

# Uma Análise do Roteamento em Redes com Diversidade Cooperativa e Canais com Desvanecimento

Daniel de O. Cunha<sup>1,2</sup>, Otto Carlos M. B. Duarte<sup>2</sup>, Guy Pujolle<sup>1</sup>\*

<sup>1</sup>Laboratoire d'Informatique de Paris 6 - LIP6  
Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, Paris, França

<sup>2</sup>Grupo de Teleinformática e Automação  
Universidade Federal do Rio de Janeiro - PEE/COPPE - DEL/POLI

{doc,otto}@gta.ufrj.br, Guy.Pujolle@lip6.fr

**Abstract.** *This paper analyzes routing on cooperative diversity networks and proposes the choice of routes based on the long term behavior of the links. According to our results, cooperation-aware routes are more stable than non-cooperative routes where cooperation is used opportunistically. Moreover, greedy algorithms based on the instantaneous conditions of the channels are sub-optimal on fading networks. On these networks, the end-to-end success probability presented by cooperation-aware routes based on the long-term behavior of the channels are from 15 to 19% superior than those presented by greedy cooperation-aware routes. The obtained gain is more significant on hybrid networks, where cooperative and non-cooperative nodes coexist. In this scenario, the end-to-end success probabilities presented by routes chose based on the long-term behavior of the links are from 38 to 74% superior.*

**Resumo.** *Este artigo analisa o roteamento em redes com diversidade cooperativa e propõe a escolha de rotas com base no comportamento a longo prazo dos enlaces cooperativos. Os resultados mostram que a escolha de rotas levando-se em conta as possibilidades de cooperação resulta em caminhos mais estáveis que os obtidos através do uso da cooperação oportunista sobre rotas não-cooperativas. Além disso, a escolha de rotas cooperativas de forma gulosa com base nas condições instantâneas dos canais é sub-ótima em redes com desvanecimento. Nestas redes, rotas cooperativas escolhidas com base no comportamento a longo prazo dos enlaces cooperativos resultam em probabilidades de sucesso fim-a-fim entre 15 e 19% superiores às obtidas por rotas gulosas. Este ganho é mais significativo em redes híbridas, formadas tanto por nós cooperativos quanto por nós não-cooperativos, onde as probabilidades de sucesso fim-a-fim obtidas são entre 38 e 74% superiores às obtidas por rotas gulosas.*

## 1. Introdução

A comunicação cooperativa é uma poderosa técnica para prover diversidade espacial a transmissões de nós com apenas uma antena [Nosratinia et al. 2004]. Para isto, os nós sem fio compartilham suas antenas e funcionam como retransmissores cooperativos nas transmissões de seus vizinhos. Assim, em um enlace cooperativo, a informação enviada pelo nó emissor chega ao nó receptor tanto pelo sinal emitido pela antena do

---

\*Este trabalho foi realizado com recursos do CNPq, CAPES, FAPERJ, FINEP (Brasil) e ANR (França).

nó emissor quanto por sinais provenientes das antenas de um ou mais nós vizinhos cooperantes na comunicação. Uma espécie de arquitetura MIMO distribuída é formada e a diversidade cooperativa resultante é usada para reduzir os efeitos do desvanecimento e aumentar a confiabilidade das transmissões. No entanto, a implementação desta técnica não é trivial e requer modificações nas camadas física, MAC e rede dos nós sem fio.

O principal objetivo dos trabalhos sobre roteamento com diversidade cooperativa é a economia de energia em redes de taxa fixa. Nesse cenário, com base nas informações instantâneas dos canais e nas oportunidades de cooperação, as potências de transmissão são escolhidas de forma a minimizar a energia necessária para transmitir com sucesso um pacote [Khandani et al. 2003]. Estudos recentes tratam do roteamento em redes de taxa variável, onde o objetivo não é minimizar o consumo de energia, mas melhorar o desempenho da rede em termos de vazão [Beres and Adve 2007]. Em ambos os casos, o roteamento é analisado com base em cenários de desvanecimento estáticos. Assume-se, então, que as variações dos canais ocorrem lentamente, possibilitando, desta forma, que o roteamento se adapte e otimize as rotas de forma gulosa para a configuração de desvanecimento apresentada. No entanto, análises do comportamento dos canais sem fio mostram que, mesmo para redes estáticas, as variações dos canais devido ao desvanecimento ocorrem com uma frequência elevada [Moss et al. 1998, MacLeod et al. 2005], o que impede a implementação de mecanismos de roteamento como os estudados anteriormente.

Este trabalho analisa o roteamento em redes com diversidade cooperativa levando em conta a impossibilidade da camada de rede de se adaptar a cada variação causada pelo desvanecimento e propõe, nestes casos, o uso de métricas de roteamento baseadas no comportamento a longo prazo dos enlaces cooperativos. Ao invés de buscar otimizar a rota para uma dada configuração de desvanecimento, a idéia desta proposta é encontrar rotas que apresentem, com maior probabilidade, boas condições ao longo do tempo. São realizadas análises tanto em redes compostas inteiramente por nós cooperativos quanto em redes compostas parcialmente por nós não cooperativos. Este cenário híbrido representa redes onde equipamentos legados que não implementam os protocolos cooperativos são utilizados. Os resultados mostram que o uso de algoritmos gulosos, embora mais eficiente que o simples uso da cooperação de forma oportunista em rotas estabelecidas por métricas convencionais, não é capaz de explorar plenamente, a longo prazo, as potencialidades da cooperação. O roteamento com base no comportamento a longo prazo dos enlaces gera rotas com uma probabilidade de sucesso fim-a-fim mais elevada, resultado que se mostra ainda mais significativo em redes híbridas.

Este artigo está organizado da seguinte forma. A Seção 2 discute os trabalhos relacionados à comunicação cooperativa. Na Seção 3 são discutidas as hipóteses feitas sobre as camadas inferiores para realizar a análise do roteamento em redes cooperativas. A Seção 4 analisa o roteamento cooperativo e descreve o mecanismo proposto. Em seguida, a Seção 5 descreve as simulações realizadas e analisa os resultados encontrados. Finalmente, a Seção 6 conclui este trabalho.

## 2. Trabalhos Relacionados

Diversos protocolos são propostos para a implementação da cooperação a nível físico. Estes protocolos podem ser classificados como *Amplify-and-Forward* (AF) ou *Decode-and-Forward* (DF) [Laneman et al. 2004]. O protocolo *Non-Orthogonal Amplify-and-Forward* (NAF) é uma modificação proposta aos protocolos do tipo AF vi-

sando aumentar o desempenho da comunicação [Nabar et al. 2004]. A contribuição deste protocolo é permitir que os nós emissor e retransmissor cooperativo transmitam juntos durante parte do tempo, mesmo em redes *half-duplex*. Para isso, os dados são divididos em duas partes e o retransmissor cooperativo retransmite a primeira parte dos dados enquanto que o emissor transmite a segunda parte dos dados. Uma vez que este protocolo será utilizado nas análises deste artigo, ele será descrito com mais detalhes na Seção 3.

Um aspecto fundamental para implementar de forma eficiente a diversidade cooperativa é a correta seleção do retransmissor cooperativo. Bletsas *et al.* [Bletsas et al. 2006] propõem uma técnica reativa de seleção de retransmissores na qual, baseado em medidas locais, os próprios candidatos a retransmissores estimam sua utilidade para uma dada comunicação e, através de um mecanismo de temporização, o melhor candidato se anuncia ao nó emissor. Hucher *et al.* [Hucher et al. 2007] propõem um mecanismo AF adaptativo onde os nós trocam informação para a escolha do melhor retransmissor cooperativo. Além disso, no mecanismo AF adaptativo, se os canais que ligam o emissor e o receptor ao retransmissor cooperativo apresentarem condições muito boas, utiliza-se uma transmissão não cooperativa de dois saltos através do retransmissor cooperativo que passa a funcionar como roteador.

Existem dois enfoques diferentes para os trabalhos que analisam o roteamento em redes com diversidade cooperativa. Parte dos trabalhos nessa área analisam o uso da cooperação oportunista [Fang et al. 2005], ou seja, o uso de técnicas de cooperação nos enlaces de uma rota estabelecida por técnicas convencionais que não levam em conta as possibilidades de cooperação. Essa abordagem não é a mais eficiente, pois a rota não-cooperativa pode não apresentar oportunidades significativas para o uso da cooperação. Khandani *et al.* [Khandani et al. 2003] realizam a primeira análise de roteamento cooperativo, isto é, levando em conta as possibilidades de cooperação no momento em que as rotas são estabelecidas. Seus resultados mostram que em redes onde a taxa de transmissão é fixa, o roteamento cooperativo possibilita uma redução na potência de transmissão necessária. O trabalho de Beres e Adve [Beres and Adve 2007] se destaca por analisar o roteamento cooperativo e não cooperativo em redes onde a taxa de transmissão é variável e o objetivo não é a redução da potência de transmissão mas sim o aumento da vazão da rede. Todos esses trabalhos sobre o roteamento em redes com diversidade cooperativa supõem uma rede estática, onde não só os nós são estáticos, mas também as condições dos canais sem fio. Desta forma, eles buscam otimizar as rotas de forma gulosa, ou seja, baseando-se nas condições instantâneas dos canais sem fio.

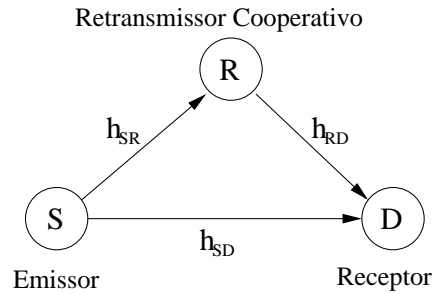
Neste trabalho analisa-se o roteamento cooperativo em redes onde o desvanecimento gera variações nos canais sem fio numa velocidade elevada em comparação ao tempo de resposta do roteamento, situação na qual algoritmos gulosos deixam de ser ótimos. Este trabalho propõe, então, o uso de informações sobre o comportamento a longo prazo dos enlaces cooperativos para escolher rotas com maior eficiência.

### 3. Modelo Adotado para as Camadas Inferiores

Este artigo trata do suporte à cooperação na camada de rede. No entanto, para que a comunicação cooperativa possa ser utilizada, as camadas inferiores devem ser adaptadas a essa tecnologia. Nesta seção, é apresentado o modelo adotado para as camadas inferiores, de modo a permitir a realização das análises sobre o roteamento.

### 3.1. A Camada Física

Durante as análises realizadas neste artigo, assume-se o uso na camada física do protocolo de cooperação *Non-Orthogonal Amplify-and-Forward* (NAF) [Nabar et al. 2004]. A Figura 1 mostra o cenário de utilização do protocolo NAF e é seguida por uma explicação detalhada da sua operação.



**Figura 1. Cenário de utilização do protocolo NAF.**

A Figura 1 mostra um canal cooperativo no qual o nó emissor,  $S$ , deseja transmitir um quadro para o nó  $D$ , que será chamado de nó receptor. Os nós  $S$  e  $D$  compartilham um vizinho,  $R$ , disposto a cooperar durante a transmissão agindo como um retransmissor cooperativo. Como os nós são *half-duplex*, o nó  $R$  é incapaz de receber o quadro do nó  $S$  e retransmiti-lo à  $D$  simultaneamente. Por isto, a transmissão do quadro é dividida em dois intervalos de tempo (*slots*). Por conseqüência, o quadro também é dividido em duas partes,  $X_1$  e  $X_2$ , usando uma codificação espaço-temporal para permitir a recepção combinada dos sinais do emissor e do retransmissor cooperativo pelo nó receptor.

No primeiro *slot* de tempo, o nó  $S$  transmite a primeira parte do quadro ( $X_1$ ) para o nó  $D$  enquanto que o nó  $R$  aproveita a difusão no meio sem fio para escutar a transmissão. Desta forma, neste primeiro *slot* de tempo, o nó  $D$  recebe  $X_1$  através do canal  $h_{SD}$  ( $Y_{D1}$ ) e o nó  $R$  recebe  $X_1$  através do canal  $h_{SR}$  ( $Y_R$ ). No segundo *slot* de tempo, o nó  $S$  transmite a segunda parte do quadro original ( $X_2$ ), ao mesmo tempo em que o nó  $R$  retransmite a primeira parte do quadro. Como resultado, o nó  $R$  recebe no segundo *slot* de tempo a segunda parte do quadro original através do canal  $h_{SD}$  somada à uma cópia da primeira parte do quadro que passou pelos canais  $h_{SR}$  e  $h_{RD}$  ( $Y_{D2}$ ).

Para que a cooperação não utilize uma potência total de transmissão superior à uma transmissão não cooperativa e simplificar a análise, assume-se que no segundo *slot* de tempo tanto o nó  $S$  quanto o nó  $R$  utilizam metade da potência de transmissão usada pelo nó  $S$  no primeiro *slot* de tempo. Com isso, os sinais recebidos ao longo do procedimento,  $Y_R$ ,  $Y_{D1}$  e  $Y_{D2}$ , podem ser expressos da seguinte forma.

$$Y_R = h_{SR}X_1 + w_r, \quad (1)$$

$$Y_{D1} = h_{SD}X_1 + w_d \quad e \quad (2)$$

$$Y_{D2} = \frac{h_{SD}}{\sqrt{2}}X_2 + \frac{h_{RD}}{\sqrt{2}}bY_R + w_d, \quad (3)$$

onde  $X_1$  and  $X_2$  são as duas partes do quadro;  $w_r$  e  $w_d$  são os ruídos nos nós  $R$  e  $D$ ;  $h_{SR}$ ,  $h_{SD}$  e  $h_{RD}$  são os coeficientes dos canais mostrados na Figura 1; e  $b$  é um fator de normalização definido como

$$b = \sqrt{\frac{1}{|h_{SR}|^2 + \sigma_r^2}}, \quad (4)$$

sendo  $\sigma_r^2$  a energia do ruído no nó retransmissor cooperativo. O fator  $\frac{1}{\sqrt{2}}$  na Equação 3 é uma consequência da política de alocação de potência.

Como mostram as Equações 1 e 3, o retransmissor cooperativo também propaga o ruído recebido junto com o sinal correspondente à primeira parte do quadro. Em situações onde este ruído se mantém num nível razoável, a diversidade proporcionada pelo uso do caminho que passa pelo retransmissor cooperativo é capaz de aumentar a SNR no receptor. Em situações onde os canais que ligam o nó  $R$  aos nós  $S$  e  $R$  não apresentam boas condições instantâneas, a transmissão cooperativa irá atrapalhar a comunicação ao invés de melhorá-la. Cabe à subcamada MAC escolher a configuração que oferece a maior capacidade instantânea. A capacidade instantânea do canal não cooperativo que liga os nós  $S$  e  $D$  é, em bits por uso do canal (*bits per channel use* - bpcu), igual a

$$C(h_{SD}) = \log_2(1 + |h_{SD}|^2) \quad (5)$$

enquanto que a capacidade instantânea do canal cooperativo NAF com a potência do ruído normalizada em 1 [Hucher et al. 2007] é, também em bits por uso do canal, igual a

$$C_{NAF} = \frac{1}{2} \log_2 \left( 1 + |h_{SD}|^2 + \frac{|h_{SD}|^2}{2 + |h_{RD}|^2 b^2} + \frac{|h_{SD}|^4 + |h_{RD}|^2 b^2 |h_{SR}|^2}{2 + |h_{RD}|^2 b^2} \right) \quad (6)$$

É importante ressaltar que a comunicação cooperativa requer uma camada de acesso ao meio (*Medium Access Control* - MAC) específica que permita o emprego da cooperação. Por exemplo, o nó emissor e o nó cooperativo retransmissor podem e devem transmitir dados ao mesmo tempo. No entanto, assumindo uma implementação compatível com interfaces atuais, as configurações da interface de rede são feitas baseadas no modo OFDM do padrão IEEE 802.11g [IEEE 2003]. A taxa mínima de transmissão considerada é 6 Mbps e a máxima de 54 Mbps. Por razões de simplificação, assume-se que a taxa de transmissão pode variar de forma contínua entre estes dois extremos. O tempo de transmissão de um pacote é modelado da forma

$$t(\mu s) = \frac{K_{dados}}{C} + K_{oh}, \quad (7)$$

onde  $K_{dados}$  é uma constante que depende do tamanho do pacote transmitido,  $C$  é a capacidade do canal e  $K_{oh}$  é uma constante que representa a sobrecarga da transmissão. Assumindo-se o uso de pacotes de 1024 bytes e calculando-se o tempo de transmissão para as taxas mínima e máxima segundo [Ho et al. 2003], as constantes  $K_{dados}$  e  $K_{oh}$  são configuradas com os valores 675 e 250, respectivamente. A Tabela 1 resume as características das taxas mínima e máxima de transmissão.

**Tabela 1. Taxas mínima e máxima de operação das interfaces.**

Taxa de Transmissão	Taxa de Codificação	Bits por Sub-portadora	Capacidade de Interrupção	Tempo de Transmissão
6 Mbps	1/2	1	0.5 bpcu	1600 $\mu s$
54 Mbps	3/4	6	4.5 bpcu	400 $\mu s$

Como mostrado no Tabela 1, a capacidade de interrupção da taxa mínima da interface ( $C_{min}$ ) é 0.5 bpcu, ou seja, se a capacidade do canal for menor que este valor a

transmissão não pode ser feita com sucesso nem mesmo na taxa mínima da interface e o enlace estará interrompido. Por outro lado, a capacidade de interrupção da taxa mais alta suportada ( $C_{max}$ ) é de 4.5 bpcu, o que significa que mesmo que a capacidade do canal seja superior à 4.5 bpcu, a taxa de transmissão será de 54 Mbps, pois a interface não possui uma taxa mais elevada para transmitir.

### 3.2. A Subcamada MAC

O uso da cooperação impõe duas novas funções à camada MAC: a escolha do retransmissor cooperativo e a decisão de usar ou não a cooperação numa determinada transmissão. Assume-se, portanto, que a camada MAC é capaz de escolher o melhor entre os retransmissores cooperativos disponíveis. Além disso, apenas um retransmissor cooperativo é usado por transmissão. Em situações onde mais de um retransmissor cooperativo estiver disponível, apenas o melhor entre eles será utilizado.

A fim de evitar que o ruído recebido pelo retransmissor cooperativo atrapalhe a transmissão em situações em que os canais  $h_{SR}$  e  $h_{RD}$  não apresentam condições favoráveis, assume-se a utilização da técnica conhecida como cooperação inteligente (*Smart Cooperation*) [Beres and Adve 2007], onde a configuração cooperativa só é utilizada quando a sua capacidade instantânea (Equação 6) é maior que a capacidade instantânea obtida pela configuração não-cooperativa (Equação 5). Desta forma, a capacidade instantânea do enlace cooperativo entre os nós emissor e receptor ( $C'$ ) é

$$C' = \max\{C(h_{SD}), C_{NAF}(R^*)\}, \quad (8)$$

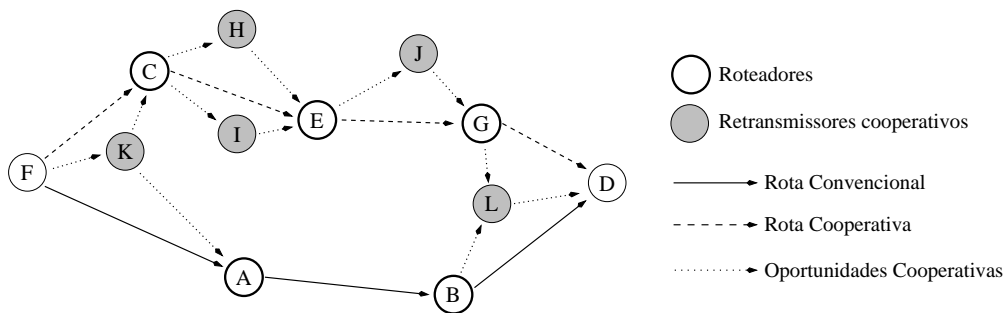
onde  $C_{NAF}(R^*)$  é a capacidade instantânea da configuração cooperativa quando o melhor retransmissor cooperativo é usado. Finalmente, assume-se que o nó é capaz de selecionar a maior taxa de transmissão possível para uma dada capacidade instantânea  $C'$ .

## 4. Análise do Roteamento Cooperativo e Algoritmo Proposto

O primeiro passo para analisar o roteamento cooperativo é fazer a distinção entre este tipo de roteamento e o roteamento não cooperativo com uso da cooperação oportunista. No roteamento não cooperativo com uso da cooperação oportunista, a escolha dos roteadores que compõem a rota é feita sem nenhuma análise a respeito da cooperação, ou seja, utiliza-se uma métrica convencional como, por exemplo, o menor número de saltos. A cada salto (enlace), no momento da transmissão do pacote, é verificado se existem condições de cooperação tais como as apresentadas na Figura 1. Isto é, o roteador que transmitirá o pacote se coloca na condição de emissor e seu sucessor na rota se coloca na condição de receptor, caso haja um vizinho em comum cujos canais  $h_{SR}$  e  $h_{RD}$  sejam favoráveis à cooperação, então o procedimento de cooperação é utilizado.

No caso do roteamento cooperativo, os roteadores que compõem a rota já são escolhidos com base nas oportunidades de cooperação existentes na rede. Ou seja, a métrica de roteamento é definida considerando cada par de possíveis roteadores vizinhos na situação mostrada na Figura 1 e verificando as possibilidades de cooperação que se apresentam. No momento da transmissão do pacote, como a subcamada MAC usa a cooperação inteligente, este é transmitido usando a configuração que oferece a maior capacidade instantânea, como discutido na Seção 3.2. A Figura 2 exemplifica a diferença entre estes dois tipos de mecanismos de roteamento.

Neste exemplo, o nó fonte,  $F$ , deseja estabelecer uma rota para se comunicar com o nó  $D$ . Se o roteamento não cooperativo se basear na métrica de menor número de saltos,



**Figura 2. O roteamento não cooperativo e o roteamento cooperativo.**

a rota escolhida é  $\{F, A, B, D\}$ . A cooperação oportunista pode, então, ser utilizada em cada salto ( $\overline{FA}$ ,  $\overline{AB}$  e  $\overline{BD}$ ) de modo a melhorar a qualidade das transmissões. No entanto, na situação mostrada neste exemplo, os nós  $A$  e  $B$  não possuem nenhum vizinho em comum e, desta forma, o enlace  $\overline{AB}$  não pode se beneficiar da cooperação oportunista. Este enlace representará uma espécie de gargalo para a transmissão, pois provavelmente apresentará uma taxa de perda mais elevada que os demais. O roteamento cooperativo, por outro lado, tenderá a evitar o enlace  $\overline{AB}$ . No exemplo mostrado, o caminho escolhido é  $\{F, C, E, G, D\}$ . Neste caminho, todos os enlaces possuem pelo menos um possível retransmissor cooperativo (o enlace  $\overline{CE}$  possui dois), o que reduz a taxa de perda destes enlaces e, conseqüentemente, a taxa de perda fim-a-fim da comunicação.

#### 4.1. O Problema dos Algoritmos Gulosos de Roteamento Cooperativo

O exemplo anterior mostra como o simples uso da cooperação de forma oportunista pode levar a situações pouco eficientes. No entanto, resta ainda a questão sobre como realizar o roteamento cooperativo de forma eficiente. Como discutido na Seção 2 os trabalhos encontrados na literatura sobre o roteamento em redes cooperativas assumem que as condições instantâneas dos canais sem fio permanecem constantes por um período suficientemente grande para que a camada de rede possa escolher uma rota ótima.

Tipicamente, assume-se que para nós estáticos, essas variações são suficientemente lentas. No entanto, a velocidade da variação dos canais é função não só das velocidades dos nós, mas também da velocidade dos elementos que compõem o ambiente ao redor dos nós [Sklar 1997]. Diferentes trabalhos mostram que o tempo de coerência médio, isto é, o tempo durante o qual o canal é tido como constante, em redes sem fio com nós estáticos é em geral na ordem de dezenas ou centenas de milissegundos, podendo chegar a poucos segundos em casos particulares [Moss et al. 1998, MacLeod et al. 2005, Torres et al. 2006, Skentos et al. 2006]. A Tabela 2 resume alguns destes resultados.

**Tabela 2. Tempo de coerência dos enlaces sem fio com nós estáticos.**

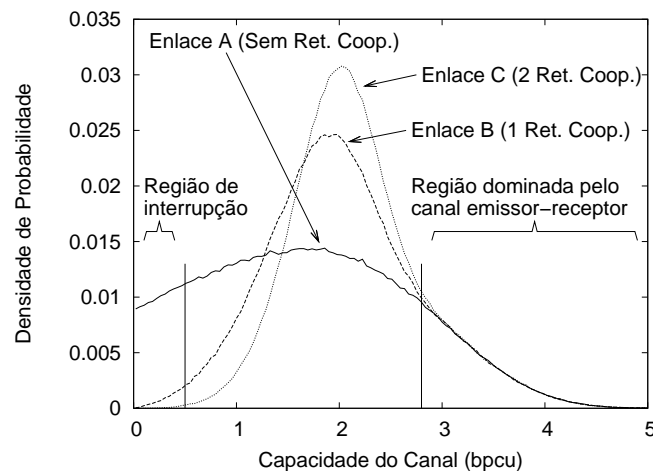
Tipo de Cenário	Frequência (GHz)	Tempo de Coerência Médio (ms)
Outdoor - Urbano	2.4	40
Indoor	2.4	entre 24.74 e 211.5 <sup>1</sup>
Outdoor - Urbano	3.5	entre 14.34 e 92.55
Outdoor - Urbano	5.2	entre 1780 e 1980 <sup>2</sup>

<sup>1</sup>Os valores mostrados são calculados com base no espalhamento doppler máximo para cenários onde a distância entre os nós é informada constante.

<sup>2</sup>Os valores mostrados são as medianas das medidas.

Recentes estudos mostram que, mesmo em situações de baixa carga, o tempo de ida e volta (*Round Trip Time* - RTT) em redes sem fio é na ordem de uma centena de milissegundos, podendo chegar a alguns segundos [Campista et al. 2008]. Este RTT elevado em relação ao tempo de coerência dos canais mostra que é inviável para o roteamento reagir a cada mudança na qualidade dos enlaces. Com isso, uma rota escolhida de forma gulosa numa certa configuração, será usada em condições que podem ser bem diferentes das iniciais. Na busca por otimizar a rota para uma certa configuração, é possível que a rota escolhida seja suscetível a variações e apresente a longo prazo um desempenho ruim.

Considere uma situação em que o roteamento pode escolher entre três enlaces diferentes: o primeiro, Enlace A, não possui nenhum retransmissor cooperativo disponível; o segundo, Enlace B, possui um possível retransmissor cooperativo disponível; enquanto que o terceiro, Enlace C, possui dois. A Figura 3 mostra as densidades de probabilidades destes três enlaces levando-se em conta um desvanecimento do tipo Rayleigh [Sklar 1997], e relações sinal-ruído médias de 5 dB nos canais emissor-receptor e de 15 dB nos canais emissor-retransmissor e retransmissor-receptor.



**Figura 3. Densidade de probabilidade da capacidade dos enlaces cooperativos.**

Analisando-se a Figura 3, pode-se perceber dois aspectos interessantes. O Enlace A não possui nenhum retransmissor cooperativo e apresenta baixos valores de capacidade com uma probabilidade bem superior aos enlaces que usam a cooperação. Levando-se em conta a capacidade de interrupção de enlace mostrada na Tabela 1 ( $C_{min}=0.5$ ), percebe-se que este enlace possui uma probabilidade de interrupção (*outage probability*) bem superior aos outros dois enlaces (esta probabilidade é igual a integral da curva de 0 a 0.5). Em segundo lugar, na região de alta capacidade as densidades de probabilidade dos três enlaces são muito próximas. Isto ocorre porque o protocolo de cooperação não é feito para aumentar a capacidade máxima do enlace, mas sim para melhorar seu pior caso. Desta forma, a região de alta capacidade é resultado de um canal direto ( $h_{SD}$ ) muito bom. Nestes casos, a configuração utilizada é a configuração não cooperativa (Equação 8). O resultado desta densidade similar em altas capacidades é que algoritmos gulosos, que escolhem o enlace com a maior capacidade instantânea, escolherão com grande probabilidade os enlaces A e B em detrimento do enlace C, que apresenta uma probabilidade de interrupção inferior. A Figura 4(a) mostra a probabilidade de escolha dos três enlaces por um algoritmo guloso, ou seja, a probabilidade da capacidade instantânea de cada um dos canais ser superior à capacidade instantânea dos outros dois enlaces. Neste cenário, a



relação sinal-ruído dos canais que ligam os retransmissores cooperativos aos nós emissor e receptor é 10 dB superior àquela experimentada pelos canais diretos. A Figura 4(b) mostra a probabilidade de interrupção dos enlaces.

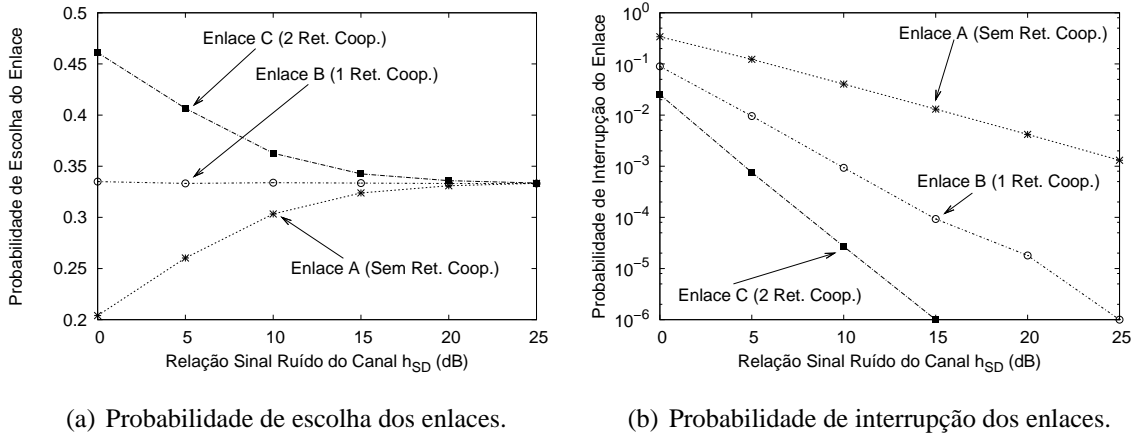


Figura 4. Efeito da variação da relação sinal-ruído média.

Observando-se a Figura 4, pode-se perceber que embora o Enlace C apresente probabilidades de interrupção sempre muito inferiores às apresentadas pelos outros dois enlaces, um algoritmo guloso escolherá frequentemente os enlaces A e B. Para resolver este problema, é proposto o uso do comportamento de longo prazo dos enlaces para definir a métrica do roteamento cooperativo. A próxima seção detalha a proposta.

#### 4.2. Roteamento Cooperativo Ponderado

Ao tentar melhorar o desempenho da rede para uma dada configuração de canais, os algoritmos gulosos apresentam problemas de desempenho a longo prazo em redes com desvanecimento. Para evitar este problema, propõe-se o uso de informações que reflitam o comportamento a longo prazo dos enlaces cooperativos no cálculo da métrica cooperativa. Com isto, busca-se rotas que apresentem, com grande probabilidade, boas condições ao longo do tempo.

Mais especificamente, é proposto o uso da probabilidade de interrupção e da capacidade útil média do enlace cooperativo, como descrito a seguir. A partir de  $C_{min}$ , pode-se obter a probabilidade de interrupção (*outage probability*) do enlace cooperativo,  $P_{out}(l)$ , através da expressão

$$P_{out}(l) = Pr(C'(l) < C_{min}). \quad (9)$$

A capacidade útil instantânea do enlace é uma medida de capacidade que leva em conta os parâmetros  $C_{min}$  e  $C_{max}$  das interfaces e é definida neste artigo como

$$C_{util}(l) = \begin{cases} 0, & C'(l) < C_{min} \\ C'(l), & C_{min} \leq C'(l) \leq C_{max} \\ C_{max}, & C'(l) > C_{max} \end{cases} \quad (10)$$

Com isto, para que o comportamento a longo prazo dos enlaces seja levado em conta no estabelecimento das rotas, propõe-se o uso da seguinte métrica de roteamento cooperativo ponderado (RCP):

$$RCP(l) = \left( \frac{K_{dados}}{E[C_{util}(l)]} + K_{oh} \right) * \frac{1}{1 - P_{out}(l)}. \quad (11)$$

Com uso da métrica RCP, espera-se melhorar os resultados do roteamento cooperativo nas redes com desvanecimento onde os canais variam com uma velocidade elevada em relação ao tempo de resposta do roteamento. As simulações são detalhadas a seguir.

## 5. Simulações

Para analisar a eficiência das diferentes métricas, são realizadas simulações para comparar a métrica proposta de roteamento cooperativo ponderado (RCP), uma métrica de roteamento cooperativo guloso (RCG) e a métrica não-cooperativa de menor número de saltos com uso da cooperação oportunista (MH-CO). Para cada cenário, as análises são feitas com base em  $10^6$  configurações de desvanecimento. Enquanto a métrica RCP é calculada segundo a Equação 11, a métrica RCG é o tempo de transmissão no enlace (Equação 7) baseado na primeira configuração de desvanecimento da rede. As métricas de comparação são: o número médio de saltos, a capacidade útil média dos enlaces que compõem a rota, a probabilidade de sucesso fim-a-fim da rota e a probabilidade de sucesso do enlace que apresenta a maior probabilidade de interrupção da rota. A probabilidade de sucesso de um enlace  $l$  é definida como  $1-P_{out}(l)$ .

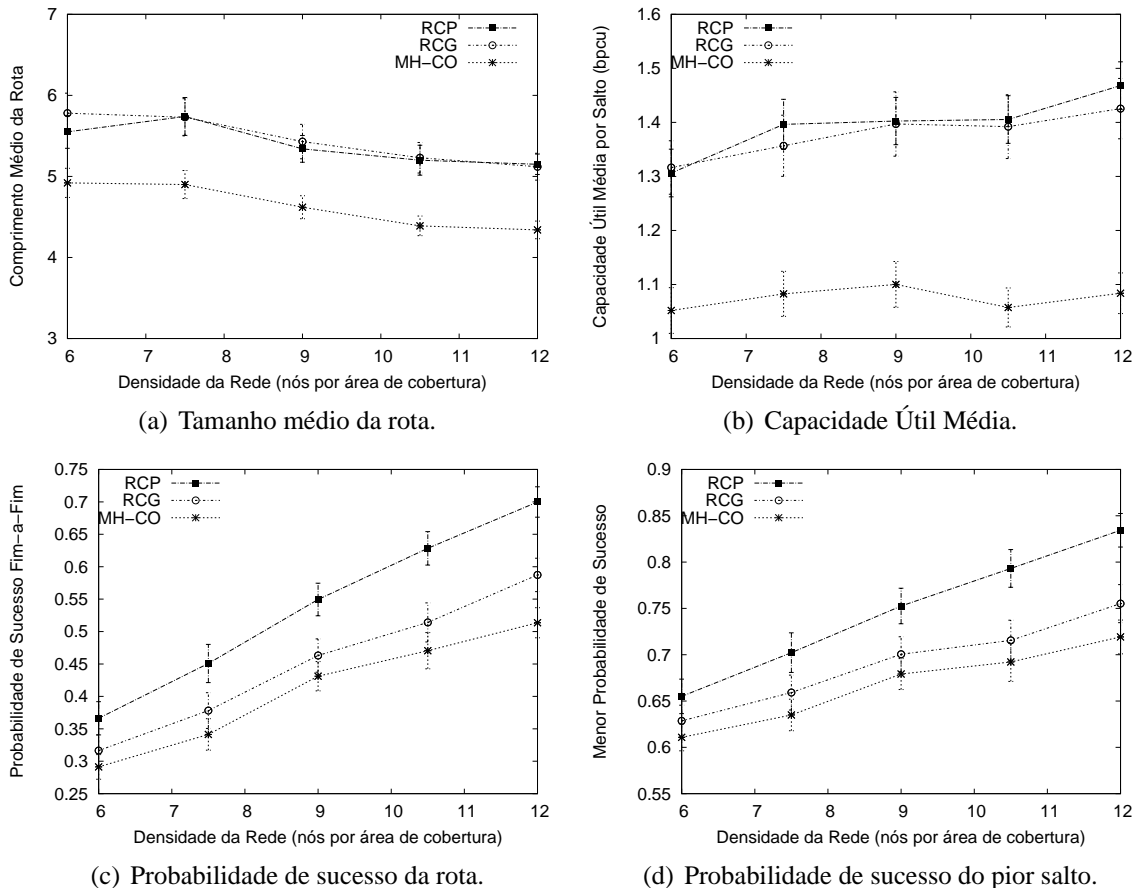
O raio de cobertura dos nós,  $r$ , é configurado para 70 metros e a potência de transmissão dos nós é definida de forma a resultar numa probabilidade de interrupção dos enlaces não cooperativos de 50% a essa distância. Utiliza-se o modelo de propagação com atenuação exponencial e fator de atenuação igual a 2.7 e o modelo de desvanecimento Rayleigh, ou seja, a SNR dos canais possui distribuição exponencial tendo por média a potência de recepção calculada com o modelo de propagação exponencial. A área de simulação é um retângulo de lados  $\pi r \times 6r$  metros. O nó fonte é colocado nas coordenadas  $(\pi \frac{r}{2}, 1.5r)$  e o nó destino nas coordenadas  $(\pi \frac{r}{2}, 4.5r)$ . Essa configuração com os nós fonte e destino mais próximos do centro da área de simulação visa evitar que o efeito de borda interfira com a densidade de retransmissores cooperativos dos enlaces utilizados pela métrica de menor número de saltos. Para variar a densidade da rede, varia-se o número total de nós. Para cada métrica, a rota ligando o nó fonte ao nó destino é então calculada segundo o algoritmo de Dijkstra.

São realizados dois conjuntos de simulações: um com todos os nós cooperativos, ou seja, capazes de utilizar o protocolo cooperativo, e outro com apenas metade dos nós cooperativos. No segundo conjunto, apenas enlaces entre dois nós cooperativos podem se servir da cooperação. Além disso, apenas nós cooperativos podem funcionar como retransmissores cooperativos. As simulações são feitas com o auxílio da ferramenta Matlab e os resultados apresentados são acompanhados de intervalos de confiança de 95%, representados por barras verticais nos gráficos.

### 5.1. Cenário Inteiramente Cooperativo

A Figura 5 mostra os resultados obtidos para o cenário onde todos os nós são cooperativos. O comprimento médio das rotas escolhidas pode ser visto na Figura 5(a). Neste cenário, a métrica não-cooperativa de menor número de saltos escolhe caminhos ligeiramente menores que as métricas cooperativas que escolhem caminhos de tamanhos aproximadamente iguais. As três métricas resultam em rotas menores à medida que a densidade da rede aumenta. Isso ocorre porque a maior densidade aumenta o número de enlaces e, conseqüentemente, a probabilidade de se encontrar enlaces perto de uma linha reta ligando os nós fonte e destino. As rotas cooperativas são entre 13 e 19% maiores que as rotas não cooperativas. Deve-se destacar, que a escolha de rotas mais longas pelas

métricas cooperativas não implica uma menor eficiência uma vez que, como mostra a Figura 5(b), essas rotas são compostas por enlaces de maior qualidade. Mais uma vez as duas métricas cooperativas apresentam resultados equivalentes onde a capacidade útil média dos enlaces por elas escolhidos são entre 25 e 36% superiores às capacidades dos enlaces escolhidos pela métrica não cooperativa.

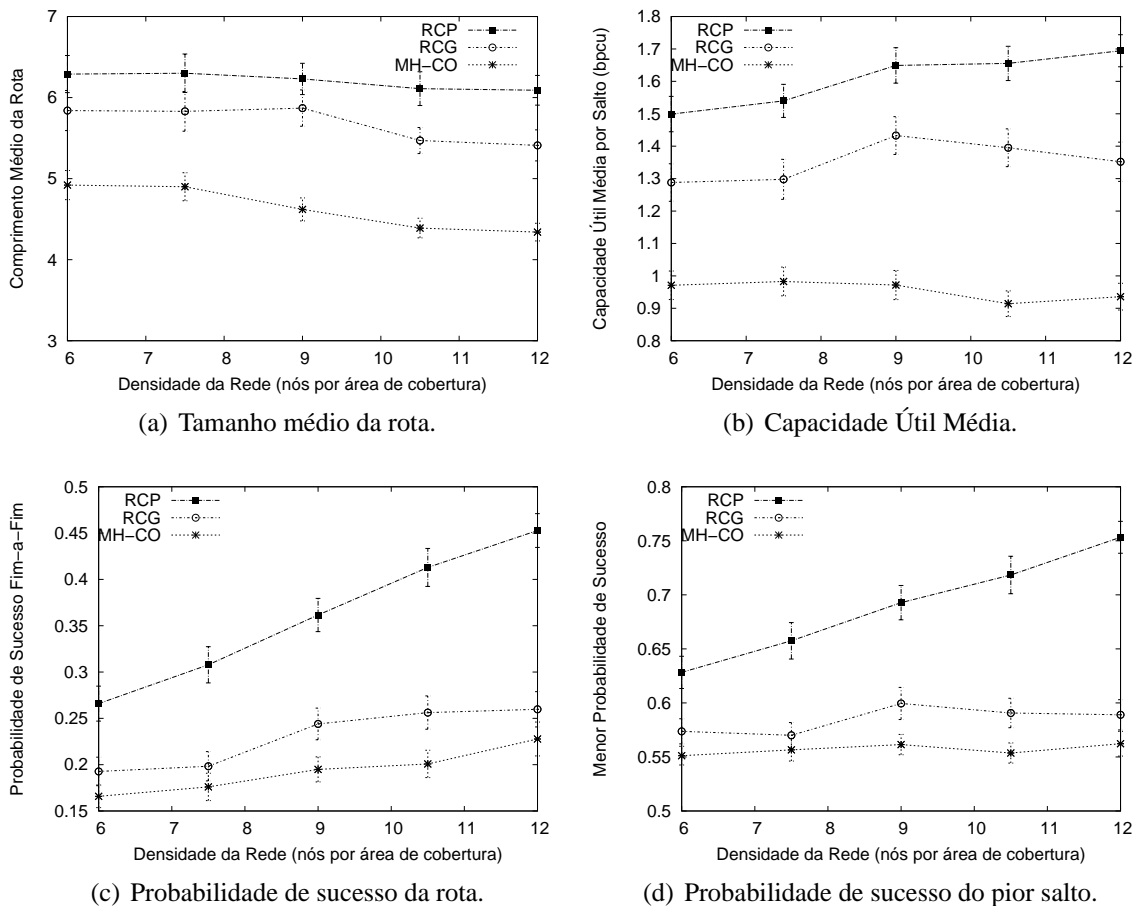


**Figura 5. Resultados do cenário com todos os nós cooperativos.**

Embora os desempenhos das duas métricas cooperativas sejam equivalentes em relação ao comprimento do caminho em número de saltos, a métrica de roteamento cooperativo ponderado (RCP) resulta numa probabilidade de sucesso fim-a-fim entre 15 e 19% superior que a métrica de roteamento cooperativo guloso (RCG) como pode ser visto na Figura 5(c). Essa diferença se explica pelo fato da métrica RCG buscar maximizar a capacidade da rede com base em uma configuração instantânea sem se preocupar com outras características dos enlaces. Desta forma, é possível que ela escolha enlaces com alta capacidade média (por causa do canal direto  $h_{SD}$ ), mas que apresentam altas probabilidades de interrupção, pois não possuem muitas possibilidades de cooperação. A métrica RCP, por outro lado, leva a probabilidade de interrupção dos enlaces em conta e por isso evita a inclusão de enlaces cuja probabilidade de interrupção é elevada, como pode ser visto na Figura 5(d). Nesta figura, pode-se perceber que a probabilidade de sucesso do enlace com maior probabilidade de interrupção entre os enlaces escolhidos pela métrica RCP é entre 4 e 10% superior à do pior enlace escolhido pela métrica RCG. Como a relação entre a probabilidade de sucesso de um enlace individual e a probabilidade de sucesso fim-a-fim é exponencial, essa diferença na probabilidade de sucesso dos enlaces individualmente resulta em grandes disparidades na probabilidade de sucesso fim-a-fim.

## 5.2. Cenário Híbrido

A Figura 6 mostra os resultados obtidos para o cenário híbrido, onde apenas 50% dos nós são cooperativos. Neste cenário, as possibilidades para a utilização da cooperação são bastante reduzidas, uma vez que com 50% de nós cooperativos, aproximadamente, apenas 25% dos enlaces são cooperativos e estes enlaces possuem, em média, 50% menos retransmissores cooperativos disponíveis que no cenário precedente. Este cenário representa situações onde equipamentos legados convivem com equipamentos cooperativos ou cenários onde alguns nós preferem não utilizar a cooperação por motivos egoístas. A convivência entre equipamentos legados e equipamentos que utilizam a cooperação é esperada devido à natural instalação progressiva da tecnologia.



**Figura 6. Resultados do cenário com 50% dos nós cooperativos.**

A Figura 6(a) mostra o tamanho médio da rota encontrada com as três métricas consideradas. É interessante a comparação destes resultados com aqueles obtidos para a rede inteiramente cooperativa (Figura 5). Primeiramente, a métrica MH-CO apresenta os mesmos resultados, pois neste caso a rota não depende das oportunidades de cooperação. Os resultados da métrica RCG também não mudam de forma significativa, uma vez que ela busca canais com capacidades elevadas, condição ditada predominantemente pelos canais diretos  $h_{SD}$ . A métrica proposta (RCP), por outro lado, mostra resultados bastante diferentes. Isto ocorre porque esta métrica é mais sensível às oportunidades de cooperação que a métrica RCG sendo, portanto, mais reativa à redução nas oportunidades de cooperação. Nas redes híbridas, a métrica RCP, que busca preservar a probabilidade de sucesso da comunicação, resulta em rotas maiores que a métrica RCG. Como o número

de saltos da rota escolhida pela métrica RCP é maior, estes saltos tendem a ser mais curtos e apresentam uma capacidade útil média mais elevada (Figura 6(b)).

A análise da probabilidade de sucesso fim-a-fim neste cenário (Figura 6(c)) deixa ainda mais claro a importância da definição de métricas cooperativas que levem eficientemente em conta as oportunidades de cooperação dos enlaces. Neste cenário onde as oportunidades de cooperação são reduzidas e a escolha da rota deve ser feita mais cuidadosamente, a métrica cooperativa proposta (RCP) resulta numa probabilidade de sucesso fim-a-fim entre 38 e 74% superior à probabilidade de sucesso obtida pela métrica cooperativa gulosa (RCG). Na verdade, o que se observa na Figura 6(c) é que a métrica RCP é a única a aproveitar eficientemente a maior possibilidade de utilização da cooperação gerada pelo aumento da densidade da rede, o que fica ainda mais claro quando a probabilidade de sucesso do pior enlace (Figura 6(d)) é analisada. A métrica cooperativa RCG, por outro lado, apresenta um comportamento muito próximo daquele mostrado pela métrica não cooperativa com uso de cooperação oportunista.

## 6. Conclusões

Este artigo analisa o roteamento em redes com diversidade cooperativa e propõe o uso de informações sobre o comportamento a longo prazo dos enlaces cooperativos no cálculo da métrica de roteamento. As análises se baseiam em cenários inteiramente cooperativos assim como em cenários híbridos, onde nós cooperativos e não-cooperativos co-existem. Estes cenários híbridos representam situações onde equipamentos legados convivem com equipamentos cooperativos ou cenários onde alguns nós preferem não utilizar a cooperação por motivos egoístas.

Os resultados das análises corroboram a importância do desenvolvimento de mecanismos de roteamento que levem em consideração as oportunidades de cooperação no momento do estabelecimento das rotas. Além disso, é mostrado que em redes onde as variações causadas pelo desvanecimento são muito rápidas para que o roteamento responda a cada uma dessas variações e recalcule a rota, os algoritmos de roteamento cooperativo guloso, ou seja, que se baseiam nas condições instantâneas da rede, não representam a opção mais eficiente. Em redes inteiramente cooperativas, o uso de uma métrica cooperativa baseada na capacidade útil do enlace cooperativo e na sua probabilidade de interrupção resulta em probabilidades de sucesso fim-a-fim entre 15 e 19% superiores às obtidas pelo algoritmo guloso. A diferença entre os dois mecanismos é ainda mais significativa em redes híbridas, pois nestas redes existem menos retransmissores cooperativos disponíveis. Neste caso, a probabilidade de sucesso fim-a-fim obtida pela métrica proposta é entre 38 e 74% superior à obtida pelo algoritmo cooperativo guloso. Além disso, no cenário híbrido, os resultados do algoritmo cooperativo guloso se assemelham muito aos resultados obtidos pelo uso da cooperação oportunista sobre uma rota não cooperativa.

Em redes híbridas, a inclusão de nós cooperativos nas rotas possibilita o aumento do desempenho da rede como um todo. Um aspecto importante é criar um mecanismo que induza ou recompense os nós cooperantes.

## Referências

- Beres, E. and Adve, R. (2007). Cooperation and routing in multi-hop networks. In *IEEE International Conference on Communications*.

- Bletsas, A., Khisti, A., Reed, D. P., and Lippman, A. (2006). A simple cooperative diversity method based on network path selection. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 24(3).
- Campista, M. E. M., Passos, D. G., Esposito, P. M., Moraes, I. M., Albuquerque, C. V. N., Saade, D. C. M., Rubinstein, M. G., Costa, L. H. M. K., and Duarte, O. C. M. B. (2008). Routing metrics and protocols for wireless mesh networks. *IEEE Network*, 1(22).
- Fang, X., Hui, T., Ping, Z., and Ning, Y. (2005). Cooperative routing strategies in ad hoc networks. In *IEEE Vehicular Technology Conference (VTC 2005-Spring)*.
- Ho, M.-J., Wang, J., Shelby, K., and Haisch, H. (2003). IEEE 802.11g OFDM WLAN throughput performance. In *IEEE VTC-Fall*.
- Hucher, C., Othman, G. R.-B., and Belfiore, J.-C. (2007). Adaptive amplify-and-forward cooperative channel. In *IEEE International Symposium on Information Theory - ISIT2007*.
- IEEE (2003). Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications: High-speed physical layer in the 2.4 GHz band. *IEEE Standard 802.11g*.
- Khandani, A. E., Abounadi, J., Modiano, E., and Zheng, L. (2003). Cooperative routing in wireless networks. In *Allerton Conference on Communications, Control and Computing*.
- Laneman, J. N., Tse, D. N. C., and Wornell, G. W. (2004). Cooperative diversity in wireless networks: Efficient protocols and outage behavior. *IEEE Transactions on Information Theory*, 49(10).
- MacLeod, H., Loadman, C., and Chen, Z. (2005). Experimental studies of the 2.4-GHz ISM wireless indoor channel. In *3rd Annual Communication Networks and Services Research Conference (CNSR'05)*.
- Moss, J., Fitton, M., Street, A. M., Brown, K. M., Constantinou, C. C., and Edwards, D. J. (1998). Spatio-temporal variability analysis of the wideband microcellular environment. In *IEEE Vehicular Technology Conference*.
- Nabar, R., Bölcskei, H., and Kneubühler, F. (2004). Fading relay channels: Performance limits and space-time signal design. *IEEE Journal on Selected Areas of Communication*, 22(6).
- Nosratinia, A., Hunter, T. E., and Hedayat, A. (2004). Cooperative communication in wireless networks. *IEEE Communications Magazine*, 42(10).
- Skentos, N. D., Kanatas, A. G., Dallas, P. I., and Constantinou, P. (2006). MIMO channel characterization for short range fixed wireless propagation environments. *Wireless Personal Communications*, 36(4).
- Sklar, B. (1997). Rayleigh fading channels in mobile digital communication systems Part I: Characterization. *IEEE Communications Magazine*.
- Torres, R. P., Cobo, B., Mavares, D., Medina, F., Loredó, S., and Engels, M. (2006). Measurement and statistical analysis of the temporal variations of a fixed wireless link at 3.5 GHz. *Wireless Personal Communications*, 37(1-2).