

Um Protocolo de Acesso ao Meio para Redes Locais sem Fio Infra-estruturadas utilizando Múltiplos Canais Ortogonais

Luis Felipe M. de Moraes¹, Julio Heitor Silva Nóbrega¹ *

¹Laboratório de Redes de Alta Velocidade - RAVEL
Universidade Federal do Rio de Janeiro - PESC/COPPE
{moraes, julioh}@ravel.ufrj.br

Abstract. *With the increase in the demand for wireless high-speed networks and the use of delay-sensitive applications, MAC protocols using multiple channels have received a lot of attention recently. The use of multiple orthogonal channels allows simultaneous transmissions, improving the performance of the network. This work proposes a multi-channel MAC protocol for infrastructured wireless networks, considering multiple radios in the access point. Based on a polling scheme, the protocol aims to reduce the queueing time experienced in contention-based protocols, permitting the stations to ask the access point to postpone the transmission opportunity instead of "pass the turn" when its destination is busy (receiving or transmitting) in other channel. Approximated expressions for the queueing delay are deduced using a combination of M/G/k and queueing polling models. The results, validated by simulation, show that the queueing delay is better compared to the same protocol but without the postponing function. Besides, from the results it is possible to determine the quantitative gain in the queueing time, for a specific traffic, when the number of channels varies.*

Resumo. *Com o aumento da demanda por redes sem fio de alta velocidade e o uso de aplicações sensíveis ao atraso, protocolos de acesso utilizando múltiplos canais têm recebido muita atenção recentemente. O uso de múltiplos canais ortogonais permite transmissões simultâneas, aumentando a performance da rede. Neste trabalho é proposto um protocolo MAC multi-canal para redes sem fio infra-estruturadas, considerando múltiplos rádios no ponto de acesso. Baseado em um esquema de polling, o protocolo tem como objetivo reduzir o tempo de fila experimentado em protocolos baseados em contenção, permitindo que as estações peçam o adiamento da oportunidade de transmissão ao ponto de acesso ao invés de "passar a vez" quando seus destinos estão ocupados (recebendo ou transmitindo) em outro canal. Expressões aproximadas para o tempo médio na fila são deduzidas usando uma combinação de um modelo de fila M/G/k com um modelo de polling. Os resultados, validados por simulação, mostram que o tempo na fila é menor se comparado com o mesmo protocolo mas sem a função de adiamento das transmissões. Além disso, através dos resultados é possível determinar o ganho quantitativo no tempo de fila, para um determinado tráfego, quando o número de canais varia.*

* Autores em ordem alfabética de sobrenomes.

1. Introdução

Recentemente, as redes locais sem fio 802.11 têm enfrentado um novo patamar de demanda por mais velocidade e qualidade de serviço, não apenas por causa do aumento de usuários nos pontos de acesso mas também pela necessidade de suportar cada vez mais tráfego multimídia. Vídeo sob demanda (*Video on Demand - VoD*), conversação por voz e video-conferências são exemplos de aplicações que exigem uma grande quantidade de banda disponível além de serem sensíveis ao atraso. Imaginar as atuais arquiteturas estabelecidas satisfazendo as necessidades das aplicações apresentadas de maneira eficiente, sem pensar em um novo paradigma de provisão de serviços, se tornará (se já não se tornou) uma opção inviável.

O conceito de sistemas com múltiplos rádios e/ou antenas tem sido encarado como um forte candidato a futuras redes de acesso sem fio, por permitir transmissões simultâneas não interferentes. Essas transmissões são possíveis pois os padrões IEEE 802.11a/g dispõem de canais ortogonais entre si. Se cada estação sintonizar em um canal diferente, elas podem transmitir ao mesmo tempo sem interferir umas nas outras. Como exemplo de uso desses canais, podemos citar a tecnologia MIMO (*Multiple Input Multiple output*) [1] que ganhou bastante atenção influenciado pelo novo padrão 802.11n. Apesar de apenas um rádio ser utilizado em cada estação, a informação é transmitida nos diversos canais através de um conjunto de antenas. O objetivo é aumentar a velocidade e o alcance das transmissões, ao mesmo tempo que se reduz a interferência das mesmas. Além disso, o problema dos múltiplos caminhos encontrado em muitas redes *ad Hoc* e infra-estruturadas é atenuado, pois o receptor das transmissões combina os sinais recebidos em um único sinal.

Uma outra abordagem estudada pioneiramente em [2, 3] é utilizar pontos de acesso (AP - *Access Point*) co-localizados, onde estes são agrupados em um único lugar, cobrindo a mesma área, mas operando em canais distintos de forma a fornecer largura de banda agregada proporcional ao número de APs (limitado pelo número de canais ortogonais disponíveis pelos padrões "a" e "g").

O uso de múltiplos rádios em um único ponto de acesso é uma opção alternativa às citadas anteriormente, onde os rádios funcionam sobre uma mesma camada MAC, permitindo que estes atuem de maneira integrada. Como vantagem, podemos citar o custo com *hardware*, que é menor se comparado com as demais abordagens. No caso do MIMO, é necessário que todas as estações estejam equipadas com um conjunto de antenas (o que nem sempre é possível), enquanto que nesta última abordagem, nenhuma modificação de *hardware* é necessária nas estações. No caso dos APs co-localizados, o custo com a infra-estrutura pode ser um limitador para o seu uso em larga escala. Além disso, nesta abordagem os rádios não funcionam de maneira integrada. Cada AP possui sua própria camada MAC, exigindo um rígido controle de associação das estações clientes.

Vários protocolos multi-canais foram propostos para redes sem fio *ad Hoc*, mas que podem facilmente ser adaptados para as redes infra-estruturadas com múltiplos rádios no AP (além dos trabalhos propostos especificamente para as redes infra-estruturadas). Entretanto, no melhor do nosso conhecimento, todos eles se baseiam em contenção para dar acesso ao meio sem fio, podendo degradar rapidamente o desempenho à medida que a utilização da rede aumenta. Além disso, nenhum dos trabalhos ataca a questão dos destinos das estações estarem ocupados em outro canal quando estas conseguem acessar o

meio. Se uma estação consegue obter acesso ao meio mas seu destino não puder responder por estar sintonizado em um canal diferente, a oportunidade de transmissão será perdida e a estação terá que reiniciar todo o processo de *backoff*. Apenas em [4] é estudado o impacto deste problema no desempenho dos protocolos multi-canais, mas nenhuma solução é proposta para amenizá-lo. Assim, o objetivo deste trabalho é apresentar uma solução para este problema.

Para isso, propõe-se um protocolo alternativo que busca melhorar o desempenho da rede, utilizando uma abordagem livre de contenção através da introdução de um esquema de *polling*. O esquema permite que as estações sejam escalonadas pelo ponto de acesso enquanto ocorrem transmissões em outros canais. Além disso, é apresentada uma solução para amenizar o impacto negativo gerado na performance da rede quando os destinos das estações estão ocupados.

A seção 2 discute os trabalhos relacionados a protocolos multi-canais para redes sem fio. Na seção 3, o protocolo proposto é descrito. A seção 4 apresenta a modelagem analítica para o tempo de fila. Em seguida, a seção 5 descreve as simulações realizadas e os resultados obtidos são analisados. Finalmente, a seção 6 conclui esse trabalho.

2. Trabalhos Relacionados

Há muitas variações em protocolos de acesso ao meio multi-canais. Em [4], uma classificação dos protocolos para redes *ad Hoc*, baseada em seus princípios gerais de operação, é apresentada. Existem basicamente quatro abordagens para o acesso ao meio:

- **Canal de controle dedicado:** Cada dispositivo móvel possui dois rádios. Um rádio está sintonizado em um canal dedicado a mensagens de controle e o outro pode sintonizar em qualquer outro canal. Todos os dispositivos podem escutar todos os acordos feitos pelos demais, até mesmo durante a transmissão de dados. A troca de mensagens RTS (*Request to Send*) e CTS (*Clear to Send*) no canal de controle entre um par de estações, permite que estas determinem qual canal será usado para a transmissão dos dados. Exemplos desta abordagem incluem [5, 6].
- **Salto de Frequência Sincronizado (*Common Hopping*):** Os dispositivos que não estejam trocando informações saltam por todos os canais sincronizadamente, seguindo um padrão. Um par de dispositivos pára de saltar quando eles entram em acordo para uma transmissão (através de mensagens RTS e CTS), e retornam ao padrão de saltos quando a transmissão termina. Exemplos desta abordagem incluem [7, 8].
- **Divisão por Fases (*Split Phase*):** O tempo é dividido em fases alternadas de controle e de troca de dados. Durante a fase de controle, todos os dispositivos chaveiam para o canal de controle e tentam reservar um canal para a próxima fase de troca de mensagens. Quando existem terminais escondidos, que reaparecem no contexto de multi-canais, os dispositivos podem ter visões diferentes de quais canais estão disponíveis. Para estes casos, um protocolo mais sofisticado é necessário, como proposto em [9]. Esse protocolo adiciona mais um troca de RTS e CTS no canal escolhido pelo par de dispositivos para garantir que nenhum outro interfira na transmissão dos dados. Exemplos desta abordagem incluem [9, 10].
- **Empreitadas Múltiplas (*Multiple Rendezvous*):** Quando um dispositivo está livre, este segue um padrão de salto de frequências criado por ele próprio, padrão esse gerado por uma semente de um gerador pseudo-aleatório. Se uma estação

móvel A quer transmitir para B, ela aprende a sequência de saltos de B para que ambos fiquem sempre sintonizados em um mesmo canal e a troca de mensagens RTS e CTS se inicie. Quando a transmissão termina, a estação A retorna à sua sequência de saltos padrão. Exemplos desta abordagem incluem [11, 12].

Existem ainda variações dos protocolos acima descritos. Por exemplo em [13], as estações seguem o esquema de sequência sincronizado (*common hopping*) mas, ao invés do dispositivo reservar uma transmissão enviando um RTS, é o receptor que iniciará a reserva enviando, através de um RTR (*Request to Receive*), uma pergunta ao transmissor para saber se ele tem algo a transmitir. Vale lembrar que os protocolos acima mencionados podem ser adaptados para as redes infra-estruturadas com pouca ou nenhuma modificação em seus esquemas de acesso ao meio. Alguns trabalhos propõem protocolos específicos para as redes em questão [14, 15, 16, 17]. Todas as propostas assumem que o ponto de acesso tem mais de um rádio, cada um para um canal diferente, podendo assim receber ou transmitir simultaneamente para mais de uma estação móvel. Particularmente em [17], uma adaptação do protocolo proposto por [9] foi feita para as redes infra-estruturadas e seu desempenho é medido analiticamente. Na seção 5, o tempo de fila do protocolo proposto será comparado com a referência [17]¹.

Novamente, todos os trabalhos para redes infra-estruturadas, além dos protocolos para redes *ad Hoc*, são baseados em contenção e nenhum deles apresenta uma solução para reduzir o impacto negativo no desempenho quando os destinos das estações estão sintonizados em outro canal.

3. Protocolo Proposto

O protocolo supõe que o AP utiliza $M + 1$ canais. Os M primeiros canais são utilizados para a transmissão de dados (canais de dados). O M -ésimo + 1 canal (canal de controle) é usado para se enviar mensagens de *polling* para as estações. Quando o ponto de acesso inicia a sua operação, todas as estações devem começar se associando ao canal de controle esperando receber uma mensagem de *polling*. Dentro da mensagem estará presente a identificação do canal a ser utilizado e o endereço da estação alvo para a qual será dada uma oportunidade de transmissão. O AP forma uma fila de endereços MAC cuja ordenação, criada segundo a ordem em que as estações se associaram, será respeitada para se fazer o *polling*.

O AP começa fazendo o *polling* à primeira estação no canal de controle. Se a estação aceitar a oportunidade de transmissão, ela fará o chaveamento (e a devida associação) para o canal indicado na mensagem de *polling*. A estação que será o destino da transmissão também sintonizará seu rádio e fará a associação no mesmo canal. Enquanto a estação transmite, o AP faz uma nova pergunta a uma outra estação e esta pode começar a transmitir em outro canal, caso aceite a oportunidade recebida. O processo se repete até que todos os M canais estejam ocupados ou quando não houver mais estações esperando no canal de controle (Figura 1(a)). Sempre que um canal de dados é liberado, o AP fará o *polling* de uma nova estação que esteja esperando. Para que uma estação saiba que ela é o destino de uma transmissão e qual o canal será usado, o esquema de *polling* é composto por uma troca de quadros entre o ponto de acesso, a estação alvo e a estação destino. Essa troca é realizada por um *handshake* de 3 vias (Figura 1(b)): O AP

¹A referência [17], por ser baseada na abordagem *Split Phase*, divide o tempo em quadros que contém segmentos de contenção e dados.

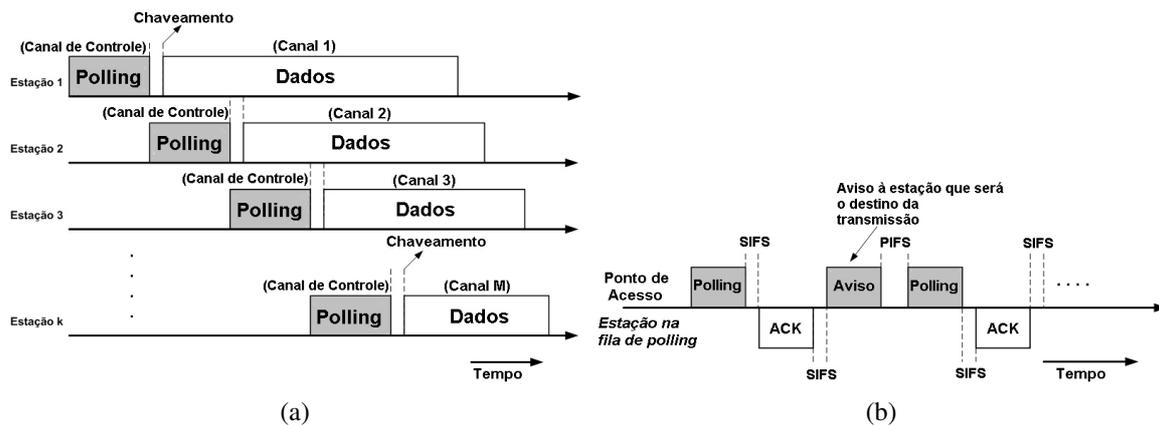


Figura 1. (a)Esquema de alocação dos canais de dados. (b)Esquema de *polling* baseado em um *handshake* de 3 vias.

pergunta à primeira estação na fila de *polling* se ela quer transmitir. Em seguida, a estação alvo responde favoravelmente à pergunta do AP com uma mensagem de ACK, contendo a estação destino de sua transmissão e chaveia sua frequência para o canal indicado na mensagem de *polling*. Por fim, o AP envia uma mensagem à estação destino, avisando que ela também deve chavear sua frequência para o canal indicado na mensagem de *polling*.

O AP utiliza uma fila provisória para colocar os endereços MAC de estações que estão recebendo uma transmissão e não podem responder ao *polling*². Sempre que um canal de dados é liberado, o ponto de acesso coloca as estações da fila provisória para o início da fila de *polling* antes de continuar a oferecer oportunidades de transmissão³.

Todas as estações mantêm uma lista interna chamada “Lista de estações ocupadas” que guardará os endereços MAC de estações que estejam recebendo ou transmitindo em algum canal de dados. Esta lista deve ser atualizada periodicamente⁴. Se o destino da estação que recebeu o *polling* estiver ocupado, ela pode solicitar um adiamento de transmissão ao AP (ao invés de simplesmente não responder) através de uma mensagem, indicando que ela tem algo para transmitir mas não pode aceitar a oportunidade imediatamente. A estação é colocada na fila provisória da mesma forma que as estações que estão recebendo transmissões em outros canais. O AP passa para a próxima estação na fila de *polling* e, caso esta também solicite o adiamento, ela também é adicionada à fila provisória. Note que quando a estação pede o adiamento, o *handshake* de 3 vias não se completa pois a terceira mensagem não é enviada para a estação destino. Quando o AP consegue encontrar uma estação que aceite a oportunidade de transmissão, este recoloca todas as estações que estão na fila provisória de volta para a fila de *polling* e recomeça o *polling* a partir da estação que está no início da fila.

Quando uma estação acaba de receber ou transmitir, sua lista fica desatualizada. Para atualizar a lista tanto da estação transmissora quanto da estação receptora, o ponto de acesso incluirá na confirmação do pedido de associação das estações (associação essa que ocorre ao final de cada transmissão, como será mostrado a seguir) os endereços MAC

²Para essas estações, o AP não realiza o *polling*, colocando-as automaticamente na fila provisória.

³Se a estação ainda estiver recebendo uma transmissão, ela é colocada novamente na fila provisória quando chegar a sua vez de receber o *polling*.

⁴Uma estação atualiza sua lista escutando as trocas de mensagens entre as demais e o AP.

de todas as estações que estiverem ocupadas, recebendo ou transmitindo. Para as estações novas que ainda não se associaram nenhuma vez ao ponto de acesso, a mensagem de *Beacon* será usada para carregar a lista de estações ocupadas (além de oferecer um intervalo para que as novas estações possam se associar ao AP), mantendo-as atualizadas.

Para que as estações participantes possam se comunicar, é necessário que ambas façam o processo associação, tanto para transmitirem e receberem no canal de dados, quanto para retornarem ao canal de controle. Nos pontos de acesso tradicionais, a estação móvel envia uma requisição de associação (*request association*) e espera pela confirmação do ponto de acesso (*association grant*), indicando que a estação está devidamente associada[18]. No caso do protocolo proposto, a estação transmissora enviará a requisição de associação dentro da segunda mensagem do *handshake* e a confirmação será enviada na terceira mensagem, quando o AP for avisar a estação destino de que ela deverá trocar de canal. Quando a estação fizer o chaveamento para o canal de dados, ela não pode iniciar sua transmissão imediatamente pois a estação destino ainda não está associada ao canal em questão. Assim, a estação destino fará o chaveamento para o canal de dados e enviará um pedido de associação. No momento em que ambas escutarem a confirmação de associação por parte do AP, a estação transmissora poderá iniciar o envio de seus dados.

Ao final da transmissão, ambas as estações devem se reassociar ao canal de controle de acordo com o esquema descrito a seguir. O último pacote de dados enviado pela estação transmissora deve conter as informações de associação. Assim, o ponto de acesso irá reter essas informações e transmitirá ao destino apenas os dados úteis. Após SIFS (*Short interframe Space*) segundos, a estação destino irá enviar um ACK confirmando o recebimento correto dos dados e contendo um pedido de associação. Após outro intervalo de SIFS segundos, o AP irá confirmar ambos os pedidos de associação em uma única mensagem (Figura 2). É importante mencionar que, ao contrário da estação transmissora, que será colocada no final da fila de *polling* quando esta terminar de transmitir, a posição da estação destino não é afetada. Sua reassociação no canal de controle não influencia sua posição na fila de *polling*.

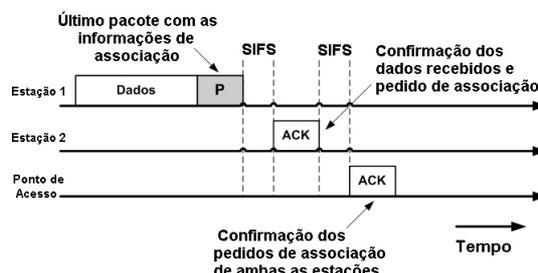


Figura 2. Associação executada ao final da transmissão no canal de dados.

3.1. A questão da Equidade

Normalmente, as estações não ocupam o meio sem fio de maneira igualitária. Se uma estação tem um arquivo muito grande para transmitir e recebe uma oportunidade de transmissão, provavelmente ela ficará ocupando o canal por muito mais tempo do que o desejável. Para outras estações que estejam utilizando aplicações sensíveis ao atraso, esse comportamento pode impactar negativamente no desempenho. Por esse motivo, o protocolo determina uma quantidade máxima r de pacotes que uma estação pode transmitir

por oportunidade de transmissão⁵ (ou todo o conteúdo de seu *buffer* caso a quantidade de pacotes seja menor que r), visando manter a equidade entre as estações, ou seja, fazer com que todas as estações tenham o direito de transmitir a mesma quantidade de pacotes.

4. Modelagem Analítica

Para que a modelagem seja tratável, algumas simplificações são feitas: as chegadas de pacotes em cada uma das estações cliente segue um processo de Poisson com uma taxa de λ pacotes/s. Será considerado que os canais de dados transmitem a uma taxa μ bits/s e são considerados idênticos e sem erros. O tempo de transmissão das mensagens de *polling*, ACK e aviso, bem como as mensagens relativas a associação das estações é considerado determinístico. O tamanho dos *buffers* das estações é considerado infinito. As estações escolhem seus destinos baseadas em uma distribuição uniforme. A quantidade de mensagens *Beacons* gerada pelo ponto de acesso, bem como os intervalos reservados para a associação de novas estações não são considerados.

A probabilidade de uma estação estar ocupada em algum canal de dados (recebendo ou transmitindo) e a utilização ρ são dados por $P_{ocupada} = \frac{2M\rho}{N}$ e $\rho = \frac{N\lambda}{M\mu}$ respectivamente, onde N é a quantidade de estações e M o número de canais de dados (os canais de dados devem ser encarados como servidores em um sistema de filas). Um pacote que chega a uma estação terá que esperar um tempo de fila igual a W_{POLL}^{busy} se, com probabilidade $P_{ocupada}$, o destino da estação estiver ocupado em um dos canais de dados, ou um tempo igual a W_{POLL}^{idle} , com probabilidade $1 - P_{ocupada}$, se seu destino estiver livre. Portanto, o tempo de fila total W_{total} que um pacote terá que esperar é dado por:

$$W_{TOTAL} = P_{ocupada} \cdot W_{POLL}^{busy} + (1 - P_{ocupada}) \cdot W_{POLL}^{idle} \quad (1)$$

Os tempos de fila W_{POLL}^{busy} e W_{POLL}^{idle} serão deduzidos ao longo desta seção. Independente do destino da estação estar ou não livre, existe um piso para a média do tempo de fila, identificado por W_{POLL} . Segundo [19], o tempo de fila para um sistema de *polling* 1-limitado de um pacote em uma estação pode ser expresso como:

$$W_{POLL} = R_t + R_p + \rho W_{POLL} + \lambda \bar{V} W_{POLL} + Y = \frac{R_t + R_p + Y}{1 - \rho - \lambda \bar{V}} \quad (2)$$

$$W_{POLL} = \frac{\lambda E[S^2]}{2(1 - \rho - \lambda \bar{V})} + \frac{(N + \rho) \bar{V}}{2(1 - \rho - \lambda \bar{V})} + \frac{\sigma_V^2 (1 - \rho)}{2\bar{V}(1 - \rho - \lambda \bar{V})} \quad (3)$$

onde R_t e R_p são o tempo residual de transmissão de um pacote e o tempo residual de um *polling* respectivamente, $E[S^2]$ é a média de segunda ordem do tempo de serviço e Y é a soma dos tempos de intervalos de *polling*⁶ \bar{V} que um pacote tem que esperar até chegar a sua vez. Como existem M canais de dados, o termo ρ deve ser substituído por ρ^M e, segundo [22], o termo $\lambda \bar{V}$ de cada um dos denominadores deve ser dividido por r para representar o limite máximo r de pacotes que podem ser transmitidos por transmissão. Assim, a equação (2) passa a ser expressa como:

⁵Um sistema de *polling* que limita a quantidade de pacotes por transmissão é denominado r-limitado quando $r > 1$ e 1-limitado quando $r = 1$.

⁶A variância do intervalo de *polling* \bar{V} é σ_V^2 . Como as transmissões das mensagens de *polling* são consideradas determinísticas, seu valor será zero.

$$W_{POLL} = R_t + R_p + \rho^M W_{POLL} + \frac{\lambda \bar{V}}{r} W_{POLL} + Y = \frac{R_t + R_p + Y}{1 - \rho^M - \frac{\lambda \bar{V}}{r}} \quad (4)$$

O primeiro termo da equação (3) é a média do tempo de fila M/G/1 adaptado para o caso 1-limitado. Como há M servidores (canais de dados) no nosso modelo de filas, esse termo é substituído pela expressão que representa o tempo de fila M/G/k proposto por [20]⁷. Além dessa substituição, devemos somar os tempos gastos com a associação A e o chaveamento de canal T_{switch} que devem ser realizados pelas estações antes da transmissão começar. Assim, juntamente com as modificações feitas em (4), obtemos :

$$W_{POLL} = \frac{P_M(1 + C_s^2)}{2\mu M(1 - \rho^M - \frac{\lambda \bar{V}}{r})} + \frac{(N + \rho^M)\bar{V}}{2(1 - \rho^M - \frac{\lambda \bar{V}}{r})} + \frac{A + T_{switch}}{1 - \rho^M - \frac{\lambda \bar{V}}{r}} \quad (5)$$

onde P_M é a probabilidade dos M servidores estarem ocupados⁸ e C_s^2 é o coeficiente de variação do tempo de serviço, expresso por $C_s^2 = \frac{\sigma_s^2}{E[S]^2}$. Como $\sigma_V^2 = 0$, o terceiro termo da equação (3) desaparece. Com o tempo W_{POLL} em mãos, podemos obter a expressão para W_{POLL}^{busy} . Se a estação pede um adiamento, ela terá que esperar uma quantidade extra de intervalos de *polling* até que o AP retorne a ela, que é dado por⁹:

$$T_{EXTRA} = \frac{P_{ocupada}\bar{V}}{1 - 2P_{ocupada}} + 2\bar{V} \quad (6)$$

Quando o destino da estação estiver ocupado, esta terá que fazer o adiamento de sua transmissão sempre que um canal for desalocado e o seu destino não estiver nesse canal. Isso pode acontecer até $M - 1$ vezes, até que no pior caso, quando o M -ésimo canal for desalocado, seu destino finalmente estará livre. Assim, a estação terá que esperar $i.T_{EXTRA}$ com probabilidade $(1 - \rho)^i$ de i canais serem liberados e seu destino não estar em nenhum desses canais. Assim, o tempo W_{POLL}^{busy} é a soma desses tempos T_{EXTRA} com o tempo W_{POLL} (equação (5)):

$$\begin{aligned} W_{POLL}^{busy} &= W_{POLL} + \frac{\sum_{i=1}^{M-1} i(1 - \rho)^i . T_{EXTRA}}{1 - \rho^M - \frac{\lambda \bar{V}}{r}} \\ &= W_{POLL} + \frac{\left[\frac{1 - \rho - (1 - \rho)^M (M\rho - \rho + 1)}{\rho^2} \right] . T_{EXTRA}}{1 - \rho^M - \frac{\lambda \bar{V}}{r}} \end{aligned} \quad (7)$$

Contudo, quando mais de uma estação à frente da estação em questão quer transmitir para o mesmo destino, mais tempos T_{EXTRA} devem ser adicionados pois, estas

⁷Essa expressão é uma aproximação das filas M/M/k para M/G/k

⁸A expressão para P_M pode ser obtida em [21].

⁹Por uma questão de espaço, a dedução da equação (6) foi omitida.

estações também terão solicitado o adiamento de suas transmissões e, quando todas elas forem recolocadas na fila de *polling*, elas receberão a pergunta do AP antes da estação consi-derada. A probabilidade de pelo menos duas estações quererem transmitir para o mesmo destino, ou seja, pelo menos uma estação à frente da estação em questão escolher o mesmo destino, condicionada ao fato desta estação estar na posição l da fila de *polling* é dada por:

$$P(\text{Destino} \geq 2 / \text{Est. estar em } l) = \sum_{k=2}^l \frac{1}{(N-1)^k} \quad (8)$$

Descondicionando em relação a l :

$$P(\text{Destino} \geq 2) = \sum_{l=2}^N \sum_{k=2}^l \frac{1}{(N-1)^k} \cdot P(l) = \sum_{l=2}^N \sum_{k=2}^l \frac{1}{(N-1)^{k+1}} \quad (9)$$

Assim, com probabilidade $1 - P(\text{Destino} \geq 2)$, a estação esperará tempos extras quando apenas ela escolheu um destino que está ocupado, e com probabilidade $P(\text{Destino} \geq 2)$ a estação irá esperar tempos extras relacionados a estações que também escolheram o mesmo destino dela. Somando-se esses tempos na equação (5), obtemos a expressão completa para W_{POLL}^{busy} :

$$W_{POLL}^{busy} = W_{POLL} + [1 - P(\text{Destino} \geq 2)] \cdot \frac{\left[\frac{1 - \rho - (1 - \rho)^M (M\rho - \rho + 1)}{\rho^2} \right] \cdot T_{EXTRA}}{1 - \rho^M - \frac{\lambda \bar{V}}{r}} \\ + \frac{\underbrace{\sum_{l=2}^N \sum_{k=2}^l \frac{1}{(N-1)^{k+1}}}_{P(\text{Destino} \geq 2)} \sum_{i=2}^{k(M-1)} i(1 - \rho)^i \cdot T_{EXTRA} + T_{recebendo}}{1 - \rho^M - \frac{\lambda \bar{V}}{r}} \quad (10)$$

onde $T_{recebendo}$ é o tempo em que a estação terá que esperar caso ela esteja recebendo uma transmissão quando a sua vez de receber o *polling* chega¹⁰. Finalmente, o tempo de espera na fila W_{POLL}^{idle} pode ser calculado considerando-se que, apesar da estação não ter escolhido um destino que esteja ocupado, ela deverá esperar por tempos de *polling* de estações que vieram da fila provisória. Usaremos uma simplificação para determinar a quantidade média de *polling* extras. Vamos assumir que, tanto a probabilidade do AP estar na posição j na fila de *polling* quanto a probabilidade da estação estar na posição i seja $1/N$. Assim, a distância $|j - i \bmod N|$ entre o AP e a estação na fila de *polling* determinará a quantidade de intervalos de *polling* a mais que a estação terá que esperar¹¹:

¹⁰Por uma questão de espaço, a expressão $T_{recebendo}$ foi omitida.

¹¹Na verdade, a distância $|j - i|$ representa a quantidade de estações na fila provisória no momento em que um pacote chega na estação. No pior caso, o pacote terá que esperar $N - 1$ *pollings* a mais se a fila provisória contiver todas as demais estações. No melhor caso, o pacote não terá que esperar nenhum *polling* a mais (apenas aqueles necessários para que o AP siga a ordem normal da fila de *polling*) se a fila provisória estiver vazia no momento em este chegar à estação.

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N |(j-i) \bmod N| \cdot \bar{V} \cdot P(\text{Est estar em } i) \cdot P(\text{AP estar em } j) \\ &= \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N |(j-i) \bmod N| \cdot \bar{V} \cdot \frac{1}{N^2} \end{aligned} \quad (11)$$

Somando-se a expressão (11) com o piso W_{POLL} e $T_{recebendo}$, obtemos o tempo de fila W_{POLL}^{idle} completo:

$$W_{POLL}^{idle} = W_{POLL} + \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N |(j-i) \bmod N| \cdot \bar{V} \cdot \frac{1}{N^2} + T_{recebendo}}{1 - \rho^M - \frac{\lambda \bar{V}}{r}} \quad (12)$$

Substituindo (10) e (12) em (1), obtemos a expressão completa para W_{TOTAL} .

5. Resultados Obtidos

Para validar o modelo analítico, foi desenvolvido um simulador em linguagem Java. A distribuição de Poisson foi usada não apenas para o processo de chegadas mas também para o processo de atendimentos dos múltiplos servidores (canais de dados). A tabela 1 mostra os parâmetros usados na simulação. O valor para o intervalo de *polling* considera as 3 mensagens do *handshake*, não importando se a estação adiou, recusou ou aceitou a oportunidade de transmissão. Foram configurados três cenários para mostrar o comportamento do protocolo e seu desempenho. Em cada um dos cenários, foram realizadas 7 rodadas de simulação, com 1000 segundos cada, com um nível de confiança de 95%.

O primeiro cenário tem por objetivo mostrar o tempo médio de fila à medida que a quantidade de estações na rede aumenta, variando-se a quantidade de canais de dados disponíveis (Figura 3). Observe que existe uma relação custo/benefício entre aumentar o número de canais e a redução no tempo de fila. Por exemplo, para 60 estações, aumentar o número de canais de dados de 4 para 5 não melhora, de maneira significativa, o tempo de fila. Saber a quantidade média de estações associadas é essencial na hora de decidir pela instalação de mais um rádio no ponto de acesso.

Parâmetro	Valor
Tamanho do pacote	1000 bytes
Capacidade de cada canal de dados	11 Mbps = 1375 pacotes/s
Taxa de chegada de pacotes por estação	60 pacotes/s
Tempo de chaveamento de frequência	224 μ s
Quantidade máxima de pacotes r	1 ; 5 ; 10
Tempo de associação	385 μ s
Intervalo de <i>polling</i> (inclui as 3 mensagens do <i>handshake</i>)	139 μ s

Tabela 1. Parâmetros usados para obter os resultados tanto da modelagem quanto da simulação.

O segundo cenário teve por objetivo mostrar que o adiamento oferece melhora no desempenho se comparado com o mesmo protocolo mas sem a opção de adiamento. No protocolo sem adiamento, a estação é colocada no final da fila de *polling* quando seu destino está ocupado, mas as estações que estiverem recebendo uma transmissão continuarão sendo colocadas na fila provisória. Foi definido uma quantidade de canais de dados igual

também em linguagem Java, que implementa o protocolo de [17]. Essa referência foi escolhida para ser comparada pois ela foi a que apresentou as características mais semelhantes com o contexto do protocolo proposto. Como o trabalho de Rajagopal Iyengar *et al.* utiliza 3 canais com uma taxa de transmissão de 10 Mbps cada um, os mesmos valores foram usados no simulador desenvolvido¹².

O tamanho do pacote foi configurado para 625 bytes, equiparando-se com o tamanho do segmento de dados usado em [17]. A quantidade S_a de segmentos de contenção usados em [17] foi configurada para 10 e 12, com um tamanho de quadro igual a 5 milissegundos. O valor de r , no protocolo proposto, foi configurado para 1 pois, no outro protocolo, uma estação pode reservar apenas um segmento de dados por vez. Foi definida uma quantidade de estações igual a 15.

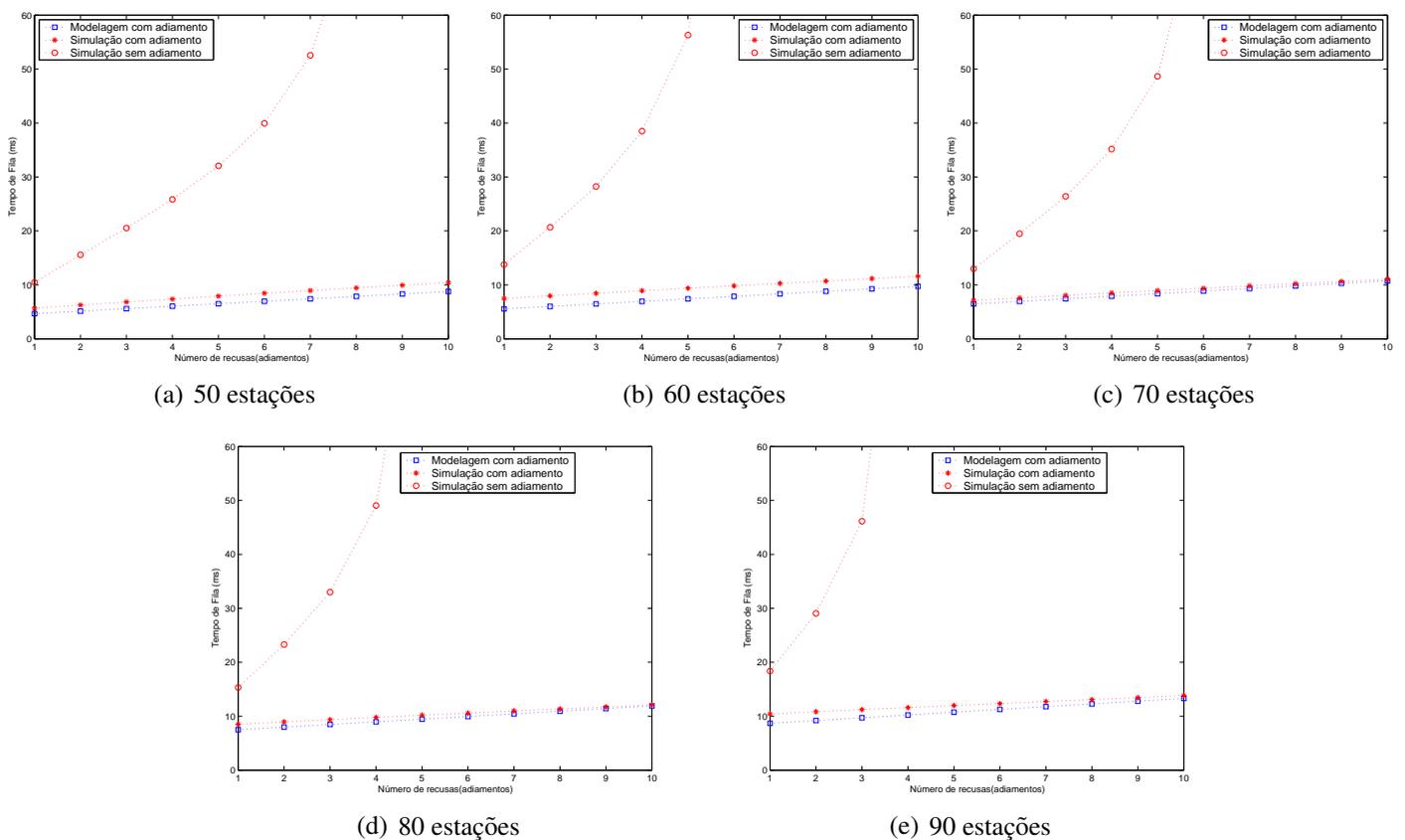


Figura 4. Tempo médio de espera na fila versus número de adiamentos(recusas).

O tempo médio de espera na fila foi medido variando-se a taxa de chegada dos pacotes nas estações. Como pode ser visto na figura 5, o protocolo proposto apresenta uma performance significativamente melhor. Três motivos podem justificar o melhor desempenho apresentado pelo protocolo proposto. O primeiro está associado ao fato de que as reservas feitas pelas estações em [17] são baseadas na contenção. À medida que a taxa de chegada aumenta, maior será o número de colisões, enquanto o protocolo proposto é livre de contenção. O segundo motivo se refere à própria característica do protocolo em [17] que separa o intervalo de reserva do intervalo de transmissão dos dados. Enquanto as reservas são feitas, nenhum dado útil é transmitido pelos canais disponíveis. Já no protocolo proposto, as transmissões podem ser realizadas em paralelo com o *polling* das

¹²No caso do protocolo proposto, dos 3 canais usados, um é utilizado como canal de controle

estações. O terceiro motivo, mencionado pelo próprio Rajagopal Iyengar *et al.*, é que contenções com sucesso não resultam, necessariamente, em transmissões com sucesso, dado o número limitado de segmentos de dados disponíveis. Uma estação pode conseguir acessar o meio sem colisões e reservar um segmento de dados já alocado a outra estação.

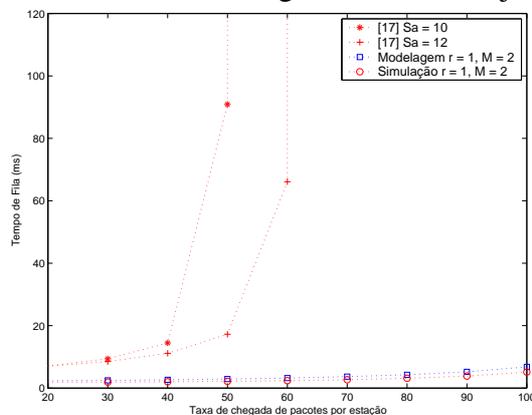


Figura 5. Comparação entre o protocolo proposto e [17]: Tempo médio de espera na fila versus taxa de chegada, considerando 15 estações na rede.

6. Conclusões

Este artigo propôs um protocolo de acesso ao meio multi-canal e livre de contenção, que permite transmissões simultâneas por parte das estações cliente, considerando que o ponto de acesso está munido de múltiplos rádios, cada um sintonizado em um canal diferente. Para analisar sua performance, foi utilizado conjuntamente um modelo de filas M/G/k e um modelo de *polling*. Os resultados numéricos foram validados por simulação.

Os resultados mostraram que existe uma relação custo/benefício entre aumentar o número de canais e a redução no tempo de fila, relação esta que está associada à quantidade de estações na rede. Além disso, a solução proposta para amenizar o problema dos destinos das estações estarem ocupados em outros canais se mostrou vantajosa, apresentando um desempenho melhor do que o obtido pelo mesmo protocolo mas sem a função de adiamento. Por fim, uma comparação entre o protocolo proposto e [17] foi feita. Pela análise dos resultados, pode-se concluir que o protocolo proposto obteve uma performance melhor, principalmente para taxas maiores de chegada de pacotes.

Referências

- [1] P. Almers, E. Bonek, A. Burr, N. Czink, M. Debbah, V. Degli-Esposti, H. Hofstetter, P. Kyosti, D. Laurenson, G. Matz, A. F. Molisch, "Survey of Channel and Radio Propagation Models for Wireless MIMO Systems", in EURASIP Journal, 2007.
- [2] L. B. Pinho and C. L. Amorim, "Efficient Support to Scalable Delivery of VoD Systems Using Collocated Access Points", in Proc. of the 5th ICN, Abril 2006.
- [3] L. B. de Pinho, C. L. de Amorim, "Impact of the client's position on performance of VoD systems based on collocated APs", in Proceedings of the 12th Brazilian symposium on Multimedia and the Web (WebMedia '06), Page(s):253 - 262, 2006.
- [4] J. Mo, H. W. So and J. Walrand, "Comparison of Multi-Channel MAC Protocols", in IEEE Transactions on Mobile Computing, Volume 7, No. 1, Janeiro 2008.
- [5] S. Wu, C. Lin, Y. Tseng, and J. Sheu, "A New Multi-Channel MAC protocol with on demand channel assignment for mobile ad-hoc networks", ISPAN '00, Page(s) 232 - 237, Dezembro 2000.

- [6] W. Hung, K.L. E. Law and A. Leon-Garcia, "A Dynamic Multi-Channel MAC for Ad-Hoc LAN", in Proc. 21st Biennial Symposium on Communications, Pages 31-35, 2002.
- [7] A. Tzamaloukas and J.J. Garcia-Luna-Aceves, "Channel-Hopping Multiple Access", in Proc. IEEE ICC 2000, Junho 2000.
- [8] A. Tzamaloukas and J. Garcia-Luna-Aceves, "Channel-hopping multiple access with packet trains for ad hoc networks", in IEEE MoMuC '00, Novembro 2000.
- [9] J. So and N. Vaidya, "Multi-Channel MAC for Ad Hoc Networks: Handling Multi-Channel Hidden Terminals Using A Single Transceiver", in MobiHoc, Maio 2004.
- [10] J. Chen, S. Sheut and C. Yangt, "A new multichannel access protocol for IEEE 802.11 ad hoc wireless LANs", in 14th IEEE Proc. on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications 2003, PIMRC '03, Vol. 3, Page(s): 2291- 2296, Setembro 2003.
- [11] P. Bahl, R. Chandra and J. Dunagan, "SSCH: Slotted Seeded Channel Hopping for Capacity Improvement in IEEE 802.11 Ad-Hoc Wireless Networks", in MobiCom 2004, Page(s): 216 - 230, Setembro 2004.
- [12] H. W. So and J. Walrand, "McMAC: A Multi-Channel MAC Proposal for Ad-Hoc Wireless Networks", in IEEE WCNC '07, Page(s):334 - 339, Março 2007.
- [13] A. Tzamaloukas and J. Garcia-Luna-Aceves, "A receiver-initiated collision-avoidance protocol for multi-channel networks", in IEEE INFOCOM 2001, Abril 2001.
- [14] T. Kuang, Q. Wu and C. Williamson, "MRMC: A Multi-Rate Multi-Channel MAC protocol for Multi-Radio Wireless LANs", in Proc. of WinCS, Page(s): 263 - 272, Julho 2005.
- [15] K. Kar, X. Luo and S. Sarkar, "Throughput-optimal Scheduling in Multichannel Access Point Networks under Infrequent Channel Measurements", in IEEE Transactions on Wireless Communications, Volume 7, Issue 7, Page(s): 2619-2629, Julho 2008.
- [16] A. Chockalingam, W. Xu, M. Zorzi and L. B. Milstein, "Throughput-Delay Analysis of a Mutichannel Wireless Access Protocol", in IEEE Trans. on Vehicular Technology, Volume 49, No. 2, Março 2000.
- [17] R. Iyengar, V. Sharma, K. Kar and B. Sikdar, "Analysis of Contention-based Multi-channel Wireless MAC for Point-to-multipoint Networks", in WoWMoM'06, Page(s): 26 - 29, Junho 2006.
- [18] IEEE Std. 802.11-1999, Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, IEEE Std. 802.11, Edição de 1999.
- [19] Dimitri Bertsekas and Robert Gallager, "Data Networks", Segunda Edição, Capítulo 3, Page(s): 154 - 158, Prentice Hall, 1992.
- [20] James Martin, "Systems Analysis for Data Transmission", 1ª Edição, Capítulo 31, Page(s):451 - 461, Prentice Hall, 1972.
- [21] G. Bolch, S. Greiner, H. de Meer and K. Trivedi, "Queueing Networks and Markov Chains", 1ª Edição, Capítulo 6, Page(s): 230 - 233, Wiley, 1998.
- [22] S. W. Fuhrmann, "Symmetric queues served in cyclic order", in Operational Research Letters, Page(s):139 - 144, Outubro 1985.