

Aumento do Reuso Espacial em Redes Ad Hoc IEEE 802.11 com o uso de Enlaces Independentes*

Alexandre Andrade Pires, José Ferreira de Rezende

¹GTA - PEE - COPPE – Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)
Caixa Postal 68.504 – 21.945-970 – Rio de Janeiro – RJ – Brasil

{andrade, rezende}@gta.ufrj.br

Abstract. *This paper presents an efficient mechanism to increase the capacity of 802.11 ad hoc networks, by adjusting, in a decentralized fashion, terminals' transmit power P_t and carrier sensing threshold CS_{th} . The basis of the proposed heuristic is to maximize the number of independent links, defined as those in which the mutual interference generated can be tolerated by the devices involved, avoiding collision between frames. The solution presented is compared by simulation with a recent proposal, presenting an improvement in aggregate throughput of about 30%, to a large number of random topologies. It is also performed a comparison with the optimal solution to the problem proposed, obtained with global knowledge for different scenarios. In this case, we tested all possible combinations of settings, to determine that which maximizes the number of independent links. The results indicate that the heuristics developed are capable of producing configurations of P_t and CS_{th} that result in a performance quite close to that obtained with the ideal solution.*

Resumo. *Este trabalho apresenta um mecanismo eficiente para o aumento de capacidade de redes ad hoc 802.11, por meio do ajuste descentralizado da potência de transmissão P_t e do limiar de detecção de portadora CS_{th} dos terminais. A base da heurística proposta consiste na maximização do número de enlaces independentes, definidos como aqueles nos quais a interferência mutuamente gerada pode ser tolerada pelos dispositivos envolvidos, sem que ocorra colisão entre os quadros. A solução apresentada é comparada por meio de simulação com uma recente proposta, apresentando ganho em vazão agregada da ordem de 30%, para um grande número de topologias aleatórias. É realizada ainda a comparação com a solução ótima para o problema proposto, obtida com conhecimento global para diversos cenários. Neste caso, testaram-se todas as combinações possíveis de ajustes, determinando-se aquela que maximiza a quantidade de enlaces independentes. Os resultados indicam que as heurísticas desenvolvidas são capazes de produzir configurações de P_t e CS_{th} cujos resultados são bastante próximos dos obtidos com a solução ideal.*

1. Introdução

O padrão IEEE 802.11 [802.11] vem sendo utilizado como um dos principais meios de acesso sem fio à Internet. A crescente popularidade dessa tecnologia fez com que o

*Este trabalho recebeu recursos da CAPES, CNPq, FAPERJ e FINEP.

aumento de capacidade em redes *ad hoc* baseadas nessa especificação se tornasse o foco de diversos trabalhos recentes. Uma das principais linhas de pesquisa sobre o tema é o desenvolvimento de métodos para o aumento do reuso espacial, com o objetivo de manter capacidades elevadas, mesmo em cenários de intensa interferência co-canal.

Numa rede *ad hoc* 802.11 geograficamente distribuída em uma área, um dos principais problemas a serem resolvidos é justamente identificar o grau de reuso espacial adequado. Basicamente, trata-se de maximizar o número de transmissões simultâneas sem ocasionar perdas de quadros em função do excesso de interferência co-canal. Como os terminais 802.11 operam em canal compartilhado, existem algoritmos específicos para disciplinar o acesso ao meio de transmissão, sempre envolvendo algum tipo de *detecção de portadora*. Essa detecção é utilizada para identificar quando o canal é considerado ocupado, e é geralmente implementada pela comparação entre o nível de potência recebido e um certo limiar. Assim, o ajuste do limiar de detecção de portadora CS_{th} tem sido o foco de vários trabalhos, visando a atingir esse grau adequado de reuso espacial.

Outro fator relevante para uma reutilização eficiente do canal sem fio é a potência de transmissão P_t utilizada por cada terminal. Para que uma transmissão seja bem sucedida, é necessário que a *SINR* (*Signal to Interference plus Noise Ratio*) no receptor de interesse seja superior a um determinado limiar β . Assim, tanto a potência empregada pelo transmissor quanto a potência usada pelos terminais interferentes podem afetar a recepção do quadro, demonstrando a importância do ajuste da potência de transmissão.

Embora o limiar CS_{th} e a potência P_t sejam os principais parâmetros capazes de regular o grau de reuso espacial, há diferenças significativas a serem levadas em conta no desenvolvimento de mecanismos de ajuste para cada um deles. Diferentemente de CS_{th} , existe um valor ótimo de P_t , ao menos do ponto de vista da eficiência energética da rede. Dado um determinado enlace, esse valor corresponde à potência mínima necessária para a decodificação correta do quadro, considerando apenas a presença de um determinado nível de ruído. De fato, o senso comum é que a utilização dos menores níveis de potência possíveis conduziria a um menor valor de interferência média nos receptores, favorecendo a manutenção das *SINRs* necessárias em cada receptor.

No entanto, pesquisas recentes indicam que seria possível obter maior reuso espacial justamente com o uso de potências superiores às mínimas necessárias. O trabalho [Gurses and Boutaba 2009] sugere a aplicação de um fator $\lambda \geq 1$, que seria multiplicado pela potência mínima necessária para determinar a potência a ser empregada. Este fator seria uma função da distância entre TX e RX de cada enlace. Otimizando parâmetros usados para o cálculo de λ , o estudo aponta a possibilidade de ganhos da ordem de 15% sobre um mecanismo existente. No entanto, a proposta foi avaliada apenas de forma analítica, sem o emprego de simulações.

Neste trabalho, propõe-se uma técnica diferente para ajuste das potências de transmissão e, em seguida, do limiar CS_{th} . Embora sejam utilizados níveis de potências superiores aos mínimos necessários, a exemplo de [Gurses and Boutaba 2009], o método desenvolvido propõe ajustes de P_t de forma a aumentar o número de enlaces independentes. Demonstra-se que a potência a ser utilizada em cada terminal não deve ser simplesmente ajustada em função da distância entre TX e RX, mas levando-se em conta outros fatores, como a *SINR* necessária em cada terminal e a possibilidade da ocorrência de colisões.

Conclui-se que o problema de maximização do número de pares de enlaces independentes na rede é computacionalmente complexo, optando-se pela elaboração de uma heurística. É ainda demonstrado por meio de simulação que a vazão agregada da rede com o uso da heurística desenvolvida aproxima-se da obtida com o emprego da solução ótima, determinada por meio de um solução de força bruta, exaurindo todas as possibilidades do ajuste de P_t . Os resultados obtidos são ainda comparados com o padrão 802.11 puro e o método analítico proposto por [Gurses and Boutaba 2009], obtendo-se expressivos ganhos em vazão sobre ambos.

O restante deste trabalho é organizado da forma descrita a seguir. A Seção 2 apresenta os principais trabalhos existentes na área. Em seguida, a Seção 3 define as condições que garantem a independência entre dois enlaces e descreve a heurística utilizada para aumentar o número de enlaces independentes na rede. Na Seção 4, são descritos o ambiente de simulação utilizado e os principais resultados obtidos na avaliação da técnica proposta.

2. Trabalhos Relacionados

Nos últimos anos, vários trabalhos têm se dedicado ao aumento de capacidade de redes *ad hoc* 802.11. Grande parte deles propõe esse aumento pela via do reuso espacial, sendo que a maioria desses últimos propõe o ajuste de P_t , CS_{th} ou ambos.

No trabalho [Yang and Vaidya 2005], é realizada uma análise conjunta da influência do limiar CS_{th} e da potência P_t no desempenho de uma rede 802.11. Este estudo é ampliado em [Zhai and Fang 2006], considerando-se a possibilidade do uso de múltiplas taxas de transmissão. É utilizado um modelo de interferência do tipo *Honey-grid*, onde um arranjo hexagonal de transmissores interferentes é posicionado em torno de cada terminal. Os seis transmissores interferentes encontram-se à mesma distância do terminal de interesse, e à mesma distância uns dos outros, o que é garantido pelo formato hexagonal. Se essa distância for ligeiramente superior ao raio da Zona de Detecção de Portadora (ZDP), nenhum deles poderia perceber a transmissão dos demais, levando ao cálculo analítico de uma interferência de pior caso. O mesmo modelo de interferência hexagonal é usado em [Kim et al. 2006], que propõe o ajuste de P_t , CS_{th} e da taxa de transmissão. No entanto, o estudo argumenta que o ajuste de P_t seria mais vantajoso do que o de CS_{th} , usando-se exemplos de redes de topologias específicas. Assim, é proposto um algoritmo para ajuste simultâneo apenas de P_t e da taxa de transmissão.

Em [Yang et al. 2007b], é proposto um modelo analítico para investigar o efeito do ajuste de P_t e CS_{th} no desempenho de uma rede. O modelo de interferência pressupõe terminais aleatoriamente distribuídos, obedecendo a uma distribuição de *Poisson* bidimensional com densidade constante. A interferência acumulada em um certo terminal é calculada analiticamente por meio de uma integral, computando-se os efeitos de interferidores posicionados em anéis de raios crescentes a partir do terminal de interesse.

O trabalho citado é ampliado em [Yang et al. 2007a], por meio de um algoritmo capaz de ajustar a potência de transmissão e o limiar de detecção de portadora para os valores calculados com base no modelo descrito. Basicamente, os terminais trocam quadros contendo informações sobre a vizinhança, possibilitando a elaboração de uma árvore geradora mínima em cada um dos nós. A árvore é então utilizada para determinar os valores de P_t e CS_{th} . Esse trabalho, juntamente com [Yang et al. 2007b], tornou-se a principal referência na área desde então. Quanto ao ajuste da potência de transmissão,

ambos propõem a utilização dos menores níveis de potência capazes de estabelecer a comunicação como forma de aumentar o reuso espacial.

No trabalho [Fonseca 2007], o autor argumenta acerca da dificuldade intrínseca ao problema de determinação do CS_{th} ótimo, uma vez que o número de interferidores a cada instante é aleatório. Assim, propõe um método de tentativa e erro, monitorando estatísticas sobre as transmissões bem sucedidas na vizinhança. Um modelo baseado na Teoria dos Jogos é utilizado em [Yang et al. 2008], para demonstrar que o ajuste local do CS_{th} em um terminal pode levar a um equilíbrio de *Nash* indesejável, ocasionando grande injustiça. Em [Liu et al. 2008], é proposto um modelo analítico para ajuste de CS_{th} , abordando a questão da interferência de forma semelhante à utilizada em [Yang et al. 2007b, Yang et al. 2007a].

No trabalho [Fu et al. 2009], os autores dedicam-se a determinar um raio seguro para a ZDP, por meio de um modelo analítico. Com este raio, identificado por um fator que multiplica a distância máxima de alcance para enlaces na rede, seria possível virtualmente eliminar o problema do terminal escondido. Entretanto, não é abordada diretamente a questão do reuso espacial.

Contrariando a ideia da utilização da mínima potência necessária em cada enlace, o trabalho [Gurses and Boutaba 2009] propõe a utilização de níveis de potência superiores para aumento do reuso espacial. Utilizando uma abordagem analítica, é proposta a utilização de um método de ajuste de P_t em função da distância entre TX e RX. A potência de cada enlace passa a ser definida por $\lambda(d_{sr}) \cdot P_{t_{min}}$. É derivada uma expressão para a capacidade agregada da rede e os resultados são obtidos com o uso do MATLAB. Parâmetros da função $\lambda(d)$ são determinados por meio de uma otimização. Uma vez determinados os valores de P_t considerados ótimos, o trabalho emprega o método de ajuste de CS_{th} analítico desenvolvido em [Yang et al. 2007b] com pequenas modificações. Com essa configuração globalmente determinada, e mais uma vez utilizando o MATLAB, verifica-se um melhor desempenho do que o obtido em [Yang et al. 2007b].

Em [Vegad et al. 2010], os autores propõem a utilização de um método diferenciado de detecção de portadora, aproveitando-se do fato de que a *SINR* mínima necessária em um receptor é dependente da ordem em que o atingem o quadro de interesse e o quadro interferente. Na prática, o esquema leva a um ajuste indireto no limiar CS_{th} , mas a questão do ajuste de potência não é abordada.

Uma avaliação sobre o aumento de desempenho obtido com um possível ajuste ótimo de CS_{th} é apresentada em [Acholem and Harvey 2010]. No entanto, não é apresentado um método de ajuste, limitando-se a determinar o desempenho da rede com o uso de diferentes valores, usando-se apenas topologias regulares.

3. Enlaces Independentes

O ganho de vazão decorrente de reuso espacial é explicado pela possibilidade de comunicações ocorrerem de forma simultânea na rede. Desta forma, o problema de determinação de um grau ótimo de reuso deve passar pelo estudo das condições que tornam enlaces independentes entre si. A título de exemplo, considere-se os enlaces expostos na Figura 1(a). O expoente α da distância na equação que expressa a atenuação de propagação no canal (*path loss exponent*) é 3, a *SINR* necessária em todos os receptores

para uma decodificação correta é $10dB$, e a potência empregada é a mínima necessária para os enlaces. Nesse cenário, é fácil verificar que existe risco de uma colisão caso todos os terminais usem a mesma potência $P_{t_{min}}$. Basta haver o envio simultâneo de um quadro DATA no enlace 1 e de um ACK no enlace 2 para que a $SINR$ em s_2 seja igual a 8, ou $9,03dB$, resultando na perda do quadro ACK. Verifica-se assim, que tais enlaces não atendem ao requisito de independência mútua.

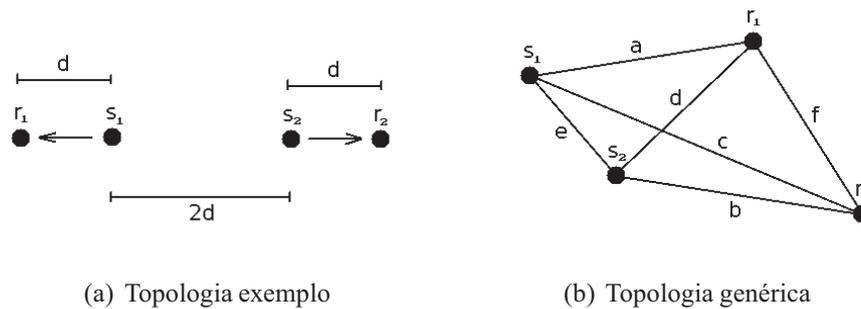


Figura 1. Topologias sob estudo.

Entretanto, propõe-se agora que os terminais s_1 e s_2 passem a utilizar uma potência P_s , e r_1 e r_2 utilizem P_r . Para essa topologia específica, verifica-se que utilizar $P_r = 1,25 * P_s$ é suficiente para fazer com que a $SINR$ na situação anteriormente descrita passe a ser igual a $10dB$. Na verdade, o uso de uma potência P_r pouco superior à citada garante a manutenção da $SINR$ necessária em todos os terminais, para a transmissão simultânea de quaisquer quadros. Assim, ao menos nessa topologia, o uso de níveis de potência superiores aos mínimos necessários pode garantir a existência de enlaces totalmente independentes, aumentando o reuso espacial e a capacidade agregada. Vale destacar que seria ainda necessário ajustar os limiares de CS_{th} de maneira a aproveitar-se dessa independência, fazendo com que os terminais de um enlace simplesmente ignorem as transmissões advindas do enlace vizinho, viabilizando a transmissão simultânea.

Outro ponto a ser frisado é que as ideias contidas em [Gurses and Boutaba 2009] são em parte confirmadas com esse exemplo. Em parte porque, embora a escolha de níveis de potência superiores ao mínimo possa realmente representar aumento do reuso espacial, o ajuste de P_t baseado unicamente na distância TX - RX, como proposto no trabalho citado, não permitiria tornar tais enlaces independentes. Se o fator de ajuste de P_t é uma função exclusiva da distância entre os terminais comunicantes, fica afastada a possibilidade de enlaces assimétricos, nos quais o TX utiliza potência diferente do RX. E é justamente isso o necessário para que os enlaces do exemplo se tornem independentes.

A fim de estabelecer formalmente as condições para a independência entre enlaces, propõe-se considerar a topologia genérica exposta em 1(b). As distâncias entre cada um dos terminais envolvidos são representadas por a, b, c, d, e e f .

Seja o *path loss exponent* igual a α , a $SINR$ mínima para recepção β , e as potências de cada terminal dadas por $P_{s_1}, P_{s_2}, P_{r_1}$ e P_{r_2} . Considerando a transmissão simultânea de quadros DATA nos dois enlaces, deve-se atender às duas condições expressas em 1 para que ambos os quadros sejam corretamente recebidos.

$$\begin{cases} \frac{P_{s_1}}{P_{s_2}} \left(\frac{d}{a}\right)^\alpha \geq \beta \\ \frac{P_{s_2}}{P_{s_1}} \left(\frac{c}{b}\right)^\alpha \geq \beta \end{cases} \quad (1)$$

Utilizando $R_{s_1,s_2} = P_{s_1}/P_{s_2}$, as condições podem ser resumidas da forma exposta em 2, que pode ser definida como uma condição de independência unidirecional, garantindo a possibilidade da transmissão simultânea de quadros DATA.

$$\beta \left(\frac{a}{d}\right)^\alpha \leq R_{s_1,s_2} \leq \frac{1}{\beta} \left(\frac{c}{b}\right)^\alpha \quad (2)$$

Analogamente, buscando garantir a possibilidade de transmissão simultânea de quaisquer quadros pelos terminais envolvidos, pode-se definir as quatro condições que estabelecem a independência entre os dois enlaces, da forma exposta em 3

$$\begin{cases} \beta \left(\frac{a}{d}\right)^\alpha \leq R_{s_1,s_2} \leq \frac{1}{\beta} \left(\frac{c}{b}\right)^\alpha \\ \beta \left(\frac{a}{f}\right)^\alpha \leq R_{s_1,r_2} \leq \frac{1}{\beta} \left(\frac{e}{b}\right)^\alpha \\ \beta \left(\frac{a}{e}\right)^\alpha \leq R_{r_1,s_2} \leq \frac{1}{\beta} \left(\frac{f}{b}\right)^\alpha \\ \beta \left(\frac{a}{c}\right)^\alpha \leq R_{r_1,r_2} \leq \frac{1}{\beta} \left(\frac{d}{b}\right)^\alpha \end{cases} \quad (3)$$

3.1. Independência baseada em distância

As condições anteriormente descritas podem ou não ser atendidas, dependendo das relações que se estabelecem entre as distâncias que separam os terminais envolvidos e as razões entre as suas respectivas potências. No entanto, é possível avançar no modelo, estabelecendo condições que independem das razões de potência, para casos específicos.

Inicialmente, deve-se notar que as razões R_{s_1,s_2} , R_{s_1,r_2} , R_{r_1,s_2} e R_{r_1,r_2} são compostas por um numerador, que corresponde sempre a uma potência do enlace 1, e um denominador, que é uma das potências do enlace 2. Além disso, sempre existirá um limite físico para a potência de qualquer transmissor, dado por P_{max} . Desta forma, sendo R qualquer das quatro razões citadas, ela se situa entre os limites descritos em 4.

$$\frac{P_{min_1}}{P_{max}} \leq R \leq \frac{P_{max}}{P_{min_2}} \quad (4)$$

Por simplicidade, adota-se um modelo de propagação do tipo *log-distance*, com ganho total de transmissão G . Sendo o limiar de recepção RX_{th} a mínima potência necessária para possibilitar a recepção, P_{min_1} e P_{min_2} podem ser expressos por 5.

$$P_{min_1} = \frac{RX_{th}a^\alpha}{G} \quad P_{min_2} = \frac{RX_{th}b^\alpha}{G} \quad (5)$$

Assim, pode-se reescrever a equação 4 como exposto em 6.

$$\frac{RX_{th}}{GP_{max}}a^\alpha \leq R \leq \frac{GP_{max}}{RX_{th}}\left(\frac{1}{b^\alpha}\right) \quad (6)$$

Essa condição é sempre atendida pelas quatro razões de potências utilizadas nas condições expostas em 3. Assim, tomando-se a primeira condição exposta em 3 em conjunto com 6, é possível comparar os limites estabelecidos para R_{s_1, s_2} pelas duas condições, lembrando sempre que 6 é mandatória. Desta forma, simplificando adequadamente os termos, conclui-se que a primeira condição do conjunto 3 será atendida com certeza se forem atendidas simultaneamente as novas condições 7, que podem ser reduzidas à condição 8.

$$\begin{cases} \beta \left(\frac{1}{d^\alpha}\right) \leq \frac{RX_{th}}{GP_{max}} \\ \left(\frac{1}{\beta}\right) c^\alpha \geq \frac{GP_{max}}{RX_{th}} \end{cases} \quad (7)$$

$$c, d \geq \left(\frac{GP_{max}}{RX_{th}}\beta\right)^{\frac{1}{\alpha}} \quad (8)$$

Realizando-se as mesmas operações sobre as demais condições em 3 obtém-se o exposto em 9. Esta condição combinada representa a situação de pares de enlaces que sempre são independentes, não importando a escolha das potências de cada terminal envolvido e tampouco a distância de cada enlace (a e b). A independência descrita é imposta pelo distanciamento dos terminais componentes de cada enlace.

$$c, d, e, f \geq \left(\frac{GP_{max}}{RX_{th}}\beta\right)^{\frac{1}{\alpha}} \quad (9)$$

Quando essas condições são atendidas em relação a dois enlaces que compartilham o mesmo canal, eles sempre serão independentes, segundo o conceito definido anteriormente. Os terminais envolvidos podem escolher quaisquer níveis de potência para comunicação (desde que inferiores a P_{max} , obviamente), sendo sempre mantida a condição de independência mútua.

3.2. Maximização do número de pares de enlaces independentes

A principal ideia explorada neste trabalho é a de que pode-se ampliar bastante o reuso espacial na rede maximizando-se os enlaces independentes. O ajuste dos níveis de potência de forma a gerar o maior número possível de relações de independência mútua tende a aumentar o número de possíveis transmissões simultâneas, embora não represente, necessariamente, a solução ótima para o problema de maximização do reuso espacial. A

razão para isso consiste na interferência cumulativa gerada por diversas transmissões simultâneas. Dois enlaces podem ser independentes entre si, e cada um deles pode ser independente de um terceiro enlace. No entanto, é possível que, em uma situação na qual quadros estejam sendo enviados nos três enlaces simultaneamente, a *SINR* se torne insuficiente em um dos receptores envolvidos.

Desta forma, a proposta consiste em utilizar a solução de maximização de um problema mais simples, ou seja, considerando-se a independência de enlaces dois a dois, para obter melhores resultados, embora não necessariamente ótimos, em um problema cuja solução é notoriamente mais difícil.

A fim de formalizar o problema de maximização, propõe-se considerar um grafo de dependência entre enlaces $D = (V, E)$. O conjunto de vértices V é composto por todos os *enlaces* lógicos da rede *ad hoc* considerada. Desta forma, considera-se que cada terminal t_i conhece um conjunto de terminais dentro de seu alcance de transmissão físico, com os quais vai estabelecer comunicações lógicas. Esse conjunto de terminais *correspondentes* pode ou não ser composto por todos os terminais ao alcance de t_i . Assim, $V = \{(t_i, t_j)\}$, sendo t_j correspondente de t_i .

Por sua vez, o conjunto de arestas E tem como seus elementos os pares (V_i, V_j) que possuem entre si relação de dependência. Tal relação pode ser definida indiretamente pelas condições de independência listadas em 3. Se uma das condições de independência não é atendida, diz-se que V_i é dependente de V_j , e haverá uma aresta entre esses enlaces no grafo de dependência D .

Conforme anteriormente exposto, o atendimento às condições de independência é função do posicionamento dos terminais da rede, de suas potências de transmissão e dos valores de *SINR* necessários. Assim, o problema de maximização de enlaces independentes em uma rede sem fio, considerando-se determinada topologia e *SINR* necessária em cada terminal, poderia ser solucionado de acordo com os seguintes passos: (i) diante de uma certa configuração de níveis de potência, cabendo a cada terminal uma potência de transmissão específica, determinar o grafo de dependência D ; (ii) dado o grafo D , determinar o número máximo de enlaces independentes entre si, ou seja, que não são conectados diretamente por arestas pertencentes a E ; e (iii) realizar os passos (i) e (ii) com todas as possíveis configurações de níveis de potências, determinando a solução que maximiza os pares de enlaces independentes.

Analisando a sequência de passos descrita, é possível verificar a inviabilidade computacional desta solução. O passo (i) implica realizar a verificação das condições de independência para todos os pares de enlaces pertencentes a V . Em uma rede com n enlaces, significa realizar os testes para cada uma das $\frac{n(n-1)}{2}$ combinações possíveis, cabendo aqui ainda ressaltar que o número de enlaces possíveis na rede varia ainda quadraticamente com o número de terminais. O passo (ii) pode ser reduzido ao conhecido problema de determinação do *maximal independent set*, cuja solução em tempo polinomial é desconhecida. Por fim, o terceiro passo exige a exploração de todas as combinações possíveis de potência em relação aos terminais. Considerando N_p níveis de potência discretos, resultam N_p^k combinações a serem testadas, onde k é o número de terminais.

3.3. Heurística proposta

Diante da complexidade do problema de maximização dos enlaces independentes, optou-se pelo desenvolvimento de uma heurística a ser executada de forma distribuída pelos terminais. O objetivo a ser alcançado consiste em, a partir de uma rede sem fio que dispõe de um determinado número de pares de enlaces independentes, aumentar este número por meio do ajuste dos níveis de potência de alguns terminais. Vale ressaltar que não se pretende atingir uma solução ótima, mas apenas uma aproximação que gere um melhor reuso espacial do que a configuração original.

O mecanismo proposto pressupõe a troca periódica de quadros destinados à difusão de informações para o reuso espacial. Tais quadros deverão ser enviados pelos terminais utilizando a máxima potência disponível e a taxa de transmissão básica, visando maximizar seu alcance. Um enlace v_1 é considerado vizinho de outro v_2 se ao menos um dos terminais de v_1 pode se comunicar, utilizando esse máximo alcance possível, com um dos terminais de v_2 . Cada terminal deverá informar: (a) a identificação de seus correspondentes; (b) a distância estimada em relação a cada um deles; (c) a *SINR* mínima necessária para recepção (em relação a ele próprio e a seus correspondentes), e ; (d) as potências de transmissão utilizadas na comunicação com seus correspondentes.

A distância estimada referenciada em (b) é aquela determinada pelo nível de potência recebido, quando se conhece a potência utilizada pelo transmissor correspondente. Usando-se um modelo de propagação *Log-Distance*, $d_{est} = (\frac{GP_t}{P_r})^{\frac{1}{\alpha}}$. O próprio recebimento de um quadro de informações sobre reuso é oportunidade para determinação dessa distância, já que ele é sempre enviado em potência máxima. Para contornar problemas relativos à instabilidade do canal, é conveniente o uso de uma média móvel, estimando a distância a partir de várias observações consecutivas. Vale ressaltar ainda que essa distância pode não representar uma estimativa confiável da distância real entre os terminais, mas pode ser considerada como uma *distância equivalente* para fins de propagação. Na verdade, o que realmente importa para determinar a independência entre enlaces é o nível médio de *atenuação* entre os terminais, pois determina a contribuição na *SINR* resultante em cada receptor.

A base da heurística implementada é fazer com que cada um dos enlaces eleja um determinado enlace dependente, ou seja, um enlace vizinho no grafo de dependência D , para uma tentativa de ajuste dos níveis de potência que possa gerar a independência. Obviamente, o grafo D aqui passa a ter significado apenas local, cabendo a cada enlace, por meio de um de seus terminais, determinar os enlaces vizinhos dependentes. Escolhido esse enlace e realizada a otimização, ou seja, determinada uma configuração de níveis de potência dos quatro terminais envolvidos que gera a independência, ambos os enlaces são marcados, de forma a impedir uma nova mudança nos níveis de potência. Caso a tentativa de se encontrar uma configuração dos níveis de potência que resulte em independência falhe, os enlaces permanecem disponíveis para participar de novas tentativas.

Resumidamente, os passos a serem executados periodicamente por um terminal de determinado enlace são:

1. Determinar seus enlaces vizinhos no grafo D e suas respectivas distâncias equivalentes b, c, d, e e f ;
2. Escolher o enlace vizinho para realizar a otimização;

3. Explorar todas as combinações possíveis de potência entre os quatro terminais, utilizando as condições expostas em 3 para determinar a independência;
4. Se for possível alcançar a independência, comunica-se ao enlace vizinho, ambos assumem os níveis de potência escolhidos e são marcados, evitando-se nova otimização por certo período de tempo. Realiza-se ainda a atualização do conjunto de vizinhos em D para cada um dos enlaces envolvidos, excluindo-se mutuamente.
5. Após executar os passos acima, ou após ser comunicado de uma otimização realizada por um enlace vizinho que o envolva, os terminais do enlace ajustam seu respectivos valores de CS_{th} de acordo com o novo conjunto de vizinhos em D .

Basta que um dos terminais de cada enlace execute a heurística, considerando que as informações necessárias deverão ser repassadas pelo seu terminal correspondente. O passo 1 é alcançado com a recepção dos quadros de controle de cada um dos vizinhos. A cada quadro recebido, realiza-se o teste de dependência, construindo o grafo D . Inicialmente, pode-se eliminar os enlaces independentes por distância, com base nas condições expostas em 9. Em seguida, passa-se a determinar os demais enlaces independentes com base no conjunto de condições mais complexo, exposto em 3. Excluídos todos os enlaces independentes, restarão os vizinhos em D . Se uma das distâncias (c, d, e, f) não puder ser estimada, por estar o terminal fora de alcance, será utilizado o pior caso, do ponto de vista da interferência por ele gerada. Usa-se, para isso, o máximo alcance, determinado pelo uso da potência máxima e limiar de recepção correspondente à taxa básica.

A escolha do enlace vizinho a ser otimizado baseia-se na maior probabilidade de ser alcançada a otimização. Analisando-se as condições de independência citadas, verifica-se que quanto menor o valor de b , ou seja, quanto mais curto é o enlace vizinho, maior a probabilidade de se tornar independente do enlace de referência. Da mesma forma, quanto maiores os valores de c, d, e e f , menor a interferência mútua entre os enlaces, também favorecendo a independência. Assim, o método escolhido para selecionar o enlace vizinho para a tentativa de otimização é comparar as razões $\frac{b}{\min(c,d,e,f)}$ de cada um dos vizinhos no grafo D , selecionando o que apresentar a menor relação. Se existem n enlaces na rede, o pior caso é representado por $(n - 1)$ comparações.

O passo 3 é executado testando-se todas as combinações possíveis de potência para os terminais envolvidos. Considerando-se N_p níveis discretos de potência, resultam N_p^4 combinações. Na versão implementada para a avaliação, este número foi de apenas 81 configurações diferentes. Passa-se assim ao passo 4, realizado de maneira trivial.

Por fim, o passo 5 é alcançado fazendo com que cada terminal do enlace ajuste seu CS_{th} de forma a ser sensibilizado pelo terminal mais distante dentre aqueles pertencentes a enlaces vizinhos em D . Para isso, o terminal utiliza as distâncias c, d, e e f para estimar a respectiva potência recebida de cada terminal cujo enlace seja vizinho em D . Utiliza-se como valor de CS_{th} a menor dessas potências, menos uma margem de segurança.

4. Resultados de Simulação

Foram realizadas simulações do funcionamento de redes *ad hoc* 802.11, visando a comparar o desempenho dos métodos de ajuste de P_t e CS_{th} citados e o padrão IEEE 802.11, que utiliza valores fixos para esses parâmetros. O simulador utilizado foi *Network Simulator 2* [NS-2 2009]. O cenário implementado consiste em uma área plana, de formato quadrado, de lado $L = 1000m$, na qual foram posicionados n pares transmissor-receptor segundo

uma distribuição aleatória uniforme bidimensional. Cada par transmissor-receptor realiza entre si comunicações de um único salto, sendo a distância entre os dois aleatória, uniformemente distribuída, até o limite do alcance de transmissão.

O tráfego é do tipo *Constant Bit Rate*, com taxa de geração R , variada a cada simulação. O modelo de propagação é o *Two-Ray Ground*, que considera, além do sinal que se propaga diretamente, o sinal que atinge o receptor após sofrer uma reflexão no solo. Esse modelo apresenta resultados mais precisos para a potência que incide no receptor do que o clássico modelo de propagação em espaço livre.

Os terminais utilizam antenas omni-direcionais. A taxa física de transmissão utilizada foi de $18Mbps$, por constituir uma taxa razoavelmente intermediária entre as opções existentes no padrão IEEE 802.11g [802.11g]. Os receptores experimentam um ruído térmico branco, de potência $-100.6dBm$, valor típico nos canais do 802.11. O tamanho dos quadros utilizado foi de 1024 bytes, exceto quando indicados valores diferentes.

A versão do *Network Simulator* utilizada foi a 2.31, com modificações. Basicamente, foi implementado um modelo de controle do sinal interferente que atinge cada um dos terminais da rede. Este sinal corresponde ao somatório das potências de todos os transmissores ativos a cada instante, considerando-se a atenuação até o receptor de interesse. Isto é necessário, uma vez que mesmo os sinais enviados por transmissores muito distantes podem representar valores substanciais de interferência, se levados em conta conjuntamente. O tempo de cada simulação executada foi de 30 segundos, além de um tempo inicial aleatório para que seja atingida uma operação razoavelmente estacionária.

Inicialmente, buscou-se comparar o desempenho da heurística proposta com a solução de força bruta do problema de maximização dos enlaces independentes, descrita em 3.2. Para viabilizar a comparação, foram utilizados 10 cenários aleatórios, cada um com 8 enlaces, totalizando 16 terminais. O número de níveis de potência utilizado foi de 3, sendo eles 13, 16 e $19dBm$. Quando operando em potência fixa, como é o caso do 802.11 puro, os terminais foram configurados com a potência de $13dBm$.

Para cada um dos 10 cenários utilizados, foram testadas todas as combinações possíveis de níveis de potência com relação aos 16 terminais, determinando-se, para cada cenário, a combinação que gera o maior número de pares de enlaces independentes. Esta busca exaustiva foi realizada em um *cluster* composto por cerca de 40 processadores, em um tempo aproximado de 48 horas. Com tais combinações predeterminadas, foi possível configurar cada terminal com seu respectivo nível de potência e ajustar seu CS_{th} de forma semelhante à descrita na heurística, apenas com a diferença de serem utilizadas as distâncias reais entre os terminais, sem o uso das distâncias estimadas. Com isso, obteve-se uma rede configurada para operação otimizada, segundo o critério de maximização do número de pares de enlaces independentes, com base em um conhecimento global e ajuste centralizado.

Os resultados da comparação pretendida são expostos na Figura 2(a). Cada ponto obtido é o resultado de 100 simulações, e os intervalos de confiança são de 95%. É possível verificar que a heurística de ajuste local aproxima-se bastante do desempenho obtido com ajuste global, sendo ambos bastante superiores ao ajuste analítico utilizado em [Gurses and Boutaba 2009]. Tais resultados foram obtidos com o uso dos parâmetros ótimos calculados no próprio trabalho citado. A Figura 2(b) mostra os resultados obtidos

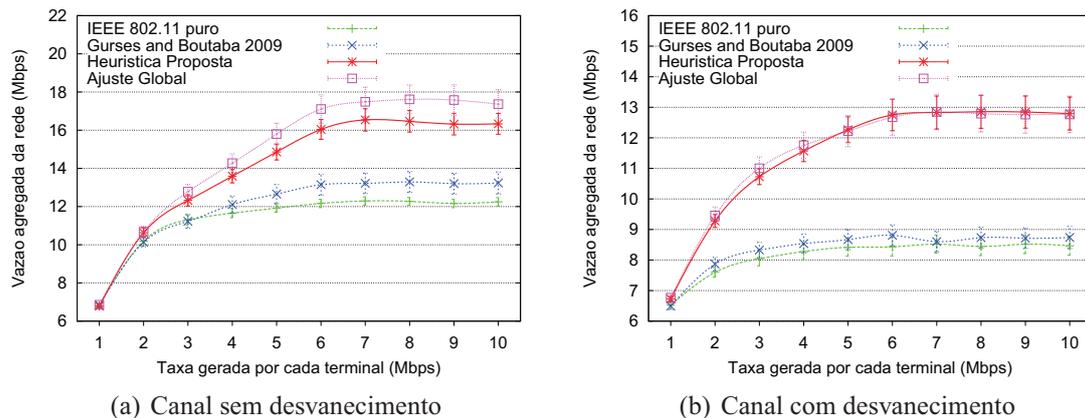


Figura 2. Comparação de desempenho entre os métodos de ajuste - 10 cenários.

na presença de desvanecimento por multipercursos. Em determinadas redes, o sinal que atinge um receptor pode sofrer abruptas variações, em função das múltiplas reflexões causadas principalmente pela movimentação de objetos no ambiente. Esse efeito foi levado em consideração por meio de amostras de variações no sinal geradas de acordo com a distribuição *Rice*, frequentemente usada para modelar o fenômeno [ARC 2007]. Novamente, é possível verificar que a heurística funciona adequadamente, sofrendo inclusive uma degradação de desempenho inferior à sofrida pelo ajuste global. Este efeito pode ser atribuído ao uso das distâncias reais pelo método de conhecimento global, já que a deterioração das condições do canal resulta em atenuações bastante diferentes das esperadas. Como a heurística baseia-se na atenuação efetivamente observada, seu desempenho é mais consistente.

Em seguida, buscou-se analisar o desempenho do ajuste local proposto para um número maior de cenários aleatórios, com e sem a presença de desvanecimento no canal. Para isso, foram utilizados 50 cenários aleatórios. Desta vez, a comparação é realizada apenas entre a heurística desenvolvida, o ajuste analítico proposto em [Gurses and Boutaba 2009] e o padrão 802.11, pelo alto custo de computação em realizar o ajuste global para tantos cenários. Os resultados são mostrados na Figura 3.

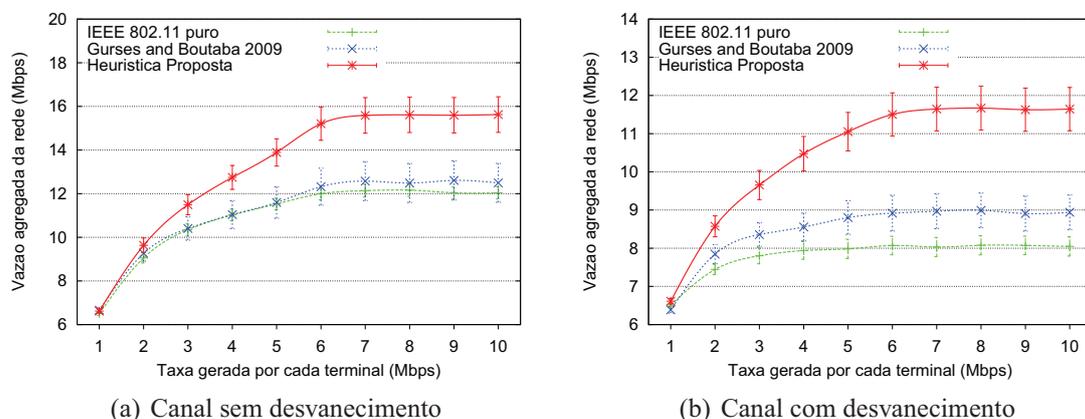


Figura 3. Comparação de desempenho entre os métodos de ajuste - 50 cenários.

Por fim, duas comparações de desempenho complementares são realizadas, ambas na presença de desvanecimento. A primeira delas, exposta na Figura 4(a), investiga se a variação do tamanho do quadro do 802.11 usado poderia influir no desempenho da heurística, quando comparada com o ajuste analítico e o padrão 802.11. Verifica-se que o impacto dessa variação foi mínimo na diferença entre os métodos de ajuste.

Na Figura 4(b), é avaliada a influência da densidade da rede nos resultados, fixando-se a taxa de geração do tráfego *CBR* em cada terminal em 8 Mbps. Foram realizadas simulações para diferentes números de enlaces na mesma área de $1km^2$, variando da metade ao dobro do número de pares TX-RX usado nas demais simulações. Da mesma forma, para cada número de enlaces, foram gerados 50 cenários diferentes. Mais uma vez, verifica-se a manutenção dos bons resultados obtidos pela heurística proposta.

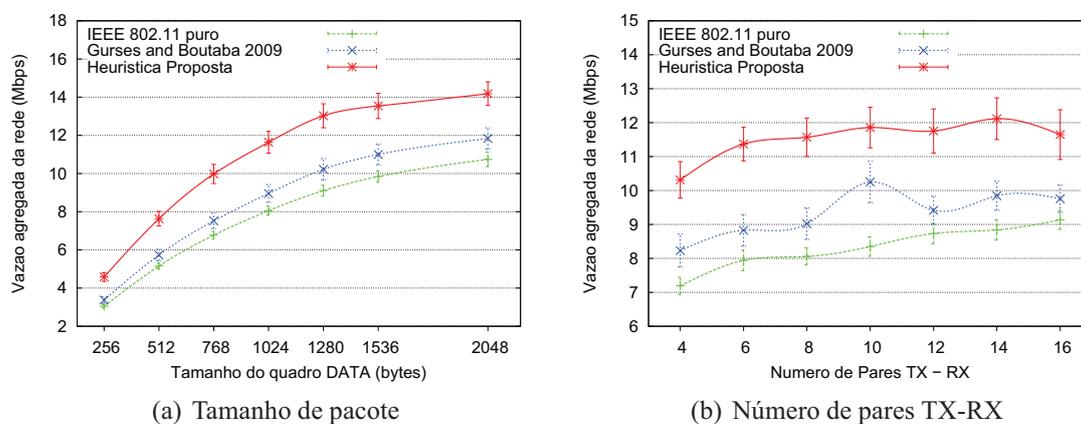


Figura 4. Avaliações adicionais.

5. Conclusão

Neste trabalho, o problema de aumento do reuso espacial em redes *ad hoc* 802.11 é explorado por meio do conceito de enlaces mutuamente independentes, visando a atingir um maior número de transmissões simultâneas na rede. São deduzidas as condições que definem a independência e demonstra-se ser possível atingi-la através do ajuste dos níveis de potência dos terminais envolvidos. Diferentemente da proposta apresentada em [Gurses and Boutaba 2009], verifica-se que o ajuste de potência visando ao reuso não pode ser exclusivamente baseado na distância entre transmissor e receptor, sob pena de reduzir o número de possíveis transmissões simultâneas.

Com o objetivo de aumentar o número de pares de enlaces independentes, é apresentada uma heurística original para ajuste de P_t e CS_{th} . Com o uso de simulações, verifica-se que o desempenho obtido pelo mecanismo proposto se aproxima razoavelmente do obtido por meio de uma solução ótima do problema, calculada com o uso de força bruta devido à sua alta complexidade computacional.

Para um número significativo de cenários, a vazão agregada da rede com o uso do método proposto é cerca de 30% superior à obtida com o uso do mecanismo proposto em [Gurses and Boutaba 2009], e cerca de 46% maior do que a obtida com P_t e CS_{th} fixos, como é o caso do padrão 802.11 puro.

Referências

- 802.11. *IEEE 802.11, 1999 Edition (ISO/IEC 8802-11: 1999). IEEE Standards for Information Technology – Telecommunications and Information Exchange between Systems – Local and Metropolitan Area Network – Specific Requirements – Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, 1999.*
- 802.11g. *IEEE 802.11g-2003 IEEE Standard for Information Technology - Local and metropolitan area networks - Specific requirements - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications - Amendment 4: Further Higher-Speed Physical Layer Extension in the 2.4 GHz Band.*
- Acholem, O. and Harvey, B. (2010). Throughput Performance in Multihop Networks using Adaptive Carrier Sensing Threshold. In *IEEE SoutheastCon 2010*.
- ARC (2007). *Additions to the NS network simulator to handle Ricean and Rayleigh fading*. Acessado em: 15/06/2009.
- Fonseca, B. J. B. (2007). A Distributed Procedure for Carrier Sensing Threshold Adaptation in CSMA-based Mobile Ad Hoc Networks. In *IEEE Vehicular Technology Conference*, pages 66–70.
- Fu, L., Liew, S. C., and Huang, J. (2009). Safe Carrier Sensing Range in CSMA Network under Physical Interference Model. Technical report, Department of Information Engineering - The Chinese University of Hong Kong.
- Gurses, E. and Boutaba, R. (2009). Capacity of Wireless Multi-hop Networks Using Physical Carrier Sense and Transmit Power Control. In *IEEE GLOBECOM*.
- Kim, T.-S., Lim, H., and Hou, J. C. (2006). Improving spatial reuse through tuning transmit power, carrier sense threshold, and data rate in multihop wireless networks. In *ACM MOBICOM*.
- Liu, Y., Zhang, X., Liu, Q., and Dai, S. (2008). Interference-aware physical carrier sensing for maximum throughput in ad hoc networks. In *Communications and Networking in China*, pages 60–64.
- NS-2 (2009). *The Network Simulator - ns-2*. Acessado em: 24/05/2009.
- Vegad, M. M., De, S., and Lall, B. (2010). A Liberal Carrier Sensing for Increased Spatial Reuse in Multi-Hop Wireless Ad Hoc Networks. In *IEEE ICC 2010*.
- Yang, E., Choi, J., and Lee, S. (2008). On Selfish Behavior using Asymmetric Carrier Sensing in IEEE 802.11 Wireless Networks. In *IEEE LCN*, pages 527–529.
- Yang, X. and Vaidya, N. H. (2005). On physical carrier sense in wireless ad hoc networks. In *IEEE INFOCOM*.
- Yang, Y., Hou, J. C., and Kung, L.-C. (2007a). Modeling of Physical Carrier Sense in Multi-hop Wireless Networks and Its Use in Joint Power Control and Carrier Sense Adjustment. In *IEEE INFOCOM*.
- Yang, Y., Hou, J. C., and Kung, L.-C. (2007b). Modeling the Effect of Transmit Power and Physical Carrier Sense in Multi-hop Wireless Networks. In *IEEE INFOCOM*.
- Zhai, H. and Fang, Y. (2006). Physical carrier sensing and spatial reuse in multirate and multihop wireless ad hoc networks. In *IEEE INFOCOM*.