

TRABALHO DE GRADUAÇÃO

MODELAGEM E AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE UM
PROTOCOLO DE CONTROLE DE ACESSO AO MEIO
PARA REDES SEM FIO *AD HOC* COGNITIVAS

Larissa Marinho Eglem de Oliveira
Priscilla Amorim dos Santos Rodrigues

Brasília, fevereiro de 2011

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
Faculdade de Tecnologia

TRABALHO DE GRADUAÇÃO

**MODELAGEM E AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE UM
PROTOCOLO DE CONTROLE DE ACESSO AO MEIO
PARA REDES SEM FIO *AD HOC* COGNITIVAS**

Larissa Marinho Eglem de Oliveira

Priscilla Amorim dos Santos Rodrigues

*Relatório submetido ao Departamento de Engenharia
Elétrica como requisito parcial para obtenção
do grau de Engenheiro de Redes de Telecomunicações*

Banca Examinadora

Prof. Marcelo Menezes de Carvalho, ENE/UnB

Orientador

Prof. Renato Mariz de Moraes, ENE/UnB

Examinador interno

Prof. Luiz A. DaSilva, Virginia Tech

Examinador externo

Dedicatórias

Ao meu marido João Victor, aos meus pais Márcia e Mário e a todos que me apoiaram e que contribuíram para a realização deste trabalho.

Priscilla Amorim dos Santos Rodrigues

À minha família: meus pais, meus avós, meus tios e meus irmãos. Sem vocês não teria chegado aonde cheguei..

Larissa Marinho Eglem de Oliveira

Agradecimentos

Quero agradecer aos meus familiares por sempre me apoiarem na minha jornada, meus avós com seus conselhos, meus pais com incentivos e compreensão, e meus irmãos que tiveram paciência comigo, na maioria das vezes, nos momentos de maior estresse. Quero agradecer especialmente ao meu tio Alexandre, se não fosse por ele não teria cursado Engenharia, ele sempre me deu forças e me ajudou quando mais precisei. Aos meus amigos, Amanda, Priscilla e Pedro, que estiveram ao meu lado e passaram pelos momentos felizes e tristes comigo durante esses cinco anos. Ao meu orientador, Professor Marcelo Menezes de Carvalho, por ter me guiado e me incentivado durante a realização deste trabalho e pela confiança que depositou em mim.

Larissa Marinho Eglem de Oliveira

Primeiramente, a Deus, pela oportunidade de chegar a esse momento. À minha família e aos meus pais, Mário e Márcia, que me apoiaram e batalharam para oferecer todos os recursos possíveis aos meus estudos. Aos meus amigos, em especial a Amanda, Pedro e Larissa, pelos bons momentos nas horas que passamos estudando juntos. Ao meu orientador, Professor Marcelo Menezes de Carvalho, pela paciência e dedicação durante a realização deste trabalho. Um agradecimento especial ao meu marido, João Víctor, por me fazer rir nos momentos de dificuldades e pela plena confiança em mim.

Priscilla Amorim dos Santos Rodrigues

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
3	DESCRIÇÃO DO PROTOCOLO	9
4	MODELO ANALÍTICO	13
4.1	INTRODUÇÃO À FUNÇÃO DE COORDENAÇÃO DISTRIBUÍDA DO IEEE 802.11 (DCF)	13
4.2	MODELAGEM DO IEEE 802.11 DCF MAC	15
4.3	TEMPO MÉDIO DE SERVIÇO	16
4.4	CÁLCULO DA VAZÃO MÉDIA DO PROTOCOLO	17
5	MODELO DE OPERAÇÃO DO RÁDIO COGNITIVO	19
5.1	MODELO DE OCUPAÇÃO DO USUÁRIO PRIMÁRIO	19
5.1.1	MODELO ON-OFF	19
5.1.2	MODELO M/M/M/M	20
5.2	MECANISMO DE BUSCA PARALELO DE CANAIS	21
5.3	MECANISMO DE BUSCA SEQUENCIAL DE CANAIS	22
5.4	MECANISMO DE BUSCA ALEATÓRIA DE CANAIS	24
6	MODELO DE OPERAÇÃO DO RÁDIO COGNITIVO COM INTERFERÊNCIA DO USUÁRIO SECUNDÁRIO	27
6.1	OCUPAÇÃO DO USUÁRIO SECUNDÁRIO	27
6.2	MODELO DE BUSCA PARALELO COM INTERFERÊNCIA DO US	28
6.3	MODELO DE BUSCA SEQUENCIAL COM INTERFERÊNCIA DO US	29
7	AValiação DE DESEMPENHO	31
7.1	ANÁLISE DA PROBABILIDADE DE ACESSO EM RELAÇÃO AO NÚMERO DE CANAIS	31
7.1.1	PROBABILIDADE DE ACESSO EM RELAÇÃO AO NÚMERO DE CANAIS NO MODELO ON-OFF	32
7.1.2	PROBABILIDADE DE ACESSO EM RELAÇÃO AO NÚMERO DE CANAIS NO MODELO ON-OFF COM INTERFERÊNCIA DO US	33
7.1.3	PROBABILIDADE DE ACESSO EM RELAÇÃO AO NÚMERO DE CANAIS NO MODELO M/M/M/M	33

7.1.4	PROBABILIDADE DE ACESSO EM RELAÇÃO AO NÚMERO DE CANAIS NO MODELO M/M/M/M COM INTERFERÊNCIA DO US.....	34
7.2	ANÁLISE DA VAZÃO MÉDIA EM RELAÇÃO AO NÚMERO DE CANAIS	35
7.2.1	VAZÃO MÉDIA EM RELAÇÃO AO NÚMERO DE CANAIS NO MODELO ON-OFF	36
7.2.2	VAZÃO MÉDIA EM RELAÇÃO AO NÚMERO DE CANAIS NO MODELO ON-OFF COM INTERFERÊNCIA DO US	36
7.2.3	VAZÃO MÉDIA EM RELAÇÃO AO NÚMERO DE CANAIS NO MODELO M/M/M/M	37
7.2.4	VAZÃO MÉDIA EM RELAÇÃO AO NÚMERO DE CANAIS NO MODELO M/M/M/M COM INTERFERÊNCIA DO US	39
7.3	ANÁLISE DE DESEMPENHO DO PROTOCOLO PROPOSTO EM RELAÇÃO AO PADRÃO IEEE 802.11	40
7.3.1	ANÁLISE DE DESEMPENHO DO PROTOCOLO PROPOSTO EM RELAÇÃO AO PADRÃO IEEE 802.11 PARA O MODELO ON-OFF.....	41
7.3.2	ANÁLISE DE DESEMPENHO DO PROTOCOLO PROPOSTO EM RELAÇÃO AO PADRÃO IEEE 802.11 PARA O MODELO ON-OFF COM INTERFERÊNCIA DO US.....	42
7.3.3	ANÁLISE DE DESEMPENHO DO PROTOCOLO PROPOSTO EM RELAÇÃO AO PADRÃO IEEE 802.11 PARA O MODELO M/M/M/M	42
7.3.4	ANÁLISE DE DESEMPENHO DO PROTOCOLO PROPOSTO EM RELAÇÃO AO PADRÃO IEEE 802.11 PARA O MODELO M/M/M/M COM INTERFERÊNCIA DO US	43
8	CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO	49

LISTA DE FIGURAS

3.1	Módulo de envio	10
3.2	CAC nega a transmissão nos canais propostos	11
3.3	Transmissão com sucesso nos canais padrão e cognitivo	11
3.4	Falha no envio de dados pelo canal cognitivo no RXcog	12
4.1	Método de acesso do IEEE 802.11 – Básico	14
4.2	Método de acesso do IEEE 802.11 – RTS/CTS.....	15
5.1	Modelo ON-OFF de ocupação do Usuário Primário.	20
5.2	Seleção de Canais: cadeia de Markov da busca sequencial.	23
5.3	Seleção de Canal: cadeia de Markov da busca aleatória.	24
7.1	Probabilidade de um US encontrar um canal ocioso <i>versus</i> o número de canais para o modelo de atividade do UP ON-OFF e modelos de busca de canais <i>paralelo</i> e <i>sequencial</i>	32
7.2	Probabilidade de um US encontrar um canal ocioso <i>versus</i> o número de canais para o modelo de atividade do UP ON-OFF e modelos de busca de canais <i>paralelo</i> e <i>sequencial</i> , considerando a interferência de outros US's.....	33
7.3	Probabilidade de um US encontrar um canal ocioso <i>versus</i> o número de canais para o modelo de atividade do UP M/M/m/m e modelos de busca de canais <i>paralelo</i> e <i>sequencial</i>	34
7.4	Probabilidade de um US encontrar um canal ocioso <i>versus</i> o número de canais para o modelo de atividade M/M/m/m do UP e modelos de busca de canais <i>paralelo</i> e <i>sequencial</i> considerando a interferência de outros US's.	35
7.5	Vazão média <i>versus</i> o número de canais para o modelo de atividade do UP ON-OFF e modelos de busca de canais <i>paralelo</i> e <i>sequencial</i> considerando 10 nós.	36
7.6	Vazão média <i>versus</i> o número de canais para o modelo de atividade do UP ON-OFF e modelos de busca de canais <i>paralelo</i> e <i>sequencial</i> considerando 40 nós.	37
7.7	Vazão Média <i>versus</i> o número de canais para o modelo de atividade do UP ON-OFF e modelos de busca de canais <i>paralelo</i> e <i>sequencial</i> considerando 10 nós e interferência de outros US's.	38
7.8	Vazão Média <i>versus</i> o número de canais para o modelo de atividade do UP ON-OFF e modelos de busca de canais <i>paralelo</i> e <i>sequencial</i> considerando 40 nós e interferência de outros US's.	39

7.9	Vazão Média <i>versus</i> o número de canais para o modelo de atividade do UP M/M/m/m e modelos de busca de canais <i>paralelo</i> e <i>sequencial</i> considerando 10 nós.	40
7.10	Vazão Média <i>versus</i> o número de canais para o modelo de atividade do UP M/M/m/m e modelos de busca de canais <i>paralelo</i> e <i>sequencial</i> considerando 40 nós.	41
7.11	Vazão Média <i>versus</i> o número de canais para o modelo de atividade do UP M/M/m/m e modelos de busca de canais <i>paralelo</i> e <i>sequencial</i> considerando 10 nós e interferência de outros US's.	42
7.12	Vazão Média <i>versus</i> o número de canais para o modelo de atividade do UP M/M/m/m e modelos de busca de canais <i>paralelo</i> e <i>sequencial</i> considerando 40 nós e interferência de outros US's.	43
7.13	Comparação do protocolo proposto com o padrão IEEE 802.11 em relação à vazão média <i>versus</i> o número de canais para o modelo de atividade do UP ON-OFF e modelos de busca de canais <i>paralelo</i> e <i>sequencial</i> considerando 10 nós.	44
7.14	Comparação do protocolo proposto com o padrão IEEE 802.11 em relação à vazão média <i>versus</i> o número de canais para o modelo de atividade do UP ON-OFF e modelos de busca de canais <i>paralelo</i> e <i>sequencial</i> considerando 40 nós.	44
7.15	Comparação do protocolo proposto com o padrão IEEE 802.11 em relação à vazão média <i>versus</i> o número de canais para o modelo de atividade do UP ON-OFF e modelos de busca de canais <i>paralelo</i> e <i>sequencial</i> considerando 10 nós e interferência de outros US's.	45
7.16	Comparação do protocolo proposto com o padrão IEEE 802.11 em relação à vazão média <i>versus</i> o número de canais para o modelo de atividade do UP ON-OFF e modelos de busca de canais <i>paralelo</i> e <i>sequencial</i> considerando 40 nós e interferência de outros US's.	45
7.17	Comparação do protocolo proposto com o padrão IEEE 802.11 em relação à vazão média <i>versus</i> o número de canais para o modelo de atividade do UP M/M/m/m e modelos de busca de canais <i>paralelo</i> e <i>sequencial</i> considerando 10 nós.	46
7.18	Comparação do protocolo proposto com o padrão IEEE 802.11 em relação à vazão média <i>versus</i> o número de canais para o modelo de atividade do UP M/M/m/m e modelos de busca de canais <i>paralelo</i> e <i>sequencial</i> considerando 10 nós.	46
7.19	Comparação do protocolo proposto com o padrão IEEE 802.11 em relação à vazão média <i>versus</i> o número de canais para o modelo de atividade do UP M/M/m/m e modelos de busca de canais <i>paralelo</i> e <i>sequencial</i> considerando 10 nós e interferência do US.	47
7.20	Comparação do protocolo proposto com o padrão IEEE 802.11 em relação à vazão média <i>versus</i> o número de canais para o modelo de atividade do UP M/M/m/m e modelos de busca de canais <i>paralelo</i> e <i>sequencial</i> considerando 40 nós e interferência do US.	47

LISTA DE TABELAS

7.1	Parâmetros da Camada MAC	31
7.2	Valores de π_1	34
7.3	Diferença percentual entre a vazão obtida sem a interferência do US e com a interferência do US para o modelo ON-OFF considerando 10 nós (%).....	37
7.4	Diferença percentual entre a vazão obtida sem a interferência do US e com a interferência do US para o modelo ON-OFF considerando 40 nós (%).....	38
7.5	Diferença percentual entre a vazão obtida sem a interferência do US e com a interferência do US para o modelo M/M/m/m considerando 10 nós (%)	39
7.6	Diferença percentual entre a vazão obtida sem a interferência do US e com a interferência do US para o modelo M/M/m/m considerando 40 nós (%)	40

Capítulo 1

Introdução

A banda Industrial, Científica e Médica (ISM) de 2.400 - 2,500 GHz, 5,150-5,350 GHz e 5,725-5,825 GHz foi criada com o objetivo de apoiar a comunicação de dados de baixa potência e sem licença no espectro espalhado. Mais de dez anos depois, com a crescente demanda por serviços sem fio, em aplicações como WLANs, Bluetooth e Redes pessoais (PAN), a banda ISM está se tornando escassa.

Aliado à escassez do espectro não licenciado e ao desenvolvimento de novos dispositivos projetados para funcionar nessa banda, a política de alocação fixa do espectro também contribui de forma significativa para o agravamento da situação. Pesquisas conduzidas pela FCC (Federal Communications Commission) [Federal Communications Commission 2002], indicam que o espectro licenciado não é utilizado de forma eficiente, ou seja, as bandas licenciadas são sub-utilizadas. Dessa forma, o problema não está na falta de espectro disponível, mas sim na ineficiência do seu uso. Conseqüentemente, faz-se necessário hoje a criação de uma nova política de acesso com o objetivo de atender à crescente demanda dos serviços sem fio.

Tendo em vista a situação exposta anteriormente, recentemente foi proposto o uso de novas tecnologias para o acesso ao meio, tais como o acesso dinâmico ao espectro (SDA), utilizando a nova tecnologia de Rádio Cognitivo (CR) [III, Jr e G.Q. 1999]. Essa nova tecnologia possibilita o acesso oportunista ao espectro sem causar interferência na comunicação dos usuários licenciados, também denominados usuários primários (UP). Essa técnica oferece ao usuário do rádio cognitivo a possibilidade de operar no melhor canal disponível. Mais especificamente, a rádio cognição possibilita aos usuários que irão utilizar o espectro oportunistamente (denominados de usuários secundários (US)) monitorarem o espectro de forma a identificar um “espaço” ou “buraco” no espectro disponível entre os acessos de UPs. Após o sensoriamento do espectro, o US seleciona o melhor canal e coordena os parâmetros de acesso a este canal, tais como frequência, tipo de modulação, potência e taxa de transmissão. Caso seja detectado um usuário licenciado, o canal deve ser então liberado.

No contexto de redes *ad hoc*, em que os nós não têm uma unidade centralizadora coordenadora e por isso se organizam entre si e por consequência competem por recursos do espectro sem dependerem de uma entidade estruturada [Wu e Stojmenovic 2004], protocolos cognitivos de acesso ao meio (MAC) têm um importante papel na tarefa de coordenar a competição pelos recursos

do espectro entre os usuários secundários, detectar a atividade dos usuários primários e explorar bandas disponíveis para acesso oportunista. O protocolo MAC cognitivo deve ainda tomar decisões eficientes em relação ao sensoriamento de espectro, de forma a aprimorar o desempenho das comunicações e evitar o desperdício de recursos.

Neste trabalho de graduação, propomos um novo protocolo de controle de acesso ao meio (MAC) para redes *ad hoc* cognitivas sem fio, desenvolvido sobre o mecanismo DCF padrão do IEEE 802.11. No protocolo proposto, um usuário secundário é capaz de aumentar sua vazão ao acessar bandas licenciadas a partir do padrão IEEE 802.11 em conjunto ao acesso dinâmico do espectro por meio da tecnologia de rádios cognitivos.

Para alcançar esse objetivo, o protocolo a ser detalhado em capítulo posterior, conta com dois rádios. Um rádio é utilizado para competir por canais licenciados de acordo com o mecanismo de negociação padrão do IEEE 802.11, enquanto o outro é projetado como um módulo cognitivo que irá procurar por espaços ociosos no espectro para acessá-los de forma oportunística. Uma vez que o nó (US) adquira o canal padrão (IEEE 802.11), também ganha o direito de transmitir por meio do módulo cognitivo. Não há necessidade de canais de controle, já que o transmissor informa ao receptor as oportunidades de espectro encontradas por meio da troca dos quadros RTS/CTS. O protocolo proposto ainda independe da técnica de detecção de espectro escolhida e também funciona mesmo se não houver uma oportunidade de transmissão por meio do módulo cognitivo.

Após a apresentação do protocolo, focamos em uma modelagem analítica da vazão alcançada pelos usuários secundários para diferentes modelos de ocupação do meio pelos usuários primários. Ainda, derivamos mecanismos de busca de canais, modelando esse mecanismos como cadeias de Markov discretas. Demonstramos que o ganho alcançado na vazão dos nós ao utilizarem o módulo cognitivo depende diretamente da busca de canal escolhida e do comportamento do usuário primário.

Utilizamos dois modelos de ocupação de canal para o usuário primário: modelos ON-OFF e M/M/m/m. Para as duas modelagens, apresentamos três mecanismos de busca de canais pelo usuário secundário: *paralela*, *sequencial* e *aleatória*. Os resultados obtidos são validados por meio de gráficos de desempenho. Por fim, levamos em consideração o impacto de outros usuários secundários na probabilidade de um US encontrar um canal disponível para transmissão oportunista no módulo cognitivo e por consequência seu impacto no desempenho do protocolo proposto.

A principal vantagem do protocolo proposto é a simplicidade, pois ele se baseia em uma tecnologia amplamente utilizada e aceita: o padrão IEEE 802.11. Dessa forma, as principais contribuições do trabalho são:

- Protocolo simples que expande tecnologia já existente, portanto sua implementação é viável;
- Não utiliza canais extras para troca de informações de controle (*single channel*);
- Não depende exclusivamente da disponibilidade de espectro livre em outras bandas para seu funcionamento;
- Leva em consideração o impacto do usuário primário no desempenho do protocolo;

- Modela os mecanismos de busca de canal, os quais são de grande importância na probabilidade de encontrar um canal disponível para transmissão oportuna;
- Pode ser utilizado como alternativa para uso dinâmico dos canais extras definidos pelo padrão IEEE 802.11;
- Protocolo se aplica a redes descentralizadas.

O trabalho é organizado da seguinte forma: o Capítulo 2 apresenta um resumo dos trabalhos já desenvolvidos a cerca de Rádios Cognitivos, o Capítulo 3 descreve o funcionamento do protocolo, o Capítulo 4 faz um resumo do modelo de rede e introduz o padrão IEEE 802.11, o Capítulo 5 trata do modelo de operação do rádio cognitivo, o Capítulo 6 analisa o impacto do US no modelo de operação do rádio cognitivo, o Capítulo 7 apresenta o desempenho do protocolo e o Capítulo 8 apresenta as conclusões.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

Em novembro de 2004, o primeiro esforço para a padronização de um protocolo de camada física (PHY), e de controle de acesso ao meio (MAC) para Rádios Cognitivos (CR) foi desenvolvido com a formação do grupo de trabalho IEEE 802.22 (WG) [Cordeiro, Challapali e Birru 2006]. O padrão IEEE 802.22 define um protocolo MAC centralizado que propõe a utilização de faixas sub-utilizadas — conhecidas como espaços em branco — da banda de serviços de televisão UHF. Ele consiste em uma estação de rádio-base (ERB) que é responsável por administrar suas próprias células e todos os usuários secundários. Os pontos principais do protocolo podem ser resumidos em suporte ao sensoriamento de espectro, recuperação de espectro e à coexistência de diferentes usuários.

O suporte ao sensoriamento de espectro consiste em atribuir, de forma confiável, qual é a fonte da potência recebida pelos usuários primários. Com essa finalidade o protocolo utiliza períodos de tempo ociosos da rede, chamados de *tempo de detecção de canal*, que consistem em dois estágios: sensoriamento rápido e refinado. A recuperação de espectro é definida pelo protocolo de recuperação de detecção de incumbentes (IRDP). Quando um UP é detectado, o IDRP permite que a rede volte a seu estado normal de operação. A coexistência de usuários refere-se à coexistência intra-rede na rede cognitiva, o que pode ser atingido por meio do protocolo de coexistência de beacon (CBP). O CBP é responsável pela comunicação entre células.

A principal desvantagem no protocolo IEEE 802.22 está no fato de ser um protocolo centralizado, o que não é vantajoso para uma rede *ad hoc*.

Uma abordagem mais recente em relação à utilização de bandas UHF por dispositivos não licenciados foi proposta por Bahl et. al [Bahl et al. 2009] com a introdução do *WhiteFi* — um sistema Wi-Fi que opera sobre bandas disponíveis na faixa UHF (a qual abriga principalmente transmissões de TV e de microfones sem fio). As principais contribuições deste trabalho, como evolução em relação às pesquisas anteriores — que focaram principalmente na correta detecção de sinais RF licenciados, e ao recém estudado problema de se estabelecer enlaces sem fio em espaços brancos — são a introdução de técnicas, algoritmos e protocolos para contornar os desafios apresentados ao se tentar estabelecer uma rede sobre faixas UHF inutilizadas, tais como variação espacial e temporal e fragmentação do espectro.

A variação espacial ocorre tanto na banda ISM quanto na faixa UHF, porém nesta o impacto da variação é maior pois as regras impostas pela FCC [Federal Communications Commission 2002]

exigem que os usuários secundários não interfiram nas transmissões dos usuários primários. Uma implicação dessa variação espacial é que o Ponto de Acesso (Access Point - AP) não deve simplesmente selecionar canais baseando-se exclusivamente na sua própria observação. O AP deve levar em conta também a disponibilidade de espectro vista pelo seus clientes. Além da variação espacial, outro problema é a fragmentação espacial, pois como usuários primários podem operar em qualquer porção dos canais inutilizados, a rede deve ser projetada para lidar com a fragmentação do espectro, em que cada fragmento pode apresentar diferentes larguras de banda. A variação temporal apresenta-se devido à presença de transmissões de microfones sem fio, que podem ser ativas em qualquer momento sem aviso.

Para lidar com o problema de variação e fragmentação do espectro, o *WhiteFi* apresenta um novo algoritmo adaptativo de atribuição de espectro que periodicamente reavalia as atribuições baseando-se na disponibilidade dos canais ociosos tanto para o AP quanto para os clientes. Os clientes compartilham informações de suas observações nos canais UHF com o AP. Após fazer um “mapeamento” do espectro e escolher um canal, o AP informa o novo canal a seus clientes que, ao receberem a mensagem, mudam para o novo canal. No caso da variação temporal, o *WhiteFi* propõe um protocolo com pouca informação extra de controle. Basicamente, na abordagem apresentada pelo protocolo, o AP mantém um canal de reserva, que é anunciado em parte de seus pacotes no canal principal. Caso o AP ou um cliente detecte um usuário primário no canal principal, o nó migra para o canal reserva e transmite as informações sobre o canal disponível.

Liangping, Chien-Chung e Bo [Ma, Shen e Ryu 2007] propõem um protocolo denominado SRAC (*Single Radio Adaptive Channel*) que agrupa bandas de frequência de forma adaptativa de acordo com a demanda do usuário secundário (agrupamento dinâmico de canal) e utiliza um método de acesso chamado comunicação por canal cruzado (*cross-channel communication*). O SRAC utiliza apenas um único rádio com comunicação *half-duplex*.

No agrupamento dinâmico de canal, a banda disponível é dividida em unidades menores que podem ser combinadas a fim de ser obter um número maior de bandas de transmissão disponíveis. De acordo com a demanda do US, as bandas de frequência usadas podem ser mudadas adaptativamente levando-se em consideração a carga observada e a atividade do UP.

Para evitar congestionamento na banda e interferência do UP, utiliza-se a comunicação por canal cruzado, na qual um US pode transmitir e receber pacotes em bandas de transmissão diferentes.

O protocolo HCMAC (MAC com restrição de hardware) proposto por Juncheng, Qian e Chien-Chung [Jia, Zhang e Shen 2008] leva em consideração o impacto das limitações de hardware na camada de acesso, tais como as limitações de operação de um rádio único e os limites referentes ao sensoriamento parcial do espectro e agregação de banda, com o intuito de proporcionar acesso e sensoriamento de espectro eficientes.

As limitações de hardware podem ser divididas em limitações de sensoriamento (custo entre o tempo dispendido no sensoriamento e a acurácia das informações obtidas) e limitações de transmissão que são determinadas pela técnica de acesso utilizada — OFDM (Multiplexação Ortogonal por Divisão de Frequência).

Uma regra de parada é apresentada para determinar quantos canais devem ser sensoriados de forma a maximizar o resultado obtido, isto é, quanto maior o número de canais, maior a banda disponível. No entanto, quanto maior o número de canais, maior o tempo gasto no sensoriamento. No caso do rádio cognitivo, a oportunidade de transmissão pode ser desperdiçada caso o UP ocupe o canal ao final do sensoriamento. Juncheng et. al propõem uma técnica para determinar o tempo ótimo de parada.

Liangping et. al [Ma, Han e Shen 2005] propõem um protocolo que combina as bandas disponíveis para transmissão dinamicamente, e utiliza três rádios: um para o canal de controle, um para dados e outro para o som de ocupado (*busy tone*). O som de ocupado permite que outros US's saibam que há uma transmissão ativa em um dado canal, ou seja, quando um nó transmite ou recebe dados em um dado canal, esse nó também emite um sinal de ocupado no canal apropriado. O uso de sinais de ocupado resolve os problemas de terminal exposto e escondido.

A principal desvantagem do protocolo está no uso de três rádios. Especificamente, duas faixas de espectro distintas são usadas para o canal de controle (CCC) e tons de ocupado, levando a um desperdício de banda.

Gabhoosi, MacKenzie e DaSilva em [Ghaboosi et al. 2009] propõem uma seleção estocástica de canais em redes cognitivas distribuídas, além de uma técnica descentralizada de balanceamento de carga para distribuição de tráfego entre um conjunto de canais, baseada na utilização do PU em diferentes canais. Para tal, é proposto um algoritmo de seleção probabilística de canal e um mecanismo de *backoff* exponencial binário de multi-canal (BEB). Cada canal recebe um valor que representa a probabilidade de um UP ocupar aquele canal durante uma transmissão. Uma das vantagens do protocolo proposto por Gabhoosi et. al é o fato de considerar o impacto da probabilidade de um UP transmitir no canal escolhido, o que não é levado em consideração em outros trabalhos.

Ahuja, Cork and Bok [Ahuja, Corke e Bok 2008] propõem um sistema de rádio cognitivo que utiliza o padrão IEEE 802.11a na banda UHF de TV. O sistema utiliza pontos de acesso e estações-base cognitivas que se comunicam com o IEEE 802.11 por meio de uma interface cognitiva. Para determinar a presença de usuários primários (transmissão do sinal de TV) e de outros usuários secundários, além do sensoriamento, também utiliza técnicas de localização geográfica.

Niyato and Hossain [Niyato e Hossain 2009] propõem uma seleção dinâmica de canais para acesso oportunístico de espectro em redes de malha baseadas no padrão IEEE 802.11. A escolha do canal é feita por meio de lógica *fuzzy* e de um algoritmo de aprendizado que coleta informações sobre a intensidade do tráfego e qualidade de transmissão nos canais disponíveis.

As principais desvantagens dos protocolos propostos por Ahuja et. al e Niyato et. al estão no fato de que ambos os sistemas propõem protocolos baseados em cenários específicos (i.e, faixa UHF de TV). Ainda, Ahuja et. al propõem um protocolo centralizado, que não pode ser implementado em redes *ad hoc*.

Apesar dos avanços e trabalhos realizados até então, várias limitações ainda não foram solucionadas, tais como: utilização de canais extra para comunicação de controle, soluções centralizadas e pouco aproveitamento de tecnologias legadas (como IEEE 802.11). Neste trabalho apresentamos

um novo protocolo de acesso ao meio para redes cognitivas *ad hoc* que não utiliza canais extras para comunicação de controle e que se baseia em modificações do protocolo IEEE 802.11, aproveitando grande parte da tecnologia legada existente.

Capítulo 3

Descrição do Protocolo

Neste capítulo descrevemos a operação do protocolo proposto para controle de acesso ao meio em redes ad hoc cognitivas sem fio. A idéia principal do protocolo proposto é transmitir quadros oportunamente em faixas de espectro não utilizadas, em paralelo com os quadros transmitidos por meio dos canais-padrão do IEEE 802.11. Portanto, no protocolo proposto, os nós competem pelo acesso ao canal seguindo o mecanismo padrão do IEEE 802.11 DCF, em suas bandas de frequência pré-definidas. Ainda, cada nó é equipado com um módulo cognitivo que é responsável por encontrar uma faixa de espectro disponível em outras bandas de frequência, além de um segundo rádio que é utilizado para transmissão oportunista nessas bandas. Assume-se que as bandas de frequência alternativas são licenciadas a usuários ditos *Usuários Primários* (UPs). Conseqüentemente, cada nó na rede cognitiva será tratado como um *Usuário Secundário* (US) na banda licenciada, já que seu acesso a essas bandas é feito oportunamente de acordo com o protocolo proposto. Por fim, em adição aos módulos cognitivo e de rádio, cada nó também será equipado com um módulo de envio, constituído por um *buffer* inserido entre as camadas de rede e de enlace, que armazena os pacotes gerados pela camada de aplicação. O módulo de envio também é chamado de pré-fila, pois é a partir deste módulo que os pacotes são encaminhados para a fila da camada de enlace MAC. A pré-fila realiza o controle da distribuição dos pacotes entre as interfaces padrão e cognitiva, como poder ser visualizado na Figura 3.1

As modificações propostas requerem um campo adicional a ser acrescentado aos quadros RTS, CTS and ACK do IEEE 802.11 DCF. Denotaremos esses campos por *requisição de canal disponível* (RAC), *confirmação de canal disponível* (CAC) e *reconhecimento oportunístico* (OPACK), respectivamente. Assume-se que ambos os campos RAC e CAC contêm k bits que representam os possíveis canais disponíveis (um bit ou uma sequência de bits é reservada para indicar a indisponibilidade do canal). O mapeamento dos bits é feito de acordo com o mecanismo de busca utilizado e pode ser adaptado à faixa de frequência de operação a qual o módulo cognitivo foi destinado.

No campo RAC, o transmissor deverá informar qual ou quais canais licenciados, se houver, ele encontrou disponível para troca imediata de informação (se nenhum canal estiver disponível, o campo RAC será preenchido com uma sequência de bits reservada). Ao receber o RTS, o receptor deverá ler o campo RAC e checar a disponibilidade dos canais UP propostos. Este passo é necessário, pois durante a transmissão do RTS, um UP pode ter ocupado os canais propostos, ou,

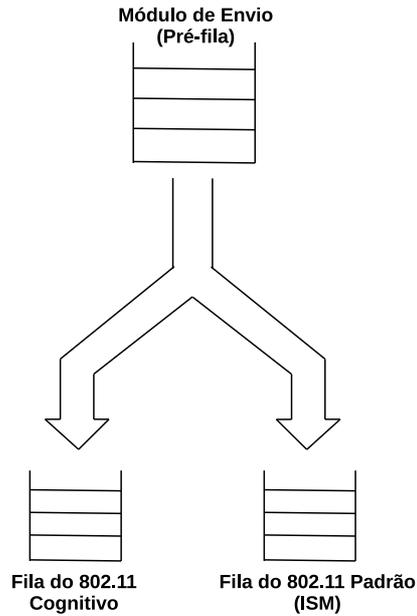


Figura 3.1: Módulo de envio

alternativamente, o transmissor pode ter cometido um erro na decisão da disponibilidade do canal (i.e, o módulo cognitivo pode ter causado um falso positivo devido a uma perda momentânea de intensidade do sinal do UP). Ao seguir esses “passos” o receptor também diminui a probabilidade de causar interferência na atividade de um UP no canal proposto.

Se o receptor aceitar o RTS (i.e, não for impossibilitado de fazê-lo devido à escuta de algum RTS/CTS anterior na sua vizinhança), o receptor checa então o estado dos canais propostos indicados no campo RAC. De acordo com a resposta recebida de seu módulo cognitivo, ele gera um quadro CTS com um campo CAC contendo informações acerca dos canais monitorados por ele mesmo. Ou seja, o campo CAC pode: i) aceitar a transmissão nos canais propostos (nesse caso, o receptor repete a informação do RAC no campo CAC); ii) aceitar a transmissão em um *subconjunto* dos canais propostos (para tal, envia uma sequência de bits correspondentes a esse subconjunto); iii) negar a transmissão nos canais propostos, e enviar a sequência de bits reservada para o caso de indisponibilidade de canal. Esta última hipótese pode ser visualizada na Figura 3.2.

Uma vez que o transmissor recebe o CTS, ele checa o campo CAC. Se a resposta for positiva, um sinal é enviado ao módulo de envio para liberar uma cópia do próximo pacote na fila para imediata transmissão por meio do módulo cognitivo. Após esperar um intervalo de tempo SIFS¹, quadros de informação devem ser transmitidos simultaneamente em ambos os canais (oportunistas e padrão). Se os quadros de informação de ambos os canais são transmitidos com sucesso, um ACK é enviado ao transmissor (após um intervalo de tempo SIFS) com o campo OPACK com valor ‘1’, indicando o recebimento com sucesso nos canais oportunistas, como pode ser visto na Figura 3.3.

¹O intervalo de tempo SIFS deve ser suficientemente longo de forma a permitir a leitura do campo CAC e o envio do próximo quadro de transmissão

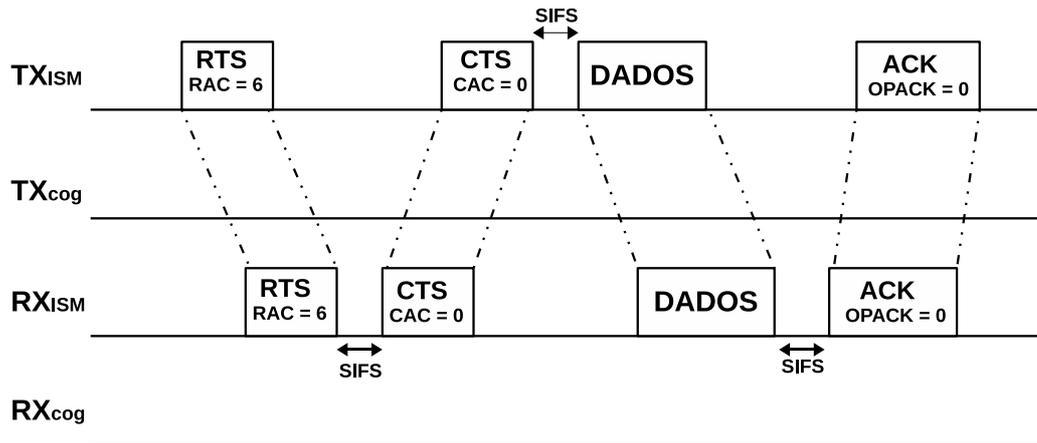


Figura 3.2: CAC nega a transmissão nos canais propostos

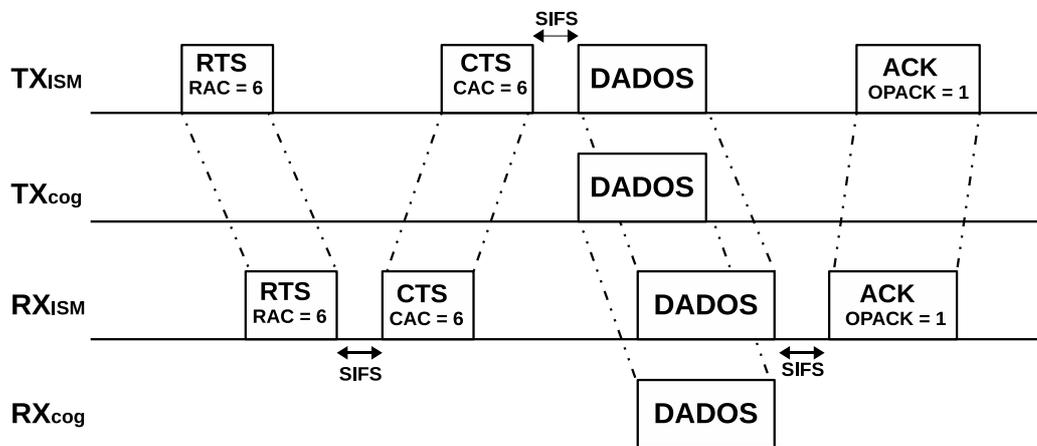


Figura 3.3: Transmissão com sucesso nos canais padrão e cognitivo

Caso contrário, se algum dos quadros enviados *não* for recebido com sucesso, duas situações a serem descritas a seguir podem ocorrer.

1. Se uma transmissão com sucesso só ocorre no canal padrão, então o campo OPACK terá valor '0', indicando falha na transmissão oportunista, como mostrado na Figura 3.4. Nesse caso, o próximo pacote a ser transmitido no canal padrão será aquele para o qual a transmissão oportunística falhou (por isso a necessidade de manter uma cópia dos pacotes a serem transmitidos no módulo de envio).
2. Se a falha ocorrer no canal padrão, abordagens diferentes podem ser tomadas, dependendo se é permitido recebimento de pacotes fora de ordem. A abordagem mais simples é aceitar somente pacotes que cheguem em *ordem*, isto é, descartar os pacotes recebidos com sucesso no canal oportunístico (já que esses pacotes são pacotes subsequentes ao recebido incorretamente no canal padrão). Como consequência, menos armazenamento e controle serão necessários no receptor. Em outra abordagem, pacotes fora de ordem são aceitos, e um rastreamento dos

pacotes recebidos corretamente é necessário, o que demanda mais recursos e controle (uma abordagem baseada em repetição seletiva). Neste trabalho, adotamos a primeira abordagem, por razões de simplicidade.

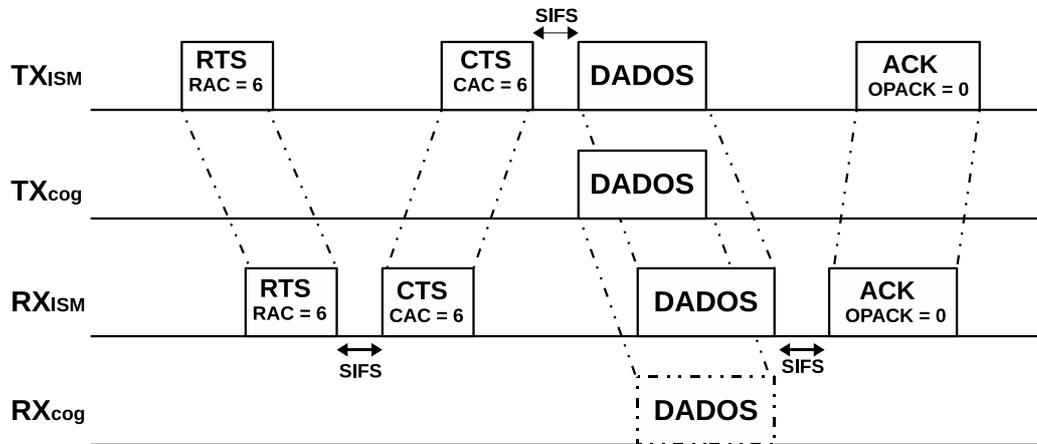


Figura 3.4: Falha no envio de dados pelo canal cognitivo no RX_{cog}

Por fim, se o campo RAC no quadro RTS do transmissor tiver a sequência de bits reservada (i.e., o transmissor não pode encontrar um canal oportunísticamente), o receptor simplesmente responde com a mesma sequência de bits reservada. Nesse caso, não há transferência de informação por meio de canal oportunístico.

Capítulo 4

Modelo Analítico

Neste trabalho, a avaliação de desempenho do protocolo proposto será realizada através da modelagem matemática da operação do protocolo. Mais especificamente, estudaremos o desempenho do protocolo em um cenário em que os nós de rede secundária comunicam-se através de um único enlace sem fio e o canal é considerado perfeito. Como nosso trabalho tem como base a operação do IEEE 802.11 DCF, necessitamos, de antemão, de um modelo analítico para sua operação como ponto de partida. Para esta análise, adotamos a abordagem de modelagem de rede introduzida por Carvalho e Garcia-Luna-Aceves [Carvalho e Garcia-Luna-Aceves 2003]. Apesar desta técnica de modelagem poder ser aplicada a qualquer topologia de rede nos canais sem fio e cenários com múltiplos saltos, focamos, nesse trabalho, em redes IEEE 802.11 DCF com único salto sob condições perfeitas no canal sem fio, isto é, sem considerar aspectos da camada física e o problema do terminal escondido. Isto porque estamos interessados, principalmente, no ganho de desempenho alcançado pelo protocolo proposto quando todos os outros aspectos da rede estão funcionando apropriadamente.

Para melhor compreendermos o mecanismo de funcionamento do protocolo proposto e os resultados derivados nos capítulos posteriores, apresentamos a seguir um resumo do funcionamento do padrão IEEE 802.11 no modo DCF.

4.1 Introdução à Função de Coordenação Distribuída do IEEE 802.11 (DCF)

Primeiramente, é importante introduzirmos alguns conceitos básicos do protocolo IEEE 802.11 DCF MAC a fim de um melhor entendimento do modelo analítico a ser apresentado. O principal mecanismo de acesso ao meio no protocolo IEEE 802.11 é conhecido como *Distributed Coordination Function* (DCF), o qual é um esquema de acesso aleatório baseado no mecanismo CSMA/CA (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*). O IEEE 802.11 DCF define duas técnicas para transmissão de pacotes: a técnica padrão de negociação de duas vias (*two-way handshake*) denominada de *mecanismo de acesso básico*; e uma técnica opcional baseada em negociação de quatro vias (*four-way handshake*) conhecida como *mecanismos RTS/CTS*. No mecanismo de acesso básico um nó, ao transmitir um novo pacote, deve primeiramente monitorar a atividade do canal

a fim de determinar se há outra transmissão ocorrendo. Se o canal estiver disponível por um intervalo de tempo que exceda o valor do parâmetro *distributed interframe space* (DIFS) definido no padrão, o pacote é transmitido. Caso contrário, o nó continua monitorando o canal até percebê-lo ocioso por um intervalo DIFS, e então define um contador aleatório de retardo (*backoff*) com valor escolhido uniformemente entre $[0, W - 1]$. O valor W é conhecido como *janela de contenção* e, para a primeira tentativa de transmissão, possui valor inicial W_{min} . A cada falha de transmissão do mesmo pacote, o valor W é dobrado até alcançar um valor máximo W_{max} , que permanece inalterado nas próximas tentativas mal sucedidas até que ocorra um número máximo e o pacote é descartado. Esse esquema é conhecido como algoritmo de retardo exponencial binário (*exponential backoff*). O tempo de *backoff* é formado por compartimentos de tamanho σ (*slots*), que representam o tempo necessário para um nó detectar a transmissão de um pacote por outro nó. Após definido o valor do contador de *backoff*, o nó continua monitorando o meio e, a cada slot de tempo σ , decrementa o contador caso detecte o canal livre. Se o canal estiver ocupado, o decremento do contador é interrompido até que o nó perceba o meio livre novamente por um intervalo de duração DIFS. Quando o contador atinge o valor zero, o nó transmite o pacote imediatamente. Se o pacote é recebido com sucesso, o receptor envia um pacote de reconhecimento (ACK) — confirmando a recepção bem sucedida — após um intervalo conhecido como *short interframe space* (SIFS). Caso o pacote ACK não seja recebido, o nó emissor assume que ocorreu uma colisão. Com isso valor de sua *janela de contenção* é dobrado (caso não esteja no valor máximo W_{max}). O nó escolhe um valor aleatório dentro da janela para o contador de *backoff* iniciando uma nova contagem. Cada nova contagem é referida como “estágio de *backoff*”. Se o pacote ACK for recebido com sucesso, ou se é atingido o número máximo de retransmissões, a *janela de contenção* é reiniciada, recomeçando assim, o estágio inicial de *backoff* para a transmissão do próximo pacote da fila. Este processo é representado na Figura 4.1.

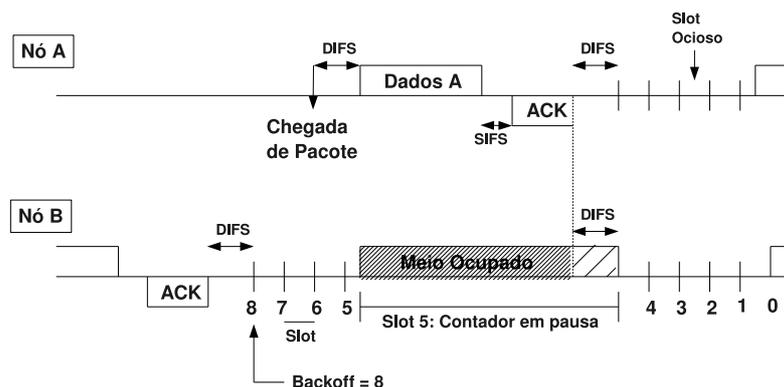


Figura 4.1: Método de acesso do IEEE 802.11 – Básico

No mecanismo de negociação de quatro vias, é exigida a transmissão de pacotes de controle — *request to send* (RTS) e *clear to send* (CTS) — antes da transmissão efetiva do pacote de

dados, como pode ser visualizado na Figura 4.2. O nó emissor envia um pacote RTS para a estação receptora, que responde após um intervalos de duração SIFS, com um pacote CTS. Com a recepção do CTS, o emissor é autorizado a enviar o pacote de dados. A transmissão do par RTS/CTS segue as mesma regras da transmissão de pacote de dados do *mecanismo básico de acesso*, e funciona como uma espécie de reserva de canal, isto é, os pacotes RTS/CTS carregam a informação do tamanho do pacote de dados a ser transmitido. Essa informação pode ser lida por cada estação, que mantém um vetor de alocação de rede (*network allocation vector (NAV)*). O NAV contém a informação do período de tempo em que o canal estará ocupado.

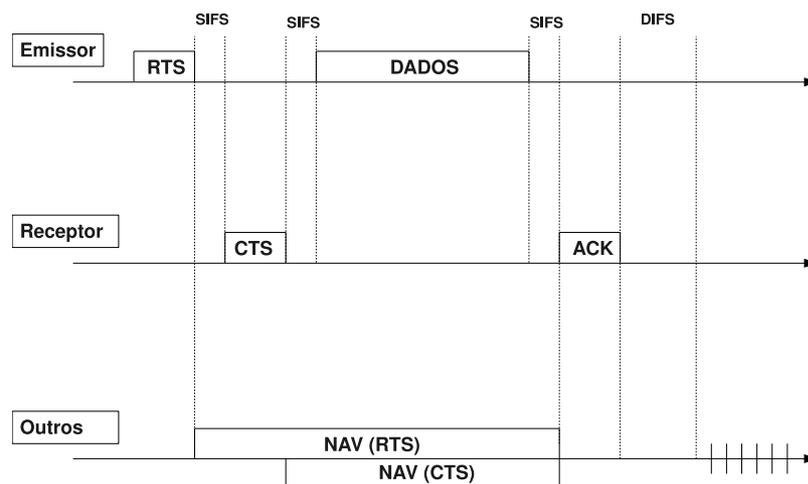


Figura 4.2: Método de acesso do IEEE 802.11 – RTS/CTS

4.2 Modelagem do IEEE 802.11 DCF MAC

Um trabalho tradicional na literatura a respeito da modelagem do IEEE 802.11 DCF MAC é a proposta apresentada por Bianchi [Bianchi 2000], que apresentou uma maneira de se calcular a vazão em redes totalmente conectadas (*fully-connected*) ao modelar o contador de retardo exponencial binário do IEEE 802.11 DCF MAC segundo uma cadeia de Markov discreta bidimensional. Para se determinar as probabilidades de transição da cadeia, Bianchi assumiu que cada quadro (*frame*) colide com uma probabilidade constante e independente p — referida como *probabilidade condicional de colisão* — a cada tentativa de transmissão e independente do número de retransmissões já realizadas. A partir da cadeia de Markov, pode-se obter, também, a probabilidade estacionária τ de um nó transmitir a qualquer instante, a qual é função da probabilidade de colisão condicional e de outros parâmetros do algoritmo de retardo do IEEE 802.11 DCF. Porém, um problema neste modelo é fato de ele considerar que os quadros de dados e RTS devam ser retransmitidos indefinidamente até conseguirem ser transmitidos com sucesso. Outra limitação é o fato de se considerar colisões restritas ao RTS, já que se assume que a rede é totalmente conectada sob perfeitas condições do canal.

O modelo introduzido por Carvalho [Carvalho e Garcia-Luna-Aceves 2003] incorpora, no mo-

delo de Bianchi, o número finito de retransmissões e considera erros em ambos os quadros de controle e de dados, além de considerar aspectos da camada física e a atividade de detecção de portadora dos nós. Dessa forma, podemos encontrar o parâmetro τ de uma maneira mais realista, o que é de extrema importância para o cálculo de métricas de desempenho da rede, tais como vazão e tempo médio de serviço.

Para o cálculo de τ_i , em que o número de nós na rede é dado por $|V| = n$, sendo V o conjunto de nós, $i \in V$, a falha na troca dos quadros RTS/CTS é assumida acontecer com uma probabilidade constante e independente p_i , e a troca de quadros DATA/ACK falha com uma probabilidade d_i . Podemos também assumir que o nó detecta o canal ocupado com uma probabilidade constante e independente g_i . É importante mencionar que esta consideração de independência é em relação ao número de retransmissões, porém p_i , d_i e g_i são dependentes de aspectos da camada física.

De acordo com o desenvolvimento apresentado por Carvalho [Carvalho 2006], temos que a probabilidade τ_i de um nó i tentar iniciar o mecanismo de negociação em qualquer instante é dado por:

$$\tau_i = \frac{2(1 - g_i)(1 - a_i^{M+1})(1 - 2a_i)}{(1 - a_i^{M+1})(1 - 2a_i)(1 - 2g_i) + \kappa W}, \quad (4.1)$$

sendo $a_i = p_i + d_i(1 - p_i)$, m representa o estágio de *backoff* com valor máximo M , $\kappa = (1 - p_i) [1 - (2p_i)^{M+1}]$ se $m = M$, e $\kappa = 1 - p_i \{1 + (2p_i)^m [1 + p_i^{M-m}(1 - 2p_i)]\}$ para $m < M$.

Como as probabilidades p_i , d_i e g_i , $i \in V$, dependem de τ_i , Carvalo [Carvalho 2006] propõe uma aproximação linear do sistema acoplado para o cálculo dos τ_{is} , usando a técnica de matrizes de interferência. A partir do cálculo de τ_i pode-se determinar várias medidas de desempenho como o tempo médio de serviço e, conseqüentemente, da vazão. Esta, por sua vez, dependerá, em última análise, em quão frequente os nós agendam suas transmissões e em quão bem sucedidos eles são, com impacto conseqüente nas taxas de transmissão de todos os outros nós na rede.

4.3 Tempo Médio de Serviço

Nessa seção apresentamos sucintamente o cálculo do tempo médio de serviço de um nó de forma a obtermos em seguida a vazão média do protocolo proposto.

A partir do cálculo de τ_i , e levando em consideração as probabilidades apresentadas p_i , d_i e g_i , podemos chegar à obtenção das *probabilidades de estado do canal*, isto é, o estado do canal percebido pelo nó durante o intervalo de *backoff*. O canal pode ser percebido pelo nó como *ocupado* ou *ocioso*. Se o canal é percebido como *ocupado* é porque ocorreu uma transmissão bem sucedida no canal ou uma *colisão*. Entende-se como *colisão* o evento em que a negociação falhou. Logo, as *probabilidades de estado do canal* podem ser definidas como $p_i^{ocioso} = P[\text{canal ocioso}]$, $p_i^{suc} = P[\text{handshake bem sucedido}]$ e $p_i^{nsuc} = P[\text{handshake falho}]$. Com a derivação dessas probabilidades pode-se caracterizar o tempo de retardo médio \bar{T}_{Bi} experimentado por cada nó.

Dado a caracterização do *tempo médio de retardo* \bar{T}_{Bi} de cada nó $i \in V$, podemos proceder com o cálculo do *tempo médio de serviço* \bar{T}_i^{ser} , que representa o intervalo médio de tempo compreendido desde o instante em que um quadro de dados é retirado da fila de saída até o instante em que o nó decide se o quadro foi transmitido com sucesso ou se necessita ser descartado depois de ultrapassar o

número máximo de retransmissões (de acordo com o IEEE 802.11 DCF MAC). Podemos considerar que um quadro pode ser descartado com uma probabilidade p_i^{drop} , e que é transmitido com sucesso com uma probabilidade $1 - p_i^{drop}$, logo o *tempo médio de serviço é dado por*:

$$\overline{T}_i^{ser} = (1 - p_i^{drop})\overline{T}_i^{suc} + p_i^{drop}\overline{T}_i^{drop}, \quad (4.2)$$

sendo que \overline{T}_i^{suc} representa o tempo médio de serviço gasto em um quadro de dados se este é transmitido com sucesso. Neste caso, \overline{T}_i^{suc} é dado basicamente pelo tempo médio gasto no *backoff*, \overline{T}_{Bi} , mais o tempo médio gasto em uma negociação de quatro vias bem sucedida. Já \overline{T}_i^{drop} é o tempo médio de serviço gasto se um quadro é descartado e é dado pelo tempo médio gasto no backoff até o M-ésimo estágio (se o quadro de dados é descartado, significa que ele já foi retransmitido M vezes) mais o tempo médio gasto na resolução de uma colisão.

Outra importante métrica que devemos considerar é o *tempo médio \overline{T}_i entre a conclusão de duas transmissões bem sucedidas de quadro de dados*. Tal como \overline{T}_i^{drop} e \overline{T}_i^{suc} , \overline{T}_i

$$\overline{T}_i = \overline{T}_i^{suc} + \frac{p_i^{drop}}{1 - p_i^{drop}}\overline{T}_i^{drop}, \quad \forall i \in V \quad (4.3)$$

Este intervalo é o que utilizaremos para o cálculo da vazão, como veremos a seguir.

4.4 Cálculo da Vazão Média do Protocolo

Para calcularmos a vazão média do protocolo proposto, mostramos a seguir a vazão para o padrão IEEE 802.11 DCF.

A vazão média para o IEEE 802.11 DCF MAC é determinada, basicamente, pela razão da quantidade média de dados úteis que o nó transmite com sucesso por unidade de tempo. Como estamos lidando com redes saturadas, podemos descrever a vazão média S_i alcançada por cada nó $i \in V$ na rede como a razão entre o tamanho médio de carga útil (*payload*) P_i que um nó transmite e o intervalo médio \overline{T}_i entre a conclusão da transmissão bem sucedida de dois quadros de dados. Ou seja,

$$S_i = \frac{\overline{P}_i}{\overline{T}_i} = \frac{\overline{P}_i}{\overline{T}_i^{suc} + \left(\frac{p_i^{drop}}{1 - p_i^{drop}}\right)\overline{T}_i^{drop}}, \quad \forall i \in V \quad (4.4)$$

Como mencionado na Sessão 3, no protocolo proposto, o US tentará transmitir oportunista-mente em canais livres encontrados na faixa licenciada do espectro, concorrentemente com a transmissão padrão na banda ISM. Dessa forma, o US aumentará a vazão média do protocolo 802.11 DCF apresentado acima. Para que o US consiga transmitir oportunista-mente, a transmissão pelo módulo cognitivo dependerá de dois fatores. Primeiramente, dependerá da probabilidade de um US encontrar um canal livre na banda licenciada, imediatamente antes de tentar a primeira transmissão do RTS. Esta probabilidade está relacionada principalmente com o *mecanismo de busca de canais* livres utilizado, cujos detalhes apresentaremos no próximo capítulo. De forma genérica, por enquanto, chamaremos essa probabilidade de β . Em segundo lugar, após o US conseguir um

canal livre, a transmissão oportunista ainda dependerá da ocorrência com sucesso do mecanismo de negociação. Denominaremos essa probabilidade de sucesso como α . Portanto, ϕ é a probabilidade de um US conseguir enviar um pacote de forma oportunista. Sabendo que a probabilidade de transmissão e negociação bem sucedidas são independentes entre si, então ϕ é dado por:

$$\begin{aligned}
\phi &= P[\text{US ter transmissão bem sucedida no módulo cognitivo}] \\
&= P[\{\text{US encontrar um canal livre}\} \cap \{\text{negociação bem sucedida}\}] \\
&= P[\text{US encontrar um canal livre}] \times P[\text{negociação bem sucedida}] \\
&= \beta \times \alpha
\end{aligned} \tag{4.5}$$

Portanto, a vazão alcançada pelo módulo cognitivo será dada pela vazão alcançada na transmissão padrão IEEE 802.11 ponderada pela probabilidade de o US encontrar um canal livre e ocorrer o mecanismo de negociação com sucesso nesse canal.

$$S_i^{cog} = \frac{\phi \bar{P}_i}{\bar{T}_i}, \quad \forall i \in V. \tag{4.6}$$

A vazão total para cada nó i será a vazão alcançada na transmissão regular mais a vazão alcançada pelo módulo cognitivo:

$$S_i = \frac{\bar{P}_i}{\bar{T}_i} + \phi \frac{\bar{P}_i}{\bar{T}_i}, \quad \forall i \in V. \tag{4.7}$$

Por fim, a vazão média para todos os nós será dada por:

$$\bar{S} = \frac{(1 + \phi)\bar{P}}{\bar{T}^{suc} + \left(\frac{p^{drop}}{1-p^{drop}}\right)\bar{T}^{drop}} \tag{4.8}$$

Observe que, se tratarmos de redes com único enlace, $\tau = \tau_i, \forall i \in V$.

A probabilidade α da negociação ser bem sucedida depende do receptor concordar com o canal sugerido pelo emissor e a troca dos quadros ocorrer com sucesso, na hipótese de um canal não ideal. Como em nossa análise estamos considerando um cenário de único salto com canais sob perfeitas condições (não se considera aspectos da camada física), consideraremos a probabilidade α igual a um. Logo, $\phi = \beta$.

Capítulo 5

Modelo de Operação do Rádio Cognitivo

A probabilidade de um US encontrar um canal disponível depende diretamente da técnica de busca de canal escolhida e do padrão de uso do UP nas faixas a serem monitoradas. Para avaliarmos o desempenho do protocolo proposto, precisamos considerar diferentes mecanismos de detecção de espectro. Neste capítulo, iremos apresentar três mecanismos de busca de canal. No primeiro, assumimos que o US é capaz de monitorar todas as bandas simultaneamente. No segundo mecanismo, o US procura por um canal disponível “escutando” sequencialmente cada canal até encontrar um disponível. No último caso, o US efetua uma busca aleatória até encontrar um canal disponível.

5.1 Modelo de Ocupação do Usuário Primário

Nesta seção apresentamos dois modelos analíticos para descrever a ocupação do usuário primário nos canais. Um modelo simples, porém amplamente utilizado na literatura, é o modelo ON-OFF [Su e Xi 2008] em que a presença do UP em um canal determina se este está ocupado ou ocioso. A partir desse modelo, podemos definir a *atividade do usuário primário*, ou seja, a probabilidade de um UP estar utilizando algum canal.

Podemos modelar também a ocupação do UP por meio de um sistema de filas M/M/m/m (*m-SERVER LOSS SYSTEM*). Nesse modelo, considera-se que existam m canais e que a chegada de usuários no sistema é Poissoniana. A partir do momento que os m canais estão ocupados (por m UPs), novas tentativas de ocupação por outros usuários são bloqueadas, não havendo a formação de filas. Assim, observamos que sistema de filas M/M/m/m é um dos mais adequados para análise de modelos de ocupação de canais por usuários primários.

5.1.1 Modelo ON-OFF

Podemos modelar o estado de um canal como uma cadeia de Markov de tempo discreto com dois estados: ocupado ou ocioso. O estado ocupado indica que um usuário primário está transmitindo no canal e, desse modo, o usuário secundário não pode utilizá-lo. Denominamos o estado do canal como ON. No estado ocioso — OFF — o UP não está presente, deixando assim o canal disponível

para o SU. Esse modelo está representado na Figura 5.1.

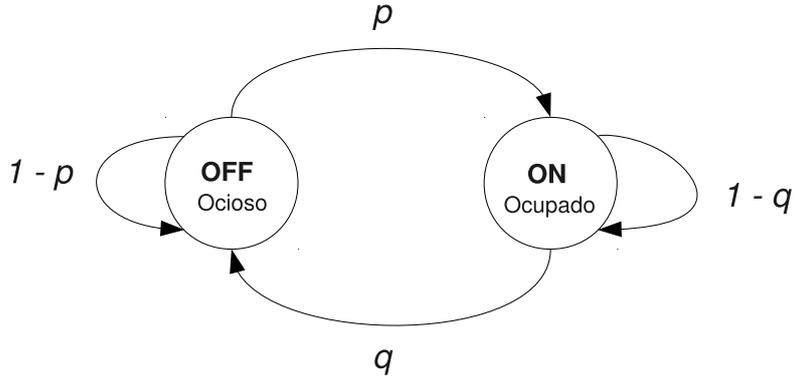


Figura 5.1: Modelo ON-OFF de ocupação do Usuário Primário.

Em relação ao estado OFF, considere a probabilidade de transição para o estado ON igual a p e a probabilidade de não haver transição $1 - p$. Da mesma forma, para o estado OFF as probabilidades de transição e não transição são iguais a q e $1 - q$ respectivamente.

Considerando π_0 como sendo a probabilidade estacionária de se estar no estado ON, e π_1 a probabilidade estacionária de se estar no estado OFF, temos que:

$$\pi_1 = \frac{p}{p + q} \quad (5.1)$$

$$\pi_0 = \frac{q}{p + q} \quad (5.2)$$

No texto, referimos também a π_1 como sendo a *atividade do usuário primário*, ou seja, a probabilidade de um UP está presente no sistema.

5.1.2 Modelo M/M/m/m

O sistema M/M/m/m é um processo Markoviano de nascimento e morte com um número m de servidores e um número máximo de usuários também igual a m , ou seja, caso chegue um número de usuários maior que m , estes não terão acesso ao sistema, de forma que não há formação de filas.

Assume-se que a chegada dos usuários é Poissoniana com taxa λ , e o tempo médio de serviço é dado por μ^{-1} . Logo,

$$\lambda_k = \begin{cases} \lambda & k < m \\ 0 & k \geq m. \end{cases}$$

Sendo que $\mu_k = k\mu$ para $k = 1, 2, \dots, m$.

Então, a probabilidade de haver k usuários no sistema é dada por [Kleinrock 1975]:

$$\begin{aligned}
P_k &= P[\text{haver } k \text{ usuários primários no sistema}] \\
&= P_0 \prod_{i=0}^{k-1} \frac{\rho}{i+1} \\
&= \begin{cases} P_0 \left(\frac{\rho^k}{k!} \right), & k \leq m \\ 0, & k > m \end{cases} \tag{5.3}
\end{aligned}$$

Sendo $\rho = \frac{\lambda}{\mu}$ e P_0 a probabilidade de não haver usuários primários no sistema é dada por:

$$P_0 = \left[\sum_{k=0}^m \rho^k \frac{1}{k!} \right]^{-1} \tag{5.4}$$

Dessa forma, a probabilidade de haver pelo menos um canal ocupado no sistema é dada por:

$$\begin{aligned}
\pi_1 &= P[\text{haver pelo menos um UP no sistema}] \\
&= 1 - P[\text{não haver UP no sistema}] \\
&= 1 - P_0 \tag{5.5}
\end{aligned}$$

Desta forma, π_1 representa a *atividade do usuário primário no sistema*.

5.2 Mecanismo de Busca Paralelo de Canais

Este mecanismo de busca de canais é denominado *paralelo* pois considera-se que o US é capaz de monitorar todos os canais simultaneamente. É fácil observar que o US somente não encontrará canais disponíveis para transmitir oportunamente se todos os canais estiverem ocupados pela presença de um UP. Consideramos n canais para o cálculo da probabilidade de o US encontrar pelo menos um canal ocioso (β), assim:

$$\begin{aligned}
P[\text{US encontrar pelos menos um canal disponível}] &= 1 - P[\text{UP estar ativo em todos os canais}] \\
&= 1 - P[\{\text{UP estar ativo no canal 1}\} \cap \dots \cap \{\text{UP estar ativo no canal } n\}]
\end{aligned}$$

Como já visto anteriormente, $P[\text{UP estar ativo}] = \pi_1$. Assumindo que uma população fixa de UP's escolhem canais de forma uniformemente distribuída, e que os eventos "escolher um canal" e "UP estar ativo" são independentes, temos:

$$\begin{aligned}
P[\text{UP estar ativo no canal } i] &= P[\{\text{UP estar ativo}\} \cap \{\text{UP escolher um canal } i\}] \\
&= P[\text{UP estar ativo}] \times P[\text{UP escolher um canal } i] = \pi_1 \times \frac{1}{n} \tag{5.6}
\end{aligned}$$

Portanto,

$$\begin{aligned}
P[\text{US encontrar pelos menos um canal disponível}] &= 1 - \prod_{i=1}^n P[\text{UP estar ativo no canal } i] \\
&= 1 - \left(\frac{\pi_1}{n} \right)^n \tag{5.7}
\end{aligned}$$

5.3 Mecanismo de Busca Sequencial de Canais

Outra técnica de busca de canais apresentada é a *busca sequencial*, em que um usuário secundário monitora um canal por vez. Apesar dessa limitação em relação ao mecanismo *paralelo*, que permite ao US perceber atividade do UP em uma vasta gama de canais, ao mesmo tempo, o mecanismo *sequencial* é mais realista e compatível com as tecnologias de hardware atuais.

Nesta técnica, o US inicia a busca escolhendo aleatoriamente um canal e monitorando-o, de modo que, se o canal estiver ocupado pela presença de um UP, o US continuará a busca monitorando o próximo canal. Se o US perceber tal canal ocioso, selecionará este para transmissão oportunista até o aparecimento de um UP. Ao perceber a presença do UP, o US continuará a busca por um canal disponível sensoriando o próximo. Observe que o US sempre procurará por um canal selecionando o próximo em ordem crescente, ou seja, ao perceber um canal ocupado, o US não voltará a escutar o anterior, visto que existe uma alta probabilidade de o UP ainda estar transmitindo neste canal.

Este processo pode ser modelado por uma cadeia de Markov bidimensional discreta, em que os estados da cadeia representam o número do canal e se ele está *ocupado* ou *ocioso*. Denominamos as probabilidades de transição entre estados como: P_{Listen} , a qual é a probabilidade de o US partir para escuta do próximo canal caso sinta-o ocupado pela presença do UP; P_{Lock} , a probabilidade de o US continuar em um canal depois de percebê-lo ocioso; e P_{Leave} , que representa a probabilidade de o US, ao perceber a chegada de um UP no canal que está utilizando, partir para a escuta do próximo canal.

As probabilidades de transição dos estados podem ser determinadas considerando a utilização do UP. Na visão do US, assumindo uma população fixa de UP's e um conjunto de n canais, o processo de ocupação de canais pelo UP pode ser considerado como uniformemente distribuído. A fim de determinar as probabilidades de transição P_{Lock} , P_{Listen} e P_{Leave} , considere (como determinado na Seção 5.2) que $P[\text{UP estar ativo em um canal } i] = P[\{\text{UP estar ativo}\} \cap \{\text{UP escolher um canal } i\}] = \frac{\pi_1}{n}$ e que $P[\text{UP estar inativo em um canal } i] = 1 - \frac{\pi_1}{n}$. Seja $X_i \in [1, n]$ uma variável aleatória que representa o canal em que o US está monitorando no i -ésimo passo. Lembrando que cada canal pode assumir dois estados para o US — *Listen* ou *Lock* — definimos a variável aleatória Y_i para representar o estado do canal, isto é, Y_i assume valor 0 para o estado *Listen* e valor 1 para o estado *Lock*. Esta cadeia de Markov pode ser visualizada na Figura 5.2.

Vamos considerar a seguinte notação:

$$P\{x_1, y_1 | x_0, y_0\} = P\{X_i = x_1, Y_i = y_1 | X_{i-1} = x_0, Y_{i-1} = y_0\}$$

A partir da cadeia de Markov mostrada na Figura. 5.2, as probabilidades não nulas de transição são dadas por:

$$P\{x + 1, 0 | x, y\} = \frac{\pi_1}{n}, \quad x \in [1, n - 1], \quad y \in [0, 1] \quad (5.8)$$

$$P\{1, 0 | x, 1\} = \frac{\pi_1}{n}, \quad x = n \quad (5.9)$$

$$P\{1, 0 | x, 0\} = \frac{\pi_1}{n}, \quad x = n \quad (5.10)$$

$$P\{x, 1 | x, y\} = 1 - \frac{\pi_1}{n}, \quad x \in [1, n], \quad y \in [0, 1] \quad (5.11)$$

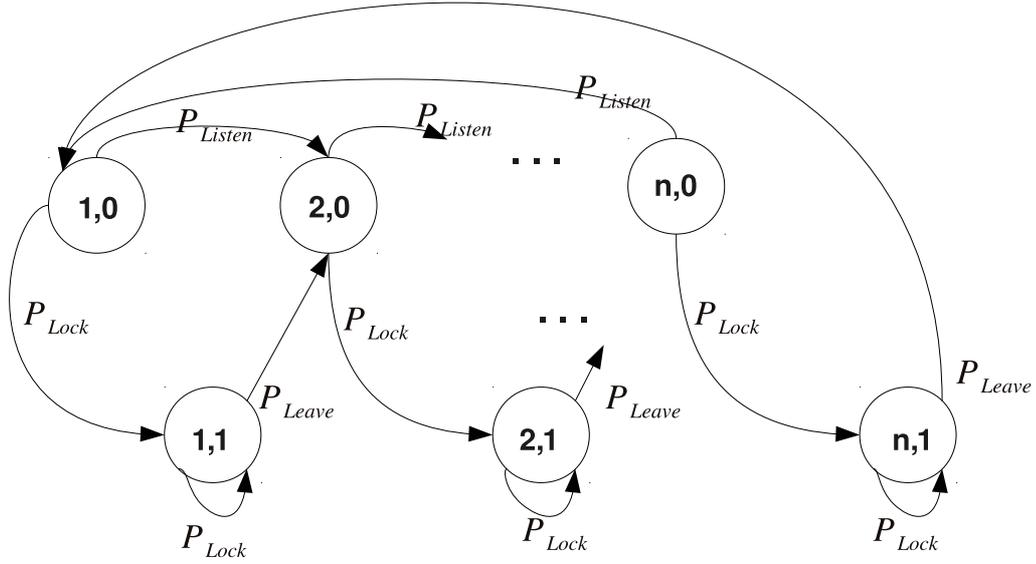


Figura 5.2: Seleção de Canais: cadeia de Markov da busca sequencial.

A Equação (5.8) indica que se o US estiver em um canal em estado *Listen* ou *Lock* e detectar atividade de um UP, o US irá monitorar o próximo canal. A Equação (5.9) representa que se o US estiver em estado *Lock* no último canal e detectar atividade do UP, voltará para a escuta do primeiro canal. A Equação (5.10) indica que se o US estiver em estado *Listen* no último canal, e como na situação anterior, detectar atividade do UP, voltará para a escuta do primeiro canal. As Equações (5.8), (5.9) e (5.10) representam as probabilidades P_{Listen} e P_{Leave} . A Equação (5.11) representa que se o US escutar o canal e percebê-lo ocioso, o escolherá para transmissão. Esta equação indica também que até o aparecimento do UP, o US permanecerá utilizando esse mesmo canal. Denominamos esta probabilidade como P_{Lock} .

Estamos interessados nas probabilidades estacionárias do US estar no estado *Listen* ou *Lock*. Denotamos γ_i^{Listen} como a probabilidade estacionária do estado *Listen* e γ_i^{Lock} a probabilidade estacionária do estado *Lock*, em que $1 \leq i \leq n$ representa o canal.

Resolvendo a cadeia de Markov, as probabilidades estacionárias de cada estado são dadas por:

$$\begin{aligned}\gamma_i^{Listen} &= \frac{\pi_1}{n^2}, & 1 \leq i \leq n \\ \gamma_i^{Lock} &= \frac{1}{n} - \frac{\pi_1}{n^2}, & 1 \leq i \leq n\end{aligned}$$

A probabilidade estacionária do US estar em *qualquer canal* no estado *Listen* é:

$$\begin{aligned}\gamma_{Listen} &= P[\{\text{US em estado Listen no canal 1}\} \cup \dots \cup \{\text{US em estado Listen no canal } n\}] \\ &= \sum_{i=1}^n P[\text{US em estado Listen no canal } i] = \frac{\pi_1}{n}\end{aligned}\tag{5.12}$$

, uma vez que os eventos são mutuamente exclusivos.

Similarmente, temos a probabilidade estacionária de o US estar no estado *Lock*:

$$\gamma_{Lock} = 1 - \frac{\pi_1}{n} \quad (5.13)$$

Observe que a probabilidade estacionária γ_{Listen} representa a probabilidade de o US estar procurando por um canal. Já γ_{Lock} nos dá a probabilidade de o US conseguir um canal para transmissão.

5.4 Mecanismo de Busca Aleatória de Canais

No mecanismo de *busca aleatória*, o usuário secundário procura um canal disponível monitorando um canal por vez, mas não de modo sequencial como mostrado na Seção 5.3, e sim aleatoriamente. Deste modo, ao detectar a presença de um UP em um determinado canal, o US decide qual o próximo canal irá monitorar sorteando uniformemente um canal entre os $n - 1$ canais restantes (o US nunca sorteará o mesmo canal, pois há grande possibilidade do UP ainda estar transmitindo naquele canal). As probabilidades de transição entre estados são as mesmas apresentadas para o modelo de busca *sequencial*, isto é, P_{Listen} , P_{Lock} e P_{Leave} . A única diferença é na escolha dos canais monitorados, que agora será feita de maneira aleatória. Este processo pode ser representado pela cadeia de Markov vista na Figura 5.3. As probabilidades de transição são dadas

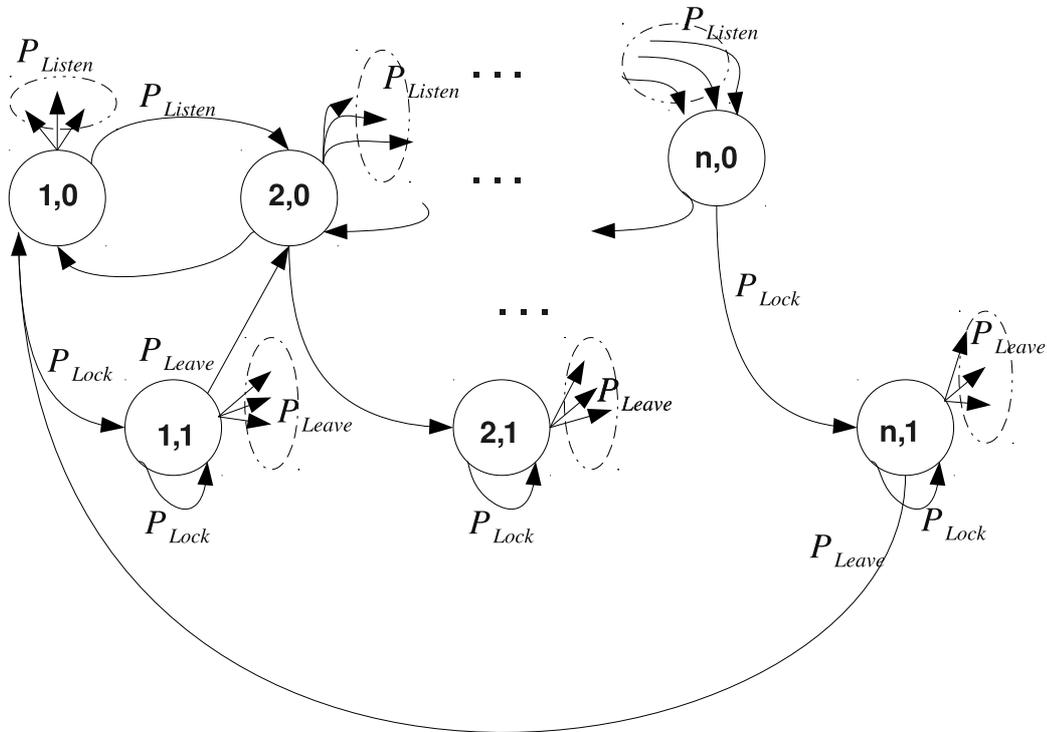


Figura 5.3: Seleção de Canal: cadeia de Markov da busca aleatória.

por:

$$\begin{aligned}
P_{Listen} &= P[\{\text{UP estar ativo em um canal } i\} \cap \{\text{US escolher um canal entre os } n-1 \text{ restantes}\}] \\
&= P[\{\text{UP estar ativo em um canal } i\}] \times P[\{\text{US escolher um canal entre os } n-1 \text{ restantes}\}] \\
&= \frac{\pi_1}{n} \frac{1}{n-1}
\end{aligned}$$

Assume-se que $P_{Listen} = P_{Leave}$ e que $P_{Lock} = P[\text{UP estar inativo em um canal } i] = 1 - \frac{\pi_1}{n}$. Considerando a mesma notação utilizada na Seção 5.3:

$$P\{x_1, y_1 | x_0, y_0\} = P\{X_i = x_1, Y_i = y_1 | X_{i-1} = x_0, Y_{i-1} = y_0\}$$

Temos que as probabilidades não nulas de transição são:

$$P\{x+n, 0 | x, 0\} = \frac{\pi_1}{n(n-1)}, \quad x \in [1, n-1], \quad y \in [0, 1] \quad (5.14)$$

$$P\{x+n, 0 | x, 1\} = \frac{\pi_1}{n(n-1)}, \quad x = n \quad (5.15)$$

$$P\{1, 0 | x, y\} = \frac{\pi_1}{n(n-1)}, \quad x = n \quad (5.16)$$

$$P\{x, 1 | x, y\} = 1 - \frac{\pi_1}{n}, \quad x \in [1, n], \quad y \in [0, 1] \quad (5.17)$$

A Equação 5.14 indica que se o US está em canal em estado *Listen* e detecta atividade do UP, então o US irá escolher o próximo canal aleatoriamente entre os $n-1$ canais restantes. A Equação 5.15 representa que se o US estiver em estado *Lock*, porém detectar atividade do UP, voltará para a escuta do próximo canal. A Equação 5.16 indica que se o US estiver em estado *Lock* ou *Listen* no último canal, e como na situação anterior, detectar atividade do UP, então voltará para a escuta do primeiro canal. As três primeiras equações representam as probabilidades P_{Listen} e P_{Leave} . A Equação 5.17 representa que se o US escutar o canal e perceber a ausência do UP, o escolherá para transmissão. Até o aparecimento do UP, o US permanecerá utilizando esse mesmo canal. Esta equação é a probabilidade P_{Lock} .

Novamente, estamos interessados nas probabilidades estacionárias do US estar no estado *Listen* ou *Lock*. Denotamos mais uma vez γ_i^{Listen} como a probabilidade estacionária do estado *Listen* e γ_i^{Lock} a probabilidade estacionária do estado *Lock*, em que $1 \leq i \leq n$ representa o canal.

Resolvendo a cadeia de Markov podemos encontrar as probabilidades estacionárias de cada estado:

$$\begin{aligned}
\gamma_i^{Listen} &= \frac{\pi_1}{n^2}, & 1 \leq i \leq n \\
\gamma_i^{Lock} &= \frac{1}{n} - \frac{\pi_1}{n^2}, & 1 \leq i \leq n
\end{aligned}$$

A probabilidade estacionária de o US estar em qualquer canal no estado *Listen* é:

$$\begin{aligned}
\gamma_{Listen} &= P[\{\text{US em estado Listen no canal 1}\} \cup \dots \cup \{\text{US em estado Listen no canal } n\}] \\
&= \sum_{i=1}^n P[\text{US em estado Listen no canal } i] = \frac{\pi_1}{n} \quad (5.18)
\end{aligned}$$

Similarmente, temos que a probabilidade estacionária de o US estar no estado *Lock* é dada por:

$$\gamma_{Lock} = 1 - \frac{\pi_1}{n} \quad (5.19)$$

Podemos observar que as probabilidades estacionárias do mecanismo de busca *aleatória* são iguais aos da busca *sequencial*, o que era esperado devido à uniformidade das probabilidades de transição e à simetria da cadeia de Markov em ambos os modelos.

Capítulo 6

Modelo de Operação do Rádio Cognitivo com Interferência do Usuário Secundário

Até agora analisamos cenários em que a ocupação do canal é definida exclusivamente pela presença do usuário primário. No entanto, um cenário mais próximo da realidade deve-se levar em consideração o impacto na rede e no desempenho do protocolo causado pela interferência dos demais usuários secundários que também estejam competindo por uma oportunidade de transmissão. No nosso caso, estudaremos o impacto de outros US's na busca por canais disponíveis.

Neste capítulo desenvolveremos um modelo para a ocupação do canal levando em consideração a presença de outros US's e apresentaremos os mesmos modelos de busca mostrados anteriormente com a interferência do US.

6.1 Ocupação do Usuário Secundário

Lembrando que a probabilidade de que um usuário secundário i transmitir é dada por τ_i [Carvalho e Garcia-Luna-Aceves 2003], e considerando um número l de usuários secundários competindo por canais ociosos, queremos descobrir a probabilidade de que o US ao escolher um determinado canal para monitorar, encontre outro US neste canal. Essa probabilidade é dada por:

$$P[\text{algum US transmitir no canal } n] = 1 - P[\text{nenhum US transmitir no canal } n]$$

A probabilidade de um US i não transmitir em um dado canal é:

$$\begin{aligned} & P[\{\text{nó } i \text{ não transmitir no canal } n\}] = \\ & = P[\{\text{nó } i \text{ transmitir, mas não neste canal}\} \cup \{\text{nó } i \text{ não transmitir em nenhum canal}\}] \\ & = P[\text{nó } i \text{ transmitir, mas não neste canal}] + P[\text{nó } i \text{ não transmitir em nenhum canal}] \\ & = \frac{n-1}{n}\tau_i + (1 - \tau_i) \\ & = \left(\frac{n - \tau_i}{n}\right) \end{aligned} \tag{6.1}$$

A probabilidade do US não encontrar nenhum dos outros $l - 1$ nós transmitindo no canal (sabendo que as transmissões dos nós US's são independentes entre si) é dada por:

$$\begin{aligned}
& P[\text{nenhum dos outros } l - 1 \text{ nós transmitem no canal } n] \\
&= P[\{\text{nó 1 não transmitir no canal } n\} \cap \dots \cap \{\text{nó } l - 1 \text{ não transmitir no canal } n\}] \\
&= \prod_{i=1}^{l-1} P[\text{nó } i \text{ não transmitir no canal } n] = \left(\frac{n - \tau}{n}\right)^{l-1} \tag{6.2}
\end{aligned}$$

Logo, a probabilidade de um US encontrar o canal ocupado pela presença de outro US é dada por:

$$\begin{aligned}
P[\text{algum US transmitir no canal } n] &= 1 - P[\text{nenhum US transmitir no canal } n] \\
&= 1 - \left(\frac{n - \tau}{n}\right)^{l-1} \tag{6.3}
\end{aligned}$$

6.2 Modelo de Busca Paralelo com Interferência do US

No caso paralelo, como visto anteriormente, a probabilidade do US encontrar um canal disponível é simplesmente a probabilidade de existir pelo menos um canal disponível na faixa monitorada pelo US. Agora, considerando a interferência de outros US's e a independência entre as transmissões do UP e do US, temos que a probabilidade de o US encontrar um canal disponível será:

$$P[\text{US encontrar pelos menos um canal disponível}] = 1 - P[\text{todos os canais estarem ocupados}]$$

Como o canal pode estar ocupado tanto por um UP quanto por um US, temos que a probabilidade de um canal estar ocupado será dada por:

$$\begin{aligned}
& P[\text{canal } i \text{ estar ocupado}] = P[\{\text{UP ativo em } i\} \cup \{\text{US ativo em } i\}] \\
&= P[\text{UP ativo em } i] + P[\text{US ativo em } i] - P[\{\text{UP ativo em } i\} \cap \{\text{US ativo em } i\}] \\
&= \frac{\pi_1}{n} + \left[1 - \left(\frac{n - \tau}{n}\right)^{(l-1)}\right] - \frac{\pi_1}{n} \left[1 - \left(\frac{n - \tau}{n}\right)^{(l-1)}\right] \\
&= \left[1 - \left(1 - \frac{\pi_1}{n}\right) \left(\frac{n - \tau}{n}\right)^{(l-1)}\right] \tag{6.4}
\end{aligned}$$

A probabilidade de todos canais estarem ocupados será então:

$$P[\text{todos os canais estarem ocupados}] = \left[1 - \left(1 - \frac{\pi_1}{n}\right) \left(\frac{n - \tau}{n}\right)^{(l-1)}\right]^n \tag{6.5}$$

Logo, a probabilidade de um US encontrar um canal disponível será:

$$P[\text{US encontrar pelos menos um canal disponível}] = 1 - \left[1 - \left(1 - \frac{\pi_1}{n}\right) \left(\frac{n - \tau}{n}\right)^{(l-1)}\right]^n \tag{6.6}$$

6.3 Modelo de Busca Sequencial com Interferência do US

Anteriormente, quando um US buscava um canal, ele permanecia neste canal caso não detectasse a presença de um UP no mesmo, no entanto, levando-se em consideração a interferência dos outros US's, ele permanecerá neste canal caso não detecte nem o UP nem outro US, ou seja, a probabilidade de ficar no estado *Lock* agora será dada por:

$$P_{Lock} = P[\text{ficar no estado Lock}] = P[\text{UP e US estarem ausentes no canal } n] \quad (6.7)$$

Sabendo que as transmissões do US e do UP são independentes entre si,

$$\begin{aligned} P_{Lock} &= P[\{\text{UP estar ausente no canal } n\} \cap \{\text{US estar ausente no canal } n\}] \\ &= \left(1 - \frac{\pi_1}{n}\right) \left(\frac{n - \tau_i}{n}\right)^{l-1} \end{aligned} \quad (6.8)$$

$P_{Leave} = 1 - P_{Lock}$, sendo que $P_{Leave} = P_{Listen}$. A atividade π_1 do UP foi desenvolvida na Seção 5.1.

A ocupação do canal pode então novamente ser modelada pela cadeia de Markov mostrada na figura 5.2. Utilizando a notação adotada na seção 5.3 $P\{x_1, y_1 | x_0, y_0\} = P\{X_i = x_1, Y_i = y_1 | X_{i-1} = x_0, Y_{i-1} = y_0\}$, as probabilidades de transição da cadeia são dadas pelas equações levando em conta a interferência de outros US:

$$P\{j+1, 0 | j, i\} = 1 - \left(1 - \frac{\pi_1}{n}\right) \left(\frac{n - \tau}{n}\right)^{l-1}, \quad j \in [1, n-1], i \in [0, 1] \quad (6.9)$$

$$P\{1, 0 | j, 1\} = 1 - \left(1 - \frac{\pi_1}{n}\right) \left(\frac{n - \tau}{n}\right)^{l-1}, \quad j = n \quad (6.10)$$

$$P\{1, 0 | j, 0\} = 1 - \left(1 - \frac{\pi_1}{n}\right) \left(\frac{n - \tau}{n}\right)^{l-1}, \quad j = n \quad (6.11)$$

$$P\{j, 1 | j, i\} = \left(1 - \frac{\pi_1}{n}\right) \left(\frac{n - \tau}{n}\right)^{l-1}, \quad j \in [1, n], i \in [0, 1] \quad (6.12)$$

Resolvendo a cadeia de Markov, temos que:

$$\begin{aligned} \gamma_i^{Listen} &= \frac{1}{n} \left[1 - \left(1 - \frac{\pi_1}{n}\right) \left(\frac{n - \tau}{n}\right)^{l-1} \right], 1 \leq i \leq n \\ \gamma_i^{Lock} &= \frac{1}{n} \left[\left(1 - \frac{\pi_1}{n}\right) \left(\frac{n - \tau}{n}\right)^{l-1} \right], 1 \leq i \leq n \end{aligned} \quad (6.13)$$

Finalmente, a probabilidade estacionária do US encontrar-se em qualquer canal no estado *Listen* é:

$$\begin{aligned} \gamma_{Listen} &= P[\{\text{US em estado Listen no canal 1}\} \cup \dots \cup \{\text{US em estado Listen no canal } n\}] \\ &= \sum_{i=1}^n P[\text{US em estado Listen no canal } i] \\ &= 1 - \left(1 - \frac{\pi_1}{n}\right) \left(\frac{n - \tau}{n}\right)^{l-1} \end{aligned} \quad (6.14)$$

Similarmente, temos a probabilidade estacionária do US estar no estado *Lock*:

$$\gamma_{Lock} = \left(1 - \frac{\pi_1}{n}\right) \left(\frac{n - \tau}{n}\right)^{l-1} \quad (6.15)$$

Observe que a probabilidade estacionária γ_{Listen} representa a probabilidade de o US estar procurando por um canal. Já γ_{Lock} nos dá a probabilidade β de o US conseguir um canal para transmissão.

Capítulo 7

Avaliação de Desempenho

Neste capítulo, apresentaremos a análise de resultados para o protocolo proposto, considerando os diferentes modelos de busca de canais (*paralelo* e *sequencial*) para cada modelo de ocupação do usuário primário (*ON-OFF* e *M/M/m/m*).

Utilizamos a ferramenta MatlabTM 7.0 [The MathWorks, Inc] para analisar o desempenho do protocolo apresentado, implementando o modelo analítico apresentado no Capítulo 4, Considerou-se um cenário em que o modelo de propagação de perda de caminho utilizado foi de *dois raios* para simular uma rede de único salto. Os nós são distribuídos aleatoriamente em uma área de $20m \times 20m$. Na camada física utilizamos a sequência direta de espalhamento de espectro (DSSS), protocolo IEEE 802.11 PHY, com taxa de bit efetiva de 1Mbps sob modulação DBPSK. Assumimos que a operação de encaminhamento na interface cognitiva conseguir ocorrer dentro de um SIFS padrão, porém na prática o valor do intervalo SIFS deve ser redefinido a fim de ser suficientemente longo para permitir a leitura do campo CAC e o envio do próximo quadro. A Tabela 1 resume outros parâmetros utilizados para a camada MAC.

Tabela 7.1: Parâmetros da Camada MAC

MAC	
W_{\min}	32
W_{\max}	1024
Cabeçalho MAC (bytes)	34
ACK (bytes)	38
CTS (bytes)	38
RTS (bytes)	44
Slot de Tempo (μsec)	20
SIFS (μsec)	10
DIFS (μsec)	50

7.1 Análise da Probabilidade de Acesso em Relação ao Número de Canais

Nesta seção analisamos o impacto da atividade do usuário primário na probabilidade β do usuário secundário encontrar um canal disponível à medida que o número de canais aumenta, para

os modelos paralelo e sequencial. Em um primeiro momento, consideramos apenas a interferência do UP. Por fim, adicionaremos a interferência do US à mesma análise.

7.1.1 Probabilidade de Acesso em Relação ao Número de Canais no Modelo ON-OFF

A fim de compreendermos o impacto da atividade do usuário primário π_1 na probabilidade β do usuário secundário encontrar um canal disponível à medida que o número de canais aumenta, mostramos na Figura 7.1 a probabilidade de um nó encontrar um canal disponível para transmissão, em que podemos perceber que β aumenta com o aumento do número de canais, como pode também ser analisado pelas Equações (5.19) e (5.13).

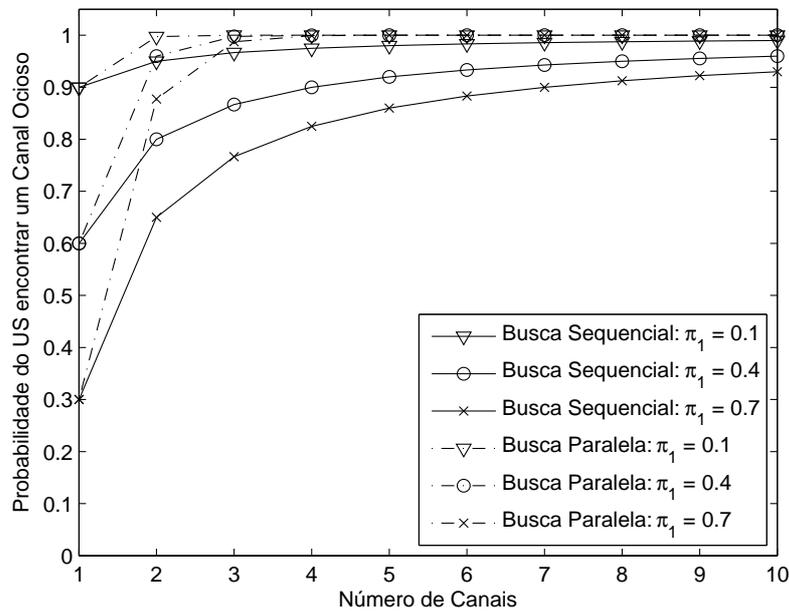


Figura 7.1: Probabilidade de um US encontrar um canal ocioso *versus* o número de canais para o modelo de atividade do UP ON-OFF e modelos de busca de canais *paralelo* e *sequencial*

Para o caso da busca *paralela* podemos observar uma rápida convergência ao seu ponto de saturação, como foi previsto no modelo analítico apresentado na seção 5.2. A Equação (5.19) nos dá a probabilidade de um US encontrar um canal disponível. Essa probabilidade cresce rapidamente com o número de canais com o limiar máximo sendo atingido em aproximadamente quatro canais, independentemente da atividade do UP π_1 .

No modelo de busca *sequencial* proposto observa-se que a convergência ao ponto de saturação é mais lenta que na busca *paralela*, pois seu ponto de saturação é atingido em aproximadamente 10 canais, independentemente da atividade do usuário primário π_1 .

Essa diferença entre o número de canais que cada modelo leva para atingir seu ponto de saturação é esperada, pois no modelo *paralelo* assumimos que o módulo cognitivo é capaz de monitorar todos os canais simultaneamente, enquanto que no modelo *sequencial* um nó irá, em média, procurar mais canais até encontrar um disponível. Este também é um resultado esperado

ao compararmos as equações obtidas nas seções 5.2 e 5.3.

7.1.2 Probabilidade de Acesso em Relação ao Número de Canais no Modelo ON-OFF com Interferência do US

Ao considerarmos também a interferência do US na busca de canais, observa-se que tanto para o modelo *sequencial* quanto para o *paralelo* o ponto de saturação demora mais a ser atingido, como pode ser visto na Figura 7.2. Entretanto, o impacto do US não é significativo na busca de canais, pois a probabilidade estacionária τ de um nó transmitir a qualquer tempo é pequena, fazendo com que a probabilidade de um nó transmitir em um dado canal também seja pequena, o que pode ser percebido pela Equação 6.3.

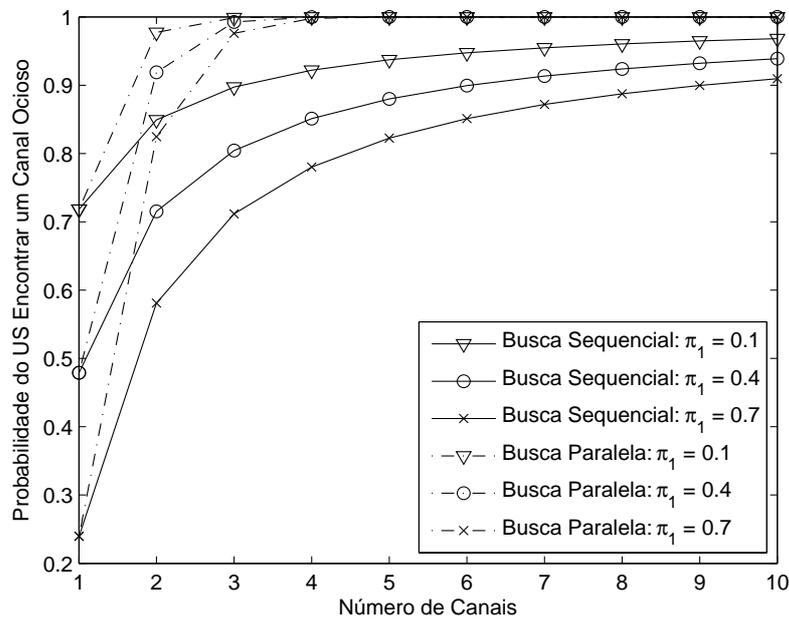


Figura 7.2: Probabilidade de um US encontrar um canal ocioso *versus* o número de canais para o modelo de atividade do UP ON-OFF e modelos de busca de canais *paralelo* e *sequencial*, considerando a interferência de outros US's.

7.1.3 Probabilidade de Acesso em Relação ao Número de Canais no Modelo M/M/m/m

A probabilidade β de um US encontrar um canal disponível em relação ao número de canais que, em média, o módulo cognitivo deverá monitorar, está representada na Figura 7.3, para o caso em que atividade do UP é modelada como um sistema de filas M/M/m/m para o UP.

Ao calcularmos a atividade do UP com valores de π_1 iguais a 0.1 0.4 e 0.7 na Equação 5.5, podemos notar que π_1 se aproxima desses valores, o que pode ser visto na Tabela 2. Percebe-se que para este caso, os valores de π_1 variam com o número de canais tal como apresentado nas Equações 5.4 e 5.5.

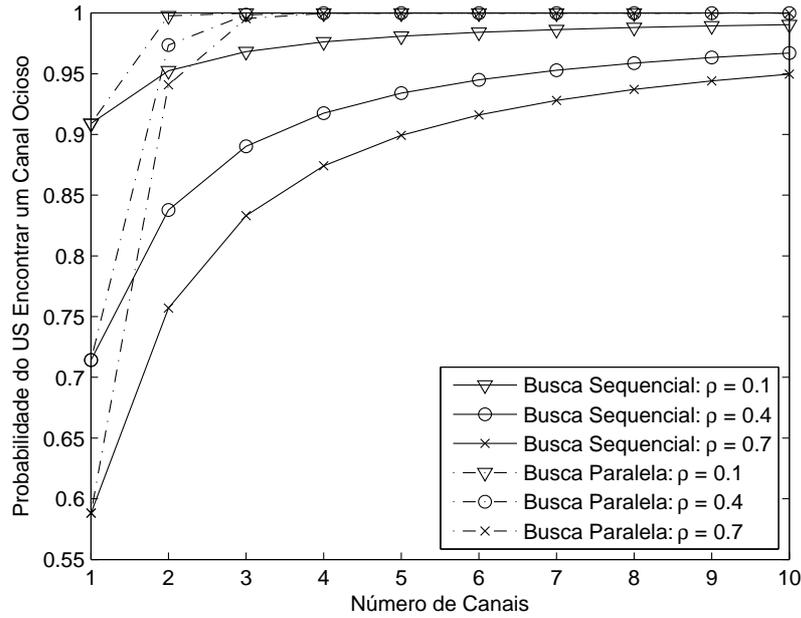


Figura 7.3: Probabilidade de um US encontrar um canal ocioso *versus* o número de canais para o modelo de atividade do UP M/M/m/m e modelos de busca de canais *paralelo* e *sequencial*.

Tabela 7.2: Valores de π_1

Número de Canais	$\rho = 0.1$	$\rho = 0.4$	$\rho = 0.7$
1	0.0909	0.2857	0.4118
2	0.0950	0.3243	0.4859
3	0.0952	0.3296	0.5030
4	0.0952	0.3297	0.5034
5	0.0952	0.3297	0.5034
6	0.0952	0.3297	0.5034
7	0.0952	0.3297	0.5034
8	0.0952	0.3297	0.5034
9	0.0952	0.3297	0.5034
10	0.0952	0.3297	0.5034

Percebemos que os valores obtidos para π_1 no modelo M/M/m/m se aproximam ao estabelecidos para o caso ON-OFF quando $\pi_1 = 0.1$. Para os valores 0.4 e 0.7 de π_1 estabelecidos no modelo ON-OFF, obtemos uma diferença maior em relação ao π_1 obtido no modelo M/M/m/m. Consequentemente os valores de β terão um comportamento similar, ou seja, a probabilidade β obtida no modelo M/M/m/m com $\pi_1 = 0.1$ é similar à obtida no modelo ON-OFF, mas para $\pi_1 = 0.4$ e $\pi_1 = 0.7$ os valores de β aumentam, visto que π_1 no modelo M/M/m/m torna-se menor em relação às atividades π_1 estabelecidas no modelo ON-OFF.

7.1.4 Probabilidade de Acesso em Relação ao Número de Canais no Modelo M/M/m/m com Interferência do US

Ao adicionarmos a interferência do US na busca de canais podemos observar, de forma análoga ao exposto para o modelo ON-OFF, que a probabilidade de encontrar um canal disponível, para

ambos os modelos de busca, também diminui. Como pode ser visto na Figura 7.4, a interferência de outros US's não é tão significativa na probabilidade de um US encontrar um canal, pois — como já mencionado anteriormente — a probabilidade estacionária τ de um nó transmitir a qualquer tempo é pequena.

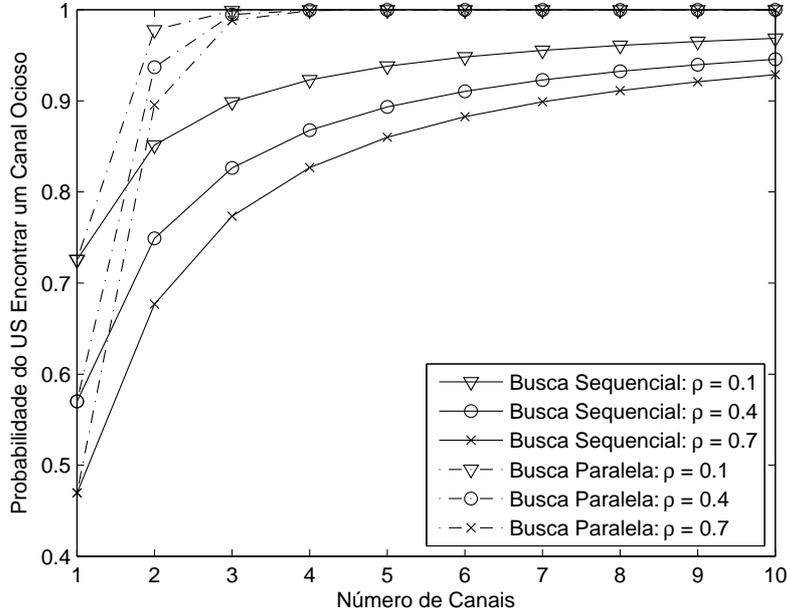


Figura 7.4: Probabilidade de um US encontrar um canal ocioso *versus* o número de canais para o modelo de atividade M/M/m/m do UP e modelos de busca de canais *paralelo* e *sequencial* considerando a interferência de outros US's.

7.2 Análise da Vazão Média em Relação ao Número de Canais

Nesta seção, estudaremos o desempenho do protocolo proposto por meio da análise da vazão média obtida para diferentes parâmetros, como número de canais, atividade do UP e sua modelagem — ON-OFF ou M/M/m/m — e técnicas de busca de canais — *paralela* e *sequencial*—, considerando, ainda, a interferência ou não do US.

Lembrando que a vazão é dada pela Equação (4.8), observa-se que o ganho obtido pelo módulo cognitivo dependerá de ϕ , a probabilidade de um US ter uma transmissão bem sucedida no módulo cognitivo. Como em nossa análise estamos considerando um cenário de único salto com canais sob perfeitas condições, a probabilidade α assume valor unitário na Equação (4.5). Logo, o fator determinante na ponderação da vazão será β , o qual depende do modelo de busca e de atividade do UP escolhidos e se considerando a presença ou não do US.

7.2.1 Vazão Média em Relação ao Número de Canais no Modelo ON-OFF

Para analisarmos o desempenho do protocolo proposto para cada abordagem de busca, mostramos nas Figuras 7.5 e 7.6 a vazão obtida nas buscas *paralela* e *sequencial* em relação ao número de canais. Investigamos o desempenho para diferentes número de nós e atividades π_1 do UP.

Na Figura 7.5 podemos observar o desempenho do protocolo proposto para uma rede com 10 nós. Podemos também notar que na busca *paralela* as curvas convergem rapidamente, atingindo sua vazão máxima para aproximadamente quatro canais, independentemente da utilização π_1 do UP. No modo *sequencial* o ponto de saturação é atingido para aproximadamente 10 canais, também independentemente da utilização do UP. Porém, no caso *sequencial* a convergência ao ponto de saturação é mais lenta que no caso *paralelo*. Essa diferença também pode ser observada ao compararmos as Equações 5.19 e 5.13.

Na Figura 7.6 mostramos o desempenho do protocolo para uma rede com 40 nós. Ao compararmos as figuras, observamos que a diferença entre elas baseia-se no fato que a vazão média é menor para um número maior de nós. Nota-se também que para maiores valores de π_1 a probabilidade de se encontrar um canal ocioso diminui. Isto é intuitivo, pois quanto maior a utilização de canais pelo UP, menor será o número de canais disponíveis.

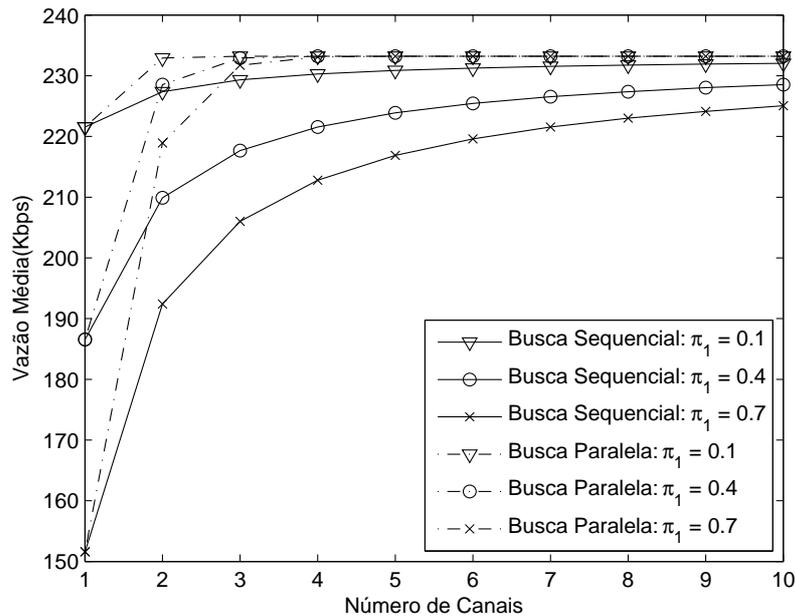


Figura 7.5: Vazão média *versus* o número de canais para o modelo de atividade do UP ON-OFF e modelos de busca de canais *paralelo* e *sequencial* considerando 10 nós.

7.2.2 Vazão Média em Relação ao Número de Canais no Modelo ON-OFF com Interferência do US

Ao adicionarmos a interferência do US aos modelos de busca *paralelo* e *sequencial*, podemos observar, ao analisarmos as Figuras 7.7 e 7.8, que a vazão média para ambos os tipos de busca é

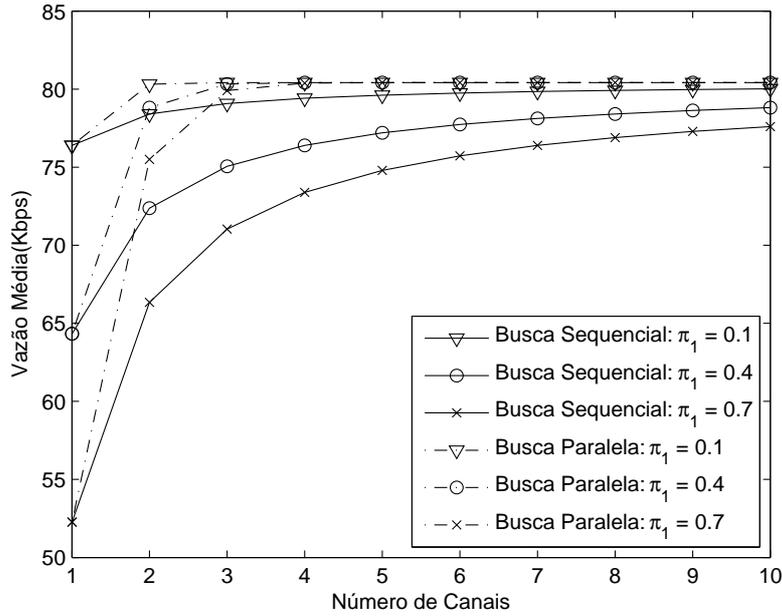


Figura 7.6: Vazão média *versus* o número de canais para o modelo de atividade do UP ON-OFF e modelos de busca de canais *paralelo* e *sequencial* considerando 40 nós.

menor ao compararmos com a vazão média obtida sem a interferência do US em ambos os gráficos. Esse resultado é o esperado, pois como mencionado anteriormente, β é o fator que pondera a vazão obtida pelo protocolo e o mesmo é afetado pela interferência do US, como mostrado na Seção 7.1.

As Tabelas 3 e 4 resumem as diferenças percentuais entre as vazões obtidas sem considerarmos a interferência de outros US's e considerando a interferência, para o modelo ON-OFF com 10 nós e 40 nós respectivamente.

Tabela 7.3: Diferença percentual entre a vazão obtida sem a interferência do US e com a interferência do US para o modelo ON-OFF considerando 10 nós (%)

Número de Canais	Sequencial			Paralelo		
	$\rho = 0,1$	$\rho = 0,4$	$\rho = 0,7$	$\rho = 0,1$	$\rho = 0,4$	$\rho = 0,7$
1	9,56	7,57	4,66	9,56	7,57	4,66
2	5,16	4,71	4,17	1,01	2,10	2,82
3	3,53	3,33	3,12	0,05	0,26	0,57
4	2,68	2,57	2,45	0,00	0,02	0,07
5	2,16	2,09	2,02	0,00	0,00	0,01
6	1,81	1,76	1,71	0,00	0,00	0,00
7	1,56	1,52	1,48	0,00	0,00	0,00
8	1,37	1,34	1,31	0,00	0,00	0,00
9	1,22	1,20	1,17	0,00	0,00	0,00
10	1,10	1,08	1,06	0,00	0,00	0,00

7.2.3 Vazão Média em Relação ao Número de Canais no Modelo M/M/m/m

A Figura 7.9 representa a vazão obtida para uma rede com 10 nós utilizando o modelo de filas M/M/m/m como modelagem da ocupação do canal pelo UP. Ao observarmos a Figura 7.9,

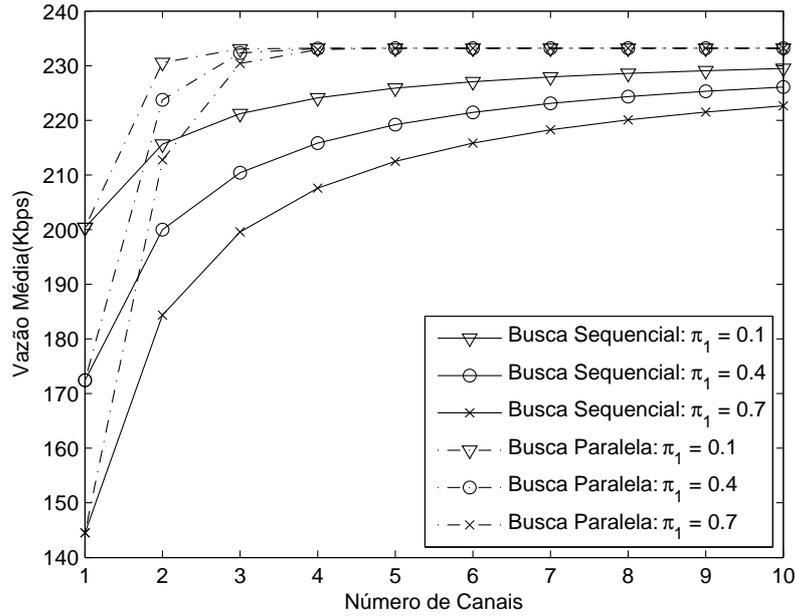


Figura 7.7: Vazão Média *versus* o número de canais para o modelo de atividade do UP ON-FF e modelos de busca de canais *paralelo* e *sequencial* considerando 10 nós e interferência de outros US's.

podemos notar que a vazão média se comparada a obtida para o caso ON-OFF é aproximadamente igual. Como exposto na seção 7.1, ao modelarmos a atividade do UP obtemos valores menores para π_1 e, conseqüentemente, a probabilidade de encontrarmos um canal disponível aumenta.

Na Figura 7.10, mostramos a vazão que o protocolo atinge para uma rede com 40 nós. Podemos observar uma queda no valor da vazão média ao compararmos esta figura com a obtida para uma rede de 10 nós. Analogamente ao caso ON-OFF, podemos notar que quanto maior o número de nós, menor é a vazão média.

Tabela 7.4: Diferença percentual entre a vazão obtida sem a interferência do US e com a interferência do US para o modelo ON-OFF considerando 40 nós (%)

Número de Canais	Sequencial			Paralelo		
	$\rho = 0,1$	$\rho = 0,4$	$\rho = 0,7$	$\rho = 0,1$	$\rho = 0,4$	$\rho = 0,7$
1	12,98	10,27	6,32	12,98	10,27	6,32
2	7,19	6,56	5,82	1,69	3,12	4,07
3	4,96	4,69	4,38	0,11	0,42	0,87
4	3,79	3,63	3,47	0,00	0,04	0,11
5	3,06	2,96	2,86	0,00	0,00	0,01
6	2,57	2,50	2,431	0,00	0,00	0,00
7	2,21	2,16	2,11	0,00	0,00	0,00
8	1,94	1,90	1,87	0,00	0,00	0,00
9	1,73	1,70	1,67	0,00	0,00	0,00
10	1,56	1,54	1,51	0,00	0,00	0,00

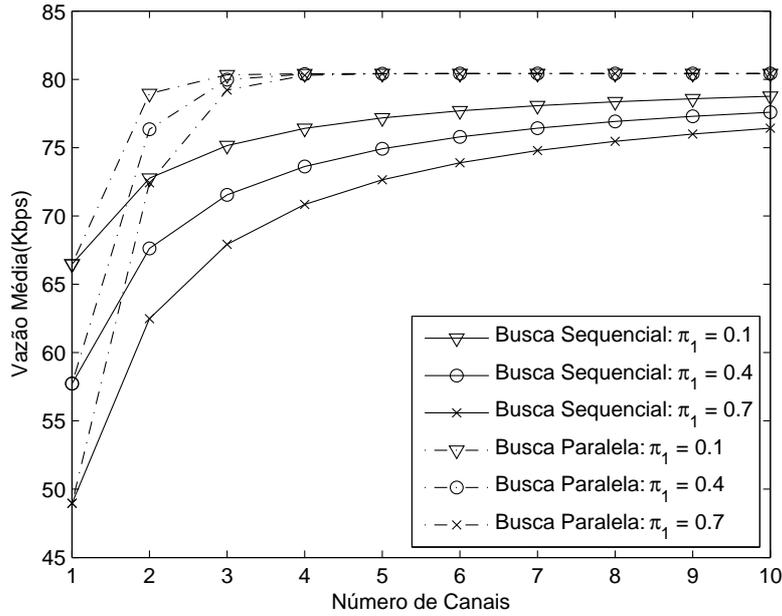


Figura 7.8: Vazão Média *versus* o número de canais para o modelo de atividade do UP ON-OFF e modelos de busca de canais *paralelo* e *sequencial* considerando 40 nós e interferência de outros US's.

7.2.4 Vazão Média em Relação ao Número de Canais no Modelo M/M/m/m com Interferência do US

De forma análoga ao observado para o caso ON-OFF, podemos notar ao analisarmos as figuras 7.11 e 7.12, que para ambos os modelos de busca *paralelo* e *sequencial* a vazão média obtida é menor ao adicionarmos a interferência do US, quando comparada a obtida sem a interferência do US, como pode ser observado na Figura 7.9.

As Tabela 4 e 5 resumem as diferenças percentuais entre as vazões obtidas sem considerarmos a interferência de outros US's e considerando a interferência, para o modelo M/M/m/m com 10 nós e 40 nós respectivamente.

Tabela 7.5: Diferença percentual entre a vazão obtida sem a interferência do US e com a interferência do US para o modelo M/M/m/m considerando 10 nós (%)

Número de Canais	Sequencial			Paralelo		
	$\rho = 0,1$	$\rho = 0,4$	$\rho = 0,7$	$\rho = 0,1$	$\rho = 0,4$	$\rho = 0,7$
1	9,61	8,41	7,47	9,61	8,41	7,47
2	5,17	4,83	4,56	0,99	1,86	2,34
3	3,53	3,38	3,26	0,05	0,20	0,35
4	2,68	2,60	2,53	0,00	0,01	0,03
5	2,16	2,11	2,07	0,00	0,00	0,00
6	1,81	1,77	1,74	0,00	0,00	0,00
7	1,56	1,53	1,51	0,00	0,00	0,00
8	1,37	1,35	1,33	0,00	0,00	0,00
9	1,22	1,20	1,19	0,00	0,00	0,00
10	1,10	1,08	1,07	0,00	0,00	0,00

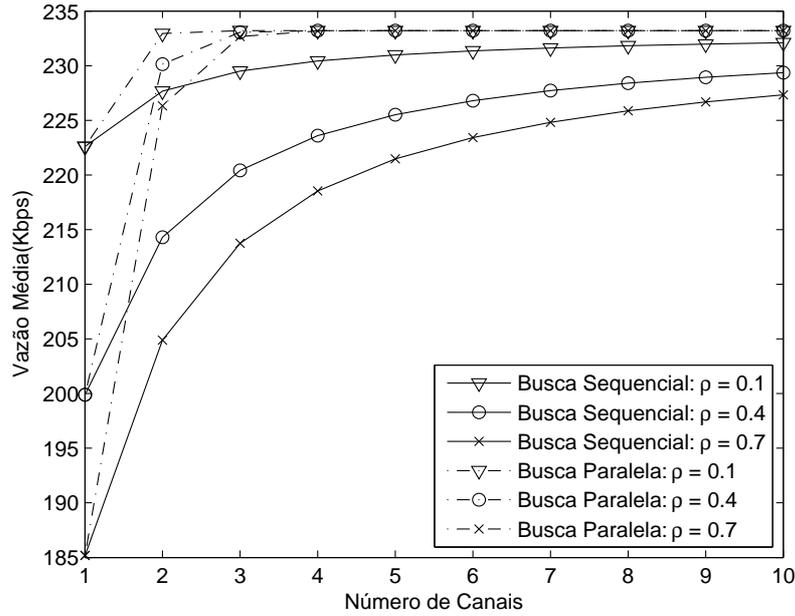


Figura 7.9: Vazão Média *versus* o número de canais para o modelo de atividade do UP M/M/m/m e modelos de busca de canais *paralelo* e *sequencial* considerando 10 nós.

0 1,00000 1,00000 1,00000

7.3 Análise de Desempenho do Protocolo Proposto em Relação ao Padrão IEEE 802.11

Nesta seção iremos comparar o desempenho atingido pelo protocolo proposto neste trabalho de graduação, em relação ao desempenho apresentado pelo protocolo IEEE 802.11. Para alcançar este objetivo, faremos uma comparação entre as vazões médias obtidas por cada protocolo, levando em consideração, para o caso do nosso protocolo proposto, os dois modelos de busca *paralelo* e *sequencial*. Analisaremos também, o desempenho alcançado para os modelos ON-OFF e M/M/m/m

Tabela 7.6: Diferença percentual entre a vazão obtida sem a interferência do US e com a interferência do US para o modelo M/M/m/m considerando 40 nós (%)

Número de Canais	$1 - \frac{\pi_1}{n}$			$1 - P_m$		
	$\pi_1 = 0,1$	$\pi_1 = 0,4$	$\pi_1 = 0,7$	$\rho = 0,1$	$\rho = 0,4$	$\rho = 0,7$
1	0,90909	0,71429	0,58824	13,05	11,42	10,15
2	0,99774	0,97370	0,94098	1,66	2,81	3,44
3	0,99997	0,99868	0,99536	0,11	0,33	0,56
4	1,00000	0,99995	0,99975	0,00	0,02	0,06
5	1,00000	1,00000	0,99999	0,00	0,00	0,00
6	1,00000	1,00000	1,00000	0,00	0,00	0,00
7	1,00000	1,00000	1,00000	0,00	0,00	0,00
8	1,00000	1,00000	1,00000	0,00	0,00	0,00
9	1,00000	1,00000	1,00000	0,00	0,00	0,00
10	1,00000	1,00000	1,00000	0,00	0,00	0,00

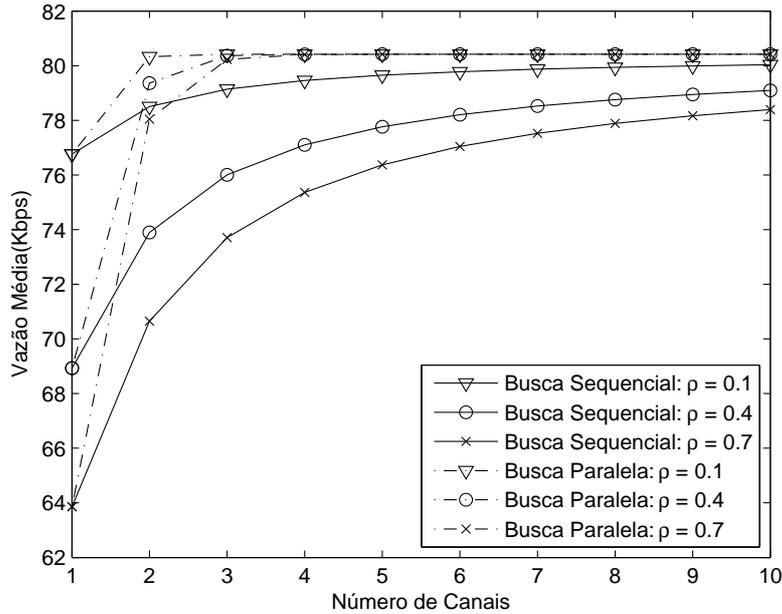


Figura 7.10: Vazão Média *versus* o número de canais para o modelo de atividade do UP M/M/m/m e modelos de busca de canais *paralelo* e *sequencial* considerando 40 nós.

em relação ao IEEE 802.11. Por fim, adicionaremos a interferência do US no protocolo proposto, ainda o comparando com o IEEE 802.11. Ainda, todos os gráficos foram gerados com valores de π_1 e ρ iguais à 0.4.

7.3.1 Análise de Desempenho do Protocolo Proposto em Relação ao Padrão IEEE 802.11 para o Modelo ON-OFF

Mostramos nas Figuras 7.13 e 7.14, a vazão média de cada método de busca em relação ao IEEE 802.11, levando-se em consideração diferentes tamanhos de rede (10 e 40 nós), para diferentes números de canais.

Ao observarmos a Figura 7.13, podemos notar que a vazão média do protocolo proposto é significativamente maior que a obtida no protocolo IEEE 802.11, tanto para o modelo de busca *paralelo*, quanto o *sequencial*.

Deve-se observar ainda que, para o caso de apenas um canal, as vazões médias dos modelos de busca *paralelo* e *sequencial* são iguais, enquanto que essa diferença para quatro canais é maior, o que pode ser explicado pelo fato de que no modelo de busca *paralelo*, o ponto de saturação é atingido para aproximadamente quatro canais, enquanto que o modelo de busca *sequencial* necessita buscar mais canais para atingir seu ponto de saturação.

Também podemos notar que para um número maior de canais (maior que quatro), a diferença entre as vazões médias do caso *paralelo* e *sequencial* é menor. Dessa forma, para o cenário apresentado, é mais vantajoso escolher o método de busca *sequencial*, já que é mais simples implementar um rádio que monitore canais de forma sequencial do que um rádio capaz de sensoriar todos os

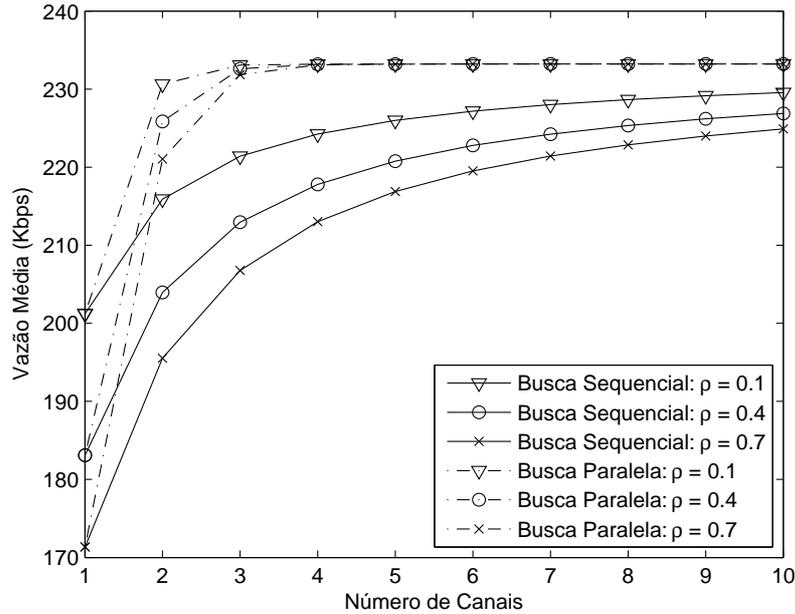


Figura 7.11: Vazão Média *versus* o número de canais para o modelo de atividade do UP M/M/m/m e modelos de busca de canais *paralelo* e *sequencial* considerando 10 nós e interferência de outros US's.

canais ao mesmo tempo ao se levar em consideração a tecnologia atual.

Por fim, na Figura 7.14, comparamos as vazões médias obtidas no nosso protocolo proposto, para ambos métodos de busca, com a vazão média obtida no protocolo IEEE 802.11 para uma rede com 40 nós. Ao analisarmos a figura, podemos notar que a vazão média obtida é menor para um número maior de nós, no entanto, o desempenho alcançado pelo protocolo proposto ainda é significativamente maior que o IEEE 802.11.

7.3.2 Análise de Desempenho do Protocolo Proposto em Relação ao Padrão IEEE 802.11 para o Modelo ON-OFF com Interferência do US

Podemos observar nas Figuras 7.15 e 7.16, que ao adicionarmos a interferência do US nos modelos de busca *paralelo* e *sequencial*, a vazão média obtida diminui. No entanto, o desempenho obtido pelo protocolo proposto continua superior ao desempenho do IEEE 802.11

7.3.3 Análise de Desempenho do Protocolo Proposto em Relação ao Padrão IEEE 802.11 para o Modelo M/M/m/m

As Figuras 7.17 e 7.18 mostram a vazão média obtida pelo protocolo proposto para os modelos de busca *paralelo* e *sequencial* para o caso de 10 e 40 nós, respectivamente, em relação a vazão obtida pelo protocolo IEEE 802.11, considerando a utilização do canal pelo UP dada pelo sistema de filas M/M/m/m.

Podemos concluir ao analisarmos as figuras que o desempenho alcançado pelo protocolo apre-

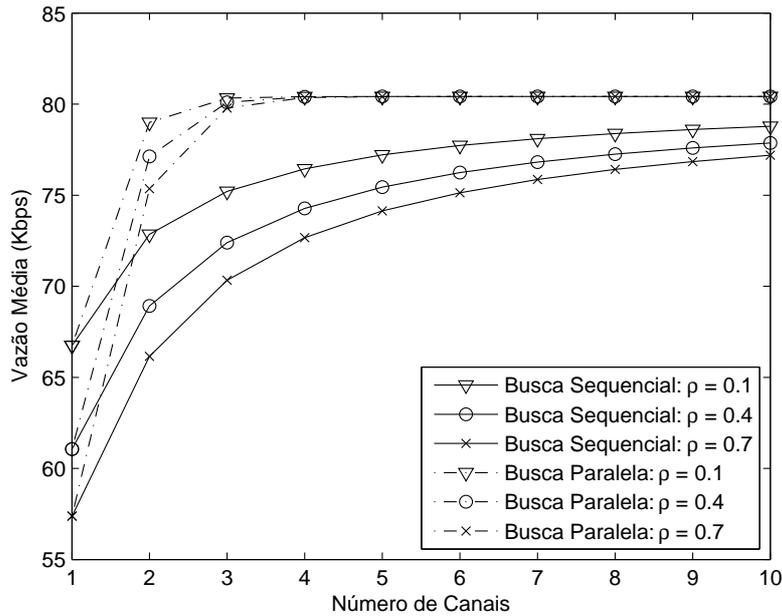


Figura 7.12: Vazão Média *versus* o número de canais para o modelo de atividade do UP M/M/m/m e modelos de busca de canais *paralelo* e *sequencial* considerando 40 nós e interferência de outros US's.

sentado é superior ao do IEEE 802.11. Ao compararmos os gráficos obtidos para o caso em que a utilização do canal pelo UP foi modelada por um sistema de filas M/M/m/m com o modelo ON-OFF, vemos claramente que o modelo M/M/m/m tem um desempenho melhor se comparado ao modelo ON-OFF. O que pode se torna claro se levarmos em consideração o fato de que a modelagem por meio de um sistema de filas se aproxima mais da ocupação real de um usuário primário, pois leva em consideração a competição entre os nós UP, enquanto que a modelagem ON-OFF é uma abordagem idealística.

7.3.4 Análise de Desempenho do Protocolo Proposto em Relação ao Padrão IEEE 802.11 para o Modelo M/M/m/m com Interferência do US

Finalmente, ao analisarmos as Figuras 7.19 e 7.20, podemos observar novamente o impacto da interferência do US na vazão média do protocolo proposto, levando-se em consideração os modelos de busca *paralelo* e *sequencial*, e compará-los ao protocolo IEEE 802.11. Notamos, que mesmo com a interferência do US, o desempenho do nosso protocolo ainda é maior que a do IEEE 802.11.

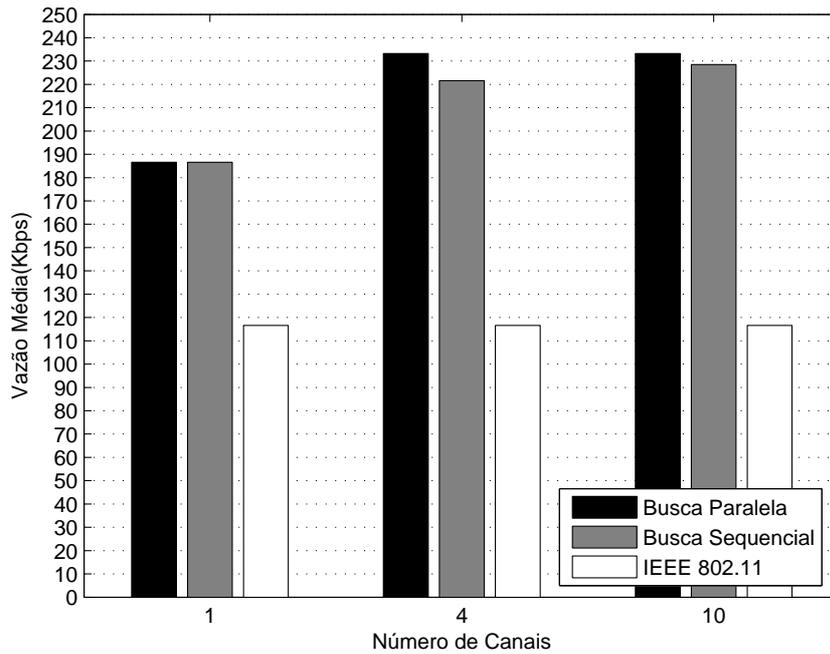


Figura 7.13: Comparação do protocolo proposto com o padrão IEEE 802.11 em relação à vazão média *versus* o número de canais para o modelo de atividade do UP ON-OFF e modelos de busca de canais *paralelo* e *sequencial* considerando 10 nós.

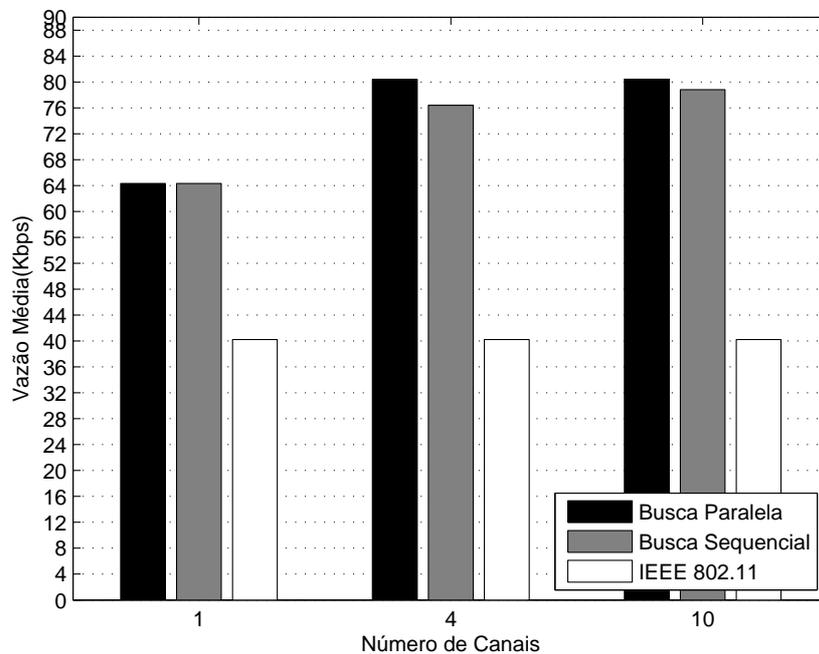


Figura 7.14: Comparação do protocolo proposto com o padrão IEEE 802.11 em relação à vazão média *versus* o número de canais para o modelo de atividade do UP ON-OFF e modelos de busca de canais *paralelo* e *sequencial* considerando 40 nós.

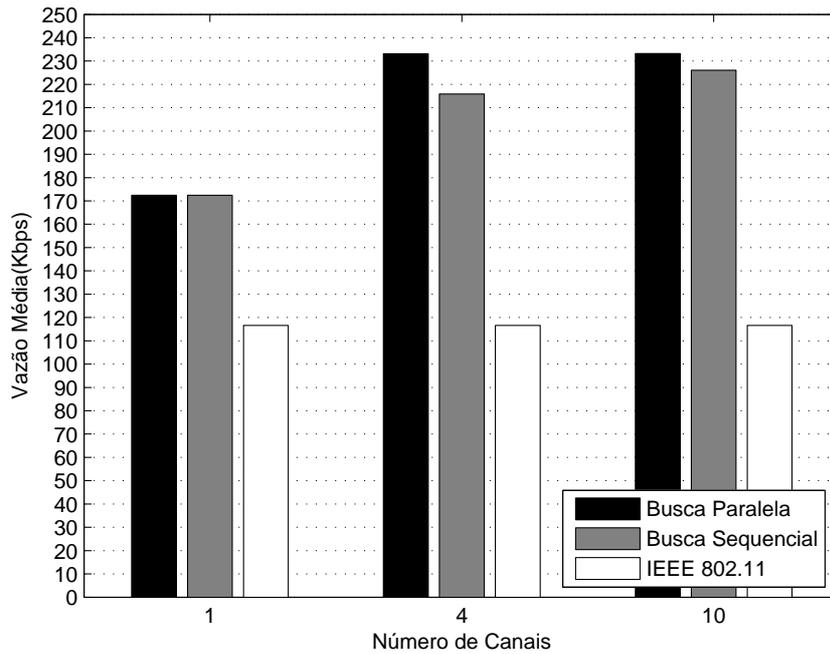


Figura 7.15: Comparação do protocolo proposto com o padrão IEEE 802.11 em relação à vazão média *versus* o número de canais para o modelo de atividade do UP ON-OFF e modelos de busca de canais *paralelo* e *sequencial* considerando 10 nós e interferência de outros US's.

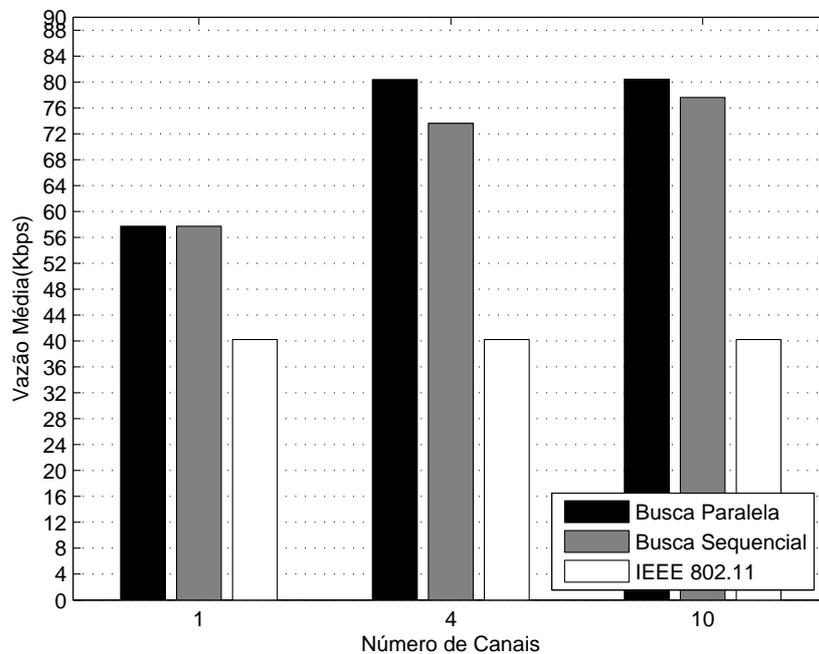


Figura 7.16: Comparação do protocolo proposto com o padrão IEEE 802.11 em relação à vazão média *versus* o número de canais para o modelo de atividade do UP ON-OFF e modelos de busca de canais *paralelo* e *sequencial* considerando 40 nós e interferência de outros US's.

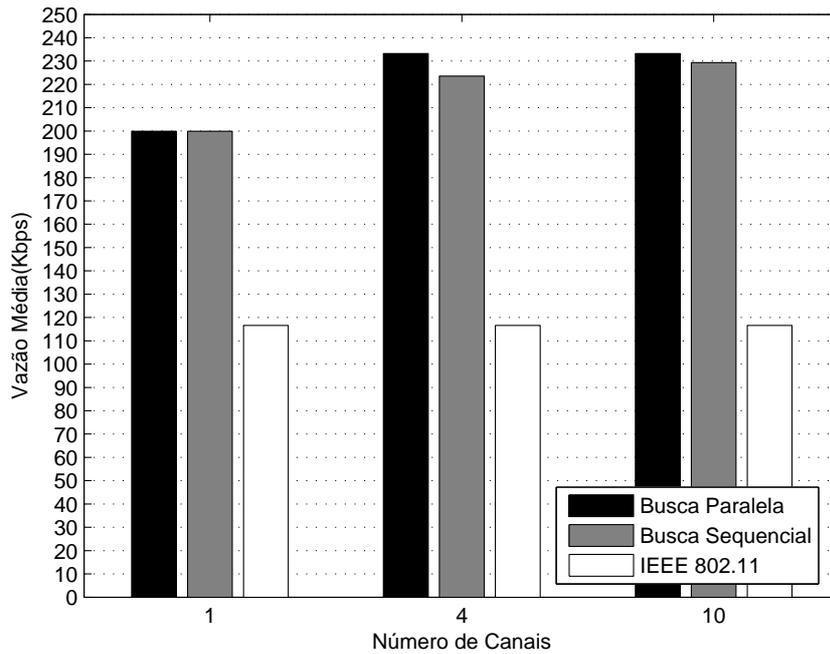


Figura 7.17: Comparação do protocolo proposto com o padrão IEEE 802.11 em relação à vazão média *versus* o número de canais para o modelo de atividade do UP M/M/m/m e modelos de busca de canais *paralelo* e *sequencial* considerando 10 nós.

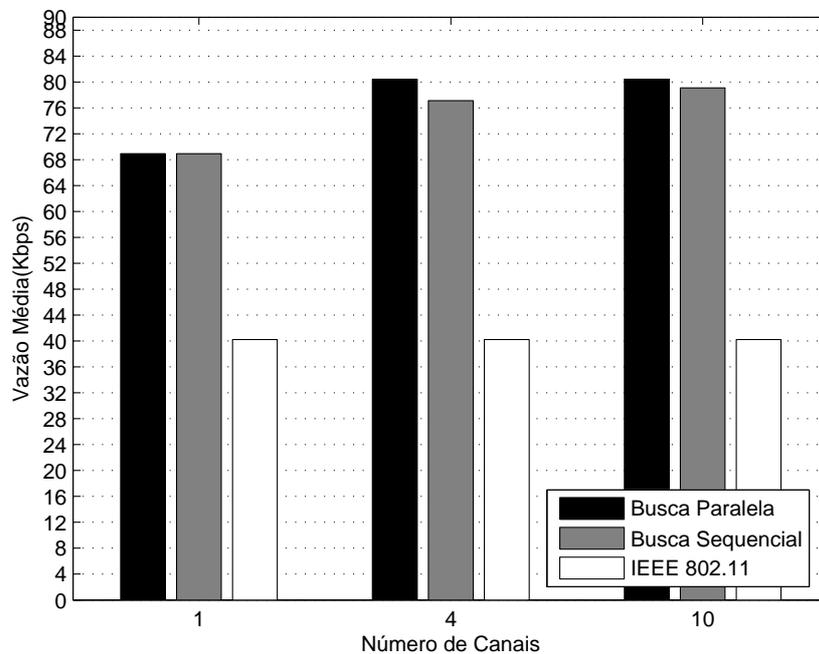


Figura 7.18: Comparação do protocolo proposto com o padrão IEEE 802.11 em relação à vazão média *versus* o número de canais para o modelo de atividade do UP M/M/m/m e modelos de busca de canais *paralelo* e *sequencial* considerando 10 nós.

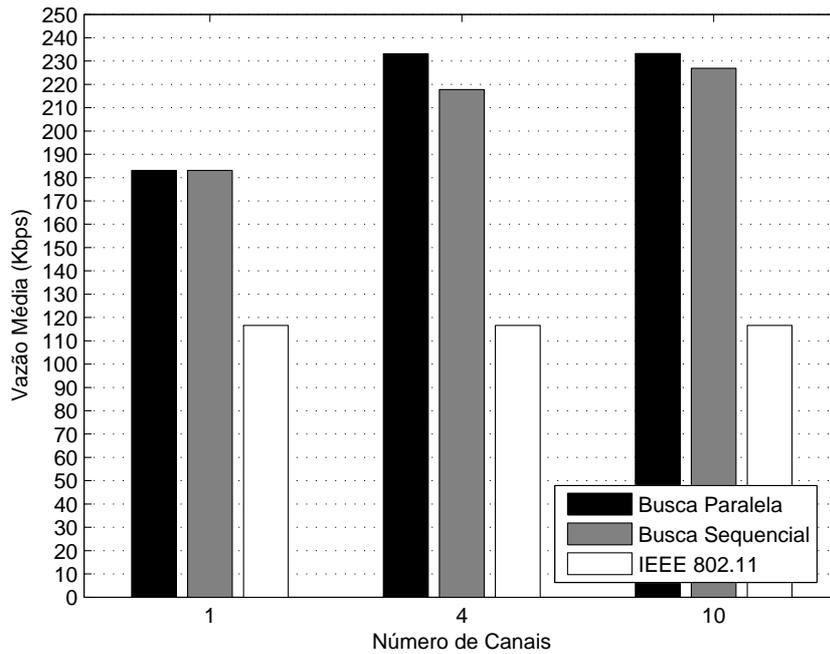


Figura 7.19: Comparação do protocolo proposto com o padrão IEEE 802.11 em relação à vazão média *versus* o número de canais para o modelo de atividade do UP M/M/m/m e modelos de busca de canais *paralelo* e *sequencial* considerando 10 nós e interferência do US.

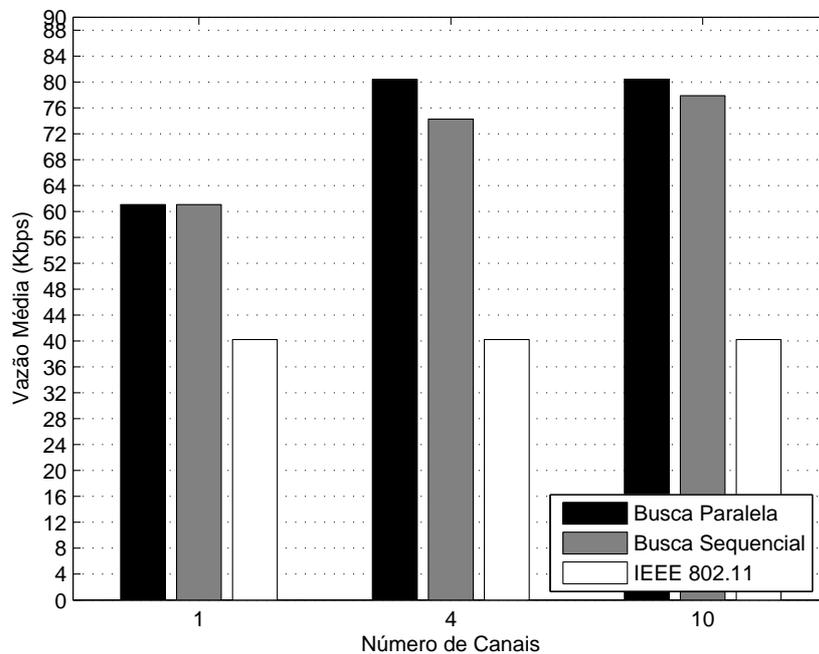


Figura 7.20: Comparação do protocolo proposto com o padrão IEEE 802.11 em relação à vazão média *versus* o número de canais para o modelo de atividade do UP M/M/m/m e modelos de busca de canais *paralelo* e *sequencial* considerando 40 nós e interferência do US.

Capítulo 8

Conclusões e Trabalho Futuro

Introduzimos nesse trabalho um novo protocolo de controle de acesso ao meio (MAC) para redes sem fio *ad hoc* cognitivas, construído sobre o mecanismo DCF padrão do IEEE 802.11. O protocolo que propomos é baseado em modificações do protocolo IEEE 802.11 e permite o aumento da vazão alcançada por cada nó na rede com a transmissão oportunista de quadros em espaços disponíveis do espectro concorrentemente com a transmissão sobre canais padrão IEEE 802.11. A principal vantagem do protocolo proposto é a simplicidade, a qual reside no aproveitamento da maior parte da tecnologia existente no padrão IEEE 802.11.

Focamos em uma modelagem analítica da vazão alcançada pelos nós secundários para diferentes modelos de ocupação dos usuários primários e mecanismos de busca de canais. O incremento da vazão que os usuários secundários alcançam transmitindo oportunisticamente depende diretamente da busca de canal realizada e do comportamento do usuário primário. Para as duas modelagens da ocupação de canais pelo usuário primário — ON-OFF e M/M/m/m — apresentamos três mecanismos de busca de canais pelo usuário secundário: as buscas *paralela*, *sequencial* e *aleatória*. Concluímos que a busca *paralela* é mais efetiva na busca de canais, permitindo ao US alcançar uma maior vazão. Porém é um modelo difícil de ser implementado em rádios reais, visto que neste modelo de busca o US deve ser capaz de monitorar uma vasta gama de canais simultaneamente. Os modelos *sequencial* e *aleatório* apresentaram resultados indênticos na probabilidade de um US encontrar um canal disponível, logo escolhemos utilizar o modelo *sequencial* para compararmos com o modelo *paralelo* na análise de desempenho. Confirmamos pela análise dos gráficos obtidos que no modelo *paralelo* o US alcança uma vazão maior que no *sequencial*, porém com o aumento de número de canais, a vazão satura rapidamente (aproximadamente 4 canais). Já para a busca *sequencial*, a curva da vazão saturou para aproximadamente 10 canais, alcançando um desempenho muito próximo da busca *paralela*. Portanto, concluímos que a busca *sequencial* mostrou-se mais satisfatória, devido à proximidade no desempenho alcançado com a busca *paralela* e a simplicidade na implementação de hardware quando comparada a esta. Em um segundo momento, analisamos também o impacto da atividade de outros usuários secundários na probabilidade de um nó encontrar um canal disponível. Observamos que há um decréscimo no desempenho, porém não tão significativo, sendo mantidas as características das curvas de desempenho da análise anterior, como saturação em quatro e dez canais para os modelos *paralelo* e *sequencial* respectivamente.

O ganho de desempenho obtido pelo protocolo proposto foi bastante significativo. A vazão praticamente dobrou quando comparada com a vazão alcançada somente pelo protocolo padrão IEEE 802.11. Porém este é um modelo bastante simplificado, pois analisamos o protocolo em redes de único salto sobre condições perfeitas do canal. Para uma análise mais efetiva, trabalhos futuros poderão incorporar o protocolo em redes de múltiplos saltos e modelos de roteamento. Nestes cenários mais realistas, também poderão ser incorporado no protocolo mecanismos de trocas de informações de canais entre nós e algoritmos mais eficientes de busca e seleção de canais, a fim de aumentar a probabilidade de um nó encontrar canais disponíveis e, conseqüentemente, a vazão obtida pela transmissão oportunista.

Referências Bibliográficas

- [Ahuja, Corke e Bok 2008]AHUJA, R.; CORKE, R.; BOK, A. Cognitive radio system using ieee 802.11a over UHF TVWS. *IEEE*, 2008.
- [Bahl et al. 2009]BAHL, P. et al. White space networking with wi-fi like connectivity. *SIGCOMM'09*, 2009.
- [Bianchi 2000]BIANCHI, G. Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, v. 18, n. 3, p. 535–547, March 2000.
- [Carvalho 2006]CARVALHO, M. M. *ANALYTICAL MODELING OF MEDIUM ACCESS CONTROL PROTOCOLS IN WIRELESS NETWORKS*. Tese (Doutorado) — University of California, Santa Cruz, CA., March 2006.
- [Carvalho e Garcia-Luna-Aceves 2003]CARVALHO, M. M.; GARCIA-LUNA-ACEVES, J. J. Delay analysis of IEEE 802.11 in single-hop networks. In: *Proc. ICNP*. Atlanta, USA: [s.n.], 2003.
- [Cordeiro, Challapali e Birru 2006]CORDEIRO, C.; CHALLAPALI, K.; BIRRU, D. IEEE 802.22: An introduction to the first wireless standard based on cognitive radios. *Journal of Communications*, v. 1, n. 1, April 2006.
- [Federal Communications Commission 2002]FEDERAL COMMUNICATIONS COMMISSION. *Spectrum Policy Task Force*. [S.l.], November 2002.
- [Ghoboosi et al. 2009]GHABOOSI, K. et al. A channel selection mechanism based on incumbent appearance expectation for cognitive networks. *IEEE WCNC*, 2009.
- [III, Jr e G.Q. 1999]III, M.; JR, J.; G.Q. Cognitive radio: making software radios more personal. *IEEE personal communications*, 1999.
- [Jia, Zhang e Shen 2008]JIA, J.; ZHANG, Q.; SHEN, X. S. HC - MAC: A hardware constrained cognitive MAC for efficient spectrum management. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, v. 26, n. 1, January 2008.
- [Kleinrock 1975]KLEINROCK, L. *Queueing Systems, Volume 1: Theory*. [S.l.]: Wiley-Interscience, 1975.
- [Ma, Han e Shen 2005]MA, L.; HAN, X.; SHEN, C.-C. Dynamic open spectrum sharing MAC protocol for wireless ad hoc networks. *IEEE DySPAN*, 2005.

[Ma, Shen e Ryu 2007]MA, L.; SHEN, C.-C.; RYU, B. Single-radio adaptive channel algorithm for spectrum agile wireless ad-hoc networks. *IEEE*, 2007.

[Niyato e Hossain 2009]NIYATO, D.; HOSSAIN, E. Cognitive radio for next-generation wireless networks: An approach to opportunistic channel selection in iee 802.11-based wireless mesh. *IEEE Wireless Communications*, February 2009.

[Su e Xi 2008]SU, H.; XI, Z. Cross-layer based opportunistic MAC protocols for QoS provisionings over cognitive radio wireless networks. *IEEE*, v. 26, n. 1, January 2008.

[The MathWorks, Inc]THE MATHWORKS, INC. *Matlab v.7.0*. [S.l.].

[Wu e Stojmenovic 2004]WU, J.; STOJMENOVIC, I. Ad-hoc networks. *Special Issue IEEE Computer*, February 2004.