

Uma Avaliação do Uso do Canal de Controle Pelo IEEE 802.11 Em Ambiente de Múltiplos Canais

Marcos Fagundes Caetano, Bruno Figueira Lourenço, Jacir Luiz Bordim

¹Departamento de Ciência da Computação – Universidade de Brasília (UnB)
Caixa Postal 4466 – 70.910-900 – Brasília – DF – Brazil

{caetano, brunofigueira, bordim}@cic.unb.br

Abstract. *Wireless networking enhanced with multiple transmitting channels has been considered to improve the utilization of the electromagnetic spectrum and to provide ways to accommodate the growing demand for connectivity. In this scenario, the use of a common control channel to coordinate the stations and networking resources is usually employed. This work evaluates the control channel capacity and its impact on the overall system throughput when multiple channels are available. To this end, an analytical model is proposed to evaluate the saturation conditions of the control channel. Empirical results are also provided and compared with the analytical model. The results show that the empirical results are consistent with the analytical model. In particular, it is shown that the ratio of eight data channels per control channel attains the best results.*

Resumo. *O uso de múltiplos canais para a comunicação sem fio tem sido objeto de pesquisa recente. Redes de rádio que utilizam múltiplos canais, como exemplo Rádios Cognitivos, buscam o melhor aproveitamento do uso do Espectro Eletro Magnético e a acomodação da crescente demanda por conectividade. Neste cenário, diversos mecanismos de acesso ao meio utilizam um canal exclusivo, conhecido como Canal de Controle, para a coordenação das estações e dos recursos da rede. Neste trabalho, realizamos a avaliação do impacto do uso do Canal de Controle quando utilizado em um mecanismo de acesso a múltiplos canais baseado no padrão IEEE 802.11. Apresentamos um modelo analítico para a avaliação do mecanismo proposto, bem como a sua implementação em ambiente de simulação. Os resultados apresentados demonstram que o modelo simulado encontra-se condizente com os resultados analíticos. Dentre os resultados obtidos, a relação de oito canais de dados para um canal de controle apresenta a menor taxa de desperdício de recursos, o que permite a construção de mecanismos de acesso ao meio mais eficientes e menos onerosos.*

1. Introdução

Atualmente, o IEEE 802.11 [Committee 1999] é o padrão de redes WLAN largamente utilizado. O aumento no uso deste tipo de tecnologia tem impactado diretamente no nível de interferência e de saturação do meio de comunicação. Este problema impulsionou o surgimento de diversas áreas de pesquisa, bem como o desenvolvimento de novas técnicas. Dentre as soluções propostas para a minimização do problema de interferência e de saturação do canal de comunicação, destacam-se as que utilizam múltiplos canais de dados para a comunicação [Domenico et al. 2012].

O uso de múltiplos canais de dados vem ganhando força com o surgimento de redes de rádios cognitivos [Zhao and Morales-Tirado 2012]. Neste contexto, as estações buscam mapear as oportunidades (canais ociosos) de acordo com as necessidades de comunicação das estações da rede, de forma a maximizar o uso dos canais de comunicação. Conforme exposto em [Domenico et al. 2012], a coordenação das estações e dos canais de dados pode ser feita com o uso exclusivo de um canal, denominado canal de controle. O uso do canal de controle permite as estações trocarem informações sobre o uso dos canais de dados, facilitando assim, a sua gerência.

Diversos trabalhos utilizam o conceito do canal de controle como forma de gerenciamento da comunicação nos canais de dados. Dos trabalhos que utilizam múltiplos canais para comunicação, destacam-se os que são baseados no padrão IEEE 802.11. Li *et al.* [Li et al. 2003] e Zhao *et al.* [Zhao et al. 2003] associam aos quadros RTS/CTS a informação de qual canal de dados será utilizado na comunicação. So *et al.* [So and Vaidya 2004] focam no problema de consumo de energia, evitando que as estações troquem de canais constantemente. Cordeiro *et al.* [Cordeiro et al. 2006] propõem uma forma de decremento diferenciado do contador de *backoff* como forma de minimizar as colisões. Choi *et al.* [Choi et al. 2003] propõem a alocação dos canais de dados por um período variável de tempo, limitando, ao canal de controle, a transmissão de quadros de confirmação (Ack).

A comunicação utilizando múltiplos canais acarreta em perda da informação transmitida no canal de controle durante os períodos de transmissão de dados. Para tentar resolver este problema, alguns autores propõem a utilização de múltiplos rádios para comunicação e o monitoramento simultâneo [Nasipuri et al. 1999], [Hung et al. 2002] e [Xu et al. 2005]. Um outra abordagem é a utilização de apenas um rádio, resolvendo este problema no próprio mecanismo de acesso ao meio. Uma abordagem comum é forçar cada estação a recolher informações suficientes antes de tentar comunicar [So and Vaidya 2004] e [Hung et al. 2002]. Outros autores, propõem a modificação do esquema de modulação dos rádios. Kwon *et al.* [Kwon et al. 2009] propõem o uso de OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) como forma de permitir o monitoramento e a transmissão em paralelo. Joa-Ng *et al.* [Joa-Ng and Lu 1999] propõem a utilização do mecanismo de modulação CDMA (*Code Division Provides Multiple Access*), associando os códigos de espalhamento a representação de canais de dados.

Dos trabalhos relacionados acima, nenhum considera as limitações físicas e lógicas envolvendo a utilização do canal de controle no processo de gerenciamento dos canais de dados. Todos assumem a utilização deste tipo de abordagem sem se preocupar com o impacto gerado na vazão total do sistema, no atraso médio, na quantidade de colisões e no desperdício de recursos. Este trabalho apresenta uma avaliação do uso do canal de controle em um ambiente de múltiplos canais. Até onde é de conhecimento destes autores, este é o primeiro trabalho feito na área. Para isso, utilizou-se como base o mecanismo de acesso ao meio CSMA/CA (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*) definido pelo padrão IEEE 802.11 [Committee 1999]. O mecanismo CSMA/CA foi modificado para o contexto de múltiplos canais, seguindo o conjunto interseção das funcionalidades comuns identificadas nos trabalhos correlatos apresentados. O modelo matemático para um único canal proposto por Bianchi [Bianchi 2000] é estendido para múltiplos canais e utilizado na análise deste trabalho. Por fim, um simulador de

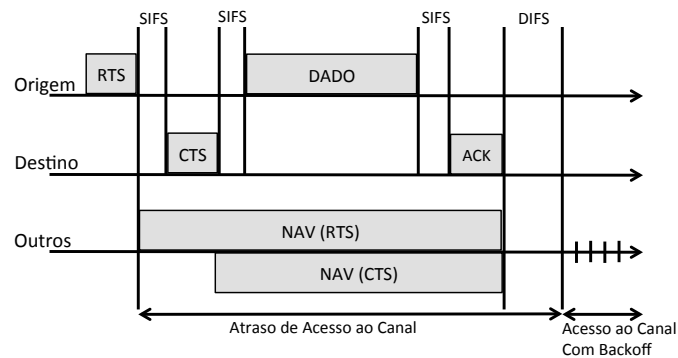


Figura 1. Funcionamento do Padrão IEEE 802.11.

eventos discretos foi implementado e validado com o modelo analítico proposto. O ambiente de simulação foi utilizado para a avaliação aprofundada dos aspectos associados ao mecanismo proposto. Resultados preliminares demonstram que o canal de controle atinge o seu limite de saturação com 8 canais de dados. Outro ponto observado é que o problema conhecido como *Problema do Terminal Escondido Em Ambiente de Múltiplos Canais* [So and Vaidya 2004] impacta diretamente na taxa de ociosidade do canal de controle, o que diminui a vazão final do sistema, mesmo em situações em que existe recursos disponíveis. Este problema é minimizado com o aumento da quantidade de nós na rede. Todavia, o aumento no número de estações implica no aumento do atraso médio do sistema, o que pode tornar proibitiva a sua utilização por aplicações críticas. Para contornar este problema, propomos um modelo de inferência de canais ociosos como forma de diminuir a taxa de ociosidade sem aumentar o atraso médio do sistema.

O restante deste artigo está organizado da seguinte forma. Na Seção 2 será apresentado o funcionamento do protocolo IEEE 802.11 DCF. O protocolo IEEE 802.11 DCF aplicado ao contexto de múltiplos canais será discutido pela Seção 3. O modelo analítico deste protocolo é abordado na Seção 4. Informações sobre o ambiente de simulação e a apresentação de resultados serão abordados pela Seção 5. Por fim, as conclusões e trabalhos futuros serão abordados pela Seção 6.

2. IEEE 802.11 DCF

Nesta seção, apresentaremos uma breve introdução sobre o funcionamento no modo DCF (*Distributed Coordination Function*) padronizado pelo IEEE 802.11. Maiores informações podem ser obtidas em [Committee 1999].

No modo distribuído de operação, toda estação que deseja transmitir dedica-se ao monitoramento do canal para identificar o seu estado corrente. Se o estado do canal estiver ocioso, por um período de tempo igual a DIFS (*Distributed Interframe Space*) tempo, a estação inicia o processo de transmissão. Caso durante este período a estação verifique que o canal encontra-se ocupado, a abordagem adotada será aguardar por um intervalo de tempo pseudoaleatório antes de tentar utilizar novamente o canal. Desta forma, a estação tenta minimizar a probabilidade de colisão. Este procedimento é conhecido como CA (*Collision Avoidance*) e faz parte do mecanismo de acesso ao meio CSMA/CA (*Carrier Sense Multiple Access*) implementado pelo IEEE 802.11 DCF Mode.

O valor que representa o intervalo de tempo em que uma estação não tentará trans-

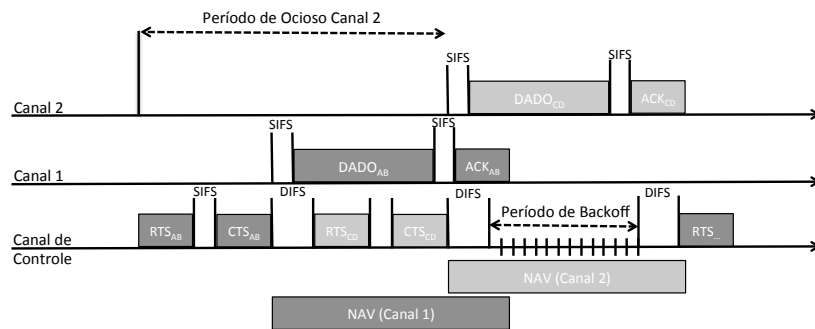


Figura 2. Padrão IEEE 802.11 aplicado ao cenário de Múltiplos Canais.

mitir no canal é conhecido como *valor de backoff* e é obtido pela execução do algoritmo exponencial de *backoff*. Após o canal ficar ocioso por DIFS tempo, a estação começa a decrementar o seu *valor de backoff*, interrompendo este processo toda a vez em que o canal ficar ocupado e retomando o seu decremento após o canal ficar DIFS tempo ocioso. O decremento ocorre na unidade de *unidades de tempo* e é representada por σ .

Com objetivo de realizar a alocação do espaço aéreo e diminuir a quantidade de colisões, o padrão IEEE 802.11 prevê o uso de quadros de controle conhecidos como RTS (*Request to Send*) e CTS (*Clear to Send*). A Figura 1 apresenta a representação do funcionamento do protocolo. Após verificar que o canal ficou ocioso por DIFS tempo, a estação origem envia o quadro RTS notificando a estação de destino que deseja estabelecer comunicação. Após SIFS (*Short Interframe Space*) tempo, a estação de destino irá responder com um quadro CTS. A partir deste momento, as demais estações que escutaram um dos dois quadros irão ficar em silêncio durante todo o período em que a comunicação irá ocorrer, para isso, elas atualizam o valor do seu NAV (*Network Allocation Vector*). Após receber o quadro CTS, a estação de origem irá aguardar SIFS tempo para iniciar a transmissão do quadro que contém os dados. Ao receber o quadro com os dados, a estação de destino irá aguardar SIFS tempo para iniciar o envio do quadro ACK (*Acknowledge*), confirmando assim o recebimento correto do quadro de dados. A partir deste ponto, o processo é reiniciado e as estações passam a ter o mesmo comportamento descrito. Colisões são detectadas quando a sequência de eventos descrita não ocorre. A estação não recebe um CTS, por exemplo, após o envio de um RTS. Neste caso, todas as estações envolvidas irão executar o algoritmo exponencial de *backoff*.

3. IEEE 802.11 DCF no Contexto de Múltiplos Canais

A seção anterior apresentou uma breve introdução sobre o mecanismo IEEE 802.11 em modo de operação distribuída. Nesta seção será apresentado o nosso mecanismo para múltiplos canais baseado nas características comuns dos trabalhos correlacionados. Este mecanismo foi utilizado como base para a proposta do modelo analítico para múltiplos canais a ser discutidos na próxima seção. As características comuns dos trabalhos apresentados estão relacionadas abaixo:

- uso de um canal exclusivo para a coordenação das estações;
- modificação dos quadros RTS/CTS para incluir o canal a ser utilizado;
- mapeamento do uso dos canais de dados através dos quadros RTS/CTS;
- perda do estado dos canais durante os períodos de comunicação;

- transmissão do quadro de dados e o de confirmação (ACK) no canal de dados;

As características relacionadas foram reunidas no mecanismo de acesso a múltiplos canais, cujo funcionamento encontra-se representado pela Figura 2. Todas as estações por padrão encontram-se no canal de controle, ausentando-se somente durante o período de transmissão dos dados. Os quadros RTS e CTS foram modificados para incluírem a informação do canal de dados escolhido pela estação transmissora. Desta forma, as demais estações tomam conhecimento do estado dos canais de dados a medida em que quadros RTS e CTS são transmitidos no canal de controle. Somente as estações que conhecem um ou mais canais de dados ociosos é que podem comunicar.

Diferentemente do mecanismo de acesso ao meio apresentado na Seção 2, o processo de alocação do espaço aéreo define em qual canal de dados as informações serão transmitidas. No exemplo apresentado pela Figura 2, as estações A e B definem que a transmissão será realizada no canal de dados 1. Neste momento, as demais estações atualizarão os seus respectivos NAVs para que este canal não seja utilizado durante o período da transmissão anunciada. Todavia, como existe a disponibilidade de um segundo canal de dados, as estações C e D irão solicitar o seu uso. É importante ressaltar que durante o processo de alocação do canal de dados 2, as estações A e B não tomaram conhecimento deste processo, pois ambas encontravam-se no canal de dados 1. Sendo assim, quando uma estação retorna ao canal de controle após transmitir, o único canal que ela pode considerar livre é aquele que ela acabou de liberar. Caso não consiga alocar este canal, a estação permanecerá no canal de controle por um tempo suficientemente grande para tomar conhecimento de outros canais livres.

Na próxima Seção iremos apresentar o modelo teórico definido para avaliação do IEEE 802.11 em ambiente de múltiplos canais.

4. Modelo Teórico

O modelo teórico a ser apresentado é baseado no trabalho proposto por Bianchi [Bianchi 2000], o qual é aplicado ao contexto de um único canal. Nesta seção, apresentamos o nosso modelo analítico para o mecanismo IEEE 802.11 em modo distribuído para múltiplos canais.

Preliminares

Seja n o número de estações de uma rede de um salto, k a quantidade de canais de dados e c o canal de controle. Onde k e c apresentam a mesma taxa de transmissão T_{rx} , $n \gg k$ e c é dividido em *unidades de tempo*, definida por u . Cada unidade de tempo u possui um tamanho variável, que está associado a uma certa probabilidade de ocorrer. Neste trabalho, assume-se que cada estação sempre tem informação para transmitir. Os valores possíveis de ocorrer estão relacionados aos seguintes eventos do canal de controle:

- *Canal Ocioso* ($u = \sigma$)
- *Transmissão bem Sucedida* ($u = T_s$)
- *Transmissão com Colisão* ($u = T_c$)

Os valores que u pode assumir são constantes e são definidos por:

Tabela 1. Parâmetros publicados em [Committee 1999] e utilizados para a obtenção dos resultados numéricos e de simulação.

Descrição	Valor
Carga útil do pacote (FRAME)	8184 bits
Atraso de propagação (δ)	1 μ s
unidade de tempo ociosa (σ)	50 μ s
Taxa de Bits dos Canais (T_{rx})	1 Mbps
DIFS	128 μ s
SIFS	28 μ s
RTS	288 μ s
CTS, ACK	240 μ s
W	16
m	6

$$\begin{cases} T_s = DIFS + RTS + SIFS + CTS + (2 * \delta) \\ T_c = DIFS + RTS + \delta \\ T_{DATA} = SIFS + \frac{FRAME}{T_{rx}} + SIFS + ACK + (2 * \delta) \end{cases}$$

T_{DATA} é o intervalo de tempo suficientemente grande para acomodar a transmissão de informação útil em um canal de dados. A Tabela 1 apresenta os valores das constantes apresentadas acima. No canal de controle, os quadros colidem de forma constante e independente com probabilidade p . O comportamento do algoritmo exponencial de *backoff* é modelado por τ , que representa o “desejo” de uma estação querer transmitir em dado momento [Bianchi 2000]. Seja W o tamanho da janela, $W = CW_{min}$, m o “estágio máximo de *backoff*”, tal que o tamanho máximo da janela seja $CW_{max} = 2^m \times W$, o valor de τ pode ser obtido por:

$$\tau = \frac{2(1 - 2p)}{(1 - 2p)(W + 1) + pW(1 - (2p)^m)}. \quad (1)$$

A probabilidade p está associada o fato de, em dado momento, duas ou mais estações transmitirem. A premissa assumida de que os quadros colidem de forma constante e independente com probabilidade p , implica que cada transmissão “vê” o sistema em um mesmo estado. Quando o sistema estabiliza-se, cada estação passa a transmitir um quadro com probabilidade τ [Bianchi 2000], o que resulta na definição:

$$p = 1 - (1 - \tau)^{n-1}. \quad (2)$$

A probabilidade de pelo menos uma transmissão ocorrer, em um dado momento, é definida por:

$$P_{tr} = 1 - (1 - \tau)^n. \quad (3)$$

A probabilidade de uma transmissão ser bem sucedida é dada pela probabilidade de exatamente uma estação e definida por:

$$P_s = \frac{n\tau(1-\tau)^{n-1}}{P_{tr}}. \quad (4)$$

Estimativa da Vazão Máxima em Múltiplos Canais

O objetivo do modelo a ser apresentado é calcular a vazão máxima dos canais de dados. Nesse sentido, faz-se necessário calcular a taxa em que cada estação chega ao canal de dados. Para simplificação da análise, no limite, assume-se que o canal de controle encontra-se em um dos seguintes estados:

- **Estado 1:** Todos os k canais de dados estão ocupados;
- **Estado 2:** Existe exatamente um canal de dados ocioso e $n - k + 1$ estações no canal de controle disputando o seu acesso.

Como $T_{DATA} > T_s$, durante o período de transmissão em um canal de dados, o canal de controle é utilizado para alocação dos canais de dados disponíveis. Neste caso, em condições adequadas, o sistema irá alcançar o *Estado 1*. Quando todos os canais de dados estiverem ocupados, o canal de controle ficará ocioso. Neste caso, um canal de dados será liberado a cada $\frac{T_{DATA}}{k} \mu s$. Após a liberação de um canal de dados, o sistema alcança o *Estado 2*. Neste ponto, se o canal de dados for negociado em um espaço de tempo menor que $\frac{T_{DATA}}{k} \mu s$, o sistema atingirá novamente o *Estado 1*. Caso esta condição não seja respeitada, um segundo canal de dados será liberado e mais uma estação chegará ao canal de controle. A restrição $n \gg k$ faz com que a condição $\frac{T_{DATA}}{k} \mu s$ ocorra um número maior de vezes. Sendo assim, para simplificação do modelo, assume-se que a condição é sempre respeitada. Neste caso, no limite, existe um canal de dados ocioso, $n - k + 1$ estações disponíveis e, em um dado momento, um dos três eventos abaixo podem ocorrer no canal de controle:

- **Evento 1:** Nenhuma estação deseja transmitir. Este estado pode acontecer quando todas as estações encontram-se decrementando os seus contadores de *backoff*. A probabilidade deste evento ocorrer é representada por $(1 - P_{tr})$ e o tamanho da unidade de tempo u é $\sigma(1 - P_{tr})$;
- **Evento 2:** Intervalo de tempo gasto no processo de alocação do canal de dados. Conforme a premissa definida, um canal de dados será liberado em um tempo inferior ou igual a $\frac{T_{DATA}}{k}$. Neste caso, o tempo compreendido entre a negociação do canal de dados e outra estação chegar ao canal de controle não será maior que $\max(\frac{T_{DATA}}{k}, T_s)$. A probabilidade deste evento ocorrer é representada $P_{tr}P_s$ e o tamanho da unidade de tempo u é $P_{tr}P_s \max(\frac{T_{DATA}}{k}, T_s)$;
- **Evento 3:** Duas ou mais estações desejam transmitir. Neste caso, haverá colisão. A probabilidade deste evento ocorrer é representada pela probabilidade de ocorrer um transmissão e ela não ser bem sucedida, $P_{tr}(1 - P_s)$. O tamanho da unidade de tempo u é $P_{tr}(1 - P_s)T_c$.

Com base nos três possíveis eventos definidos para o canal de controle, é possível calcular o tamanho médio de uma unidade de tempo escolhida ao acaso.

$$S = \sigma(1 - P_{tr}) + P_{tr}P_s \max\left(\frac{T_{DATA}}{k}, T_s\right) + P_{tr}(1 - P_s)T_c. \quad (5)$$

De acordo com a análise apresentada, o único evento em que existe uma estação deixando o canal de controle é o *Evento 2*. Desta forma, podemos representar a taxa em que uma estação chega a um canal de dados, pela equação:

$$\lambda = P_{tr}P_s. \quad (6)$$

Fazendo uma analogia com teoria de filas, temos que o “tempo de serviço” de um canal de dados pode ser representado por $\frac{T_{DATA}}{S}$. Ou seja, gasta-se T_{DATA}/S para um canal transmitir apenas um pacote de dados. Neste caso, o tráfego oferecido é representado por $\frac{\lambda T_{DATA}}{S}$ e a taxa de ocupação dos canais de dados é calculada pela Equação:

$$O = \frac{\lambda T_{DATA}}{kS}. \quad (7)$$

5. Ambiente de Simulação e Resultados

Nesta seção iremos apresentar os resultados do modelo analítico discutido na Seção 4, bem como questões relacionadas ao comportamento do método de acesso a múltiplos canais proposto na Seção 3. Por fim, discutiremos os resultados obtidos com o simulador implementado.

Com objetivo de realizar uma avaliação aprofundada do mecanismo de acesso proposto, um simulador de eventos discreto foi implementado na linguagem de programação C++. A validação do simulador implementado foi realizada mediante a comparação dos resultados empíricos, provenientes do simulador, com o resultados obtidos a partir do modelo analítico apresentado.

Os parâmetros de simulação utilizados encontram-se publicados na Tabela 1. O número de estações transmissoras foram variadas de tal forma que n assumiu os seguintes valores 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128, 256 e 512. É importante ressaltar que por motivos de simplificação, cada estação transmissora possui a sua estação receptora correspondente a qual não faz parte do conjunto de estações transmissoras. A quantidade de canais de dados foi variada de tal forma que k assumiu os seguintes valores 1, 2, 4, 8, 16, 32 e 64. Cada valor obtido é o resultado de uma média de 10 simulações, cujo intervalo de confiança é de 95% com uma variação média de menos de 1%.

5.1. Taxa de Ocupação

O gráfico apresentado na Figura 3(a) representa a taxa média de ocupação dos canais de dados (Equação 7) a medida em que o número de estações da rede cresce. Conforme discutido na Seção 4, estamos considerado o cenário em que existe $n - k + 1$ estações transmissoras no canal de controle, sendo $n \geq k$. Caso contrário, não seria possível obter a vazão máxima do sistema.

Observando a Figura 3(a), verifica-se que o modelo analítico proposto encontra-se condizente com os resultados obtidos pelo simulador implementado. É possível verificar que o aumento na quantidade de estações transmissoras e de canais de dados têm um impacto negativo na taxa de ocupação dos canais de dados e conseqüentemente na vazão total do sistema. Este comportamento está diretamente relacionado com a capacidade física do canal de controle e melhor discutido nas próximas subseções.

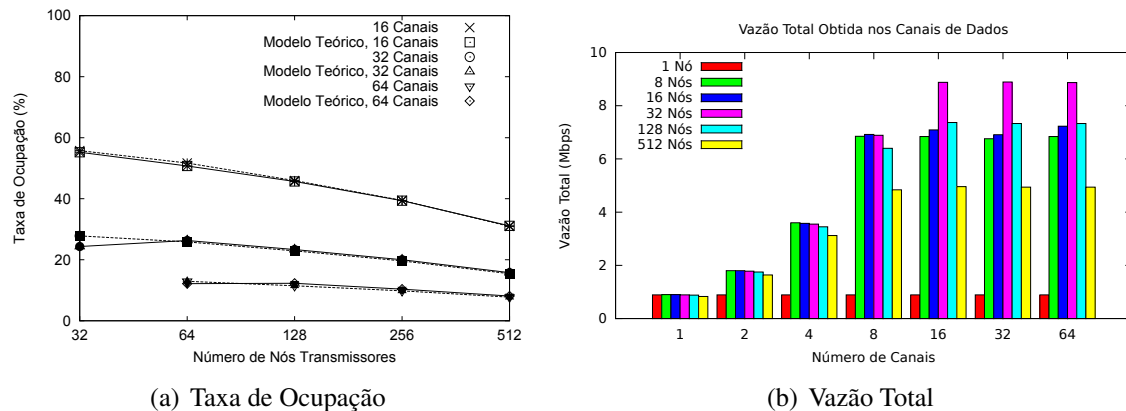


Figura 3. Avaliação dos canais de dados quando há variação na quantidade de estações que desejam transmitir.

5.2. Avaliação Capacidade do Canal de Controle

Conforme discutido, diversos trabalhos utilizam o canal de controle como meio para a coordenação entre os recursos disponíveis e as estações que desejam comunicar. Nesta seção é apresentado uma investigação quanto o uso deste recurso no processo de comunicação entre as estações da rede.

A Figura 3(b) apresenta a vazão total do sistema quando a quantidade de canais de dados aumenta. Intuitivamente, acredita-se que quanto maior for a quantidade de canais de dados disponíveis, maior será a vazão total do sistema. Contudo, os resultados demonstram que este comportamento não acontece. É possível verificar que para 16 estações transmissoras, a vazão inicia com 1.8 Mbps, utilizando 2 canais, aumentando para 3.58 Mbps com 4 canais e 6.92 Mbps com 8 canais. A partir deste ponto, para qualquer quantidade de estações, mesmo dobrando-se o número de canais de dados a vazão total obtida não cresce na mesma proporção. Para qualquer quantidade de estações, chega-se um ponto em que a vazão total agregada estabiliza-se e aumentar a quantidade de recursos não significa aumentar a vazão total do sistema. Verifica-se ainda que o aumento da quantidade de estações implica na diminuição da vazão total do sistema. Para 16 canais, a vazão máxima obtida com 32 estações é 8.88 Mbps. Este valor cai para 7.37 Mbps com 128 estações e 4.94 Mbps com 512 estações.

A relação de desperdício torna-se evidente quando analisamos os resultados apresentados pela Figura 4(a). A figura apresenta a taxa de ocupação dos canais de dados quando a quantidade de canais cresce. Analisando o exemplo anterior, 16 estações transmissoras e 8 canais de dados, aumentando-se em 100% a quantidade de canais, a taxa de ocupação cai em 49%. Nesse caso, saímos de 86.77% de ocupação para 44.31%, ou seja, com 16 canais de dados, passamos a ter 55.69% de ociosidade desses recursos. Fica claro que, para este cenário, o gerenciamento da quantidade excessiva de recursos disponíveis tornou-se um problema para o mecanismo de acesso ao meio.

A Figura 4(b) apresenta a taxa de uso do canal de controle. Esta taxa corresponde a todo o tempo, durante o período de simulação, em que o canal de controle encontrou-se ocupado. Conforme pode ser observado, para 16 ou mais estações transmissoras e a partir de 8 canais de dados, a taxa de uso do canal de controle é superior a 59% de uso.

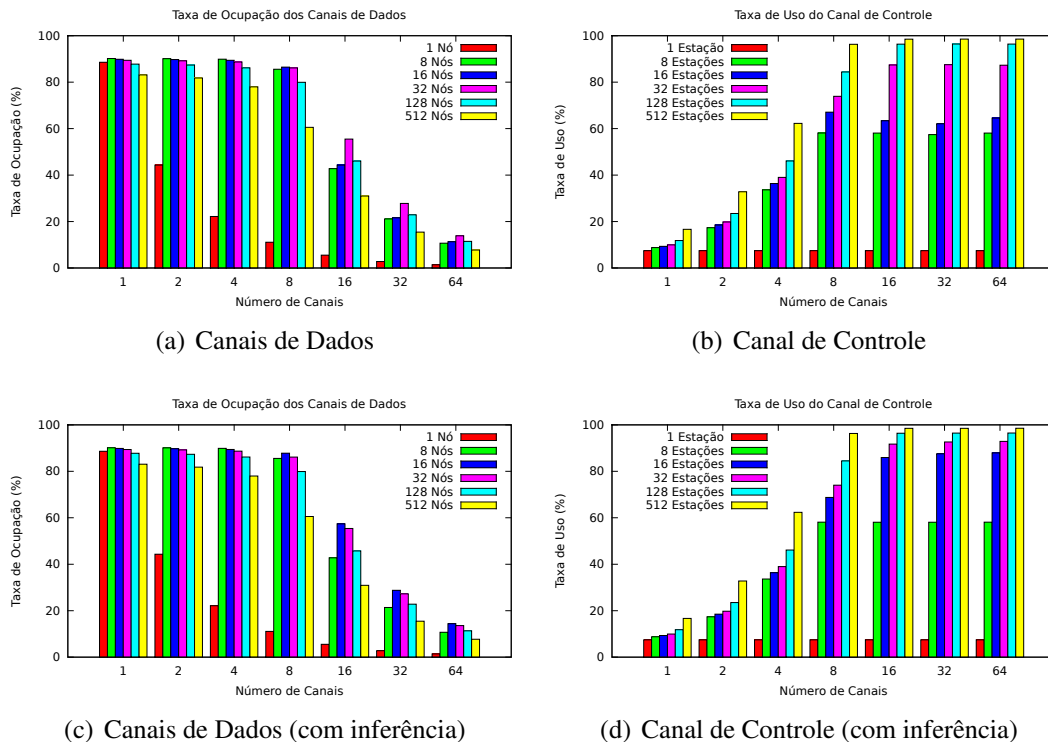


Figura 4. Comparação entre a Taxa de Ocupação vs a Taxa de Uso.

Cruzando as informações dos dois últimos gráficos, destaca-se o caso específico de 16 estações e 16 canais de dados, onde é observado que a taxa de ocupação do canal de dados é de 44.31% (Figura 4(a)), sendo que a taxa de uso do canal de controle é de 60% (Figura 4(b)). Mesmo existindo recursos disponíveis nas estações no canal de controle não estão utilizando.

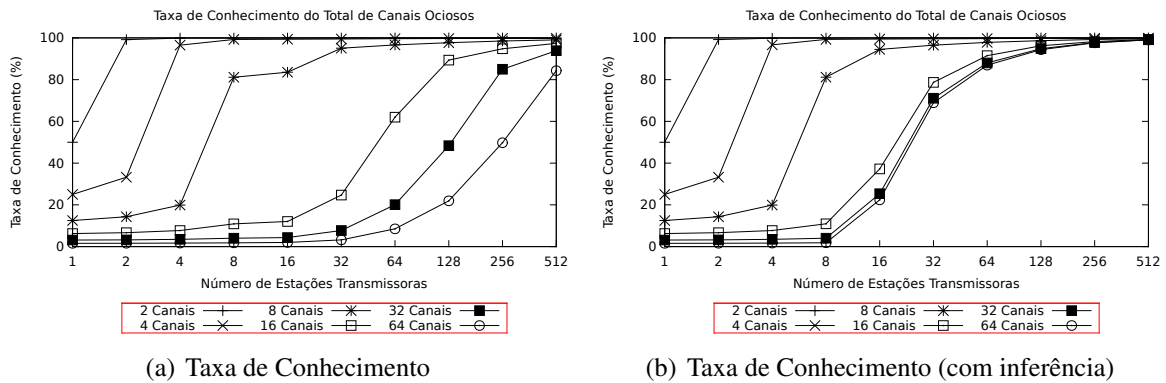
São dois os problemas identificados para esse comportamento. O primeiro está relacionado com a perda do estado dos canais de dados quando uma estação retorna ao canal de controle. Conforme já discutido, ao retornar ao canal de controle, a estação conhece somente o estado do canal que ela acabou de liberar. De acordo com o protocolo, para poder transmitir novamente, esta estação deverá aguardar no canal de controle por quadros RTS e CTS, caso não tenha conseguido retornar ao canal liberado, de forma a tomar conhecimento de quando um próximo canal de dados ficará disponível. No cenário observado, a estação retorna ao canal de controle e passa a ficar aguardando por um período muito maior que o necessário, já que existe canal de dados disponível, contudo, ela não tem este conhecimento. O segundo problema está relacionado com o algoritmo exponencial de *backoff*. Mesmo existindo canais de dados disponíveis, as estações presentes no canal de controle encontram-se decrementando os seus contadores de *backoff* e assim, o recurso é desperdiçado. Estes dois problemas serão abordados com maiores detalhes nas próximas subseções.

5.3. Perda do Estado dos Canais de Dados

O problema de perda do estado dos canais de dados também é conhecido na literatura como *problema do terminal escondido em ambiente de múltiplos canais*

Tabela 2. Resultados para 16 canais de dados e 16 estações.

Qt de Estações	Frequência	τ
5	0.15	0.076149
6	0.43	0.069677
7	0.29	0.064275
8	0.11	0.059719
9	0.02	0.055832

**Figura 5. Taxa de conhecimento do total de canais ociosos quando a quantidade de estações cresce.**

[So and Vaidya 2004]. Este problema pode acarretar em colisões, caso as estações tenham uma política agressiva e queiram selecionar um canal para comunicar sem o conhecimento real do seu estado. Caso as estações tenham uma política conservadora, a perda do estado dos canais também irá gerar desperdícios de recursos, já que as estações aguardarão o envio de novos RTS e CTS para tomar conhecimento de quando os canais ficarão liberados, o que pode acarretar em muitos casos, em esperas desnecessárias.

Todavia, esse comportamento do mecanismo de acesso ao meio pode ser aprimorado. Quando uma determinada estação retorna ao canal de controle, os canais de dados alocados serão liberados, conforme discutido na Seção 4, a uma taxa de $\max\left(\frac{T_{DATA}}{k}, T_s\right)$. Esta informação nos permite inferir que a partir do momento em que uma estação retorna ao canal de controle, passados T_{DATA} tempo, os canais que não foram alocados via RTS/CTS, pelas demais estações, podem ser considerados ociosos e devem ser disputados pela estação. Esta abordagem é definida, por este trabalho, como sendo o *método de acesso a múltiplos canais com inferência* e permite a diminuição do tempo de espera no canal de controle, por estações que aguardam a liberação de recursos.

Nesse contexto, a Figura 5(a) apresenta o grau de conhecimento da quantidade de canais de dados ociosos que cada estação tem, no momento em que consegue selecionar um canal de dados para comunicação. O gráfico nos mostra que quanto maior for a quantidade de canais de dados, maior deverá ser a quantidade de estações para que o grau de conhecimento individual cresça. Este comportamento ocorre pois o aumento no número de estações implica no aumento do tempo médio de permanência da estação no canal de controle e, conseqüente, no aumento na quantidade de quadros RTS/CTS recebidos. A Figura 5(b) apresenta o mesmo gráfico, contudo, o modo de inferência do

mecanismo de acesso encontra-se habilitado. É possível verificar um aumento acentuado no grau de conhecimento dos canais de dados, principalmente quando a quantidade de canais é maior que 8. Em nosso exemplo, para 16 canais e 16 estações, saímos de um cenário de 12% (Figura 5(a)) de conhecimento para para 38% (Figura 5(b)).

Este comportamento tem um impacto direto na taxa de ocupação dos canais de dados e no uso efetivo do canal de controle. Na Figura 4(c) apresentamos a taxa de ocupação dos canais de dados e na Figura 4(d) a taxa de uso do canal de controle quando o modo de inferência do mecanismo de acesso encontra-se habilitado. É possível verificar que houve uma melhora em alguns casos. No exemplo considerado, 16 canais e 16 estações, saímos de uma taxa de ocupação de 44.31% (Figura 4(a)) para 57.39% (Figura 4(c)). Consequentemente, a taxa de uso do canal de controle subiu de 60% (Figura 4(b)) para 86.96% (Figura 4(d)).

Retomando a discussão feita no parágrafo final da Subseção 5.2, foi possível verificar que, no caso analisado, 16 estações e 16 canais, o uso de inferência para minimizar o problema de perda do estado dos canais acarretou em uma melhora de quase 23% na taxa de ocupação dos canais de dados. Contudo, mesmo após a melhora do uso dos canais de dados, verifica-se ainda 13.04% de ociosidade do canal de controle. Conforme já explicado, este problema está relacionado com o algoritmo exponencial de *backoff*. Ou seja, as estações encontram-se em contenção decrementando os seus respectivos contadores de *backoff*. Para verificarmos esta afirmação, precisamos calcular a quantidade de tempo total referente as unidades de tempo u que tiveram tamanho σ . Para isso, a equação abaixo calcula P_{fo} que representa a probabilidade de se ter, em um dado momento, $u = \sigma$.

$$P_{fo} = \sum_{i=1}^n P_{cc_i} (1 - \tau_i)^i, \quad (8)$$

Onde P_{cc_i} representa a probabilidade de i estações estarem no canal de controle e τ_i representa o valor de τ calculado para a quantidade de estações igual a i . Como não há nenhum estudo na literatura que identifique a distribuição de probabilidade que modele a população de estações presentes no canal de controle, retiramos do simulador esta informação. A Tabela 2 apresenta a quantidade de estações relacionadas com a frequência em que estiveram presentes no canal de controle durante o período total de simulação. Utilizando os valores da tabela, verificamos que a probabilidade de termos uma unidade de tempo ociosa no canal de controle é de $P_{fo} = 0,641026$. Para a simulação, foram considerados no canal de controle um universo de 100.000 unidades de tempo. Sendo assim, a quantidade total de tempo em que o canal de controle ficou ocioso, é representado por $100.000 * P_{fo} * \sigma$. O Tempo total de simulação, para este cenário, foi de 24.522.519 μ s. Calculando o percentual de tempo em que o canal de controle ficou ocioso, temos: $\frac{100.000 * P_{fo} * \sigma}{24.522.519,4} = 13.07\%$.

O percentual de conhecimento da quantidade de canais ociosos disponíveis (Figura 5(a)) gera um impacto direto na taxa de ocupação individual de cada canal. Isso acontece pois ao conhecer uma fração menor do universo de canais disponíveis, cada estação tende a acessar sempre o mesmo conjunto de canais. Este comportamento leva o desbalanceamento no uso dos recursos disponíveis. As Figuras 6(a) e 6(b) apresentam a taxa média das diferenças de vazão entre os canais de dados e o canal com maior vazão.

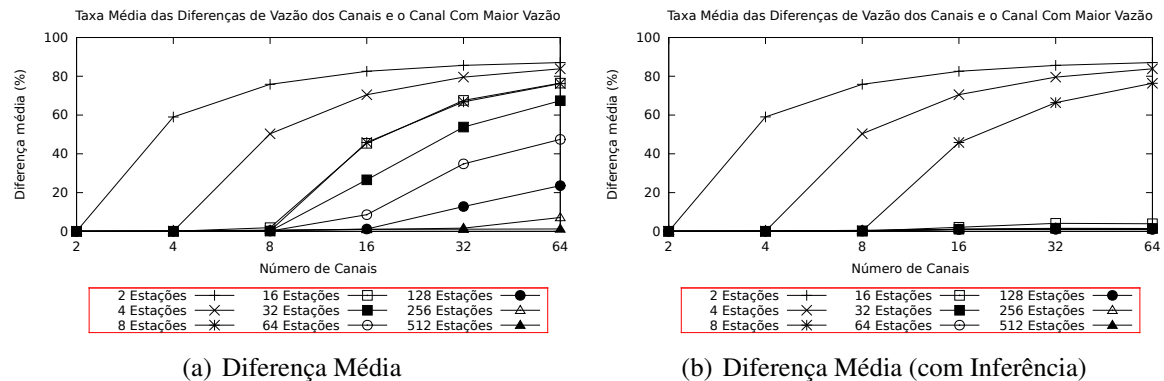


Figura 6. Avaliação quanto ao uso homogêneo dos canais de dados.

O objetivo destes gráficos é demonstrar o impacto no sistema do uso desbalanceado dos recursos de comunicação. Na Figura 6(a), é possível verificar que a medida em que a quantidade de recursos aumenta, aumenta também a discrepância média de vazão entre o canal com maior vazão e os demais canais de dados. Este problema é resolvido, Figura 6(b), para $k \leq n$, quando o modelo de inferência encontra-se habilitado. Para o caso $k > n$, como a quantidade de recurso é maior que a quantidade de estações, cada estação tende a sempre voltar para o canal que acabou de liberar. Isso ocorre pois a estação não permanece tempo suficiente no canal de controle para tomar conhecimento, por inferência ou RTS/CTS, da existência de outros canais ociosos.

Isso encerra essa abrangente avaliação sobre o IEEE 802.11 em múltiplos canais, bem como evidencia o impacto do uso de canal de controle no desempenho do padrão 802.11.

6. Conclusão

Neste trabalho foi apresentado uma avaliação do uso do canal de controle em ambiente de múltiplos canais. Utilizou-se como base para este trabalho o mecanismo de acesso ao meio definido pelo padrão IEEE 802.11 [Committee 1999]. As modificações propostas no padrão seguiram o conjunto interseção das funcionalidades apresentadas pelos trabalhos correlados apresentados. Para análise do protocolo, o modelo matemático de Bianchi [Bianchi 2000] foi estendido. Um simulador de eventos discretos foi implementando, o que permitiu o aprofundamento nas análises do mecanismo de acesso. Resultados preliminares demonstram que o canal de controle atinge o seu limite de saturação com 8 canais de dados. Outro ponto observado é que o problema conhecido como *Problema do Terminal Escondido Em Ambiente de Múltiplos Canais* [So and Vaidya 2004] impacta diretamente na taxa de ociosidade do canal de controle, o que diminui a vazão final do sistema, mesmo havendo recursos disponíveis. Este problema foi minimizado com a proposta do modelo de inferência incorporado a proposta. Como trabalho futuro, propõem-se a investigação da distribuição de probabilidade que modela o comportamento da população de estações transmissoras no canal de controle.

Agradecimentos

Este trabalho foi parcialmente financiado pelo CNPq.

Referências

- Bianchi, G. (2000). Performance analysis of the ieee 802.11 distributed coordination function. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 18(3):535–547.
- Choi, N., Seok, Y., and Choi, Y. (2003). Multi-channel mac protocol for mobile ad hoc networks. In Society, I., editor, *IEEE 58th Vehicular Technology Conference*, volume 2, pages 1379–1382.
- Committee, L. M. S. (1999). Part 11: Wireless lan medium access control (mac) and physical layer (phy) specifications. Technical report, IEEE Computer Society.
- Cordeiro, C., Challapali, K., and Birru, D. (2006). Ieee 802.22: An introduction to the first wireless standard based on cognitive radio. *Journal of Communications*, 1(1):38–47.
- Domenico, A. D., Strinati, E. C., and Benedetto, M.-G. D. (2012). A survey on mac strategies for cognitive radio networks. *IEEE COMMUNICATIONS SURVEYS & TUTORIALS*, 14(1):21–44.
- Hung, W.-C., Law, K. E., and Leon-Garcia, A. (2002). A dynamic multi-channel mac for ad hoc lan. In *21st Biennial Symposium on Communications*, pages 31–35.
- Joa-Ng, M. and Lu, I.-T. (1999). Spread spectrum medium access protocol with collision avoidance in mobile ad-hoc wireless network. In *Eighteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies INFOCOM*, volume 2, pages 776–783.
- Kwon, H., Seo, H., Kim, S., and Lee, B. G. (2009). Generalized csma/ca protocol for ofdma systems: Protocol design, throughput analysis, and implementation issues. In *IEEE Transaction on Wireless Communications*, volume 8, pages 4176–4187.
- Li, J., Haas, Z. J., Sheng, M., and Chen, Y. (2003). Performance evaluation of modified ieee 802.11 mac for multi-channel multi-hop ad hoc networks. *Journal of Interconnection Networks*, 4(3):345–359.
- Nasipuri, A., Zhuang, J., and Das, S. R. (1999). A multichannel csma mac protocol for multihop wireless networks. In *IEEE Wireless Communications and Networking Conference WCNC*, volume 3, pages 1402–1406.
- So, J. and Vaidya, N. H. (2004). Multi-channel mac for ad hoc networks: handling multi-channel hidden terminals using a single transceiver. In *Proceedings of the 5th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and computing, MobiHoc '04*, pages 222–233, New York, NY, USA. ACM.
- Xu, C., Liu, K., Yuan, Y., and Liu, G. (2005). A novel multi-channel based framework for wireless ieee 802.11 ad hoc networks. In *International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing*, volume 2, pages 812–815.
- Zhao, Y. and Morales-Tirado, L. (2012). Cognitive radio technology: Principles and practice. In *International Conference on Computing, Networking and Communications*, pages 650 – 654.
- Zhao, Y., Xiang, Y., Xu, L., and Shi, M. (2003). A multi-channel medium access control protocol for multicast in mobile ad-hoc network. In Society, I., editor, *The 14th IEEE 2003 International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communication Proceedings*, volume 2, pages 1639–1643.