

# Uma Análise da Utilização de Antenas Direcionais e Múltiplos Caminhos em Redes Ad Hoc Sem Fio

Natanael D. de Freitas<sup>1,2</sup>, Miguel Elias M. Campista<sup>2</sup> e  
Luís Henrique M. K. Costa<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Marinha do Brasil

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

{natanael,miguel,luish}@gta.ufrj.br

**Abstract.** *Currently, the number of applications of ad hoc networks is increasing. Many technologies have arisen from these networks, such as wireless mesh networks and vehicular wireless ad hoc networks. This work analyzes routing algorithms that explore the use of directional antennas along with multiple paths. Both techniques privilege the spatial reuse and the distribution of the traffic in the network. This work defines a metric that reflects the use of each node of the network as a relay node in multiple disjoint paths. The results show a considerable improvement in the distribution of the traffic in these networks. Furthermore, this work compares zone disjoint routing algorithms with node disjoint routing algorithms in different scenarios, showing their advantage and disadvantage.*

**Resumo.** *Atualmente, o número de aplicações de redes ad hoc está crescendo. Essas redes também originaram outras tecnologias, tais como as redes em malha sem fio e as redes veiculares. Este trabalho analisa algoritmos de roteamento que exploram o uso de antenas direcionais e que constroem múltiplos caminhos. Ambas as técnicas privilegiam o reuso espacial e a distribuição do tráfego na rede. Neste trabalho, é definida uma métrica que reflete a utilização de cada um dos nós da rede como nó intermediário de múltiplas rotas disjuntas. Os resultados obtidos mostram melhoria significativa na distribuição do tráfego nestas redes e também comparam algoritmos de roteamento disjuntos por zona com algoritmos de roteamento disjuntos por nó, em diferentes cenários, mostrando suas vantagens e desvantagens.*

## 1. Introdução

A utilização de redes *ad hoc* tem crescido bastante nos últimos anos, possuindo atualmente aplicações tão diferenciadas como redes em malha sem fio e redes veiculares. O custo das redes *ad hoc* é reduzido e a implementação e a reconfiguração dessas redes são rápidas e fáceis devido à ausência de infra-estruturada cabeada. Cada um dos nós dessas redes funciona como um roteador e dispõe de um transceptor e de uma antena ou sistema de antenas [Bandyopadhyay et al., 2002]. Dentre os principais cenários de

---

\*Este trabalho foi realizado com recursos da MB, CNPq, CAPES, FAPERJ e FUJB.

aplicação das redes *ad hoc* estão as operações militares em campos de batalha e as redes de salvamento em caso de catástrofes [Abbas e Jain, 2006].

A maioria dos protocolos existentes de acesso ao meio para redes *ad hoc*, incluindo o IEEE 802.11 [IEEE, 1999], assumem a utilização de antenas omnidirecionais por todos os nós. Usando a transmissão omnidirecional, o desempenho da rede é limitado. Devido à radiação omnidirecional, há distribuição de energia em todas as direções de um plano, incluindo direções diferentes da direção que se deseja transmitir e, portanto, não há um adequado reuso espacial, ocorrendo desperdício de energia em direções diferentes da desejada. São geradas interferências em outros nós e não é aproveitada toda a capacidade agregada da rede. Com a utilização de transmissão direcional, o feixe de transmissão é mais estreito, aumentando o alcance de transmissão e o reuso espacial devido à concentração de energia na direção da transmissão. Além disso, há redução na interferência [Ramanathan et al., 2005, Ramella, 2006, Ueda et al., 2006], melhorando a relação sinal-ruído e a capacidade agregada da rede [Ramanathan et al., 2005]. Outra forma de aumentar a capacidade de uma rede *ad hoc* é a utilização de múltiplos caminhos ou de múltiplas rotas. A maioria dos protocolos de roteamento *ad hoc* utiliza roteamento de caminho único [Rubinstein et al., 2006]. A utilização de roteamento com múltiplos caminhos entre um nó origem e um nó destino melhora o desempenho da rede devido ao balanceamento de tráfego entre os vários caminhos escolhidos [Bandyopadhyay et al., 2002]. Assim, o efeito das perdas de enlaces é reduzido e pode ocorrer diminuição no congestionamento da rede e no atraso fim-a-fim [Bandyopadhyay et al., 2002]. A vantagem deste trabalho é combinar as duas técnicas, pois elas são complementares.

Protocolos de roteamento que constroem múltiplos caminhos geram múltiplas rotas entre um nó origem e um nó destino, podendo ocorrer nós intermediários em comum entre rotas. Caso o protocolo de roteamento não tenha nós intermediários em comum, ele é dito protocolo que usa múltiplos caminhos disjuntos por nó. Além disso, caso o protocolo utilize rotas que não tenham interferência entre si, ele é dito disjunto por zona. O emprego de protocolos de roteamento que combinam múltiplos caminhos disjuntos por nó e sistemas de antenas direcionais melhora o desempenho total da rede porque melhora a capacidade agregada da rede. Entretanto, podem existir interferências entre os caminhos disjuntos por nó, reduzindo a capacidade total obtida. Alguns algoritmos que utilizam caminhos disjuntos por nó tentam minimizar o efeito das interferências, entretanto não eliminam esse efeito completamente [Abbas e Jain, 2006]. Outros tipos de algoritmos, os que constroem múltiplos caminhos parcialmente disjuntos por zona e utilizam sistemas de antenas direcionais, solucionam em parte o problema de interferência entre caminhos disjuntos [Ueda et al., 2006]. Entretanto, esse problema não é totalmente solucionado pois ainda podem ocorrer interferências entre as rotas. Os algoritmos de roteamento que usam múltiplos caminhos disjuntos por zona e sistemas de antenas direcionais, não permitem interferência entre caminhos disjuntos e aproveitam melhor as vantagens dos sistemas de antenas direcionais e de múltiplos caminhos.

Uma análise de algoritmo de roteamento que utiliza múltiplos caminhos disjuntos por nó e de algoritmo de roteamento que utiliza múltiplos caminhos parcialmente disjuntos por zona foi realizada por Roy *et al.* [Roy et al., 2002]. Entretanto, essa análise foi muito limitada pois foram analisados somente alguns pares de rotas parcialmente disjun-

tas por zona ou disjuntas por zona, em nós que utilizam antena direcional com seis feixes, comparando esses pares com rotas disjuntas por nó nos mesmos nós, utilizando antenas omnidirecionais, em uma configuração de cenário, quantidade máxima de saltos e escolha dos pares de nós deveras restritiva. Neste trabalho, é realizada uma análise mais ampla, quando comparamos os diferentes tipos de algoritmos entre si em diferentes cenários e diferentes configurações de feixes de antenas.

Este trabalho analisa algoritmos de roteamento que usam múltiplos caminhos disjuntos por nó e algoritmos de roteamento que usam múltiplos caminhos disjuntos por zona. Diferentemente dos trabalhos anteriores [Abbas e Jain, 2006, Ueda et al., 2006] que propõem algoritmos de roteamento que usam múltiplos caminhos disjuntos por nó ou parcialmente disjuntos por zona e de trabalhos que realizam análises limitadas [Roy et al., 2002], este trabalho implementa um novo simulador visando comparar um algoritmo de roteamento usando múltiplos caminhos disjuntos por nó e sistemas de antenas direcionais (NDD), um algoritmo de roteamento usando múltiplos caminhos disjuntos por zona e sistemas de antenas direcionais (ZDD), um algoritmo de roteamento usando múltiplos caminhos disjuntos por nó e antenas omnidirecionais (NDO) e um algoritmo de roteamento usando múltiplos caminhos disjuntos por zona e antenas omnidirecionais (ZDO) entre si em diferentes cenários e diferentes configurações de feixes de antenas. A análise comprova a vantagem do emprego de algoritmo ZDD em comparação ao algoritmo NDD. Além disso, é comprovado que os algoritmos ZDD e NDD têm melhor desempenho em um cenário com distribuição aleatória de nós do que no cenário em grade comumente usado em análise de redes *ad hoc* com antenas direcionais [Gossain et al., 2006, Rocha, 2006]. Nos cenários avaliados foi verificado também que a utilização de sistemas de antenas direcionais melhora o desempenho da rede, sendo obtidos melhores resultados nos algoritmos ZDD e NDD em comparação com os algoritmos ZDO e NDO.

Este trabalho está organizado da seguinte forma. A Seção 2 analisa o estado da arte em algoritmos de roteamento que constroem múltiplas rotas com sistemas de antenas direcionais, destacando os algoritmos que utilizam disjunção por nó e disjunção por zona. A Seção 3 descreve o simulador implementado neste trabalho para a análise dos dois tipos de algoritmos. Os resultados de simulação são analisados na Seção 4. Finalmente, a Seção 5 conclui este trabalho e apresenta a direção dos trabalhos futuros.

## 2. Trabalhos Relacionados

A disjunção entre rotas é um fator importante em algoritmos de roteamento que usam múltiplos caminhos porque diminui o efeito do acoplamento entre as rotas e pode promover o balanceamento da carga de uma rede [Ueda et al., 2006]. O acoplamento entre rotas<sup>1</sup> é a interferência mútua entre rotas existentes em redes sem fio devido à proximidade entre elas, restringindo a possibilidade de ocorrência de comunicação simultânea entre as diferentes rotas [Ueda et al., 2006]. É vantajoso o nó origem conhecer mais de um caminho para o destino em redes *ad hoc*. Se um caminho falha, a comunicação pode prosseguir por um dos caminhos alternativos. O balanceamento da carga também pode evitar a concentração de carga sobre um conjunto de nós, reduzindo a possibilidade de

---

<sup>1</sup>Ao invés de acoplamento, [Abbas e Jain, 2006] preferem o termo correlação, que é definida como a quantidade de enlaces unindo dois caminhos nós-disjuntos.

depleção da energia de um conjunto de nós severamente utilizados [Ueda et al., 2006]. Com a utilização de sistemas de antenas direcionais, a energia é concentrada na direção que se deseja transmitir. Desse modo, há menor acoplamento entre as rotas, devido a menor interferência mútua entre as rotas, maior alcance de transmissão de cada nó, maior número de comunicações simultâneas, melhor reuso espacial e maior capacidade agregada da rede [Ramanathan et al., 2005, Ramella, 2006, Ueda et al., 2006].

Múltiplas rotas são definidas como rotas disjuntas por nó<sup>2</sup> se e somente se várias rotas encontradas entre um nó origem e um nó destino não têm nós em comum, excetuando-se o nó origem e o nó destino. Se caminhos descobertos entre um par de nós são disjuntos por nó, a frequência da descoberta de rota pode ser reduzida em protocolos reativos e, se múltiplos caminhos disjuntos por nó são usados simultaneamente para a transferência de dados entre um par de nós, a vazão pode ser aumentada. Os algoritmos *Fixed Forbidden Zone* (FFZ) e *Shifted Forbidden Zone* (SFZ) [Abbas e Jain, 2006] empregam roteamento com múltiplos caminhos disjuntos por nó. Esses algoritmos utilizam um sistema de antenas baseado no modelo de antena semi-direcional. No FFZ a zona proibida para a transmissão é fixa, enquanto no SFZ essa zona é deslocada. Tanto o FFZ quanto o SFZ tentam minimizar a sobrecarga e o acoplamento entre os nós, tentando minimizar o efeito das interferências entre caminhos disjuntos, sem contudo eliminar esse efeito completamente porque ainda há correlação entre as rotas disjuntas. Entretanto, as interferências entre os caminhos disjuntos por nó não permitem o aproveitamento total das vantagens que a utilização de sistemas de antenas direcionais e de múltiplos caminhos pode fornecer para redes *ad hoc*.

Rotas parcialmente disjuntas por zona<sup>3</sup> são definidas como rotas disjuntas por nó que são minimamente acopladas, onde a comunicação de dados de uma rota interfere minimamente na outra rota. O *Adaptive Communication-Aware Routing Protocols Using Maximally Zone-Disjoint Shortest Paths* (ACR) [Ueda et al., 2006] é um algoritmo de roteamento adaptativo que emprega rotas parcialmente disjuntas por zona. Em [Ueda et al., 2006], o algoritmo ACR foi utilizado com um sistema de antenas direcionais de feixe dirigido (FD) denominado Arranjo de Irradiadores Passivos Eletronicamente Dirigíveis (*Electronically Steerable Passive Array Radiator* - ESPAR). O algoritmo ACR seleciona as rotas usando como critérios o fator de correlação do caminho e a contagem de saltos propagados. Embora objetive diminuir o efeito do acoplamento de rotas, o algoritmo ACR não elimina esse efeito completamente nos casos em que o fator de correlação não é nulo, pois ainda há interferência entre as rotas.

Múltiplas rotas são definidas como rotas disjuntas por zona se e somente se as várias rotas encontradas entre um nó origem e um nó destino empregam rotas totalmente disjuntas por zona. Essas rotas são também disjuntas por nó. Os nós intermediários dessas rotas não podem ser iluminados por feixe de transmissão em uso de nós intermediários de outras rotas disjuntas por zona. A comunicação de dados de uma rota não interfere na comunicação de dados de outra rota disjunta por zona. O algoritmo de roteamento usando múltiplos caminhos disjuntos por zona e sistemas de antenas direcionais (ZDD) é um tipo de algoritmo que emprega rotas totalmente disjuntas por zona e aproveita melhor

---

<sup>2</sup>Em [Abbas e Jain, 2006], as rotas disjuntas por nó são denominadas rotas nós-disjuntas.

<sup>3</sup>Consideramos que as rotas zonas-disjuntas propostas por [Ueda et al., 2006] são na realidade rotas parcialmente disjuntas por zona.

as vantagens disponibilizadas pelo uso de sistemas de antenas direcionais e de múltiplos caminhos.

Cabe salientar que rotas podem ser acopladas e disjuntas por nó se os nós utilizarem antena omnidirecional e desacopladas e disjuntas por zona se utilizarem sistemas de antenas direcionais. Rotas também podem ser disjuntas por nó, ter carga balanceada, mas serem acopladas, implicando em uma rota disjunta por nó interferir na outra e aumentar o atraso fim-a-fim. Em rotas de menor caminho, normalmente, o atraso fim-a-fim é menor. A utilização de caminhos múltiplos reduz o congestionamento e, em alguns cenários, reduz o atraso fim-a-fim [Ueda et al., 2006].

Neste trabalho são analisados algoritmos de roteamento usando múltiplos caminhos disjuntos por nó e algoritmos de roteamento usando múltiplos caminhos disjuntos por zona, ambos empregando antenas omnidirecionais ou sistemas de antenas direcionais. Estas análises são realizadas em cenário em grade e em cenário com distribuição aleatória dos nós.

### 3. O Simulador Implementado

Os simuladores existentes não permitem uma análise exclusiva dos algoritmos de roteamento usando múltiplos caminhos disjuntos por nó e dos algoritmos de roteamento usando múltiplos caminhos disjuntos por zona, independentemente das camadas física e MAC. Esses simuladores colocariam na análise variáveis da camada física e MAC que são indesejáveis para a análise dos algoritmos. Desse modo, para analisar esses algoritmos de roteamento que combinam múltiplas rotas e sistemas de antenas direcionais, foi implementado um simulador utilizando a linguagem de programação C++. Esse simulador implementado isola o problema das características das camadas física e MAC.

O simulador implementado modela um sistema de antenas direcionais de feixe comutado (*Switched Beam Antenna System - SB*). Esse sistema de antenas é capaz de comutar eletronicamente a direção do feixe que está transmitindo, dentre um conjunto finito de feixes, onde cada feixe é apontado para uma direção fixa. O sistema SB detecta os sinais, escolhe o feixe onde a potência do sinal recebido é maior e migra para esse feixe. Esse sistema é barato e facilmente implementado. O sistema de antenas direcionais de feixe dirigido (FD) tem custo maior e é mais complexo, embora possa ser direcionado virtualmente para qualquer direção. Como o sistema SB tem desempenho similar em redes *ad hoc* ao sistema FD [Ramanathan, 2001], o simulador foi desenvolvido para utilizar sistema SB, embora possa ser facilmente utilizado com um sistema FD.

O simulador implementado utiliza um sistema SB similar aos utilizados em [Rocha, 2006], bem como permite a utilização de antenas omnidirecionais. Esse sistema é composto por  $n_f$  antenas direcionais fixas. Cada uma dessas antenas direcionais ilumina um setor circular de ângulo  $2\pi/n_f$  radianos, não sobrepostos. Esse sistema de antenas ilumina os 360 graus equivalentes a uma antena omnidirecional. Os feixes desse sistema são numerados de 1 a  $n_f$  no sentido anti-horário, começando na posição horizontal de 3 horas.

Embora cada nó disponha de um sistema SB com a mesma quantidade de feixes fixos, supõe-se que cada nó somente pode transmitir ou receber em uma única direção em um dado instante, pois só possui um transceptor.

O modelo de transmissão utilizado foi o *Two-Ray Ground*, que simula a propagação no espaço livre, similar ao utilizado em [Rocha, 2006] para distâncias maiores que uma distância de corte. Nesse modelo, a potência recebida pelo nó será uma combinação da transmissão direta e da reflexão no solo. Considerou-se neste trabalho que o alcance das comunicações utilizando antenas omnidirecionais é de 250 metros [Rocha, 2006]. Esse valor é típico para o IEEE 802.11b na taxa de 2 Mbps. O alcance de recepção utilizado para cada sistema de antenas direcionais de feixe comutado, obtido de Rocha [Rocha, 2006], é apresentado na Tabela 1.

Quantidade de feixes por sistema	Alcance de recepção
1 (omnidirecional)	250 m
2	297 m
4	353 m
8	420 m
16	500 m

**Tabela 1. Alcance de recepção por tipo de sistema de antenas.**

O algoritmo de Dijkstra de primeiro caminho mais curto (*Shortest Path First - SPF*) permite calcular o caminho mais curto entre um nó e todos os outros nós de uma rede [Huitema, 1999]. Neste trabalho foi utilizada uma adaptação da implementação do algoritmo SPF usada por [Huitema, 1999]. Já o algoritmo primeiro caminho mais curto - múltiplos caminhos (*Shortest Path First - Multi-Path - SPF-MP*) calcula os caminhos mais curtos entre um nó e todos os outros nós de uma rede. Conforme apresentado por [Huitema, 1999], os caminhos mais curtos obtidos por meio do algoritmo SPF-MP entre um nó origem e um nó destino têm o mesmo custo.

Uma possibilidade de calcular todas as múltiplas rotas disjuntas por nó que podem ter custos diferentes em uma rede que utiliza antenas omnidirecionais ou sistemas de antenas direcionais seria utilizar o algoritmo de força bruta, de modo que ele conseguisse reconhecer o alcance de recepção de cada feixe de um sistema de antenas direcionais e obtivesse todos os caminhos mais curtos entre um nó origem e um nó destino que não obrigatoriamente tivessem o mesmo custo. Entretanto, ao implementar esta tentativa observou-se que o tempo de simulação era demasiado.

Utilizar o algoritmo SPF ou o algoritmo SPF-MP sem modificações para o cálculo de todas as múltiplas rotas disjuntas por nó que podem ter custos diferentes, não seria viável. A solução para calcular todas as múltiplas rotas disjuntas por nó que podem ter custos diferentes foi utilizar o algoritmo SPF e executá-lo até a descoberta de uma rota entre o nó origem e o nó destino. Desse modo, o algoritmo SPF modificado não calcula todas as rotas entre o nó origem e todos os demais nós da rede. Após o cálculo dessa rota entre os nós origem e destino, o algoritmo SPF modificado é novamente executado com a exclusão dos nós intermediários do mapa da topologia, conforme será detalhado na Subseção 3.1.

### 3.1. Algoritmo de Rotas Disjuntas por Nó

Visando diminuir o tempo para calcular múltiplos caminhos, foram implementados o algoritmo de roteamento usando múltiplos caminhos disjuntos por nó e sistemas de antenas direcionais (NDD) e o algoritmo de roteamento usando múltiplos caminhos disjuntos por nó e antenas omnidirecionais (NDO) baseados no algoritmo primeiro caminho

mais curto (SPF). O algoritmo SPF foi modificado de modo a considerar o alcance de recepção de cada feixe de um sistema de antenas direcionais, além do usual alcance de antena omnidirecional. Desse modo, cada nó armazena a informação do número identificador do nó vizinho e do número do feixe pelo qual ele é vizinho, similar ao utilizado em [Gossain et al., 2006]. Para a implementação dos algoritmos NDD e NDO é definida a seguinte notação:  $r$  é a rota com o caminho mais curto entre um nó origem  $n_o$  e um nó destino  $n_d$ ;  $n_{in}$  são os nós intermediários;  $r_{nd}$  são as rotas disjuntas por nó e  $l_{nd}$  é a lista de rotas disjuntas por nó que armazena as  $r_{nd}$  que podem ter custo não obrigatoriamente igual.

O pseudo-código Algoritmo 1 ilustra o funcionamento dos algoritmos NDD e NDO para o cálculo das múltiplas  $r_{nd}$ , considerando o cálculo realizado pelo nó  $n_o$ .

---

**Algoritmo 1** ALGORITMO DE DESCOBERTA DE MÚLTIPLAS ROTAS DISJUNTAS POR NÓ EXECUTADO PELO NÓ  $n_o$  (NDD OU NDO).

---

```

SPF modificado();
enquanto (existir  $r$  entre  $n_o$  e  $n_d$ ) então
     $r$  é uma rota disjunta por nó;
    armazena na  $l_{nd}(r)$ ;
    exclui da cópia do mapa da topologia os  $n_{in}$  das  $r_{nd}$  armazenadas na  $l_{nd}$ ;
    SPF modificado();
fim do enquanto

```

---

Por hipótese, cada nó possui o mapa completo da topologia da rede e tem condições de calcular a menor rota na direção do nó  $n_d$ , executando o algoritmo SPF modificado. Inicialmente, inicialize a lista  $l_{nd}$ , tornando-a vazia. Depois, inicialize as condições iniciais do algoritmo SPF modificado, observando para o cálculo dos vizinhos o alcance de recepção do tipo de sistema de antenas utilizado. Caso esteja calculando o algoritmo NDO, utilize o alcance de recepção de antenas omnidirecionais. Caso esteja calculando o algoritmo NDD, utilize o alcance de recepção de acordo com a quantidade de feixes do sistema de antenas, conforme apresentado na Tabela 1. Execute o algoritmo SPF modificado, até a obtenção de rota entre o nó  $n_o$  e o nó  $n_d$ . Enquanto houver rota  $r$  entre o nó  $n_o$  e o nó  $n_d$ , essa rota será uma rota disjunta por nó de menor custo. Armazene essa rota disjunta por nó na lista  $l_{nd}$ . Exclua da cópia do mapa da topologia da rede, os nós  $n_{in}$  dessa rota. Execute novamente o algoritmo SPF modificado. Execute o laço (*loop*) enquanto houver rota  $r$  entre o nó  $n_o$  e o nó  $n_d$ . Quando o algoritmo NDO ou NDD é concluído, são obtidas as múltiplas  $r_{nd}$  entre o nó  $n_o$  e o nó  $n_d$ . Essas múltiplas  $r_{nd}$  estarão armazenadas na lista  $l_{nd}$ , ordenadas em ordem crescente de custo, onde o custo do enlace é igual à métrica do enlace que é a menor quantidade de saltos. Caso haja  $r_{nd}$  de mesmo custo, elas serão ordenadas em ordem crescente de numeração dos nós na rota. Cabe salientar que as  $r_{nd}$  calculadas entre um nó  $n_o$  e um nó  $n_d$  não têm nós  $n_{in}$  em comum e que na execução do algoritmo SPF modificado o critério de desempate utilizado durante a formação de rota é o número mais baixo do identificador do nó.

### 3.2. Algoritmo de Rotas Disjuntas por Zona

O algoritmo de roteamento usando múltiplos caminhos disjuntos por zona e sistemas de antenas direcionais (ZDD) e o algoritmo de roteamento usando múltiplos caminhos disjuntos por zona e antenas omnidirecionais (ZDO) são baseados, respectivamente,

no algoritmo NDD e no algoritmo NDO. Por meio do algoritmo NDD ou NDO, conforme o tipo de sistema de antenas utilizado, múltiplas  $r_{nd}$  são inicialmente obtidas e armazenadas na lista  $l_{nd}$ . Dentre essas  $r_{nd}$ , são selecionadas as múltiplas rotas disjuntas por zona  $r_{zd}$ . Para a implementação dos algoritmos ZDD e ZDO é definida a seguinte notação, em acréscimo a notação usada na implementação dos algoritmos NDD e NDO:  $r_{zd}$  são as rotas disjuntas por zona e  $l_{zd}$  é a lista de rotas disjuntas por zona que armazena as  $r_{zd}$  que podem ter custo não obrigatoriamente igual.

O pseudo-código Algoritmo 2 ilustra o funcionamento dos algoritmos ZDD e ZDO para o cálculo das múltiplas  $r_{zd}$ , considerando o cálculo realizado pelo nó  $n_o$ .

---

**Algoritmo 2** ALGORITMO DE DESCOBERTA DE MÚLTIPLAS ROTAS DISJUNTAS POR ZONA EXECUTADO PELO NÓ  $n_o$  (ZDD OU ZDO).

---

NDD ou NDO();

enquanto (existir rota  $r$  na  $l_{nd}$ ) então

$r$  é uma rota disjunta por zona;

armazena na  $l_{zd}(r$  de menor custo e de menor identificador dos nós na rota);

exclui da  $l_{nd}(r$  de menor custo e de menor identificador dos nós na rota);

exclui da  $l_{nd}(r_{nd}$  cujos  $n_{in}$  são iluminados por feixe de transmissão em uso de nós das  $r_{zd}$ );

fim do enquanto

---

Por hipótese, cada nó possui o mapa completo da topologia da rede e tem condições de calcular as múltiplas  $r_{nd}$ , executando o algoritmo NDD ou o algoritmo NDO, conforme o tipo de sistema de antenas utilizado. Inicialmente, inicialize a lista  $l_{zd}$ , tornando-a vazia. Depois, inicialize as condições iniciais do algoritmo NDD ou do algoritmo NDO, conforme o tipo de sistema de antenas utilizado, seguindo o descrito no pseudocódigo Algoritmo 1. Execute o algoritmo NDD ou o algoritmo NDO, conforme o tipo de sistema de antenas utilizado, seguindo o descrito no pseudocódigo Algoritmo 1, até que as múltiplas  $r_{nd}$  sejam obtidas e armazenadas na lista  $l_{nd}$  e não haja mais rota  $r$  entre o nó  $n_o$  e o nó  $n_d$ . Enquanto houver rota  $r$  entre o nó  $n_o$  e o nó  $n_d$  na lista  $l_{nd}$ , essa rota será uma  $r_{zd}$  de menor custo e de menor identificador dos nós na rota. Armazene essa  $r_{zd}$  na lista  $l_{zd}$ . Exclua essa  $r_{zd}$  da lista  $l_{nd}$ . Verifique quais nós  $n_{in}$  de outras rotas são iluminados por feixes em uso de nós  $n_{in}$  de  $r_{zd}$ . Exclua as  $r_{nd}$  que têm nós  $n_{in}$  iluminados por feixes em uso de nós  $n_{in}$  de  $r_{zd}$  da lista  $l_{nd}$ . Execute o laço (*loop*) enquanto houver rota  $r$  entre o nó  $n_o$  e o nó  $n_d$  na lista  $l_{nd}$ . Quando o algoritmo ZDO ou ZDD é concluído, são obtidas as múltiplas  $r_{zd}$  entre o nó  $n_o$  e o nó  $n_d$ . Essas múltiplas  $r_{zd}$  estarão armazenadas na lista  $l_{zd}$ , ordenadas em ordem crescente de custo, onde o custo do enlace é igual à métrica do enlace que é a menor quantidade de saltos. Caso haja  $r_{zd}$  de mesmo custo, elas serão ordenadas em ordem crescente de numeração dos nós na rota. Cabe salientar que as  $r_{zd}$  obtidas entre um nó  $n_o$  e um nó  $n_d$  não têm nós  $n_{in}$  em comum e os nós  $n_{in}$  das  $r_{zd}$  obtidas não são iluminados por feixes em uso de nós  $n_{in}$  de outras  $r_{zd}$ . Logo, a comunicação de dados de uma rota não interfere na comunicação de dados de outra rota disjunta por zona. Convém salientar que, na execução do algoritmo SPF modificado, o critério de desempate utilizado durante a formação de rota disjunta por nó é o número mais baixo do identificador do nó e que o critério utilizado à seleção de rota disjunta por zona, dentre as  $r_{nd}$  armazenadas na lista  $l_{nd}$ , é a rota de menor custo e de menor identificador dos nós na rota.

## 4. Simulação

O simulador implementado calcula múltiplas rotas disjuntas por nó  $r_{nd}$  e múltiplas rotas disjuntas por zona  $r_{zd}$  independentemente do tipo de cenário onde os nós estão distribuídos. Em cada simulação o tipo de antena utilizada por todos os nós é o mesmo. Todos os nós da rede devem utilizar antenas omnidirecionais ou sistema de antenas direcionais do tipo feixe comutado com uma mesma quantidade de feixes.

É importante ressaltar que o tempo de simulação para obtenção das múltiplas  $r_{nd}$  e das múltiplas  $r_{zd}$  utilizando os algoritmos implementados baseados no algoritmo SPF foi muito menor que o tempo de simulação para o cálculo dessas mesmas múltiplas rotas disjuntas utilizando o algoritmo força bruta.

### 4.1. Resultados

Os diferentes tipos de algoritmos de roteamento implementados (NDD, NDO, ZDD e ZDO) foram avaliados por meio da métrica utilização dos nós intermediários. O objetivo desta medida foi analisar o emprego de algoritmo de roteamento usando múltiplos caminhos disjuntos por zona (ZD) em comparação ao emprego de algoritmo de roteamento usando múltiplos caminhos disjuntos por nó (ND). Os resultados foram obtidos utilizando o simulador descrito na Seção 3.

A métrica utilização dos nós intermediários é definida como razão entre a quantidade de vezes que um nó é utilizado como nó intermediário em rotas e a quantidade de rotas avaliadas. Essa métrica mede a probabilidade de uso de um nó da rede e fornece uma medida de como o tráfego está distribuído na rede. Com o balanceamento da utilização dos nós da rede, o desempenho da rede será melhorado em termos de melhor reuso espacial, mais comunicações simultâneas, aumento da vazão agregada e gasto de energia balanceado entre os nós, por isso a importância desta métrica.

Nos resultados, a quantidade de nós da rede é variada para redes com 36, 49, 64, 81, 100 ou 121 nós, posicionados em uma área de 1.000 metros por 1.000 metros. Os sistemas de antenas direcionais utilizados nas simulações eram compostos de 2, 4, 8 ou 16 feixes fixos por sistema. O alcance de recepção para cada quantidade de feixes fixos por sistema utilizado na simulação é apresentado na Tabela 1.

Foram considerados dois cenários para posicionamento dos nós: um cenário em grade e um cenário com distribuição aleatória. No cenário em grade, os nós foram posicionados em uma grade com  $ng$  nós em cada coluna por  $ng$  nós em cada linha. Os nós foram igualmente e lateralmente espaçados em cada coluna e em cada linha. O nó de número 1 foi posicionado no vértice inferior esquerdo da grade. Os demais nós foram posicionados em ordem crescente da esquerda para a direita e de baixo para cima. No cenário com distribuição aleatória dos nós, os nós foram posicionados aleatoriamente na área quadrada e a posição dos nós variou aleatoriamente em cada rodada.

Para cada quantidade de nós na rede, cenário de rede e tipo de antena ou tipo de sistema de antenas direcionais foram realizadas 1.000 execuções de simulações. A utilização de cada um dos nós da rede como nó intermediário de múltiplas  $r_{nd}$  e de múltiplas  $r_{zd}$  foi calculada com intervalo de confiança de 95%, representado nos gráficos por barras de erro verticais. Os valores de  $ng$ , quantidade de nós em cada linha e em cada coluna no cenário em grade, e de  $np$ , quantidade de pares de nós origem e destino para cada rota, foram

atribuídos como iguais à raiz quadrada da quantidade de nós da rede. Os nós origem e destino dos  $np$  pares de nós origem e destino foram aleatoriamente escolhidos em cada uma das simulações.

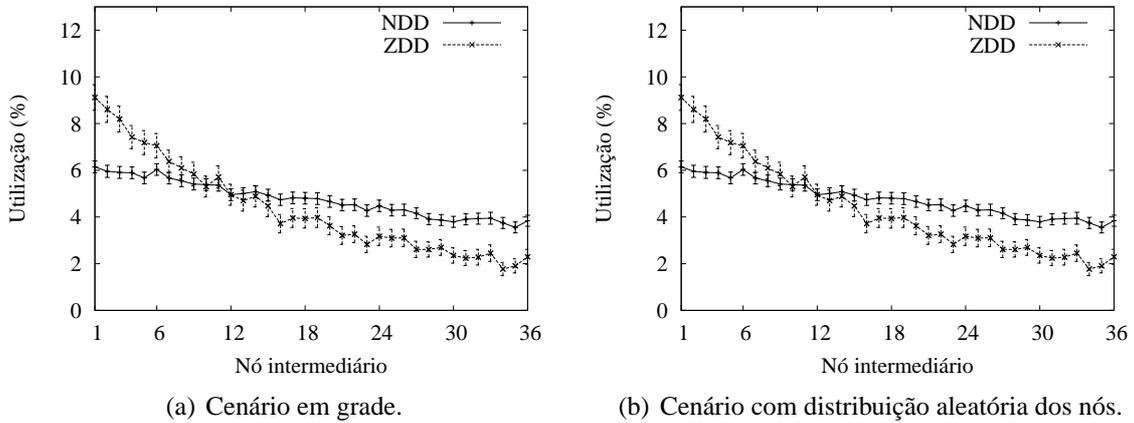


Figura 1. Utilização como nó intermediário.

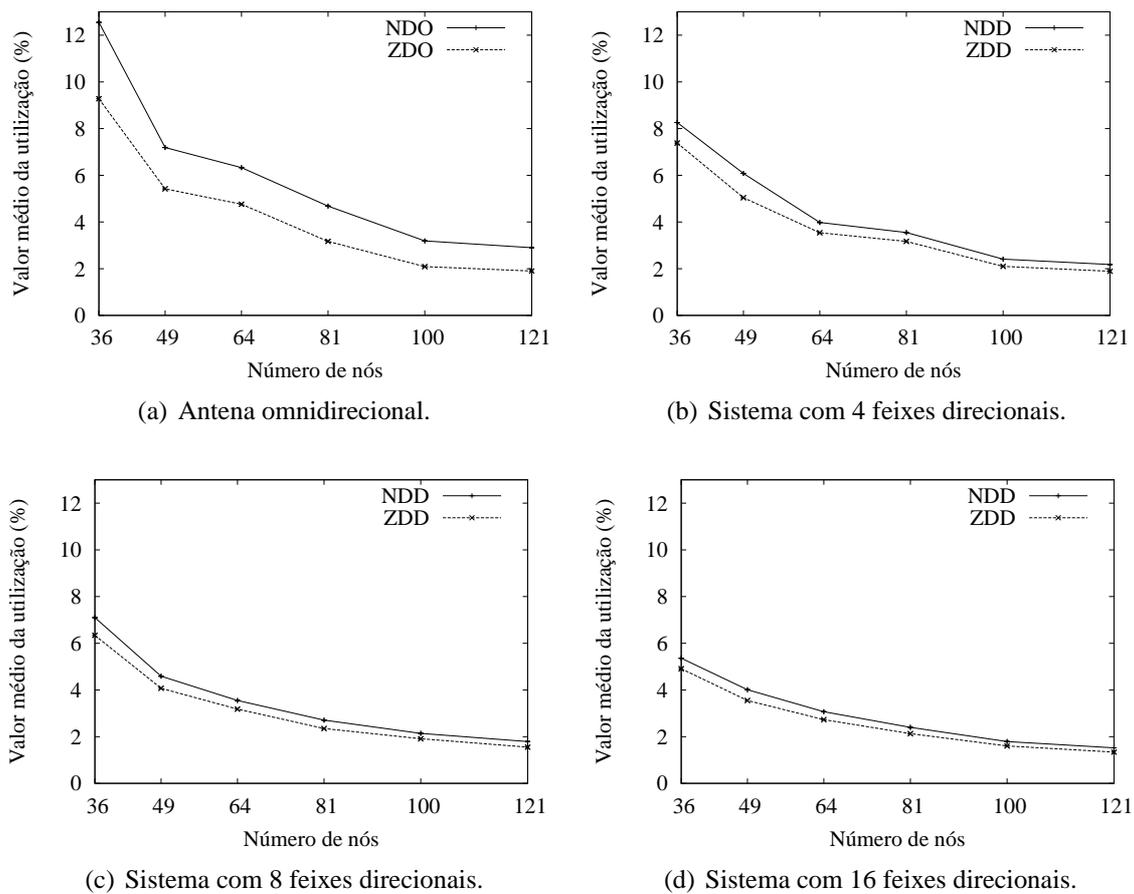
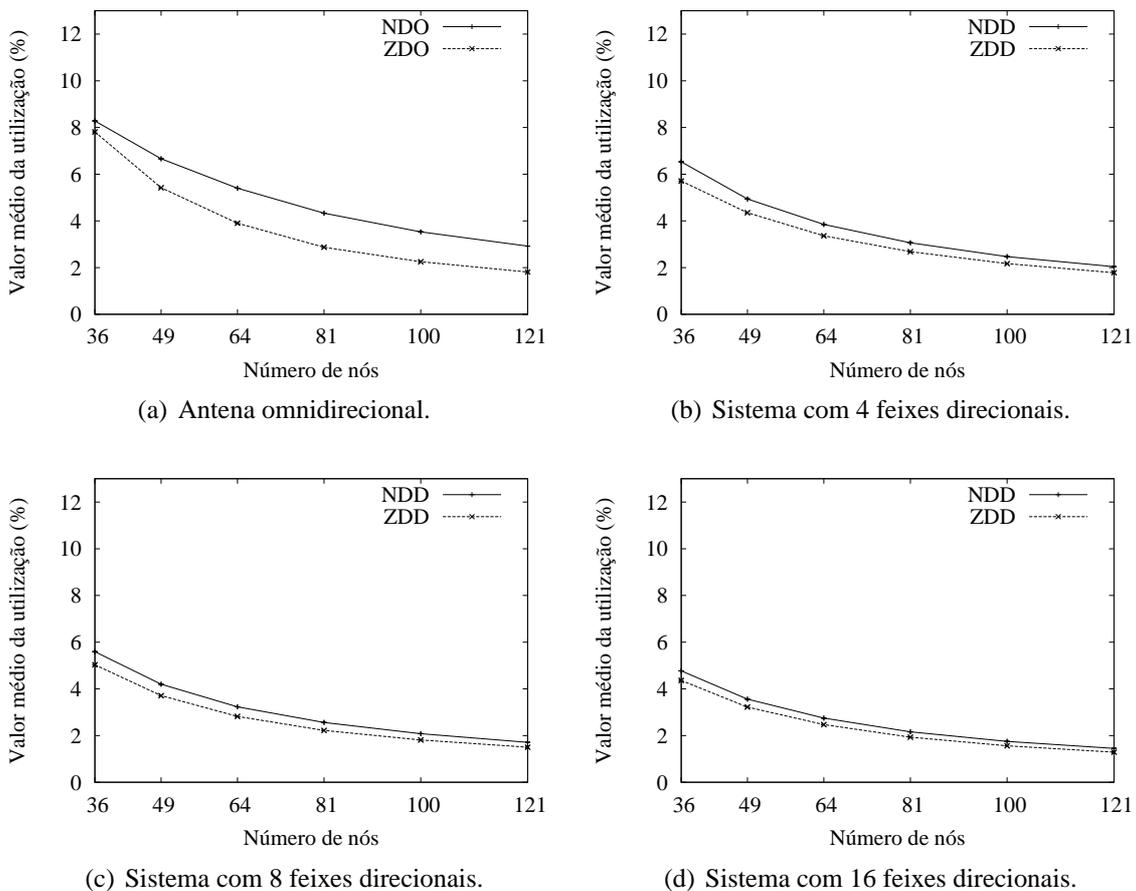


Figura 2. Valor médio da utilização como nó intermediário no cenário em grade.

A Figura 1(a) mostra a utilização como nó intermediário de cada um dos nós da rede utilizando múltiplas  $r_{nd}$  e múltiplas  $r_{zd}$  em um cenário em grade para uma rede com



**Figura 3. Valor médio da utilização como nó intermediário no cenário com distribuição aleatória dos nós.**

36 nós onde todos os nós utilizam sistema de antenas direcionais com 16 feixes. Pode-se notar que os nós centrais foram os nós  $n_{in}$  mais utilizados e os nós das extremidades da grade foram os menos utilizados, tanto para  $r_{nd}$  como para  $r_{zd}$ . Isso ocorre porque as distâncias mais curtas utilizam as diagonais no cenário em grade. A Figura 1(b) apresenta o mesmo resultado em um cenário com distribuição aleatória dos nós. Observa-se uma tendência para que todos os nós sejam utilizados como nós  $n_{in}$  de múltiplas  $r_d$  na mesma proporção. Esta tendência é facilmente visualizada para as  $r_{nd}$ , cuja curva é linear, embora a curva seja decrescente com os nós de menor número identificador sendo um pouco mais utilizados. Para as  $r_{zd}$ , a curva não é linear, embora também seja uma curva decrescente com os nós de menor numeração sendo bem mais utilizados que os nós de maior número identificador. Essa tendência de comportamento linear ocorre porque, diferente do cenário em grade, o posicionamento dos nós não é fixo em todas as execuções do simulador. Portanto, em uma rodada um determinado nó pode ficar posicionado no centro da área simulada, e em uma outra rodada ficar posicionado em uma extremidade. Para ambos os cenários utilizados, as  $r_{zd}$  tendem a utilizar menos nós  $n_{in}$  do que as  $r_{nd}$  a partir do nó número 12. No cenário em grade, alguns nós anteriores ao nó número 12 são mais utilizados como nós  $n_{in}$  em  $r_{zd}$  do que em  $r_{nd}$ . No cenário com distribuição aleatória dos nós, os nós anteriores ao nó número 12 são mais utilizados como  $n_{in}$  em  $r_{zd}$  do que em

$r_{nd}$ . O fato de nós serem mais utilizados como nós  $n_{in}$  em  $r_{zd}$  do que em  $r_{nd}$  ocorre porque durante o cálculo das  $r_{nd}$ , o critério de desempate escolhido para a formação de rota do algoritmo SPF foi o nó de menor identificador e ao fato de que as  $r_{nd}$  serem armazenadas na lista  $l_{nd}$  também pelo critério de ordem crescente de identificador dos nós na rota. Esse fato seria minimizado caso fosse utilizada aleatoriedade no desempate para a formação de rota do algoritmo SPF e fosse utilizada aleatoriedade na escolha da rota disjunta por zona dentre as  $r_{nd}$  de mesmo custo existentes na lista  $l_{nd}$ . Porém, critérios de desempate como o utilizado são comumente empregados em protocolos de roteamento de Internet.

As Figuras 2 e 3 demonstram a vantagem do emprego de algoritmo de roteamento usando múltiplos caminhos disjuntos por zona e sistemas de antenas direcionais (ZDD) em comparação com o emprego de algoritmo de roteamento usando múltiplos caminhos disjuntos por nó e sistemas de antenas direcionais (NDD) nos cenários em grade e com distribuição aleatória dos nós. Nos dois cenários, variando a quantidade de nós da rede e variando a quantidade de feixes por sistema de antenas direcionais, observa-se que o valor médio da utilização como nó intermediário de cada um dos nós da rede em ZDD é menor que esse valor médio em NDD. As Figuras 2 e 3 também demonstram que os algoritmos ZDD e NDD têm melhor desempenho no cenário com distribuição aleatória de nós do que no cenário em grade. Observa-se que os valores médios da utilização como nó intermediário de cada um dos nós da rede no cenário com distribuição aleatória de nós são menores que no cenário em grade, quando se varia a quantidade de nós da rede e a quantidade de feixes por sistema de antenas direcionais. As Figuras 2 e 3 ainda demonstram que nos cenários avaliados a utilização de sistemas de antenas direcionais melhora o desempenho da rede em comparação aos mesmos algoritmos de roteamento utilizando antenas omnidirecionais. Observa-se em ambos os cenários, variando a quantidade de nós da rede e variando a quantidade de feixes por sistema de antenas direcionais, que os valores médios da utilização como nó intermediário de cada um dos nós da rede utilizando sistemas de antenas direcionais são menores que utilizando antena omnidirecional. As Figuras 2 e 3 demonstram ainda que o aumento da quantidade de feixes por sistemas de antenas direcionais melhora o balanceamento da utilização dos nós da rede. Em ambos os cenários é observado que, variando a quantidade de nós da rede e variando a quantidade de feixes por sistema de antenas direcionais, os valores médios da utilização como nó intermediário de cada um dos nós da rede diminuem ao serem utilizados sistemas com maior quantidade de feixes por sistema.

Os melhores resultados na melhoria da distribuição do tráfego em redes *ad hoc* foram obtidos com a utilização de algoritmo de roteamento usando múltiplos caminhos disjuntos por zona e utilizando 16 feixes por sistema de antenas direcionais no cenário com distribuição aleatória dos nós.

Com o aumento da quantidade de feixes por sistema de antenas direcionais do tipo feixe comutado, o feixe de transmissão de cada antena direcional é reduzido. Entretanto, o alcance de transmissão aumenta. Logo, as rotas têm menos saltos, tornando-se mais curtas e diminuindo-se a quantidade de nós utilizados em cada rota. Desse modo a utilização como nó intermediário de cada um dos nós da rede diminui ao serem utilizados sistemas com maior quantidade de feixes por sistema de antenas direcionais.

## 5. Conclusão

Foi realizada em redes *ad hoc*, onde o tipo de antena utilizada por todos os nós era o mesmo, uma análise do emprego de algoritmos de roteamento que usam múltiplos caminhos disjuntos por zona, comparando-a com uma análise do emprego de algoritmos de roteamento que usam múltiplos caminhos disjuntos por nó no mesmo contexto. Nessa análise, esses dois principais tipos de algoritmos de múltiplos caminhos disjuntos foram comparados em diferentes cenários e diferentes configurações de feixes de antenas. Nessa análise, todos os nós utilizaram antenas omnidirecionais ou sistema de antenas direcionais do tipo feixe comutado com uma mesma quantidade de feixes e foi utilizada a métrica utilização dos nós intermediários para fornecer uma medida de como o tráfego está distribuído na rede.

Os algoritmos de roteamento que exploram as vantagens do uso de antenas direcionais e constroem múltiplos caminhos melhoram o balanceamento da utilização dos nós de redes *ad hoc*. Ambas as técnicas privilegiam o reuso espacial e a distribuição do tráfego na rede. O algoritmo de roteamento usando múltiplos caminhos disjuntos por zona e sistemas de antenas direcionais aproveita melhor essas vantagens. Com o balanceamento da utilização dos nós da rede, o desempenho da rede foi melhorado em termos de melhor reuso espacial, mais comunicações simultâneas, aumento da vazão agregada e gasto de energia balanceado entre os nós.

Os resultados obtidos demonstram que a distribuição de tráfego em redes *ad hoc* é melhor com a utilização de sistemas de antenas direcionais do tipo feixe comutado com uma mesma quantidade de feixes do que com a utilização de antenas omnidirecionais, tanto ao empregar o algoritmo de roteamento que usa múltiplos caminhos disjuntos por zona, quanto com o que usa múltiplos caminhos disjuntos por nó. Os resultados demonstram também que quanto mais feixes forem utilizados por sistema de antenas direcionais, melhor será o balanceamento da utilização dos nós da rede. Foi observado também que é melhor empregar o algoritmo de roteamento que usa múltiplos caminhos disjuntos por zona do que empregar o algoritmo de roteamento que usa múltiplos caminhos disjuntos por nó, quando ambos os algoritmos utilizam sistemas de antenas direcionais. A distribuição de tráfego nessas redes será melhor se os sistemas de antenas direcionais forem utilizados no cenário com distribuição aleatória de nós do que no cenário em grade. Os melhores resultados na melhoria da distribuição do tráfego em redes *ad hoc* sem fio foram obtidos com a utilização do algoritmo de roteamento que usa múltiplos caminhos disjuntos por zona utilizando 16 feixes por sistema de antenas direcionais no cenário com distribuição aleatória dos nós.

Futuramente, pretende-se implementar no simulador aleatoriedade no desempate para a formação de rota do algoritmo de Dijkstra de primeiro caminho mais curto (SPF) e aleatoriedade na escolha da rota disjunta por zona dentre as rotas disjuntas por nó de mesmo custo existentes na lista de rotas disjuntas por nó. Com esta implementação reduziremos o efeito de nós de menor numeração serem mais utilizados como nós intermediários em rotas disjuntas por zona do que em rotas disjunta por nó. Pretende-se também implementar mobilidade aos nós. Pretende-se ainda implementar esses algoritmos em um protocolo de roteamento, com vistas à realização de uma prova de conceito em protótipo de redes *ad hoc*.

## Referências

- Abbas, A. M. e Jain, B. N. (2006). Mitigating Overheads and Path Correlation in Node-Disjoint Multipath Routing for Mobile Ad hoc Networks. Em *First International Conference on Communication Systems Software and Middleware (IEEE Comsware)*, p. 1–7.
- Bandyopadhyay, S., Roy, S., Ueda, T. e Hasuike, K. (2002). Multipath Routing in Ad Hoc Wireless Networks with Directional Antenna. Em *IFIP TC6/WG6.8 Working Conference on Personal Wireless Communications (PWC)*, volume 234, p. 45–52.
- Gossain, H., Joshi, T., Cordeiro, C. e Agrawal, D. P. (2006). DRP: An Efficient Directional Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 17(12):1438–1541.
- Huitema, C. (1999). *Routing in the Internet*. Prentice-Hall.
- IEEE (1999). IEEE Standard 802-11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications.
- Ramanathan, R. (2001). On the Performance of Ad Hoc Networks with Beamforming Antennas. Em *2nd ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking & Computing (ACM MobiHoc)*, p. 95–105.
- Ramanathan, R., Redi, J., Santivanez, C., Wiggins, D. e Polit, S. (2005). Ad Hoc Networking With Directional Antennas: A Complete System Solution. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 23:496–506.
- Ramella, I. (2006). A Interferência em Redes Ad Hoc com Antenas Direcionais. Tese de mestrado, PEE/COPPE/UFRJ.
- Rocha, R. R. (2006). Um Mecanismo Para Evitar a Surdez Intrínseca em Redes Ad Hoc de Múltiplos Saltos utilizando Antenas Direcionais. Tese de mestrado, PEE/COPPE/UFRJ.
- Roy, S., Bandyopadhyay, S., Ueda, T. e Hasuike, K. (2002). Multipath Routing in Ad Hoc Wireless Networks with Omni Directional and Directional Antenna: A Comparative Study. Em *4th International Workshop on Distributed Computing, Mobile and Wireless Computing (ACM IWDC)*, volume 2571, p. 184–191.
- Rubinstein, M. G., Moraes, I. M., Campista, M. E. M., Costa, L. H. M. K. e Duarte, O. C. M. B. (2006). A Survey on Wireless Ad Hoc Networks. Em *Mobile and Wireless Communications Networks (MWCN)*, volume 211, p. 1–33.
- Ueda, T., Tanaka, S., Komiyama, B., Roy, S., Saha, D. e Bandyopadhyay, S. (2006). ACR: An Adaptive Communication-Aware Routing through Maximally Zone-Disjoint Shortest Paths in Ad Hoc Wireless Networks with Directional Antenna. Em *Wireless Communications & Mobile Computing (ACM WCMC)*, volume 6, p. 191–199.