

Mecanismo Conjunto de Atribuição de Canais e Roteamento para Redes em Malha Sem Fio de Múltiplos Rádios*

Celso Barbosa Carvalho¹, José Ferreira de Rezende²

¹GPComp - ICET – Universidade Federal do Amazonas (UFAM)

²COPPE – Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)

ccarvalho@ufam.edu.br, rezende@land.ufrj.br

Abstract.

Resumo. Este trabalho demonstra que a atribuição de múltiplos canais com diferentes larguras de banda aos enlaces de uma rede em malha sem fio IEEE 802.11 pode aumentar drasticamente a capacidade dessas redes, tudo isso para uma mesma quantidade de espectro disponível. No entanto, isso somente é possível em redes equipadas com múltiplos rádios e que utilizam mecanismos de atribuição de rádios e canais aos enlaces e de escolha de rotas que levem em conta essa atribuição. Levando isto em consideração, este artigo propõe um mecanismo conjunto de seleção da quantidade de rádios e da largura dos canais a serem utilizados em cada enlace, assim como uma métrica de roteamento que permite diminuir a interferência entre esses enlaces. Os mecanismos propostos são avaliados através de simulações no ns-2 e comparados com outros mecanismos existentes na literatura, mostrando assim o aumento de capacidade obtido nessas redes.

1. Introdução

As redes em malha sem fio (*Wireless Mesh Networks*-WMNs) possuem grande aplicabilidade e, como resultado é importante aumentar a máxima vazão fim-a-fim dos caminhos utilizadas pelos seus fluxos, também chamada de capacidade da rede (*bits/s*) [Zhai and Fang 2006, Chimento and Ishac 2008].

A fim de aumentar a vazão das redes em malha sem fio, a maior parte dos trabalhos relacionados [De Couto et al. 2005] consideram o uso de canais de comunicação de largura fixa (ex: 20 MHz para a tecnologia IEEE 802.11). Entretanto, existem pesquisas que mostram que o desempenho das redes sem fio pode ser melhorado ao utilizar canais de comunicação de diferentes larguras (ex: 5, 10 e 20 MHz) [Chandra et al. 2008].

Ao utilizar canais de menor largura (ex: 5MHz), é possível aumentar a capacidade da rede quando o número de enlaces disputando o espectro é grande. Em primeiro lugar, a divisão do espectro em uma maior quantidade de canais ortogonais reduz a contenção dos enlaces. Em segundo lugar, aumenta-se a eficiência espectral da rede ao utilizar transmissões paralelas em canais de menor largura. Para exemplificar, 04 canais de 5MHz podem transmitir paralelamente e em menor tempo 4 quadros, quando comparado com um único canal de 20MHz. No caso do canal de 20MHz, depende-se, serialmente, 4

*Este trabalho recebeu recursos da UFAM, FAPEAM, SECT/AM, CAPES e CNPq.

vezes os tempos de espera da camada MAC na transmissão. Em contrapartida, quando a quantidade de enlaces disputando o espectro é pequena, a melhor eficiência espectral é obtida ao utilizar os canais de maior largura [Carvalho and de Rezende 2010], uma vez que possuem maior capacidade [Yuan et al. 2007]. Outra vantagem dos enlaces estabelecidos em canais de menor largura trata-se deles possuírem maior alcance de transmissão. O alcance de transmissão de um enlace depende da mínima potência necessária para o receptor decodificar o sinal transmitido. Esta potência, chamada de sensibilidade mínima (S), é diretamente proporcional à largura do canal e, sendo assim, quanto menor a largura do canal, menor é o valor de S e consequentemente, maior o alcance de transmissão [Chandra et al. 2008, Carvalho and de Rezende 2010].

Em [Chandra et al. 2008], são realizados experimentos que mostram os efeitos de utilizar canais de diferentes larguras na vazão e alcance dos sinais transmitidos. No artigo, é desenvolvido um algoritmo de adaptação que determina a modulação e largura de canal de um enlace onde os nós são equipados com um rádio de transmissão.

Yuan et.al [Yuan et al. 2007] desenvolve um protocolo MAC (*Medium Access Control*) e algoritmo capazes de adaptar a largura de canal, frequência e tempo de transmissão de Rádios Cognitivos (CRs). Os CRs são equipados com 2 rádios, um para procurar os *white spaces* e outro para transmissão. Para isso, os autores propõem modificações ao MAC 802.11 para criar as mensagens do protocolo proposto.

Em [Carvalho and de Rezende 2010], é proposta uma métrica que gera valores utilizados para executar o roteamento e determinar a quantidade de rádios e largura de canal a serem utilizadas nos enlaces de uma WMN. No entanto, a quantidade de rádios é determinada através de um cálculo estático de capacidade e os valores da métrica não contabilizam interferências.

Neste artigo, trabalhamos em cenários de WMNs onde os roteadores podem adaptar a largura do canal de comunicação. Então, propomos uma métrica, implementada na camada de rede, e cujo objetivo é aumentar a capacidade fim-a-fim das rotas e, consequentemente, aumentar a capacidade da rede. Os valores da métrica são utilizados para se definir o roteamento dos fluxos, realizar a atribuição de canais, selecionar a largura de cada canal e escolher, em função da interferência existente, a quantidade de rádios de transmissão utilizados em cada enlace. De acordo com nossa pesquisa bibliográfica, este é o primeiro artigo a propor uma métrica cujos valores são utilizados para executar todas estas tarefas. Para avaliar a nossa proposta e comparar com outras métricas da literatura, utilizamos simulações no NS-2 nas quais é empregado o modelo de interferência físico [Augusto et al. 2010].

Para apresentar a pesquisa, o artigo é dividido nas seguintes seções. A Seção 2 apresenta trabalhos relacionados; A Seção 3 mostra a metodologia utilizada para simular canais com diferentes larguras no NS-2; Na Seção 4, apresentam-se a métrica e mecanismos propostos; Na Seção 5, a métrica e mecanismo propostos no artigo são avaliados e os resultados são comparados com os de outros trabalhos da literatura; Na Seção 6, são apresentadas as conclusões.

2. Trabalhos Relacionados

A métrica ETX (*Expected Transmission Count*) [De Couto et al. 2005] utiliza medidas das taxas de entrega de quadros no enlace direto d_f e reverso d_r . A equação $ETX =$

$1/(d_f \times d_r)$ representa a quantidade de transmissões necessárias para que em um enlace $e_{i,j}$, o quadro de dados seja recebido em j e o quadro de ACK seja recebido em i .

A métrica ETT (*Expected Transmission Time*) [Draves et al. 2004] objetiva estimar o tempo total, incluindo retransmissões, necessário para que um quadro seja transmitido e reconhecido em um enlace. Na equação $ETT = ETX \times \frac{S}{B}$, ETT é o valor da métrica para um enlace $e_{i,j}$, ETX é o valor da métrica ETX para o mesmo enlace, S e B representam, respectivamente, o tamanho e a taxa de transmissão de quadros.

A métrica WCETT (*Weighted Cumulative Expected Transmission Time*) [Draves et al. 2004] possui valor determinado para uma rota p , conforme equação $WCETT = (1 - \beta) \times \sum_{i=1}^n ETT_i + \beta \times \max_{1 \leq j \leq k} X_j$. O termo $\sum_{i=1}^n ETT_i$ representa a soma dos ETT s dos enlaces da rota. O termo $\max_{1 \leq j \leq k} X_j$, retorna a soma dos tempos de transmissão nos enlaces da rota no canal j de maior tempo de ocupação. A variável β é um parâmetro com valor no intervalo $1 \leq \beta \leq 1$, onde β com valor próximo de 1 favorece a escolha de rotas de maior capacidade e β com valor próximo de 0 determina a escolha de rotas de menor atraso.

A métrica EETT (*Exclusive Expected Transmission Time*) [Jiang et al. 2007] é calculada pela equação $EETT_l = \sum_{enlace\ i \in IS(l)} ETT_i$. O $EETT_l$ de um enlace l é resultado da soma do valor ETT_i dos enlaces i que fazem parte do Conjunto Interferente (*Interference Set*) do enlace l . Onde $IS(l)$ inclui o próprio enlace l . O valor da métrica para uma rota é dado pela soma dos $EETT$ s dos enlaces da rota.

A métrica B-MTM (*Burst per Medium Time Metric*) [Carvalho and de Rezende 2010] é calculada para um enlace físico ef^1 e possui valores dados pelo inverso da soma das capacidades de todos os enlaces e , que fazem parte do enlace físico.

3. Metodologia

Nesta seção apresentamos o modelo incorporado ao NS-2 para simular diferentes larguras de canal e os efeitos desta modelagem na vazão², capacidade³ e alcance de transmissão de um enlace.

3.1. Canais de Diferente Larguras e seus Efeitos na Vazão e Capacidade dos Enlaces

Para verificar os efeitos da utilização de diferentes larguras de canal na vazão e capacidade dos enlaces, utilizamos o NS-2.33 com suporte a múltiplos canais e múltiplos rádios (MCMR) proposto em [Calvo and Campo 2007]. Utilizando o modelo MCMR, é possível simular, por exemplo, o cenário de um enlace estabelecido através de 01 ou mais canais de comunicação. Com o modelo MCMR cada nó sem fio possui 01 instância das camadas de aplicação, transporte e rede, uma ou mais instâncias das camadas de enlace e física, onde cada camada física está associada a um canal ortogonal.

¹Conjunto de enlaces formado por um ou mais enlaces individuais e estabelecidos entre dois nós [Carvalho and de Rezende 2010]

²A taxa (*bits/s*) através da qual nenhum dos quadros transmitidos é descartado pelo receptor [Bradner 1991].

³A máxima quantidade de bits que pode ser transmitida de uma fonte e corretamente recebida pelo destino através de um enlace [Chimento and Ishac 2008].

Além disso utilizamos e implementamos modificações no MAC 802.11g de [Telecomunicazioni 2007] e no agente NOAH [EPFL-IC]. Neste último foi implementado um esquema de escalonamento onde, em um nó transmissor, cada segmento recebido da camada de transporte é encaminhado, ciclicamente pela camada de rede, para uma das instâncias da camada de enlace.

No caso do MAC 802.11g de [Telecomunicazioni 2007], foram implementadas modificações para representar as diferenças nos tempos de transmissão de quadros em canais de diferentes larguras (ex: 5, 10 e 20MHz) e modulações da camada física OFDM (ex: m54, ..., m6) [IEEE 2007]. Estas diferenças nos tempos de transmissão dos quadros se refletem em diferenças de capacidade de um enlace estabelecido entre dois nós.

As variáveis das Equações (1) a (5), com exceção da variável β , são as que aparecem codificadas na extensão de [Telecomunicazioni 2007] e com o objetivo de representar o tempo total T de transmissão e reconhecimento de uma MPDU (*MAC Protocol Data Unit*) no 802.11g, camada física OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*). A variável β , das Equações (4) e (5), é um parâmetro com valor dado por $\beta = 20\text{MHz}/w$, onde $w \in \{5, 10, 20\text{MHz}\}$ é a largura do canal de comunicação. Na determinação de β , nota-se que a medida que a largura de canal w reduz, há um aumento nos valores dos tempos de transmissão t_{DATA} e t_{ACK} , respectivamente, de um quadro de dados e de reconhecimento (*Acknowledgement*) do MAC 802.11. A introdução do parâmetro β é a alteração necessária ao MAC 802.11g de [Telecomunicazioni 2007], de maneira que sejam representados os tempos de transmissão e reconhecimento de um quadro, de acordo com a largura de canal. As demais variáveis e constantes das Equações (1) a (5) são descritas a seguir: i) t_{CW} , da Equação (2), é o tempo da janela de contenção e $t_{slot} = 20\mu\text{s}$ é o tempo de um *slot*; t_{DIFS} , da Equação (3), é o tempo de espera de um *Distributed Inter-Frame Space* e $t_{SIFS} = 10\mu\text{s}$ é o tempo de um *Short Inter-Frame Space*; t_{DATA} e t_{ACK} representam os tempos de transmissão de um quadro de dados e de um quadro de ACK e aparecem detalhadas nas Equações (4) e (5). Nestas duas últimas Equações, $t_{Pr} = 20\mu\text{s}$, $t_{sym} = 20\mu\text{s}$ e o valor 22 estão relacionados com a camada física do OFDM e representam, respectivamente, o tempo de transmissão do preâmbulo de uma MPDU, o tempo de transmissão de um símbolo OFDM e, a soma dos bits dos campos de serviço (aplicações futuras) e *tail* (delimitador de fim de quadro). Nestas mesmas equações, R é a taxa de transmissão utilizada na modulação mR (ex: a modulação m54 possui $R=54$) e $6\mu\text{s}$ é o valor de tempo chamado de *Signal Extension* com função de incluir tempo adicional de processamento ao demodulador. A variável R da Equação (5) assume sempre o valor 6, uma vez que o quadro de ACK é sempre transmitido na taxa básica do 802.11. Na Equação (4) em específico $L_{MAC} = 34\text{bytes}$ e L_{DATA} (tamanho variável) representam, respectivamente, o tamanho do cabeçalho MAC e quadro de dados da camada MAC. Na Equação (5) $L_{ACK} = 14\text{bytes}$ representa o tamanho de um quadro de ACK.

$$T = t_{CW} + t_{DIFS} + t_{DATA} + t_{SIFS} + T_{ACK} \quad (1)$$

$$t_{CW} = 8 \times t_{slot} \quad (2)$$

$$t_{DIFS} = 2 \times t_{slot} + t_{SIFS} \quad (3)$$

$$t_{DATA} = \beta \times \left[t_{Pr} + t_{sym} \cdot \left(\frac{22+8 \cdot (L_{MAC}+L_{DATA})}{4 \cdot R} \right) \right] + 6\mu s \quad (4)$$

$$t_{ACK} = \beta \times \left[t_{Pr} + t_{sym} \cdot \left(\frac{22+8 \cdot (L_{ACK})}{4 \cdot R} \right) \right] + 6\mu s \quad (5)$$

Utilizamos o NS com as configurações comentadas para simular o cenário de um enlace entre dois nós *A* e *B*. Fixou-se em $m54$ a modulação utilizada para a transmissão do quadro de dados e o tempo de simulação possuía valor igual a 400s. Neste cenário variou-se a taxa da fonte CBR (*Constant Bit Rate*) de 1 até 40Mbits/s, com o objetivo de observar o comportamento de vazão média e capacidade média do enlace, ao utilizar, respectivamente, 1, 2 ou 4 canais de 20, 10 ou 5MHz. Em cada uma das três configurações de quantidades de canais e larguras de canal simuladas, observa-se que o espectro ocupado (*EO*) possui valor igual a 20MHz. Simulamos duas configurações do cenário descrito e os resultados são apresentados nas Figuras 1(a) e 1(b). Na primeira configuração, o nó *A* utiliza fonte CBR, enquanto na segunda configuração, é utilizada uma fonte com intervalo entre geração de mensagens dado por uma função exponencial. Para ambos os tipos de fonte, as mensagens possuem tamanho de 2000 bytes.

Observa-se na Figura 1(a) que os canais de 20, 10 e 5MHz alcançam seus valores de capacidade quando a taxa da fonte CBR possui valor em torno de 22, 28 e 35Mbits/s. Na Figura 1(b) observa-se comportamento similar, sendo que as curvas são mais suavizadas e a capacidade dos canais de 20, 10 e 5MHz é alcançada com valores em torno de 20, 30 e 35Mbits/s de taxa da fonte exponencial. Estes resultados corroboram o que foi apresentado em [Carvalho and de Rezende 2010], onde é afirmado que para um mesmo valor de espectro ocupado, um conjunto de canais de menor largura possui maior capacidade que os canais de maior largura no IEEE 802.11g. Observamos em ambas as figuras que antes dos canais de 5, 10 ou 20MHz alcançarem suas capacidades, o valor de vazão é o mesmo para todos os canais e, portanto, as 03 curvas são coincidentes.

3.2. Canais de Diferente Larguras e seus Efeitos na Sensibilidade do Receptor

Na Figura 3.2 é mostrado como os valores de ruído de fundo (*Receiver Noise Floor*-RNF) e SINR (*Signal to Interference plus Noise Ratio*) vão se somando para determinar o valor de sensibilidade mínima de um rádio receptor para uma dada modulação. O nível de ruído representado pela variável RTN (*Receiver Thermal Noise*) é diretamente proporcional aos produtos da constante de Boltzman $K = 1.38 \cdot 10^{-23}$ J/K, temperatura absoluta $T0 = 290k$ e largura do canal de comunicação w . Percebe-se, portanto que quanto menor o valor de w , menor é o valor de RTN . O próximo nível de ruído é representado pela variável $RNF(dBm)$, dada pela soma de RTN e da figura de ruído NF que representa os ruídos gerados internamente pelo circuito receptor. O valor de sensibilidade mínima é dado pela soma de RNF e da razão sinal ruído $SINR_{Threshold}$ necessária para decodificar um sinal em uma certa modulação. Percebe-se na Figura 3.2 que quanto menor o valor da largura de canal, menor será o valor de sensibilidade, ou valor de potência necessária para decodificar um sinal em uma certa modulação e, sendo assim, maior poderá ser

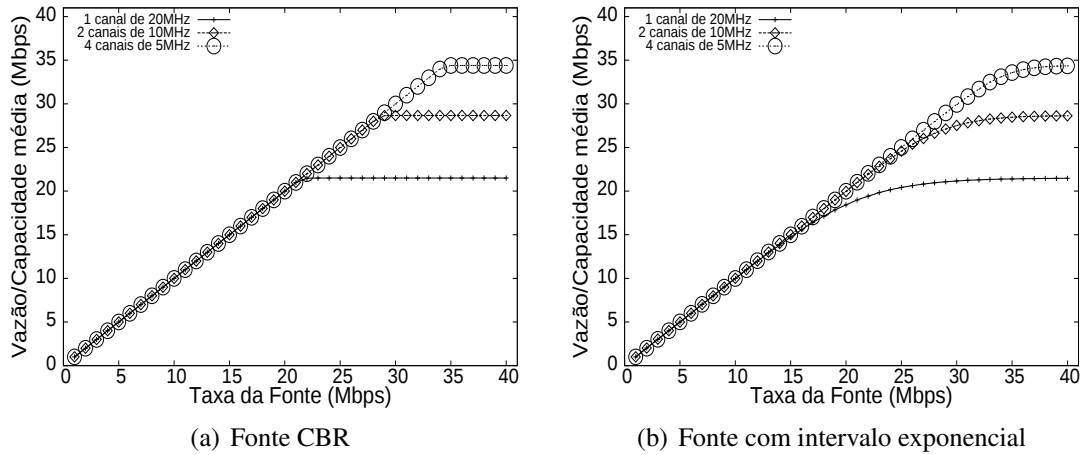


Figura 1. Vazão e capacidade de 1, 2 e 4 canais ortogonais de 20, 10 e 5MHz, respectivamente.

o afastamento entre transmissor e receptor de um enlace sem fio [Chandra et al. 2008, Carvalho and de Rezende 2010].

Nas simulações utilizamos o modelo de interferência físico [Augusto et al. 2010]. Conforme a Equação (6) é estabelecido que a probabilidade de recepção com sucesso de um quadro em um enlace e_{ij} é igual a 1, caso a razão entre a potência de recepção dos quadros do enlace ($Pr_{(i,j)}$ dada em W) e a soma das potências dos quadros de outros roteadores interferentes a j ($Pr_{(k,j)}$ em W), exceda ou seja igual ao limiar $SINR_{threshold}$. $SINR_{threshold}$ é o valor da relação entre sinal e interferência mais ruído, necessário para decodificar um sinal em uma dada modulação. Na Inequação (6), a variável $RNF_W = 10^{(RNF-30)/10}$, dada em W, possui valor que representa o valor de ruído de fundo percebido pelo receptor.

$$\frac{Pr_{(i,j)}}{\sum_{k \neq i} Pr_{(k,j)} + RNF_W} \geq SINR_{threshold} \quad (6)$$

Utilizamos, ainda, durante as simulações o mecanismo de controle de taxa RA-SINR da extensão em [Telecomunicazioni 2007]. Este mecanismo transmite quadros em um enlace, mede o valor de SINR dos quadros recebidos e compara os valores de SINR e $SINR_{threshold}$, necessário para receber um quadro em uma dada modulação. Em função desta comparação, o mecanismo determina automaticamente a taxa de transmissão que possui maior taxa de entrega de dados.

Nas simulações utilizamos o cenário de um enlace AB , onde o roteador A permanece fixo no ponto $(0, 0)$ do plano cartesiano. O roteador B é móvel, inicia seu posicionamento no ponto $(5, 0)$ e, a cada 30s, move-se 5m, terminando sua trajetória no ponto $(500, 0)$. O roteador A transmite quadros para B utilizando uma fonte CBR com taxa 10Mbps/s e ambos os roteadores possuem um único rádio de comunicação. Utilizando o padrão de posicionamento descrito e perda de propagação no meio do tipo log-distância [Rappaport 2001] com expoente de perda de propagação $n = 2.86$, executou-se uma simulação para canais com larguras 5, 10 e 20MHz.

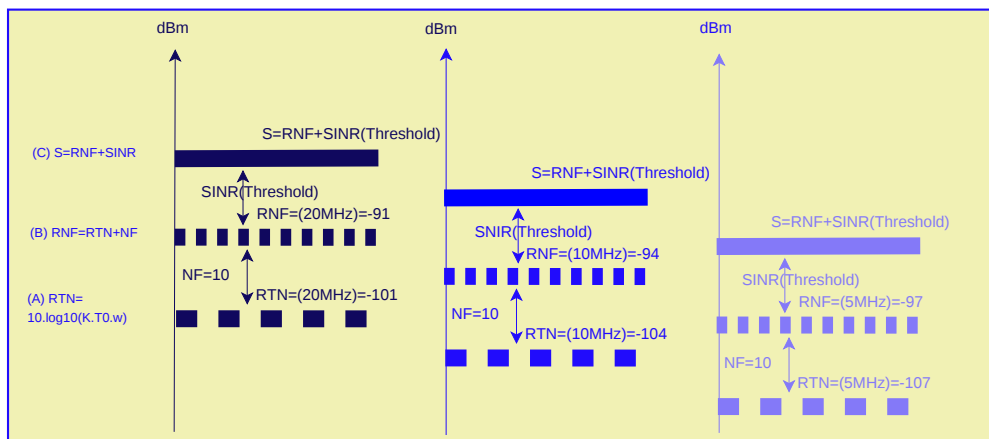


Figura 2. Sensibilidade para canais de 20, 10 e 5MHz.

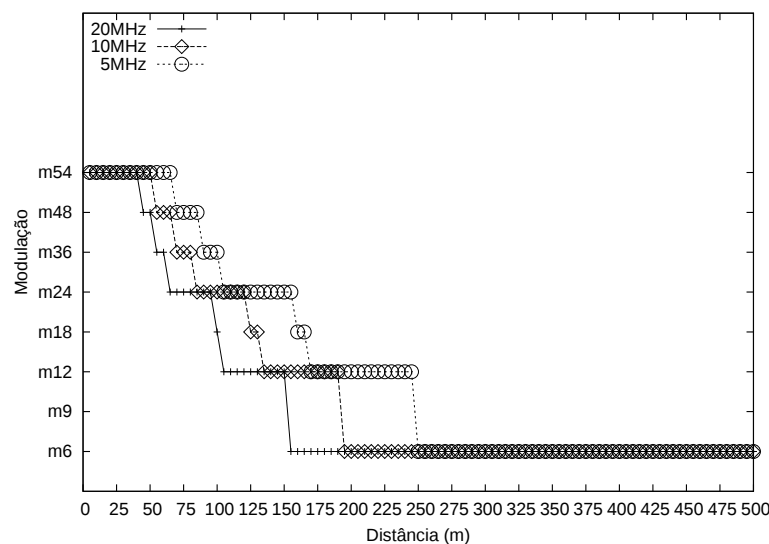


Figura 3. Distância × modulação

Observa-se na Figura 3 que com o aumento da distância entre *A* e *B*, menor é a taxa de transmissão no enlace para qualquer das larguras de canal simuladas. Na mesma figura, visualiza-se que para um dado valor de distância entre *A* e *B*, ao utilizar uma largura de canal mais estreita, emprega-se no enlace uma modulação capaz de transferir maior quantidade de bits por símbolo (ex: modulação *m24* transfere maior quantidade de bits por símbolo que a modulação *m18*), quando comparado aos canais de maior largura. Um exemplo pode ser observado para a distância de 75m. Nesta distância ao utilizar, respectivamente, as larguras de 20, 10 e 5MHz emprega-se no enlace as modulações *m24*, *m36* e *m48*.

4. Métrica e mecanismos propostos

Nas subseções a seguir explicam-se os mecanismos e métricas propostos no artigo.

4.1. Divisão e utilização do Espectro Disponível (ED)

Tal como em [Li and Zhang 2009] chama-se de enlace, todo enlace individual e_{i,j,c^w} estabelecido entre um par de nós i, j no canal c^w de largura w . Chama-se de enlace físico ef_{i,j,c^w} , ou somente ef , o conjunto formado por um ou mais enlaces individuais, estabelecidos entre os nós (i, j) , em canais de largura w . O conjunto de canais de largura w através do qual um enlace físico pode ser estabelecido é chamado de canal físico c^w . Para que um enlace físico seja estabelecido através de múltiplos canais é necessário que um par de nós i, j possua e disponibilize múltiplos rádios para se comunicarem. Para exemplificar o emprego de enlaces e canais físicos, consideremos o caso no qual o espectro disponível $ED = 40\text{MHz}$, 02 nós sem fio possuem 02 rádios de comunicação cada e podem se comunicar utilizando canais de 10MHz. Nesta situação, caso o par de nós decida utilizar apenas 01 rádio para se comunicar, ele utilizaria o ED , dividindo-o em 04 canais físicos de maneira a formar o conjunto $CF^w = \{cf^w = 1^{10}, cf^w = 2^{10}, cf^w = 3^{10}, cf^w = 4^{10}\}$. Caso o mesmo par de nós decidisse utilizar 02 rádios para comunicação no enlace, eles dividiriam o ED em 02 canais físicos $CF^w = \{cf^w = 1^{10}, cf^w = 2^{10}\}$, sendo cada canal físico composto por 02 canais individuais c^w de largura 10MHz (ex: $cf^w = 1^{10} = \{c^w = 1^{10}, c^w = 2^{10}\}$ e $cf^w = 2^{10} = \{c^w = 3^{10}, c^w = 4^{10}\}$).

4.2. Métrica MCWMR-BEETT

Na Equação (7) apresentam-se os cálculos de obtenção dos valores da métrica MCWMR-BEETT. A métrica é multi-objetivo, composta do produto de três variáveis α , β e γ , possui valor mínimo igual a 1.0 e quanto menor o seu valor, melhor é o resultado.

$$MCWMR - BEETT_{ef} = \alpha \cdot \delta \cdot \gamma \quad (7)$$

$$\alpha = \frac{Cap_{opt}}{Cap_{ef}} = \frac{(qR_{ef} \cdot L_{data} \cdot 8)/T}{\sum_{e \in ef} Cap_e} = \frac{(qR_{ef} \cdot L_{data} \cdot 8)/T}{\sum_{e \in ef} \left(\frac{8 \cdot L_{data}}{EETT} \right)} \quad (8)$$

$$\delta = \max \left(\frac{|IS(ef)|}{|CF^w|}, 1 \right) \quad (9)$$

$$\gamma = \max \left(\frac{ED}{EO}, 1 \right) = \max \left(\frac{ED}{|IS(ef)| \times qR_{ef} \times w}, 1 \right) \quad (10)$$

A variável α da Equação (7), objetiva escolher enlaces físicos de maior capacidade e é dada pela razão entre o valor de capacidade teórico Cap_{opt} de um enlace físico e a capacidade estimada Cap_{ef} para o mesmo enlace. Na Equação (8), qR_{ef} representa a quantidade de rádios utilizada no enlace físico ef , L_{data} é o tamanho do quadro e, T é o tempo de transmissão e reconhecimento de quadro em um enlace, determinado a partir da Equação (1) e que depende da modulação (utilizada a modulação m54 nos cálculos) e largura de canal $w \in \{5, 10 \text{ e } 20\text{MHz}\}$. A capacidade efetiva do enlace físico Cap_{ef} é dada pela somatória das capacidades Cap_e dos enlaces individuais e que fazem parte de ef . Cap_e é dada na Equação (8), onde a variável $EETT$ é o valor medido da métrica $EETT$ para todo enlace $e \in ef$.

O termo δ das Equações (7) e (9) é uma relação entre a quantidade de enlaces físicos interferentes ao enlace ef , representada por $|IS(ef)|$ e a quantidade de canais físicos existentes, dado pela conjunto $|CF^w|$, obtidos ao se dividir o espectro disponível

ED em um conjunto CF^w de canais físicos. Esta razão tem como objetivo escolher enlaces físicos com menor quantidade de outros enlaces físicos interferentes. O menor valor do termo δ é 1, indicando que um enlace possui no mínimo ele mesmo como interferente.

Por fim, o termo γ , das Equações (7) e (10), representa a razão entre o espectro disponível ED e o espectro ocupado EO , caso todos os enlaces físicos que fazem parte do conjunto $IS(ef)$ para o qual deseja-se calcular o valor da métrica, optem por empregar enlaces físicos com as mesmas características que ef . Na Equação (10), $|IS(ef)|$ é a quantidade de enlaces físicos do conjunto $IS(ef)$, qR_{ef} é a quantidade de rádios utilizadas no enlace físico ef e w é a largura de canal empregada neste mesmo enlace físico. O valor 1, dentro da função max do termo γ representa que todo o ED foi ocupado.

4.3. Determinação de Rotas

Na Equação (11) utilizou-se $BEETT_{ef}$ para representar o valor da métrica para um enlace físico ef e $BEETT_{Ro}$ para representar o valor da métrica para uma rota Ro .

$$BEETT_{Ro} = (1 - \beta) \times \sum_{ef \in Ro} BEETT_{ef} + \beta \times \max_{ef \in Ro} BEETT_{ef} \quad (11)$$

Tal como na métrica WCETT, β é um parâmetro ajustável com valores entre zero (0) e um (01). Na avaliação da métrica MCWMMR-BEETT utilizou-se o valor 0.5 para β . O termo $\sum_{ef \in Ro} BEETT_{ef}$ representa a soma dos valores da métrica de todos os enlaces da rota Ro . O termo $\max_{ef \in Ro} BEETT_{ef}$ representa o máximo valor da métrica para os enlaces que fazem parte da rota Ro . O primeiro termo tem como objetivo reduzir o número de saltos, uma vez que quanto maior este número, maior é o produto tempo $\times$ frequência consumido pelos enlaces da rota e, consequentemente maior é o produto tempo $\times$ frequência negado a outros enlaces. O segundo termo da Equação (11) tem o objetivo determinar a escolha de enlaces de maior capacidade.

Para determinar o valor da métrica de uma rota desenvolveu-se uma versão modificada do algoritmo de Dijkstra que recebe uma matriz $|V| \times |V| \times |CF|$ de métricas. Portanto, antes de determinar os valores da matriz de métricas, determina-se primeiro o tamanho da dimensão $|CF|$, onde CF é o conjunto de canais físicos e é dado por $CF = \cup_{w=1}^W CF^w$. A determinação do conjunto de canais físicos de largura w é realizado, conforme explicado na Seção 4.1.

5. Avaliação de Desempenho

Utilizou-se o NS-2.33 com o agente NOAH [EPFL-IC] e com as extensões MCMR de [Calvo and Campo 2007] e 802.11g de [Telecomunicazioni 2007]. Além disto, acrescentamos as seguintes funcionalidades ao simulador.

- Roteamento através de múltiplos rádios e canais e, transmissão cíclica de quadros em um enlace estabelecido através de múltiplos rádios e canais;
- Tempos de transmissão de quadros dependentes da largura de canal;
- Interferência entre canais com espectro sobreposto. Como exemplo, um $ED = 40\text{MHz}$ pode ser dividido em 2 canais $c1^{20}$ e $c2^{20}$ de 20MHz e, ainda, 4 canais de $c1^{10}$, $c2^{10}$, $c3^{10}$ e $c4^{10}$ de 10MHz. O canal $c1^{20}$ possui espectro sobreposto aos canais $c1^{10}$ e $c2^{10}$;

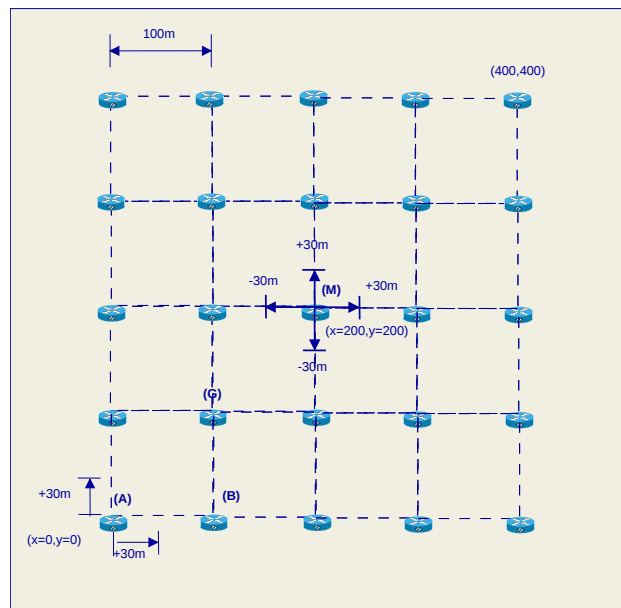


Figura 4. Cenário de avaliação

- Sensibilidade mínima dependente da largura de canal utilizada pelo rádio receptor;
- Perda de propagação log-distância;
- Métricas de roteamento ETX, ETT, WCETT, EETT, MTM e B-MTM.

Na avaliação utilizou-se o cenário da Figura 4, de uma grade 5×5 com espaçamento entre linhas de 100m e 25 nós. Em cada rodada de simulação, os nós variam em ± 30 m, em ambos os eixos X e Y , o seu posicionamento em relação a intersecção das linhas e colunas. Nesta variação evita-se que os nós da borda da grade utrassem as coordenadas com valor 0 e 400, em ambos os eixos X e Y . A variação de ± 30 m no posicionamento permite a existência de distâncias mínima $d_{MIN} = 40$ m (ex: nós A e B) e máxima $d_{MAX} = 226$ m (ex: nós G e M) de separação entre vizinhos de um (01) salto. Conforme observado na Figura 3, estes valores de distância entre roteadores permitem que a modulação utilizada em um enlace possa variar da $m54$ até a $m6$ para qualquer das larguras de canal simuladas. O objetivo do cenário em grade é simular a disposição de roteadores de uma rede em malha de um campus e a variação de posicionamento tem o intuito de simular o posicionamento de nós devido a existência de obstáculos.

Utilizou-se $ED = 60$ MHz e parâmetro $E_{MAX} = 20$ MHz que estabelece o máximo valor de espectro que um enlace físico pode ocupar. Cada roteador foi equipado com 4 rádios de comunicação e 1 rádio adicional utilizado para executar medidas e transmitir sondas nos canais de diferentes larguras. Durante as simulações foram admitidas $k = \{1, 3, 5, 7, 9\}$ demandas que geravam mensagens de tamanho 1000 bytes e que foram estabelecidas entre pares de roteadores distintos. As simulações possuíam duração de 220s, cada nova demanda foi admitida a cada 12s. Desta maneira, na configuração onde foram simuladas 9 demandas, a última foi admitida no tempo $12s \times 9 = 108s$. A cada nova demanda admitida executou-se o algoritmo de Dijkstra, para determinar a nova rota. Nos tempos de simulação igual a 120s e 220s iniciou-se e terminou-se, respectivamente, a transmissão de dados e, em seguida, executaram-se as medidas de desempenho de cada métrica. Utilizou-se fonte CBR com taxa de geração de mensagens igual a menor taxa

de transmissão dos enlaces da rota. Tal informação de taxa foi obtida na camada MAC e repassada periodicamente para a camada de aplicação. Executaram-se 30 rodadas de simulação e calculou-se a média dos resultados com intervalo de confiança de 95%.

Nas Figuras de 5(a) a 8(a), são apresentados os resultados de capacidade para cada métrica avaliada, em função da quantidade de demandas/rotas k admitidas na rede. Conforme observado nestas figuras, executaram-se simulações onde cada métrica escolheu dentre os canais de largura 5, 10 e 20MHz. Além destas, executaram-se simulações onde existia somente canais na largura de 5 ou 10 ou 20MHz. Nas Figuras de 5(b) a 8(b) são apresentados, para as simulações onde coexistem canais de 5, 10 e 20MHz, os valores de percentual do total de enlaces estabelecidos em cada largura de canal, em função da quantidade de demandas admitidas.

Na Figura 5(a), observa-se que os maiores valores de capacidade para a métrica WCETT são obtidos ao selecionar entre canais de 5, 10 ou 20MHz. Nesta situação e conforme pode ser observado na Figura 5(b), os enlaces estabelecidos utilizam a largura de 20 ou de 10MHz. Isto porque os valores da métrica WCETT determinam a seleção de enlaces que com menor tempo de transmissão fim-a-fim na rota e enlaces que utilizem canais com menor tempo de ocupação.

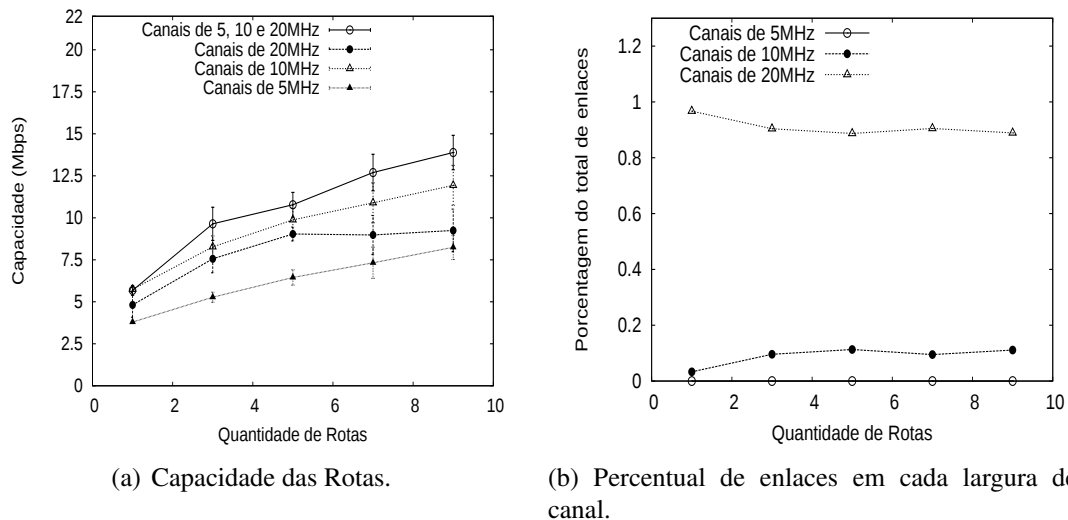


Figura 5. Resultados da métrica WCETT

Na Figura 6(b), observa-se que são escolhidos enlaces nas larguras de 10 e 20MHz quando utiliza-se a métrica EETT para selecionar a largura de canal. Isto porque os valores da métrica determinam a seleção de enlaces em canais com menor tempo de transmissão, como é o caso dos enlaces que utilizam canais de 10 e 20MHz. Com esta escolha de canais, visualiza-se na Figura 6(a) que são obtidos valores de capacidade próximos da capacidade ao utilizar somente a largura de canal de 10MHz. Na Figura 6(a), nota-se que a partir de $k = 5$ há um aumento da disputa dos enlaces pelos canais e, assim, a maior capacidade é obtida ao dividir o ED em uma maior quantidade de canais de 5MHz. A métrica *EETT* não é capaz de contabilizar a interferência entre canais com espectro parcialmente sobreposto e, sendo assim, os valores da métrica não contabilizam que com o aumento da contenção é preferível utilizar canais de 5MHz.

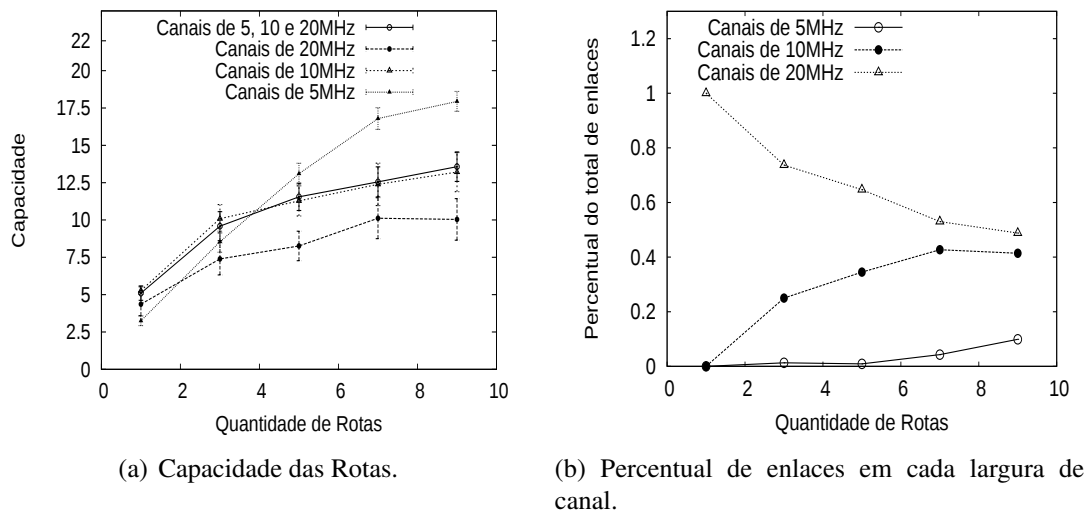


Figura 6. Resultados da métrica EETT

Na Figura 7(a), nota-se que ao utilizar os valores da métrica B-MTM para selecionar dentre canais de largura de 5, 10 e 20MHz, obtém-se valores de capacidade similares aos obtidos somente com canais de largura 10MHz. Isto porque para todas as quantidades de rotas simuladas, a métrica gera valores que determinam a escolha de canais de largura 10MHz, uma vez que estes canais são os que oferecem maior capacidade para um enlace que emprega dois rádios de saída. A utilização de canais de 10MHz pode ser constatada na Figura 7(b). Percebe-se, entretanto na Figura 7(a), que com o aumento da quantidade k de rotas e, conseqüente aumento da disputa pelos canais, que a largura de 5MHz é a que oferece maior capacidade ao utilizar a métrica.

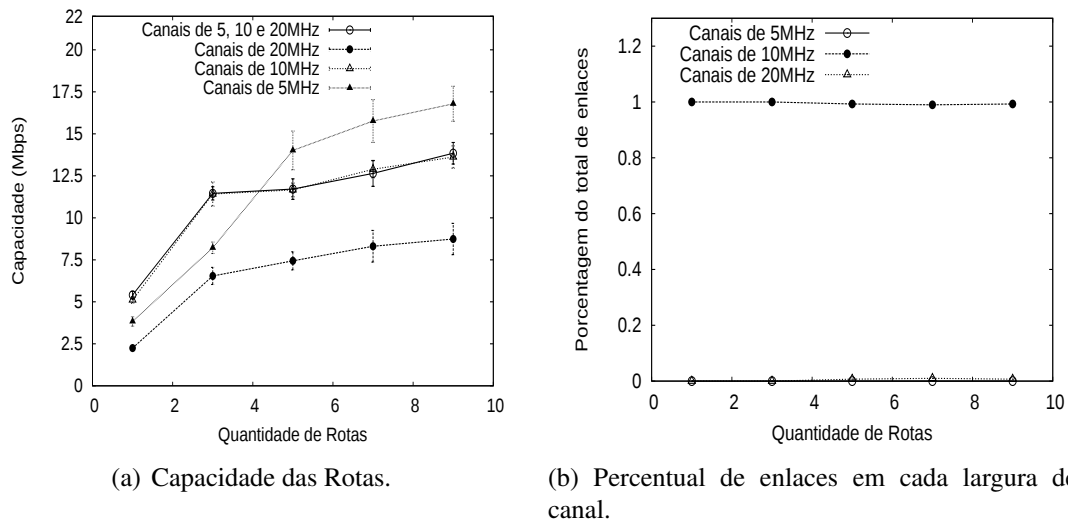


Figura 7. Resultados da métrica B-MTM

Nota-se na Figura 8(a) que os maiores valores de capacidade são obtidos ao utilizar os canais de largura 5MHz. Esta largura de canal oferece uma maior quantidade de canais ortogonais, dentro dos quais a utilização dos valores da métrica tende a distribuir

os enlaces igualmente. Ao utilizar os valores da métrica para selecionar entre as larguras de 5, 10 e 20MHz, percebe-se que há um aumento na capacidade da rede. Na Figura 8(b) percebe-se que a métrica utiliza as larguras de 5 e 10MHz para disponibilizar os maiores valores de capacidade.

Para exemplificar os ganhos de capacidade obtidos através do uso da métrica MCWMR-BEETT, compara-se, com as demais métricas, os valores de capacidade obtidos quando $k = 9$. Nesta condição, a maior capacidade ocorre quando as métricas WCETT e MCWMR-BEETT selecionam dentre as larguras de 5, 10 ou 20MHz e, quando as métricas EETT e B-MTM utilizam somente a largura de canal de 5MHz. Na situação comentada, os valores de capacidade obtidos através do uso das métricas WCETT, MCWMR-BEETT, EETT e B-MTM possuem, respectivamente, os valores 13.9, 20.6, 17.9 e 16.7Mbps/s. Neste caso, a métrica MCWMR-BEETT oferece ganho de mais de 15% quando comparada com a EETT que é a métrica que oferece o segundo maior valor de capacidade. Comparando as mesmas métricas EETT e MCWMR-BEETT com $k = 1$, e em situação similar a do exemplo anterior, onde a primeira métrica utiliza somente a largura de canal de 5MHz e a segunda métrica seleciona dentre todas as larguras de canal disponíveis, há um ganho 160% para a métrica proposta.

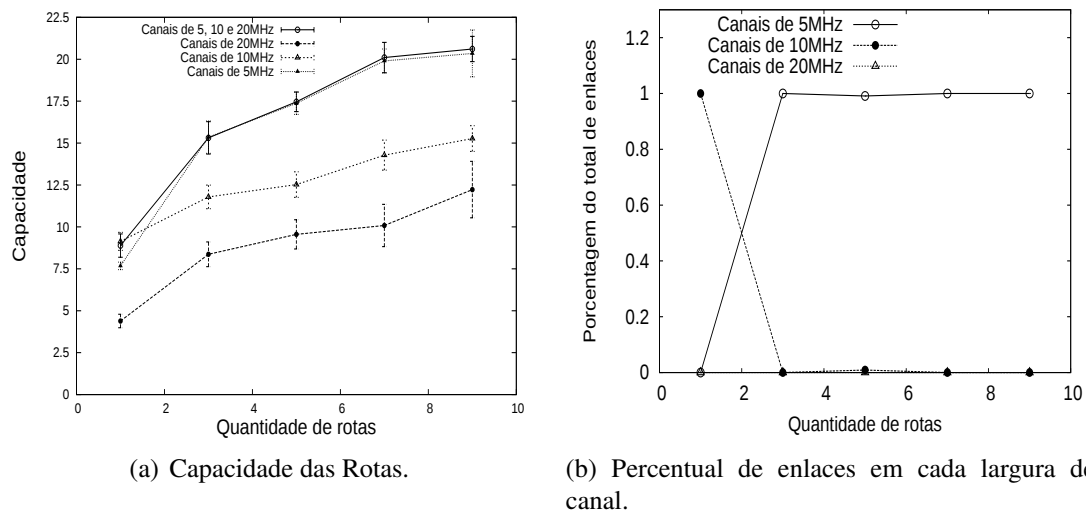


Figura 8. Resultados da métrica MCWMR-BEETT

6. Conclusão

Neste artigo propôs-se e avaliou-se, através de simulações no NS-2, a métrica denominada MCWMR-BEETT, em cenários onde existiam diferentes larguras de canal. Nas avaliações comparou-se os resultados da proposta MCWMR-BEETT com diferentes métricas para WMNs. Conforme resultados obtidos, observa-se que com a utilização da métrica MCWMR-BEETT foi possível aumentar a capacidade das redes MCMR-WMNs nos cenários estudados.

Referências

Augusto, C., Carvalho, C., da Silva, M., and de Rezende, J. (2010). Impacto do roteamento no escalonamento de enlaces em redes em malha sem fio. In *XXVIII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores, SBRC*, pages 189–202.

- Bradner, S. (1991). *Benchmarking Terminology for Network Interconnection Devices*. IETF.
- Calvo, R. A. and Campo, J. P. (2007). Adding multiple interface support in ns-2. Report, University of Cantabria, Spain. <http://personales.unican.es/aguerocr/files/ucMultiIfacesSupport.pdf> - último acesso em 21/09/2011.
- Carvalho, C. B. and de Rezende, J. F. (2010). Roteamento em redes em malha sem fio ieee 802.11 com adaptação de largura de canal. In *XXVIII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores (SBRC 2010)*, pages 161–174.
- Chandra, R., Mahajan, R., Moscibroda, T., Raghavendra, R., and Bahl, P. (2008). A case for adapting channel width in wireless networks. volume 38, pages 135–146, New York, NY, USA. ACM.
- Chimento, P. and Ishac, J. (2008). *Defining Network Capacity*. IETF.
- De Couto, D. S. J., Aguayo, D., Bicket, J., and Morris, R. (2005). A high-throughput path metric for multi-hop wireless routing. *Wireless. Networks*, pages 419–434.
- Draves, R., Padhye, J., and Zill, B. (2004). Routing in multi-radio, multi-hop wireless mesh networks. In *Proceedings of the 10th annual international conference on Mobile computing and networking, MobiCom*, pages 114–128.
- EPFL-IC. No ad-hoc routing agent (noah). <http://icapeople.epfl.ch/widmer/uwb/ns-2/noah>. - último acesso em 30/01/2012.
- IEEE (2007). Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. IEEE Standard 802.11.
- Jiang, W., Liu, S., Zhu, Y., and Zhang, Z. (2007). Optimizing routing metrics for large-scale multi-radio mesh networks. In *International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing - WiCom*, pages 1550–1553.
- Li, L. and Zhang, C. (2009). Optimal channel width adaptation, logical topology design, and routing in wireless mesh networks. volume 2009. Hindawi Corporation.
- Rappaport, T. (2001). *Wireless Communications: Principles and Practice*. Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, NJ, USA.
- Telecomunicazioni, D. G. (2007). dei80211mr library for the network simulator 2. <http://telecom.dei.unipd.it/pages/read/58/> - último acesso em 19/12/2011.
- Yuan, Y., Bahl, P., Chandra, R., Chou, P. A., Ferrell, J. I., Moscibroda, T., Narlanka, S., and Wu, Y. (2007). Knows: Kognitiv networking over white spaces. In *Proceedings of IEEE DySPAN 2007*.
- Zhai, H. and Fang, Y. (2006). Impact of routing metrics on path capacity in multirate and multihop wireless ad hoc networks. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Network Protocols*, pages 86–95.