRA

Feita a compilação, o *firmware* é gerado e está pronto para ser carregado no roteador. Como este trabalho utilizou as mesmas configurações e o mesmo equipamento que a implementação do CogTRA no trabalho de [Chaves et al, 2013], a etapa de instalação do OpenWrt no roteador não foi necessária (esta versão do OpenWrt já estava instalada no equipamento). Entretanto, a compilação de todo OpenWrt foi necessária, pois somente com o projeto completo no ambiente de implementação é possível compilar os módulos ligados ao algoritmo.

O próximo passo foi substituir no *Buildroot* o algoritmo de adaptação de taxa de transmissão padrão do OpenWrt (que é o Minstrel) para o CogTRA. O resultado da compilação são módulos que serão carregados e instalados individualmente no ambiente de testes (roteador). Esse processo de compilação por módulos permite fazer modificações e rapidamente atualizar o sistema sem precisar recompilar todo o *firmware*.

4.2.3 Inserção do CogTRA_HT

A partir da criação do CogTRA no ambiente de implementação, foi feita sua duplicação e inserção do CogTRA_HT como um novo algoritmo dentro do módulo `mac80211` do *driver* `ath9k`. Para possibilitar a inserção de um novo algoritmo, modificou-se o arquivo `config.mk` deste módulo, que mantém o nome usado pelo *kernel* como referencia ao algoritmo de adaptação de taxa de transmissão. O arquivo `/net/mac80211/Makefile` também foi modificado, pois nele é feita a associação do nome do algoritmo com os arquivo de código-fonte que devem ser compilados. O arquivo `/net/mac80211/main.c` contém a chamada principal do módulo `mac80211`. Este código trata das principais responsabilidades relacionadas ao IEEE 802.11. Na função que realiza a inicialização da interface sem fio foi inserido uma chamada ao método que inicializa o algoritmo CogTRA_HT. Já na função de desligamento da interface sem fio foi inserido a chamada ao método de finalização do algoritmo CogTRA_HT.

Finalmente, foram inseridos os arquivos `cogtra_ht.c` e `cogtra_ht.h` no ambiente de desenvolvimento. Neste ponto, todas as alteração em códigos foram feitas nestes arquivos, que quando compilados são incluídos dentro dos módulos necessários para carregar o CogTRA_HT no roteador.

4.2.4 Configurações do OpenWRT

Finalizada a criação do CogTRA_HT, foram necessárias realizar as configurações do ambiente sem fio do OpenWrt no ambiente de testes. Uma típica configuração de rede define as propriedades da interface sem fio como canal, tipo de *driver*, potência de transmissão. Isto pode ser feita de duas formas: através da interface web LuCI, ou através do arquivo `/etc/config/wireless`, localizado no sistema de arquivo de roteador. As configurações utilizadas para habilitar os recursos do padrão IEEE 802.11n são:

- **hwmode**: opção que seleciona o padrão utilizado. Pode assumir os valores `11ng`, na qual é utilizada a frequência de 2.4GHz para compatibilidade entre os padrões `.11g` e `.11n`; e `11na`, que transmite na frequência de 5GHz com os padrões `.11a` e `.11n`.

- **htmode**: especifica a largura de banda utilizada. Pode assumir os valores HT20, para transmissões com largura de 20 MHz; HT40- e HT40+, para o uso de dois canais adjacentes (*Channel Bounding*), sendo o primeiro caso o canal principal como inferior e no segundo caso, o superior. Como a faixa de frequência de 2.4GHz é a mais utilizada residencialmente, ela possui um número maior de estações em comparação com a faixa de 5GHz. Compartilhar um único canal entre duas rede muitas vezes pode prejudicar o desempenho. Quando se utiliza dois canais, esta situação é ainda mais agravante. Devido a isto o OpenWrt é configurado por padrão para não permitir utilizar os recursos de *Channel Bounding* na faixa de 2.4 GHz. Para poder habilitá-la, é preciso modificar a opção **noscan** para TRUE e assim liberar o uso de dois canais
- **ht_capab**: especifica as capacidades do *hardware*, dentre elas, o tamanho do intervalo de guarda GI. Por padrão, o roteador é configurado com LGI (800 ns). Para ativar transmissões com SGI (400 ns) deve-se inserir na opção **ht_capab** o termo ‘SHORT-GI-20’ ou ‘SHORT-GI-40’ para as larguras de banda de 20 ou 40 MHz, respectivamente.

4.2.5 Interface do código com o OpenWRT

Para realizar as mudanças no código, o primeiro passo foi compreender a estrutura do código-fonte do CogTRA, e verificar como se dá seu relacionamento com o *kernel* do sistema. Durante a inicialização do módulo **mac80211** é realizada uma chamada à função **rc80211_minstrel_init()** do CogTRA-HT. Esta função é responsável por fornecer à camada de enlace as funções básicas utilizadas no decorrer da transmissão (utilizando ponteiros para as funções). Estas funções constituem o código do CogTRA, e elas foram modificadas para atender o objetivo do trabalho.

- **.alloc()** é a função chamada logo que a interface sem fio é inicializada. Em linhas gerais, esta função realiza a instanciación do objeto relacionado ao roteador, onde as principais características são inicializadas, e compartilhadas pelas estações clientes.

- `.alloc_sta()` é a função chamada quando uma nova estação se junta à rede. Nesta etapa são coletadas informações de hardware da estação cliente.
- `.rate_init()` é chamada logo após a alocação de uma estação. Esta função inicializa as variáveis de interesse que algoritmo irá utilizar como, por exemplo, o tempo de duração da transmissão de um pacote ACK. Neste momento também é descoberto com quais taxas o cliente e o AP poderão se comunicar, e a partir disto será inicializada as métricas para cada taxa.
- `.get_rate()` é a função chamada imediatamente antes de iniciar a transmissão de um quadro. É neste momento que o CogTRA analisa as estatísticas das taxas e, com base nestas informações, toma a decisão de qual taxa escolher.
- `.tx_status()` é a função chamada imediatamente após a transmissão de um quadro, tornando possível a coleta das informações sobre a transmissão como, por exemplo, a quantidade de tentativas e o indicador de sucesso ou falha.

Durante a fase de inicialização, todas as taxas encontram-se com suas métricas zeradas e, conforme as transmissões ocorrem, as estatísticas são atualizadas. Durante a execução da função `.get_rate()` é monitorado o número pacotes transmitidos e assim, a cada intervalo de transmissões, uma nova taxa é escolhida. Para isto é chamado a função `update_stats()`, que implementa as quatro etapas do ciclo de otimização do mecanismo. Todo este processo é apresentado no digrama de sequência da Figura 4.3.

4.3 Ambiente de testes

Para validar as modificações, foram realizados testes utilizando o roteador Ubiquiti RouterStation Pro com 2 antenas, faixa de frequência de 2.4 GHz e LGI. Como cliente foi utilizado um *notebook* equipado com um adaptador USB TP-LINK TL-WN822N, também com 2 antenas. O objetivo dos testes foi avaliar o desempenho das versões intermediárias do código e analisar o comportamento de suas respectivas vazões de dados. As versões intermediárias de código seguem uma ordem de implementação na qual foi necessária para atingir a versão final do CogTRA-HT. Estas versões são descritas como:

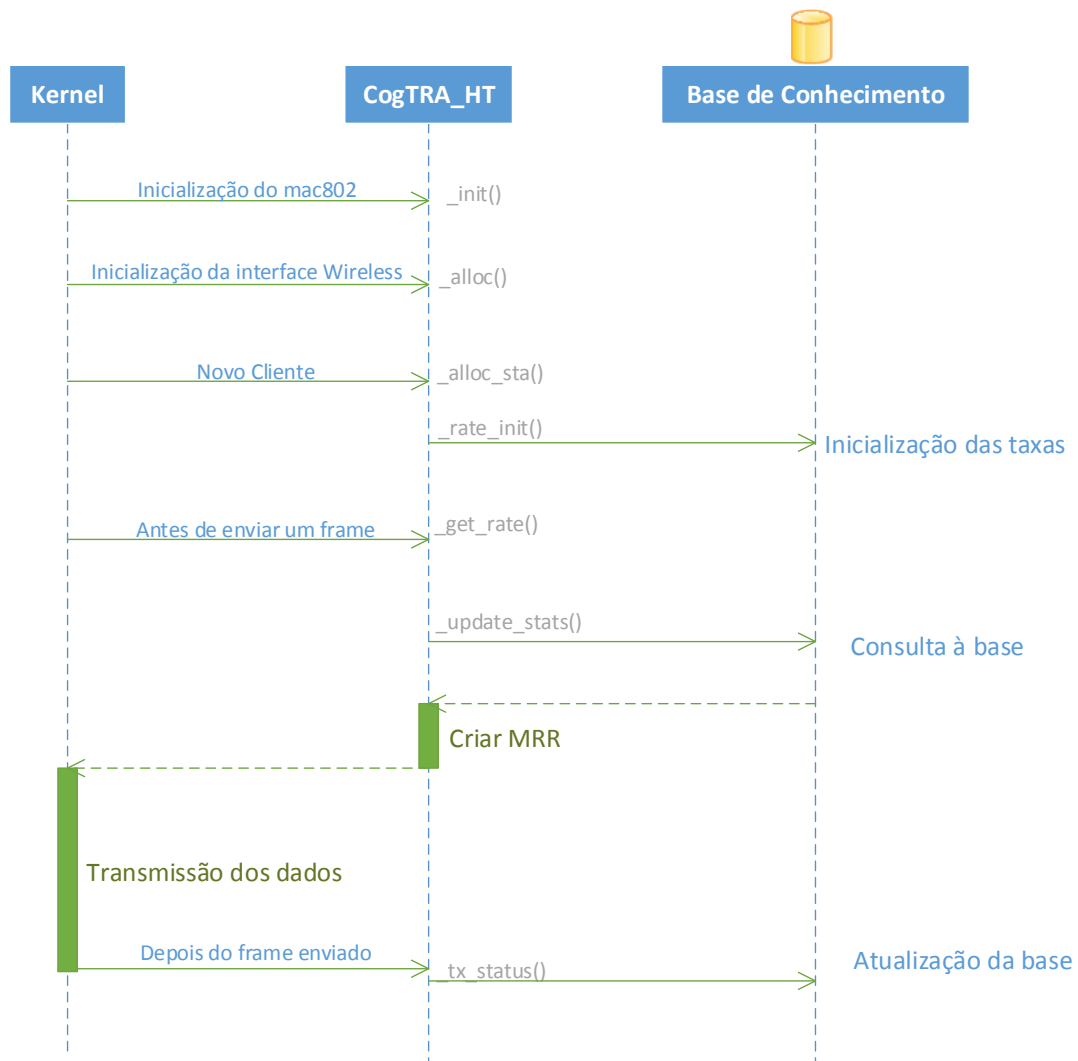


Figura 4.3: Sequência na chamada de funções do CogTRA_HT.

- CÓDIGO I: contém a implementação original do CogTRA, ou seja, sem o suporte a qualquer nova funcionalidade das redes IEEE 802.11n.
- CÓDIGO II: utiliza o algoritmo CogTRA porém não mais referenciando taxas do padrão IEEE 802.11abg, mas sim os MCSs do padrão IEEE 802.11n.
- CÓDIGO III: utiliza todos os índices MCS que o cliente tem suporte, e a possibilidade de escolha automática do número de fluxos.
- CÓDIGO IV: é o CogTRA_HT completo, que possui implementado as funcionalidades anteriores mais o suporte a transmissão de quadros agregados AMPDU, como discutidos na subseção 4.1.4.

4.3.1 Descrição dos experimentos

Para cada instancia de teste foi realizada uma transmissão contínua de dados TCP durante um intervalo de 30s. Para isto foi utilizado o `iperf`, um programa que gera tráfego conforme as configurações desejadas e ao final da transmissão é possível obter a quantidade de dados transmitidos.

Na tentativa de diminuir ao máximo as interferências, os testes foram realizados em um sábado no período da manhã. Durante esse período foi verificado a existência de 13 redes no canal 6, o mesmo canal na qual os testes foram realizados.

Foram feitos dois experimentos: em um primeiro caso desejava-se verificar o desempenho do algoritmo no ambiente com o melhor sinal possível. Para isto foi considerado uma distância entre as antenas do cliente e do AP de menos de 10cm. Já no segundo caso, as transferências foram feitas com aproximadamente 4 metros de distância entre as antenas, simulando um ambiente de transferência mais comum de dois dispositivos se comunicando dentro de uma sala.

Os testes foram realizados em dois momentos distintos: primeiro foram feitos os testes de todos os códigos. Ao final, todos os testes foram refeitos, atingindo assim um intervalo entre as duas execuções de testes de aproximadamente 15 minutos. Desta forma foi possível amenizar a influência de outros clientes nos resultados, pois dependendo do momento da realização do teste um canal pode estar mais disputado que em um segundo momento. Em cada teste foram feitas 3 execuções consecutivas, onde ao final de cada transferência a interface sem fio era reiniciada para limpar o estado do algoritmo, assim forçando o algoritmo a inicializar o próximo teste com a taxa mais baixa, e não de onde parou o último resultado.

A análise dos dados foram coletadas pela saída do programa `iperf`, que retorna a quantidade de *bytes* transferido e a vazão média da transferência dos dados durante este período.

4.3.2 Resultados dos experimentos

Analisando os dados da Figura 4.4, é possível verificar que o momento em que é realizado o teste influencia bastante nos resultados. Como os testes não foram realizados em um

ambiente isolado, o nível de ruído pode variar de um experimento à outro, principalmente pelas condições de alto número de redes disputando o mesmo canal. Por isto foi necessário realizar cada um dos experimentos em momentos diferentes.

Perto (< 0,1 m)					média (Mbits/s)	Longe (≥ 4 m)					média (Mbits/s)
Momento I		Momento II		Momento I		Momento II					
(MB)	(Mbits/s)	(MB)	(Mbits/s)	(MB)		(Mbits/s)	(MB)	(Mbits/s)			
CÓDIGO I	34,10	9,52	36,50	10,20	12,60	CÓDIGO I	52,40	14,60	39,00	10,90	10,77
	44,90	12,50	41,20	11,50			55,50	15,50	21,50	6,00	
	57,60	16,10	56,60	15,80			52,00	14,50	11,40	3,16	
CÓDIGO II	56,50	15,70	55,60	15,30	15,22	CÓDIGO II	55,10	15,40	55,50	15,50	14,40
	61,50	17,10	62,60	17,40			41,50	11,60	56,00	15,60	
	38,30	10,60	54,70	15,20			56,30	15,70	45,00	12,60	
CÓDIGO III	72,80	20,30	73,00	20,40	20,68	CÓDIGO III	75,40	21,00	77,60	21,60	19,38
	73,00	20,40	72,60	20,30			69,00	19,30	66,40	18,50	
	78,00	21,80	74,80	20,90			63,50	17,70	65,30	18,20	
CÓDIGO IV	183,00	51,20	155,70	43,60	46,90	CÓDIGO IV	176,00	49,30	118,00	32,80	38,71
	182,00	51,00	163,90	45,90			152,00	42,40	129,00	35,90	
	137,00	38,30	183,50	51,40			144,00	40,30	113,00	31,60	
Minstrel_HT	225,00	62,90	232,80	65,20	63,30	Minstrel_HT	212,00	59,00	199,00	55,00	57,98
	226,00	63,00	219,60	61,50			211,00	58,50	202,40	56,10	
	234,00	65,40	221,50	61,80			219,00	61,30	207,20	58,00	

Figura 4.4: Resultados dos experimentos com o CogTRA_HT.

Pode observar uma melhora entre cada código testado. Entre o CÓDIGO I e CÓDIGO II a melhora se teve pela utilização das taxas do padrão IEEE 802.11n e não mais das taxas dos padrão IEEE 802.11abg. O CÓDIGO II realiza a escolha das taxas com índices MCS entre 0 e 12. Como dos índices 8 em diante estamos considerando um $N_{ss} = 2$, então foi possível aumentar um pouco o desempenho da rede. A vazão maior é consequência da velocidade de transmissão de índice MCS12 do IEEE802.11n, que é maior que o de índice 12 do IEEE802.11abg.

A melhora do CÓDIGO III se deu por duas razões, a primeira foi a possibilidade de escolha automática do número de fluxos, pois até então o código não sabia lidar com a mudança de grupos, acreditando que o índice 8 possuía uma vazão teórica maior que o índice 7. A segunda razão foi utilização de todos índices MCS que o cliente tem suporte, e desta forma permitindo ao CogTRA_HT referenciar os MCSs de índices 0 até 15.

Para o CÓDIGO IV foi ativado o envio de quadros agregados e foi considerado nos cálculos de vazão. Como dito na sessão anterior, com o AMPDU é possível enviar uma carga efetiva de dados maior em um único quadro. Segundo os experimentos observou-se que a maior melhora dentre todas versões do código se deu por conta deste recurso.

O que já era de se esperar, os testes realizados com uma distancia muito próxima obtiveram desempenho maior. Esta diferença não está relacionada ao ruído do ambiente,

mas o fator relevante é por conta da força do sinal: em distâncias próximas o sinal chega ao cliente com mais potência, logo é mais fácil separá-lo do ruído.

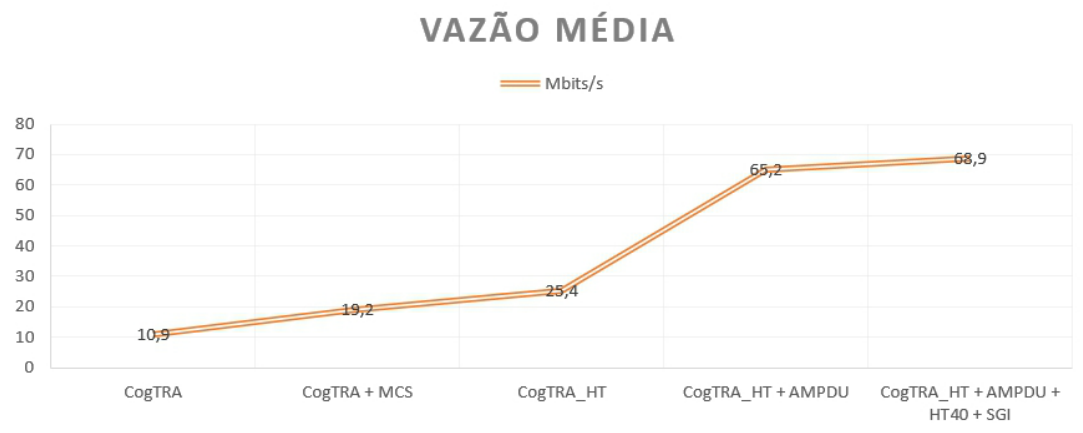


Figura 4.5: Evolução no desempenho alcançado pelas melhorias do CogTRA_HT.

A última versão do CogTRA_HT, CÓDIGO IV, possui ativo os mesmos recursos que o Minstrel_HT, portanto foi possível realizar uma comparação com os dois algoritmos. Inserindo o Minstrel_HT sob as mesmas condições que os testes anteriores, pode observar que ele obteve um desempenho maior que o CogTRA_HT. Analisando a Figura 4.6 e a Figura 4.7, pode observar o estado da utilização das taxas ao final da transmissão. A partir da coluna *attempts* deste comparativo, é possível ver que a política de escolha das taxas do Minstrel_HT é mais satisfatória, pois a taxa de maior vazão (MCS15) é escolhidas mais vezes em comparação às taxas de menor vazão. Já o CogTRA_HT utiliza outras taxas com mais frequência. Isto deixa claro que ainda há espaço para melhorias no CogTRA_HT.

	MCS	avg_thp	avg_pro	cur_thp	cur_pro	succ (atte)	success	attempts	#used
HT20/LGI	MCS0	6.2	95.7	6.5	100.0	0 (0)	728	788	4
HT20/LGI	MCS1	10.2	81.3	10.3	79.9	0 (0)	38	46	3
HT20/LGI	MCS2	13.4	69.0	12.9	66.6	0 (0)	293	323	6
HT20/LGI	MCS3	24.9	99.8	25.0	100.0	0 (0)	183	218	5
HT20/LGI	MCS4	36.6	97.3	37.5	100.0	0 (0)	476	551	25
HT20/LGI	MCS5	40.2	81.9	39.4	79.9	0 (0)	2957	3551	44
HT20/LGI	MCS6	34.0	64.4	30.2	57.1	0 (0)	5183	6052	64
HT20/LGI	MCS7	35.1	59.3	29.5	50.0	0 (0)	28332	32816	216
HT20/LGI	MCS8	12.3	94.2	13.1	100.0	0 (0)	250	306	17
HT20/LGI	MCS9	17.3	68.4	15.2	59.9	0 (0)	913	1040	27
HT20/LGI	MCS10	34.4	91.7	37.5	100.0	0 (0)	957	1086	45
HT20/LGI	MCS11	48.0	96.4	49.7	100.0	0 (0)	2632	3142	61
HT20/LGI	MCS12	48.6	64.9	37.8	50.0	0 (0)	4061	4941	54
HT20/LGI P	MCS13	94.0	99.9	95.2	100.0	0 (0)	3729	5126	62
HT20/LGI T	MCS14	104.7	97.5	107.5	100.0	0 (0)	8324	10634	89
HT20/LGI *	MCS15	97.6	83.6	89.8	77.2	143 (185)	22584	27420	184

Figura 4.6: Tabela de utilização das taxas do CogTRA_HT ao final de uma transmissão.

	MCS	avg_thp	avg_pro	cur_thp	cur_pro	succ (atte)	success	attempts
HT20/LGI	MCS0		71.4	4.7	0.0	0(0)	22	27
HT20/LGI	MCS1		97.3	12.8	100.0	0(0)	25	27
HT20/LGI	MCS2		95.2	18.6	100.0	0(0)	105	113
HT20/LGI	MCS3		98.1	25.3	100.0	0(0)	25	26
HT20/LGI	MCS4		100.0	38.0	100.0	0(0)	24	24
HT20/LGI	MCS5		100.0	49.2	100.0	0(0)	29	29
HT20/LGI P	MCS6		99.9	54.6	100.0	0(0)	24	25
HT20/LGI	MCS7		88.4	54.2	100.0	0(0)	22	25
HT20/LGI	MCS8		100.0	13.2	100.0	0(0)	23	23
HT20/LGI	MCS9		99.8	25.7	100.0	0(0)	27	29
HT20/LGI	MCS10		88.0	33.4	100.0	0(0)	24	27
HT20/LGI	MCS11		74.3	36.6	100.0	0(0)	20	25
HT20/LGI	MCS12		99.9	71.9	100.0	0(0)	24	25
HT20/LGI t	MCS13		91.6	82.5	100.0	0(0)	23	25
HT20/LGI	MCS14		65.5	66.2	0.0	0(0)	3314	3802
HT20/LGI T	MCS15		93.5	102.8	95.9	307(320)	161642	178555

Figura 4.7: Tabela de utilização das taxas do Minstrel_HT ao final de uma transmissão.

5 Conclusão

A escolha de uma taxa de transmissão fixa não é a melhor solução para atingir alto desempenho na rede sem fio. Em ambientes de baixa qualidade de sinal e com taxas muito altas, o número de retransmissões geradas acabam por diminuir drasticamente a vazão dos dados. Assim, a escolha automática de uma taxa de transmissão de acordo com a qualidade do enlace é altamente necessária. Este é a proposta dos algoritmos de adaptação de taxa de transmissão encontrados na literatura.

Em específico, o CogTRA [Chaves et al, 2013] é um algoritmo de adaptação de taxa de transmissão criado baseado em conceitos de redes cognitivas, construído sobre o *framework* de redes cognitivas CogProt. O CogTRA foi proposto para redes de padrão .11a, .11b e .11g, e não possui a capacidade de lidar com as melhorias oferecidas pelo padrão .11n.

Neste trabalho foi apresentado uma conjunto de adaptações para um novo algoritmo chamado de CogTRA_HT, com o objetivo de habilitar o algoritmo CogTRA a utilizar os principais recursos das redes 802.11n. As melhorias implementadas foram:

- Interoperabilidade do CogTRA_HT com padrões diferentes do 802.11n. Neste caso, quando uma estação do padrão 802.11abg é identificada, é feito o redirecionamento automático para o código do CogTRA;
- Os índices utilizados pelo CogTRA para se referir as taxas escolhidas são diferentes da utilizada pelo padrão 802.11n, portanto foi necessário modificar o modo de mapeamento do CogTRA para que realize a escolha correta das taxas;
- Os quadros agregados, AMPDUs, permitem aumentar a vazão real de dados na transmissão, pois ele diminui o *overhead* de dados gerados pelo cabeçalhos dos protocolos enviando diversos quadros em uma única transmissão. Sendo assim, o tamanho do quadro pode variar drasticamente, influenciando no cálculo do vazão do algoritmo. Para isto foram inseridos no código métodos que habilitam a transmissão de quadros agregados, tratando de maneira adequada o cálculo das métricas;

- Enviar ao mesmo tempo mais de um fluxo de dados, recurso do MIMO conhecido como SM, é a grande melhoria da rede 802.11n. Por tanto foi acrescentada o suporte a estas transmissões, e também apresentada uma proposta de algoritmo para a escolha do número de fluxos de dados.

Foram realizados experimentos para validar a implementação, e pode-se observar que a ativação dos recursos do padrão 802.11n aumentaram a vazão dos dados em aproximadamente 400%. A utilização de dois fluxos de dados duplicou a vazão, e a utilização de quadros melhorou ainda mais o desempenho. Já a utilização de *Channel Bonding* e SGI não pode ser avaliada, visto que a faixa de frequência suportada pelos dispositivos dos testes não eram apropriadas.

Pode observar que o Mintrel-HT possui um método mais eficaz na escolha das taxas e dos grupos que serão utilizados comparado ao CogTRA-HT. Por isto como trabalhos futuros, pretende-se implementar novas modificações que possibilitem aumentar do desempenho do CogTRA-HT, como um método mais eficiente para a escolha do N_{ss} , e a redução do espaço amostral de taxas elegíveis para uso.

Referências Bibliográficas

- Awerbuch, B.; Holmer, D. ; Rubens, H. The medium time metric: High throughput route selection in multi-rate ad hoc wireless networks. **Mobile Networks and Applications**, v.11, n.2, p. 253–266, Abril 2006.
- Boyd, J. R. **The essence of wining & losing**. Online, Junho 1995. Disponível em http://www.chetrichards.com/modern_business_strategy/boyd/essence/eowl_frameset.htm. Último acesso em 02/03/2010.
- Cardoso, K. V.; Rezende, J. F. Increasing throughput in dense 802.11 networks by automatic rate adaptation improvement. **Journal Wireless Networks**, v.18, p. 95–112, 2012.
- Chaves, L.; Malheiros, N.; Madeira, E.; Garcia, I. ; Kliazovich, D. **A cognitive mechanism for rate adaptation in wireless networks**. In: MACE: Proc. of the IEEE International Workshop on Modelling Autonomic Communication Environments, volume 5844 de **Lecture Notes in Computer Science**, p. 58–71. Springer, Outubro 2009.
- Chaves, L. J. **Um mecanismo cognitivo para adaptação automática da taxa de transmissão em redes ieee 802.11**. Instituto de Computação (IC), Junho 2010. Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP).
- Chaves, L. J.; Madeira, E. R. M. ; Garcia, I. C. CogTRA: A Deployable Mechanism for Cognitive Transmission Rate Adatation in IEEE 802.11 networks. **Journal of Brazilian Computer Society**, 2013. Aceito para publicação.
- Chaves, L. **CogTRA: Cognitive Transmission Rate Adaptation for OpenWrt**. Online, 2013. Disponível em <http://code.google.com/p/cogtra/>. Último acesso em 25/03/2013.
- Friedrich, J.; Frohn, S.; Gubner, S. ; Lindemann, C. **Understanding ieee 802.11n multi-hop communication in wireless networks**. In: Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc and Wireless Networks (WiOpt), 2011 International Symposium on, p. 321 –326, may 2011.
- Halperin, D.; Hu, W.; Sheth, A. ; Wetherall, D. 802.11 with multiple antennas for dummies. **ACM SIGCOMM Computer Communication Review (CCR)**, v.40, p. 19–25, 2010.
- Heusse, M.; Rousseau, F.; Berger-Sabbatel, G. ; Duda, A. **Performance anomaly of 802.11b**. In: INFOCOM: Proc. of the IEEE International Conference on Computer Communications, volume 2, p. 836–843, Abril 2003.
- Hou, J. C.; Park, K. J.; Kim, T. S. ; Kung, L. C. **Medium access control and routing protocols for wireless mesh networks**. In: Wireless Mesh Networks: Architectures and Protocols, chapter 4, p. 77–111. Springer, 2008.

- 802.11b. **Supplement to IEEE Standard for Information Technology - Telecommunications and Information Exchange Between Systems- Local and Metropolitan Area Networks- Specific Requirements- Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: Higher-Speed Physical Layer Extension in the 2.4 GHz Band.** Technical Report 802.11b, IEEE Computer Society, Nova York, EUA, Setembro 1999.
- 802.11a. **Supplement to IEEE Standard for Information Technology - Telecommunications and Information Exchange Between Systems - Local and Metropolitan Area Networks - Specific Requirements. Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: High-Speed Physical Layer in the 5 GHz Band.** Technical Report 802.11a, IEEE Computer Society, Nova York, EUA, Setembro 1999.
- 802.11. **IEEE Standard for Information technology - Telecommunications and information exchange between systems - Local and metropolitan area networks - Specific requirements - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications.** Technical Report 802.11-2007, IEEE Computer Society, Nova York, EUA, Junho 2007.
- 802.11n. **IEEE Standard for Information technology - Telecommunications and information exchange between systems - Local and metropolitan area networks - Specific requirements Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment 5: Enhancements for Higher Throughput.** Technical Report 802.11n, IEEE Computer Society, Nova York, EUA, Outubro 2009.
- Joshi, T.; Ahuja, D.; Singh, D. ; Agrawal, D. P. SARA: Stochastic automata rate adaptation for IEEE 802.11 networks. **IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems**, v.19, n.11, p. 1579–1590, Novembro 2008.
- Kamerman, A.; Monteban, L. Wavelan-ii: A high-performance wireless lan for the unlicensed band. **Bell Labs Tech. J**, v.2, p. 118–133, 1997.
- Kim, T.-S.; Lim, H. ; Hou, J. C. **Improving spatial reuse through tuning transmit power, carrier sense threshold, and data rate in multihop wireless networks.** In: MobiCom: Proc. of the ACM International Conference on Mobile Computing and Networking, p. 366–377, Setembro 2006.
- Kliazovich, D.; Malheiros, N.; Fonseca, N.; Granelli, F. ; Madeira, E. **CogProt: A framework for cognitive configuration and optimization of communication protocols.** In: MobiLight: Proc. of the ICST International Conference on Mobile Lightweight Wireless Systems, Lecture Notes of ICST. Springer, 2010. Aceito para publicação.
- Kurose, J.; Ross, K. **Computer Networking: A Top-Down Approach Featuring the Internet.** 3. ed., Pearson Addison Wesley, 2005.
- M. Lacage, M. M.; Turletti, T. **Ieee 802.11 rate adaptation: A practical approach.** In: ACM MSWiM, Outubro 2004.
- Lakshmanan, S.; Sanadhya, S. ; Sivakumar, R. **On link rate adaptation in 802.11n wlans.** In: INFOCOM, 2011 Proceedings IEEE, p. 366 –370, abril 2011.

- MCS Index Table - Modulation and Coding Scheme.** Online, 2013. Disponível em <http://mcsindex.com/>. Último acesso em 25/03/2013.
- Ben Makhoul, A.; Hamdi, M. **Design and experimentation of rate adaptation for ieee 802.11n wlans.** In: Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), 2011 7th International, p. 13–20, Julho 2011.
- Mccann, S. **Official ieee 802.11 working group project timelines.** Online, Março 2012. Disponível em http://grouper.ieee.org/groups/802/11/Reports/802.11_Timelines.htm. Último acesso em 01/05/2012.
- Nguyen, D.; Garcia-Luna-Aceves, J. **A practical approach to rate adaptation for multi-antenna systems.** In: Network Protocols (ICNP), 2011 19th IEEE International Conference on, p. 331–340, Outubro 2011.
- OpenWRT. **The OpenWRT Project.** Online, 2013. Disponível em <http://openwrt.org/>. Último acesso em 25/03/2013.
- Ortiz, S. Ieee 802.11n: The road ahead. **Computer**, v.42, n.7, p. 13–15, Julho 2009.
- Pefkianakis, I.; Hu, Y.; Wong, S. H.; Yang, H. ; Lu, S. **Mimo rate adaptation in 802.11n wireless networks.** In: Proceedings of the sixteenth annual international conference on Mobile computing and networking, MobiCom '10, p. 257–268, New York, NY, USA, 2010. ACM.
- Pefkianakis, I.; Lee, S.-B. ; Lu, S. Towards mimo-aware 802.11n rate adaptation. **Networking, IEEE/ACM Transactions on**, v.PP, n.99, p. 1, 2012.
- Smithies, D. **Minstrel rate control algorithm.** Online, Janeiro 2005. Disponível em <http://linuxwireless.org/en/developers/Documentation/mac80211/RateControl/minstrel>. Último acesso em 19/10/2012.
- Thomas, R. W.; Friend, D. H.; Dasilva, L. A. ; Mackenzie, A. B. Cognitive networks: adaptation and learning to achieve end-to-end performance objectives. **IEEE Communications Magazine**, v.44, n.12, p. 51–57, Dezembro 2006.
- Xia, Q.; Hamdi, M. ; Ben Letaief, K. Open-loop link adaptation for next-generation ieee 802.11n wireless networks. **Vehicular Technology, IEEE Transactions on**, v.58, n.7, p. 3713–3725, Setembro 2009.