

# Mecanismo de Difusão de Padrões de Interferência para o Aumento da Capacidade de Redes Ad Hoc IEEE 802.11\*

Alexandre Andrade Pires, José Ferreira de Rezende

<sup>1</sup>GTA - 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 work presents an efficient method for interference pattern reporting in wireless ad hoc IEEE 802.11 networks. The information disseminated can be used by neighboring terminals to adjust transmission parameters so as to increase spatial reuse. We simulated the operation of ad hoc networks, in which the intensity of the interference produced by close communication is monitored in a set of terminals. The results show that the variation of received interference in time, under certain conditions, corresponds to transitions between values belonging to a finite set, with the addition of a series of residuals. The proposed method is basically to transmit the interference pattern received through the periodic dissemination of this set of values and their relative occurrence rate. Thus, it is possible to transmit to the neighboring terminals a summary of the interference received by the terminal of interest, without sending the entire time series collected, minimizing the overhead required.*

***Resumo.** Este artigo apresenta um método eficiente para a difusão do padrão de interferência recebida por um terminal de uma rede sem fio ad hoc IEEE 802.11. As informações difundidas podem ser utilizadas por terminais vizinhos para ajuste de parâmetros de transmissão, visando ao aumento do reuso espacial. Foram realizadas simulações do funcionamento de redes ad hoc, nas quais a intensidade da interferência produzida por comunicações próximas é monitorada em um conjunto de terminais. Os resultados demonstram que a variação da interferência no tempo, sob certas condições, corresponde a transições entre valores pertencentes a um conjunto finito, com a adição de uma série de resíduos. O método proposto consiste basicamente em difundir o padrão de interferência recebido por meio da divulgação periódica desse conjunto de valores e das respectivas frequências relativas. Desta forma, é possível transmitir aos terminais vizinhos uma descrição sumária da interferência sofrida pelo terminal de interesse, sem a necessidade do envio de toda a série temporal coletada, minimizando a sobrecarga necessária.*

## 1. Introdução

O aumento de capacidade de redes *ad hoc* IEEE 802.11 [802.11] tem sido alvo de diversas pesquisas recentes. A crescente popularidade dessa tecnologia, aliada ao reduzido número de canais disponíveis para utilização, tem delineado um cenário futuro preocupante, no qual as redes poderão se tornar cada vez mais densas e com pior desempenho,

---

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

impulsionando o interesse acadêmico pelo assunto. Dentre as linhas de pesquisa sobre o tema, vem ganhando destaque 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 do canal 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 tem sido o foco de vários trabalhos, visando a atingir esse grau adequado de reuso espacial.

Nesse contexto, a interferência experimentada pelos vizinhos é sempre levada em consideração nos mecanismos de ajuste. A maioria dos trabalhos, no entanto, limita-se a estimar um valor teórico para essa interferência, enquanto outras pesquisas utilizam a divulgação periódica da última condição de interferência experimentada pelo dispositivo. O foco deste trabalho é apresentar um método de divulgação do *padrão de interferência* experimentado por um terminal para os demais, possibilitando a eles a realização de estimativas quanto à futura condição de interferência dele. A vantagem disso consiste em tornar o mecanismo de ajuste de limiar de detecção portadora mais eficiente, na medida em que poderá dispor de informações mais completas sobre a interferência em cada um dos dispositivos da rede.

O restante do documento encontra-se organizado da seguinte forma: na próxima seção são abordados os temas do ajuste de limiar de detecção de portadora e sua dependência de informações corretas sobre a interferência dos vizinhos; na seção 3 são discutidos os principais trabalhos já realizados sobre o assunto; em seguida, são exibidos os resultados de medições de interferência em redes *ad hoc* 802.11, obtidos por simulação; a seção 5 apresenta o método proposto para a difusão dos padrões de interferência, e; na seção 6 são discutidas as principais conclusões.

## **2. Detecção de Portadora e Interferência**

Numa rede 802.11, os terminais compartilham o canal de transmissão, utilizando o método CSMA/CA (*Carrier Sense Multiple Access / Collision Avoidance*). O método pressupõe uma disputa pelo canal, de tal forma que os terminais verifiquem se o mesmo está livre antes de iniciarem uma transmissão, usando ainda um algoritmo adequado para evitar que dois transmissores sejam acionados simultaneamente. Caso ocorra a transmissão simultânea, um receptor atingido pelas duas transmissões em níveis semelhantes de potência será incapaz de decodificar corretamente qualquer dos dois quadros enviados, resultando em uma *colisão*. Assim, o cenário ideal para o funcionamento desta rede seria aquele no qual, a cada instante, apenas um terminal possa se utilizar do canal para transmitir, enquanto os demais terminais permaneçam em silêncio.

Embora seja adequado para uma rede infraestruturada, na qual todas as trans-

missões são intermediadas por um ponto de acesso, o cenário descrito revela-se pouco eficiente para uma rede *ad hoc* distribuída em uma área suficientemente grande, onde nem todos os terminais estejam ao alcance uns dos outros. Nesse cenário, é possível, e mesmo desejável, que certas transmissões ocorram de forma simultânea, aumentando a vazão agregada da rede. A condição para que a utilização simultânea do canal não resulte em colisão consiste na manutenção de uma *SINR* (*Signal to Interference plus Noise Ratio*) mínima em cada receptor envolvido. Assim, as demais transmissões simultâneas seriam apenas componentes de uma interferência tolerável, possibilitando a correta recepção e decodificação do quadro de interesse. Desta forma, o compromisso (*trade off*) entre reuso espacial e baixo índice de colisões apresenta-se como o fator chave para o aumento da eficiência das redes *ad hoc*.

O principal parâmetro para o controle desse compromisso é o limiar de detecção de portadora. Essa medida representa o nível de potência mínimo a partir do qual o receptor considera que o canal encontra-se ocupado por uma transmissão. A importância deste limiar é consequência da necessidade, imposta pelo método CSMA/CA, de que, antes de iniciar uma transmissão, cada transmissor verifique se o canal já está sendo utilizado por outro terminal, por meio da comparação entre o nível de potência verificado pelo transmissor no canal e seu limiar de detecção de portadora. O ajuste nesse limiar, fazendo com que assuma valor superior ao nível de potência verificado no canal, pode fazer com que o transmissor decida iniciar uma transmissão em paralelo com outra, já em curso, viabilizando o reuso espacial. O limiar de detecção de portadora é normalmente representado por  $CS_{th}$ , em decorrência do termo em inglês *Carrier Sense Threshold*.

Obviamente, um dos fatores chave para o sucesso do método de aumento de reuso é a garantia de manutenção de uma *SINR* mínima em cada receptor. Com isso, a grande maioria das propostas de ajuste de  $CS_{th}$  pressupõe a utilização de informações sobre a interferência sofrida pelos vizinhos para que cada terminal possa decidir sobre ajustes em seus parâmetros de transmissão.

A maioria das pesquisas utiliza modelos analíticos para estimar a interferência sofrida pelos terminais próximos, ou apenas propõe a divulgação aos vizinhos da última medida de interferência observada. Neste trabalho, optou-se por viabilizar a difusão de informações mais completas sobre o *padrão de interferência* sofrido por cada terminal. A importância dessa abordagem reside no fato de que os terminais vizinhos devem usar as informações difundidas para tomar decisões sobre os parâmetros de transmissão que utilizarão em transmissões *futuras*, quando o valor exato da interferência em cada vizinho não será mais de seu conhecimento imediato.

### 3. Trabalhos Relacionados

Nos últimos anos, uma série de 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 maioria desses últimos utiliza-se de algum método de estimativa ou difusão da interferência experimentada pelos terminais vizinhos. Assim, as pesquisas recentes abordam o assunto da difusão de informações de interferência como um tema marginal, mantendo o foco sobre o mecanismo de aumento de capacidade.

No trabalho [Zhu et al. 2004], os autores observam que pode-se aumentar a vazão de uma rede com ajustes no limiar de detecção de portadora. É utilizada uma aborda-

gem analítica, calculando o melhor valor de  $CS_{th}$  para alguns casos específicos, usando topologias regulares, como cadeias e *grids*. Considera-se apenas um possível terminal interferidor teórico, e não é proposto qualquer método para a difusão de informações de interferência.

Em [J. Fuemmeler 2004], é realizada uma análise conjunta da influência da potência de transmissão  $P_t$  e do limiar de detecção de portadora no desempenho de uma rede 802.11. No trabalho [Yang and Vaidya 2005], os autores tornam os resultados anteriores mais gerais, mostrando a influência da sobrecarga (*overhead*) gerado pelos diversos mecanismos da camada MAC no ajuste de  $CS_{th}$ . Ambos os trabalhos consideram apenas estimativas analíticas da interferência esperada em cada terminal, levando em conta fatores como a densidade da rede e distâncias médias entre possíveis interferidores mútuos.

Em [Vasan et al. 2005], os autores apresentam a proposta de um esquema denominado *ECHOS – Enhanced Capacity 802.11 Networks*, destinado ao aumento de desempenho de redes infraestruturadas, usando um modelo de interferência simples, com bases analíticas, onde só um possível interferidor é considerado.

O estudo [Yang and Vaidya 2005] é ampliado em [Zhai and Fang 2006], passando a considerar a possibilidade do uso de várias taxas de transmissão diferentes e uma rede com comunicações de múltiplos-saltos. 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 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 aborda o aumento do reuso espacial com o ajuste de  $P_t$ ,  $CS_{th}$  e da taxa de transmissão dos terminais.

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 sem fio. O modelo de interferência pressupõe terminais aleatoriamente distribuídos por uma área, obedecendo a uma distribuição de *Poisson* bidimensional com densidade constante. A interferência acumulada que incide em 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. As estimativas da interferência nos vizinhos é calculada pelo mesmo modelo analítico.

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. É demonstrado que os modelos analíticos são, na maioria das vezes, falhos ao estimar a interferência sobre certo terminal. Assim, propõe um método no qual cada terminal periodicamente escolhe um valor qualquer de uma lista finita, e o utiliza como  $CS_{th}$  por certo tempo, coletando estatísticas sobre as transmissões bem

sucedidas na vizinhança. Ao final, passa a utilizar o valor que proporcionou maior média de sucesso nas transmissões, repetindo o procedimento após alguns instantes. Verifica-se que o trabalho opta por abrir mão de um método de ajuste de  $CS_{th}$  mais sofisticado, justamente por não dispor de informações mais precisas sobre a interferência na rede.

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]. O ajuste é realizado por meio de uma heurística, e os resultados são obtidos em cenários de um único salto e com taxa de transmissão fixa. Em [Fu et al. 2009], os autores dedicam-se a determinar um  $CS_{th}$  seguro, que praticamente elimine a ocorrência de colisões, usando, mais uma vez, um modelo analítico para o cálculo da interferência.

No trabalho [Frangoudis and Polyzos 2008], ampliado em [Zografos 2009], é proposto um método de divulgação periódica da interferência recebida pelos terminais de uma rede infraestruturada. A única informação divulgada consiste no último valor de interferência experimentada pelo terminal, e é destinada a alimentar bancos de dados centralizados, com o objetivo de subsidiar a reconfiguração de pontos de acesso que compõem a rede.

## 4. Medidas de Interferência

Foram realizadas simulações do funcionamento de redes *ad hoc* 802.11, visando a identificar os padrões de interferência aos quais os terminais são expostos. Como o objetivo do método de difusão de interferência é servir de subsídio a um mecanismo de aumento do reuso espacial, foram escolhidos cenários nos quais havia o posicionamento de um elevado número de terminais em uma área física restrita, resultando em uma rede de elevada densidade. Nesse caso, a disputa pelo meio de transmissão tende a ser maior, evidenciando a necessidade de reuso espacial. A opção pela simulação justifica-se pelo baixo custo e rapidez na implementação, uma vez que o número de terminais envolvidos é bastante grande.

### 4.1. Ambiente de Simulação

Foi utilizado o simulador *Network Simulator 2* [NS-2 2009] para a implementação da rede *ad hoc* virtual para a coleta das medidas. O cenário implementado consiste em uma área plana, de formato quadrado, de lado  $L$ , na qual foram posicionados  $n$  pares transmissor-receptor posicionados 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.

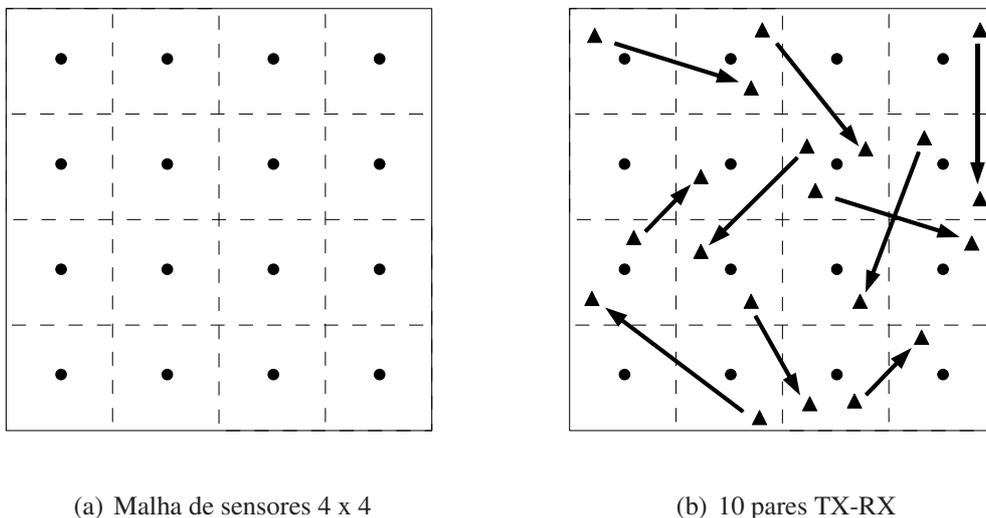
O tráfego é do tipo *Constant Bit Rate*, com taxa de geração  $R$ . O modelo de propagação é o *Two-Ray Ground*, que considera, além do sinal que se propaga diretamente, em linha reta entre transmissor e receptor, o sinal que atinge o receptor após sofrer uma reflexão no solo. Esse modelo apresenta resultados 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 potência de transmissão é de  $15dBm$ , e a taxa física de transmissão foi variada entre as opções existentes no padrão

IEEE 802.11g [802.11g]. Os receptores experimentam um ruído térmico branco, de potência  $-120dBm$ .

Para realizar a medição de interferência em diferentes pontos da área em questão foram posicionados terminais meramente sensores, responsáveis por coletar a interferência no meio de transmissão a intervalos de tempo constantes  $\Delta t$ .

Os sensores foram posicionados formando uma malha quadrada  $k \times k$ , mantendo-se a mesma distância entre sensores vizinhos. Essa distância é calculada com base no número de sensores  $k^2$  e no tamanho da área ocupada  $L^2$ , sendo igual a  $L/k$ . Dessa forma, a malha de sensores se ajusta da melhor forma possível à área, com o objetivo de coletar a interferência percebida em diferentes posições.



(a) Malha de sensores 4 x 4

(b) 10 pares TX-RX

**Figura 1. Posicionamento de sensores e pares TX-RX.**

Na Figura 1, é exibido um exemplo de configuração de uma rede de sensores 4 por 4, e em seguida o posicionamento aleatório de 10 pares transmissor-receptor, com seus respectivos fluxos de dados.

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.

Com relação aos terminais sensores, foi necessário efetuar mais uma modificação, desabilitando completamente suas funções de transmissão e recepção, possibilitando que eles operem coletando a interferência no meio durante todo o tempo de simulação, nos intervalos de tempo fixados.

## 4.2. Resultados

Foram realizadas simulações do funcionamento de redes *ad hoc* durante o intervalo de 10 segundos, com a coleta das amostras de interferência pelos terminais sensores a cada  $50\mu s$ . Foi utilizada uma malha de 16 sensores, e uma rede composta por 10 pares transmissor-receptor, conforme a Figura 1.

Os resultados obtidos por cada um dos 16 sensores são bastante diferentes entre si, devido ao posicionamento aleatório de pares TX-RX por toda a área. Entretanto, a análise comparativa entre os dados demonstrou claramente existir um determinado padrão de variação do sinal interferente, observado em todos os sensores.

Esse padrão corresponde a transições entre valores pertencentes a um conjunto finito, decorrente de uma combinação de possibilidades de transmissão por parte dos seus interferidores mais próximos. A título de exemplo, seja um determinado sensor  $A$ , cujos terminais vizinhos mais próximos são  $I_1$ ,  $I_2$  e  $I_3$ , cujas transmissões são detectadas por  $A$ , respectivamente, com potências  $Pr_1$ ,  $Pr_2$  e  $Pr_3$ . As distâncias entre  $I_1$  e  $I_2$  e entre  $I_1$  e  $I_3$  são suficientemente grandes para garantir que  $I_1$  sequer detecte a presença da portadora dos outros dois interferidores, e vice-versa. Diferentemente,  $I_2$  e  $I_3$  situam-se ao alcance um do outro. O esquema é representado na Figura 2.

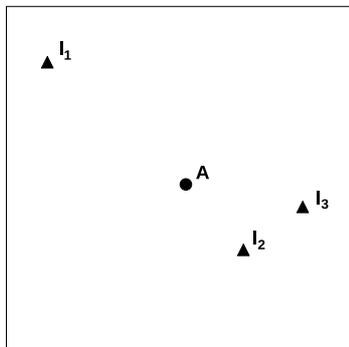


Figura 2. Arranjo estudado.

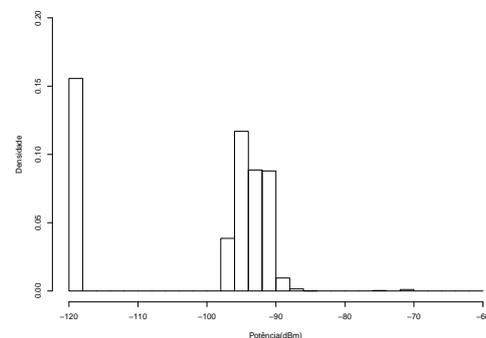


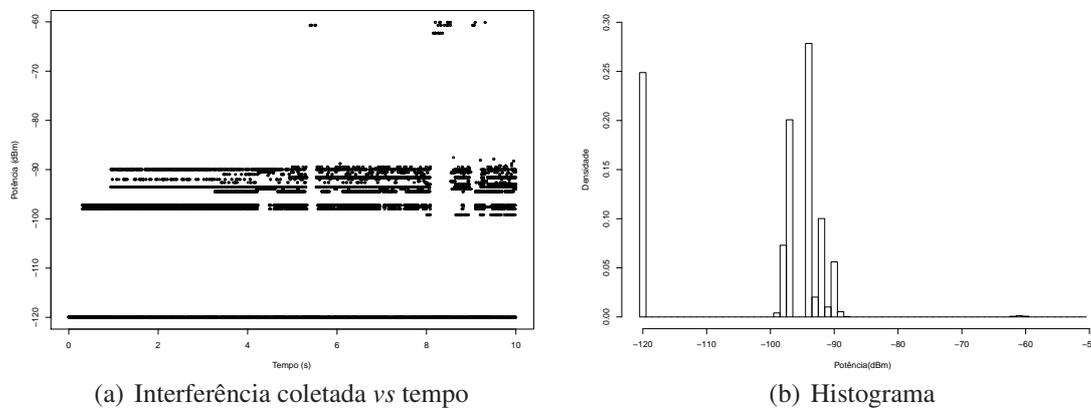
Figura 3. Histograma decorrente.

Considerando-se que o sensor  $A$  encontra-se suficientemente afastado de outras fontes de interferência, é possível concluir que a interferência que atinge  $A$  em dado instante, com base apenas nos interferidores considerados, corresponde a um valor pertencente ao conjunto  $\{0, Pr_1, Pr_2, Pr_3, Pr_1 + Pr_2, Pr_1 + Pr_3\}$ . Somando a cada um desses elementos um certo ruído térmico inerente ao canal, e considerando que as contribuições de potência recebidas por interferidores mais distantes são muito pequenas, a interferência que atinge  $A$  a cada instante será igual a um dos elementos do conjunto citado somado a uma componente residual, decorrente do somatório dessas contribuições marginais e do ruído térmico.

Na Figura 3, é apresentado um histograma hipotético, que poderia ser resultante do cenário descrito, onde é exibida a densidade de ocorrências de cada valor de interferência em  $A$ . Cada barra representa um intervalo de potência de  $2dBm$ , e é possível verificar uma grande concentração de ocorrências em  $-120dBm$ , valor utilizado como

ruído térmico, correspondente ao 0 do conjunto de possibilidades, e mais 5 barras relevantes, correspondentes aos demais valores. Os demais intervalos referem-se a situações nas quais as pequenas contribuições de interferidores distantes somadas foram capazes de fazer com que a interferência ficasse muito diferente dos elementos do conjunto. No entanto, essas situações correspondem a menos de 1% das amostras.

Embora trate-se de um histograma hipotético, referente a um exemplo simples, foi possível observar que todos os 16 sensores utilizados na simulação apresentaram resultados semelhantes. O padrão de interferência observado foi sempre de transição entre valores pertencentes a um conjunto finito, com pequenas variações.



**Figura 4. Resultados obtidos no sensor de número 7.**

Como todos os sensores obtiveram padrões semelhantes, exibe-se na figura 4 as medições realizadas pelo sensor de número 7. Juntamente com os sensores de números 6, 10 e 11, este sensor obteve o maior número de elementos significativos no conjunto de valores de interferência, fato que se explica pelo seu posicionamento mais centralizado na área, podendo contar com mais interferidores próximos.

No caso específico do sensor 7, foi possível identificar um conjunto com 10 elementos, que correspondem a mais de 99% das observações de interferência. A Figura 4(a) demonstra a interferência coletada nesse sensor ao longo do tempo, ficando claro o fato de as transições ocorrerem entre um conjunto fixo de valores. O histograma correspondente é exibido na Figura 4(b), sendo que cada barra representa o intervalo de  $1dBm$ . Ressalte-se que o número de elementos do conjunto pode ser ainda reduzido se ampliarmos o intervalo do histograma para  $2dBm$ . Com isso, menos barras significativas existiriam, aumentando-se, por outro lado, o conjunto de variações consideradas residuais, uma vez que dois níveis de potência diferentes em menos de  $2dB$  poderiam ser aproximados em um mesmo nível.

## 5. Método Proposto

Conforme exposto na seção 3, o conhecimento sobre a interferência existente em terminais próximos é crucial para o funcionamento da maioria dos mecanismos de ajuste de limiar de detecção de portadora. A grande maioria dos trabalhos existentes utiliza como

medida de interferência o resultado de modelos analíticos, baseados em inúmeros fatores. Alguns, inclusive, de difícil conhecimento pelos terminais, como por exemplo a densidade da rede. Tais modelos são eficazes ao determinar valores médios para a interferência em certo receptor. No entanto, como geralmente esta informação é utilizada para basear uma escolha de limiar de detecção de portadora, a probabilidade de que no futuro, quando tal limiar estiver sendo utilizado pelo terminal vizinho, a interferência naquele receptor assuma valores muito diferentes é bastante elevada.

Uma vez subestimada a interferência, o terminal vizinho pode passar a utilizar um valor muito elevado como limiar de detecção de portadora, tornando-se insensível a determinadas transmissões. A consequência pode ser a ativação de sua portadora em momento inoportuno, causando uma interferência ainda maior naquele receptor, podendo ocasionar colisões. Por outro lado, estimativas de interferência muito elevadas podem resultar em um decréscimo desnecessário do reuso espacial.

Outros métodos de ajuste utilizam como medida de interferência apenas o último valor observado no receptor de interesse. De forma oposta ao modelo analítico, que presta-se ao cálculo de valores médios da potência interferente, é possível perceber que a interferência recebida pode modificar-se muito rapidamente, como exposto nas medições realizadas. Com isso, num momento futuro, quando da utilização do limiar de detecção de portadora calculado em função daquele valor de interferência divulgado, pode ser que as condições sejam completamente diferentes.

Com base nos resultados exibidos, conclui-se ser possível avançar na questão da difusão dos valores de interferência coletados para os terminais vizinhos. A proposta em questão é adotar uma linha intermediária, nem tão genérica quanto a forma analítica, nem tão pontual quanto a divulgação da condição atual. A estratégia consiste basicamente em um difusão periódica das informações básicas sobre o padrão de interferência experimentado, causando o menor tráfego adicional possível.

Sabendo-se que é possível definir um conjunto finito de elementos, entre os quais a interferência sofre transições, é possível que cada terminal monitore continuamente a interferência que recebe no canal, compute o histograma desses dados para uma certa janela de tempo, e em seguida divulgue este histograma, em formato predeterminado. No caso específico do sensor 7, exibido anteriormente, bastaria difundir na rede uma matriz, contendo os níveis de potência interferente observados mais frequentemente e suas respectivas densidades de observação, como exemplificado na Figura 5.

Além da matriz contendo a descrição sumária do histograma, pode ser enviado um vetor contendo as principais medidas estatísticas relativas às amostras coletadas na última janela de tempo, como média, mediana, quartis e valores mínimo e máximo, visando a aumentar a quantidade de informações disponíveis sobre o padrão observado.

Os terminais vizinhos poderão assim tratar as informações recebidas, utilizando-as para subsidiar decisões do método de ajuste de limiar de detecção de portadora escolhido. A partir da matriz recebida, que representa o padrão de interferência observado nos últimos 10 segundos naquele terminal específico, o terminal vizinho pode realizar estimativas sobre o comportamento esperado para o sinal interferente nos próximos 10 segundos, quando novas informações serão divulgadas.

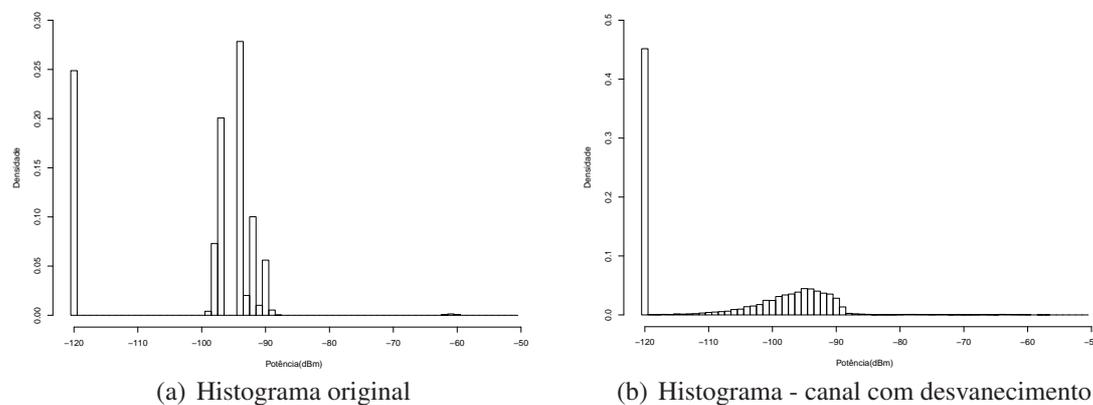
O tratamento a ser dado a essas informações depende unicamente do terminal que

Nível (dBm)	Densidade
-120	0,249
-99	0,004
-98	0,073
-97	0,201
-94	0,278
-93	0,022
-92	0,100
-91	0,010
-90	0,056
-89	0,005

**Figura 5. Matriz de padrão de interferência.**

os recebe, cabendo ao divulgador apenas a responsabilidade de difundir seu padrão no formato pré-estabelecido. Uma possibilidade ao terminal que recebe as informações seria simplesmente tomar como interferência esperada naquele vizinho a média dos últimos 10 segundos. Ou o valor abaixo do qual situam-se 75% das amostras observadas, usualmente chamado de quartil superior. Alternativamente, pode-se utilizar o ponto a partir do qual o somatório das frequências relativas das barras do histograma totaliza 10%, ou um percentual variável, definido em função de outros fatores.

Uma importante questão a ser investigada consiste no grau em que eventuais condições adversas de propagação podem afetar o método proposto. Para isso, foi realizada a mesma simulação descrita anteriormente, introduzindo-se no canal o efeito de desvanecimento por multipercurso. 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 Ricean, frequentemente usada para modelar o fenômeno em simulações [ARC 2007].



**Figura 6. Efeito do desvanecimento no canal.**

A figura 6 exibe o histograma resultante de um canal que apresenta significativo efeito de desvanecimento, comparado com o histograma obtido para o mesmo sensor, em um canal onde só existe atenuação, já exibido anteriormente. É possível observar que o desvanecimento no canal leva a uma suavização no padrão de interferência obtido, fazendo ainda com que as amostras assumam valores de potência menores, mais próximos ao nível de ruído térmico. Entretanto, fica claro ainda ser possível utilizar o método para o envio das estatísticas de interferência aos terminais vizinhos, especialmente considerando que os níveis de potência que mais importam ao método de ajuste de limiar de detecção de portadora referem-se aos limites superiores do histograma, pouco afetados pelo desvanecimento.

Outra questão central para a eficácia dessa estratégia de divulgação consiste em analisar o grau de mudança no padrão de interferência sofrido por um terminal com o passar do tempo. As amostras de interferência são coletadas em uma certa janela temporal e em seguida divulgadas, possibilitando aos terminais vizinhos o ajuste de seus parâmetros. No entanto, esses parâmetros estarão em utilização na janela de tempo seguinte àquela na qual as amostras foram coletadas. Assim, importa investigar se os dados coletados em uma certa janela temporal permanecem suficientemente válidos na próxima janela.

Essa investigação foi realizada com base em duas métricas, que se destinam a medir o grau de similaridade entre os histogramas de interferência de duas janelas adjacentes. A primeira métrica consiste na área de interseção entre os histogramas, que varia de 0 (similaridade nula) a 1 (igualdade). Considerando-se que os níveis de interferência encontram-se classificados em  $d$  faixas, a área de interseção entre os histogramas de um sensor  $K$ , nas janelas  $n$  e  $n + 1$  são calculadas pela expressão 1.  $H(K, n, i)$  representa a frequência relativa de ocorrências de níveis de potência da faixa  $i$ , na janela de tempo  $n$  no sensor  $K$ .

$$A_{(n,n+1)}^K = \sum_{i=1}^d \min[H(K, n, i), H(K, n + 1, i)] \quad (1)$$

A segunda métrica consiste na distância euclidiana quadrática (DEQ) entre os histogramas. Essa distância é calculada pela expressão 2. Diferentemente da área de interseção, quanto mais próxima de zero for a DEQ, mais similares serão os histogramas comparados.

$$DEQ_{(n,n+1)}^K = \sum_{i=1}^d [H(k, n, i) - H(k, n + 1, i)]^2 \quad (2)$$

As simulações realizadas monitoraram as duas métricas para várias janelas adjacentes de 10 segundos cada, em 16 sensores. Além disso, foi analisado o impacto de dois fatores nessas métricas de similaridade: o tráfego gerado por cada um dos transmissores da rede e o número de pares TX-RX em uma área fixa de 1000 x 1000 m. A carga oferecida foi variada de 100 kbps a 1 Mbps por transmissor, e a densidade de terminais variada entre 4 e 32 pares TX-RX, na área fixa citada. Foram considerados 10 cenários aleatórios diferentes para cada um dos valores de carga e densidade. Ao final, os dados foram estatisticamente tratados, de forma a permitir o cálculo de uma média global para cada métrica, com o respectivo intervalo de confiança, que foi fixado em 95%.

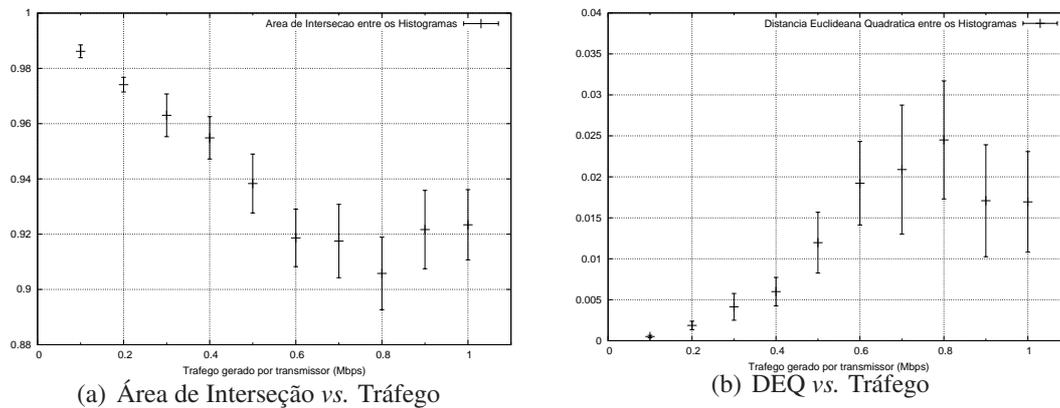


Figura 7. Efeito da carga sobre a similaridade.

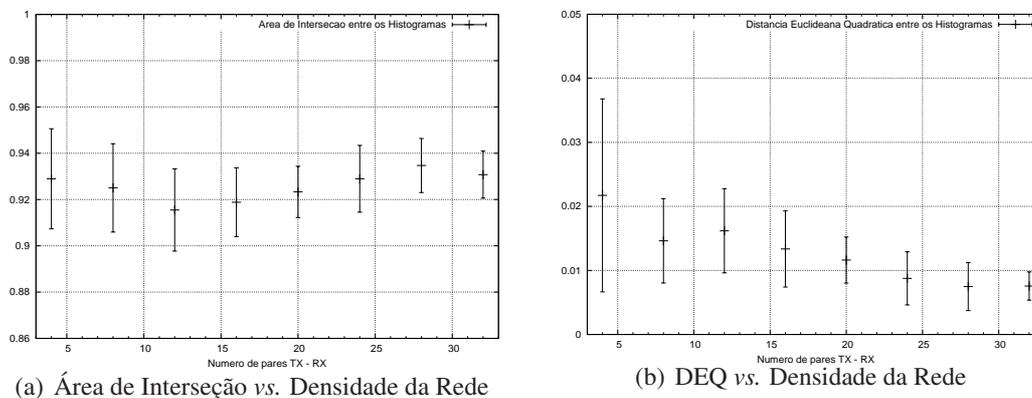


Figura 8. Efeito da densidade da rede sobre a similaridade.

As figuras 7 e 8 exibem os resultados, verificando-se que a área de interseção entre os histogramas mantém-se sempre superior a 0,9 (90% de similaridade) e a DEQ sempre inferior a 0,05. Verifica-se ainda que o aumento da carga leva a uma suave redução da similaridade entre os histogramas até a taxa de 800 kbps por transmissor. Simulações adicionais, realizadas entre 1 Mbps e 10 Mbps, resultaram em uma estabilização no comportamento das métricas, mantendo-se médias e intervalos de confiança semelhantes aos da taxa de 1 Mbps, indicando a saturação do meio de comunicação. Por sua vez, a variação na densidade da rede não produziu alterações significativas nas métricas de similaridade usadas.

Conclui-se assim que os histogramas defasados de uma janela apresentam um satisfatório grau de semelhança, independentemente da carga oferecida e da densidade da rede, indicando que as informações divulgadas permanecem válidas para uso na janela temporal subsequente à da coleta.

## 6. Conclusão

O aumento de capacidade em redes *ad hoc* IEEE 802.11 tem sido o foco de diversos estudos nos últimos anos. Uma importante linha de pesquisa nesse sentido é a que explora

as possibilidades de maximizar a utilização do meio de transmissão, por meio do reuso espacial do canal.

O principal desafio consiste em obter o aumento do reuso espacial sem aumentar o número de colisões e retransmissões de quadros. Diversos trabalhos têm proposto o ajuste do limiar de detecção de portadora para este fim, utilizando-se de alguma medida ou estimativa da interferência nos terminais vizinhos como parâmetro para evitar o aumento excessivo da probabilidade de colisão.

A principal contribuição deste trabalho consiste justamente na proposta de um método capaz de aprimorar a forma como as informações de interferência são trocadas entre terminais vizinhos. O mecanismo é baseado na observação experimental de que a variação da interferência em um terminal no tempo corresponde a transições entre valores pertencentes a um conjunto finito, com a adição de uma série de resíduos, gerada por fatores como interferidores muito distantes, ruído térmico e desvanecimento no canal.

Assim, é possível que cada terminal realize a coleta de amostras do sinal interferente que o atinge e compute um histograma de frequências relativas para cada faixa de potência observada. Com isso, pode-se divulgar aos terminais vizinhos o *padrão de interferência* observado em uma janela temporal, fornecendo a eles uma informação mais precisa sobre as condições de recepção daquele terminal.

O método apresenta-se como uma opção às propostas existentes, baseadas ora no uso de estimativas analíticas da interferência sofrida por vizinhos, ora na divulgação de apenas uma única amostra de interferência recebida. As principais vantagens consistem na simplicidade de implementação, na divulgação de informações mais completas sobre a interferência experimentada com um reduzido tráfego adicional, e na possibilidade de utilização em conjunto com vários dos métodos de aumento do reuso espacial disponíveis na literatura, mediante poucas adaptações.

Além disso, os resultados do trabalho demonstraram a alta similaridade do padrão de interferência entre janelas temporais de observação adjacentes, considerando uma rede de terminais fixos, em diferentes condições de tráfego e densidade da rede.

As bases deste estudo podem ainda ser facilmente adaptadas a uma outra linha de pesquisa bastante atual, que é a de rádios cognitivos. Basicamente, esse tema explora o desenvolvimento de transceptores capazes de realizar estatísticas com base em medições de utilização do espectro, utilizando-as para a mudança de parâmetros de transmissão [Akyildiz et al. 2006]. A estratégia de difusão de padrões de interferência parece ser igualmente adequada para subsidiar mecanismos usualmente propostos nessa área.

## 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 - Telecommunications and information exchange between systems - Local and metropolitan area networks - Specific requirements - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control*

(MAC) and Physical Layer (PHY) specifications - Amendment 4: Further Higher-Speed Physical Layer Extension in the 2.4 GHz Band.

- Akyildiz, I. F., Lee, W.-Y., Vuran, M. C., and Mohanty, S. (2006). NeXt Generation/Dynamic Spectrum Access/Cognitive Radio Wireless Networks: A Survey. *Computer Networks*, 50(13):2127 – 2159.
- 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.
- Frangoudis, P. A. and Polyzos, G. C. (2008). Coupling QoS provision with interference reporting in WLAN sharing communities. In *Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2008. PIMRC 2008*.
- 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.
- J. Fuemmeler, N. H. Vaidya, V. V. V. (2004). Selecting transmit powers and carrier sense thresholds for CSMA protocols. Technical report, University of Illinois at Urbana-Champaign.
- 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.
- Vasan, A., Ramjee, R., and Woo, T. (2005). ECHOS - enhanced capacity 802.11 hotspots. In *IEEE INFOCOM*, pages 1562–1572.
- 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*.
- Zhu, J., Guo, X., Yang, L. L., and Conner, W. S. (2004). Leveraging spatial reuse in 802.11 mesh networks with enhanced physical carrier sensing. In *IEEE ICC*.
- Zografos, D. I. (2009). Spectrum Sensing and Reporting in WLANs. Master's thesis, Department of Informatics - Athens University.