

Capacidade de redes *ad hoc* e *mesh* sem fio

Fabício Lira Figueiredo, Paulo Cardieri e Álvaro Augusto Machado de Medeiros

Resumo— Este artigo apresenta um método semi-analítico para o dimensionamento de capacidade de redes *ad hoc* e *mesh* sem fio. A partir de um modelo analítico que representa o comportamento das camadas física, de enlace de dados e de roteamento, é construída uma ferramenta de simulação estatística que provê métricas relacionadas à capacidade destas redes. São apresentados exemplos de aplicação do método, calculando a capacidade por nó em função de parâmetros como densidade de *gateways* e raio de cobertura, bem como o posicionamento ótimo dos *gateways*. Ao final, uma metodologia de dimensionamento utilizando o método é proposta.

Palavras-Chave— Redes *Ad hoc*, Redes *Mesh* Sem Fio, Capacidade.

Abstract— This article presents a semi-analytical method for capacity dimensioning of wireless *ad hoc* and *mesh* networks. From an analytical method that represents the physical, MAC and routing layers, a statistical simulator is designed, which provides metrics related to capacity. Examples of application of the proposed method are presented. Finally, a dimensioning methodology based on the proposed method is proposed.

Keywords— *Ad hoc* Networks, Wireless Mesh Networks, Capacity.

I. INTRODUÇÃO

O dimensionamento da capacidade de redes *ad hoc* ou *mesh* sem fio tem sido importante objeto de pesquisa nos últimos anos. Além dos aspectos teóricos, a construção de metodologias consistentes para a estimativa de capacidade tem grande relevância prática, pois tem aplicação direta na implantação e otimização destas redes.

Diversas abordagens têm sido adotadas para investigar este tema específico em redes *ad hoc* e *mesh* sem fio, cujo objetivo principal é determinar limites teóricos superiores e inferiores de capacidade, em diferentes condições. Estes resultados refletem principalmente uma relação entre capacidade e algum parâmetro de interesse, como, por exemplo, o número de nós. Contudo, se baseiam em um conjunto de

premissas que muitas vezes não se aplicam em cenários reais. Em [1], mostra-se que, para nós estáticos e agendamento ideal de transmissões, a taxa de transmissão por nó é limitada por uma função inversamente proporcional à raiz quadrada do número de nós. Resultados similares baseado em simulação são apresentados em [2]. Também através de simulações, os limites de capacidade das redes *mesh* são estudados em [3]. Tal estudo indica que o limite da capacidade total da rede decai com o inverso da quantidade de nós, o que é um resultado pior do que aquele apresentado em [1], visto que o tráfego das redes *mesh* originam ou terminam em um *gateway*. Em [4], são analisadas as interações entre as camadas física (PHY) e de acesso ao meio (MAC) para estimar a vazão de todas as transmissões simultâneas para, então, somá-las, resultando na capacidade total.

Neste artigo é apresentado um modelo para o dimensionamento de capacidade de redes *ad hoc* e *mesh* sem fio, baseado em uma abordagem semi-analítica. A partir de um modelo analítico que representa o comportamento das camadas física, de enlace de dados e de roteamento em topologias *ad hoc* e *mesh*, é construída uma ferramenta de simulação estatística que provê métricas relacionadas à capacidade destas redes. Esta abordagem elimina a necessidade de adoção de ferramentas de simulação a eventos discretos, permitindo a obtenção de resultados mais gerais com menor esforço computacional. O modelo é validado através de comparações com uma ferramenta de simulação a eventos discretos. São apresentados também resultados de análise do comportamento da rede quando são inseridos os *gateways* para o escoamento do tráfego e considerando as localizações destes na malha de nós que proporcionam a máxima capacidade para os usuários.

II. MODELO DE ESTIMAÇÃO DA CAPACIDADE

O modelo proposto neste artigo para o dimensionamento de capacidade de redes *ad hoc* e *mesh* sem fio busca representar a estrutura de múltiplas camadas referente à arquitetura de protocolos destas redes, que compreende a camadas física, de enlace de dados, de roteamento e de tráfego. O modelo baseia-se em um algoritmo

· Fabício L. Figueiredo e Álvaro A. M. de Medeiros, Gerência de Comunicações Sem Fio, Fundação CPqD, Rod. SP-340, km 118,5, Campinas – SP, 13086-902, email: [fabricio.amachado]@cpqd.com.br. Paulo Cardieri, Wireless Technology Laboratory (Wisstek) DECOM/FEEC/UNICAMP – C.P. 6101, Campinas – SP, 13081-970, e-mail: cardieri@wisstek.org. Este trabalho foi financiado pela Fundação CPqD e FUNTTEL. O trabalho de Paulo Cardieri foi parcialmente financiado pelo CNPq Proc. No. 312535/2006-6.

que permite dimensionar a máxima capacidade por usuário G_{max} que pode ser proporcionada em uma dada topologia \mathfrak{J} , para uma determinada densidade de nós e *gateways*. O modelo proposto compreende as seguintes entradas:

- Número e localização de nós e *gateways* na área a ser coberta pela rede;
- Parâmetros da interface de rádio, em conformidade com o padrão IEEE 802.11 [5];
- Comprimento em bits dos pacotes de dados e de sinalização;
- Caracterização de protocolos de roteamento *ad hoc* (opcional).

A seguintes saídas são fornecidas pelo modelo:

- Identificação de nós ou enlaces sobrecarregados (gargalos);
- A máxima banda disponível por usuário para garantir disponibilidade do serviço, considerando cenários de pior caso;
- Variação da capacidade com o número de nós e o número de *gateways*;
- Posicionamento dos *gateways* que maximiza a banda disponível por usuário;
- Dimensionamento de quantidade e capacidade dos *gateways*;
- Comprimento médio das rotas estabelecidas.

Os principais passos do algoritmo são descritos a seguir. Antes, porém, algumas definições se fazem necessárias:

- ρ_n : densidade de nós distribuídos uniformemente em uma área, em nós/km²;
- N : número de nós distribuídos uniformemente em uma área A , dado por $\rho_n A$;
- \vec{P}_n : matriz composta pelas coordenadas (x,y) dos nós $\{n_i\}_{i=1}^N$ da topologia, de dimensão $N \times 2$;
- ρ_{gw} : densidade de *gateways* distribuídos em uma área, em *gateways*/km²;
- N_{gw} : número de *gateways* distribuídos uniformemente em uma área A , dado por $\rho_{gw} A$;
- \vec{P}_{gw} : matriz composta pelas coordenadas (x,y) dos *gateways* $\{gw_i\}_{i=1}^{N_{gw}}$ da topologia, tendo dimensão $N_{gw} \times 2$.

A. Cálculo da Matriz de Conectividade

O primeiro passo do algoritmo consiste em determinar a matriz de conectividade $C = \{c_{ij}\}_{i,j=1}^N$, que

representa a existência de enlaces entres os nós da topologia. Os elementos c_{ij} são definidos como:

$$c_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se } Pr_{ij} \geq Pr_{sens} \\ 0, & \text{se } Pr_{ij} < Pr_{sens} \end{cases}, \quad (1)$$

em que Pr_{ij} é a potência no receptor do nó n_j considerando transmissão a partir do nó n_i , e Pr_{sens} corresponde à sensibilidade de recepção, definida em conformidade com o padrão IEEE 802.11. A potência Pr_{ij} recebida no nó destino n_j do sinal transmitido pelo nó n_i é calculada com base na perda no sistema Ls_{ij} , a qual é estimada com base em um modelo que caracterize o ambiente de propagação, resultando em

$$Pr_{ij} = Pt_i + Gs_{ij} - Ls_{ij} \text{ [dBm]},$$

em que Gs_{ij} é o ganho total do sistema.

B. Construção de conjunto de *gateways* candidatos

Em seguida, visando minimizar a complexidade do algoritmo, é pré-estabelecido um conjunto de *gateways* candidatos \vec{P}_{gwc} , sobre o qual será realizada a busca pelo sub-conjunto ótimo de *gateways* \vec{P}_{gw} , que maximiza a capacidade da rede. Para tanto, a área A da topologia é particionada em N_{sa} sub-áreas disjuntas e iguais, resultando no conjunto $\{A_i\}_{i=1}^{N_{sa}}$. Para cada sub-área A_i , um único nó é selecionado dentre os nós que pertencem a esta região como *gateway* candidato gw_i . Vários critérios podem ser utilizados para selecionar o nó candidato, mas foi verificado, através de simulações, que o critério de máxima conectividade proporciona uma boa estratégia para se obter a capacidade máxima por usuário G_{max} do sistema. O critério de máxima conectividade é descrito por $gw_i = \arg \max_{\forall n \in A_i} |\vec{V}_1(n)|$ em que $\vec{V}_1(n)$ é um vetor contendo os identificadores dos nós vizinhos imediatos do nó n e $|\vec{V}_1(n)|$ é o número de elementos de $\vec{V}_1(n)$. O conjunto de *gateways* candidatos é definido como $\vec{P}_{gwc} = \{\vec{P}_{gw_i}\}_{i=1}^{N_{gwc}}$, em que N_{gwc} corresponde ao número de conjuntos candidatos não nulos, sendo, portanto, menor ou igual a N_{sa} .

C. Construção Matriz de Rotas

Este passo do algoritmo consiste em construir a matriz de rotas $R(\vec{P}_n, \vec{P}_{gwc})$ da topologia, cujas linhas correspondem a um vetor que representa o caminho entre os nós \vec{P}_n e os *gateways* candidatos \vec{P}_{gwc} , a qual é definida por

$$R(\bar{p}_n, \bar{p}_{gw}) = \left\{ \bar{r}_k \left(\left[\bar{p}_n \right], \left[\bar{p}_{gw} \right] \right) \right\}_{k=1}^{N_r}, \quad (2)$$

em que $\left[\bar{p}_n \right]$ e $\left[\bar{p}_{gw} \right]$ representam os elementos dos vetores \bar{p}_n e \bar{p}_{gwc} , respectivamente, $\bar{r}_k(n_s, n_d)$ é uma rota entre os nós n_d e n_s , N_r é o número total de rotas entre os nós de \bar{p}_n e \bar{p}_{gwc} . A rota $\bar{r}_k(n_s, n_d)$ pode ser expressa como uma seqüência de nós ou enlaces, de acordo com o formato

$$\bar{r}_k(n_s, n_d) = [n_s, n_1, \dots, n_{L-1}, n_d] = [l_{s n_1}, l_{n_1 n_2}, \dots, l_{n_{L-1} n_d}], \quad (3)$$

em que n_i corresponde ao i -ésimo nó intermediário da rota e $l_{n_i n_j}$ corresponde ao enlace entre os nós n_i e n_j .

Uma rota $\bar{r}(n_s, n_d, C)$ é definida como o caminho ótimo entre os nós n_s e n_d , segundo uma métrica de roteamento específica e sobre uma topologia com matriz de conectividade C . Um critério típico é o caminho mais curto (*shortest-path*), que é tipicamente empregado por protocolos de roteamento do tipo *link-state* [7]. Outro critério corresponde ao caminho de menor atraso, normalmente usado por protocolos reativos [7], isto é

$$\bar{r}(n_s, n_d, C) = \arg \min_{\bar{r}_i(n_s, n_d, C)} \delta(\bar{r}_i(n_s, n_d, C)), \quad (4)$$

em que $\delta(\bar{r})$ corresponde ao atraso fim-a-fim sobre uma rota \bar{r} , calculado como a soma dos atrasos dos enlaces que a compõem, usando

$$\delta(\bar{r}) = \delta_s + \delta_d + \sum_{k=1}^{L-1} \delta(n_k) + \sum_{k=1}^{L-2} \delta(l_{n_k n_{k+1}}), \quad (5)$$

em que δ_s é o atraso no nó origem, δ_d é o atraso no nó destino, $\delta(n_k)$ é o atraso no nó n_k e $\delta(l_{n_k n_{k+1}})$ é o atraso de propagação no enlace $l_{n_k n_{k+1}}$.

Visando simplificar a busca das rotas, adotou-se um critério do menor atraso simplificado, considerando apenas o atraso de propagação nos enlaces. Neste caso, a busca pela rota ótima se baseia no algoritmo de Dijkstra, aplicado sobre a matriz de atraso de propagação D , definida por $D = \left\{ \delta_{ij} \right\}_{i,j=1}^N$,

em que

$$\delta_{ij} = \begin{cases} d_{ij} / c, & \text{se } c_{ij} = 1 \\ 0, & \text{se } c_{ij} = 0 \end{cases}, \quad (6)$$

no qual c corresponde à velocidade de propagação da onda de rádio e d_{ij} é a distancia entre os nós n_i e n_j .

D. Aplicação do método de Monte Carlo

Uma vez definida a matriz de rotas $R(\bar{p}_n, \bar{p}_{gw})$, o próximo passo do algoritmo consiste em realizar uma busca pelo conjunto ótimo de *gateways* \bar{p}_{gw}^* que maximiza a capacidade suportada por usuário para uma topologia de matriz de conectividade C , sendo a capacidade máxima G_{max} expressa por

$$G_{max} = \max_{\bar{p}_{gw} \in \bar{p}_{gwc}} G(\bar{p}_{gw}, \bar{p}_n, C), \quad (7)$$

em que $G(\bar{p}_{gw}, \bar{p}_n, C)$ é a taxa de transmissão por nó. Neste caso, o conjunto \bar{p}_{gw}^* é determinado por

$$\bar{p}_{gw}^* = \arg \max_{\bar{p}_{gw} \in \bar{p}_{gwc}} G(\bar{p}_{gw}, \bar{p}_n, C). \quad (8)$$

A determinação da capacidade $G(\bar{p}_{gw}, \bar{p}_n, C)$ se baseia no método proposto em [3] e está descrita em [7]. Em linhas gerais, a determinação de $G(\bar{p}_{gw}, \bar{p}_n, C)$ consiste em encontrar o enlace gargalo da topologia e a taxa máxima que este suporta. Para estimar a capacidade G_{max} , realiza-se, portanto, uma busca com restrições sobre todas as possíveis combinações de posicionamento de *gateways* em uma dada topologia, considerando que os *gateways* deverão ser posicionados apenas em localizações onde está prevista a presença de um nó de usuário. O pseudo-código pode ser encontrado em [7], e não é reproduzido aqui por restrições de espaço.

Finalmente, adota-se o método de Monte Carlo para calcular a capacidade média G_m , sobre um conjunto de topologias $\{T_i\}_{i=1}^M$ com nós e *gateways* aleatoriamente distribuídos, em função da densidade de *gateways* e nós nesta área, isto é

$$G_m(\rho_n, \rho_g) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M G_{max}(\bar{p}_n, \bar{p}_g, C_i), \quad (9)$$

em que, ρ_g é a densidade de *gateways*, M é a quantidade total de topologias, C_i é a matriz de conectividade da i -ésima topologia.

III. VALIDAÇÃO DO MODELO

A validação do modelo de dimensionamento de capacidade proposto foi realizada através da comparação com resultados obtidos através da ferramenta de simulação de redes NS-2. Para tanto, adotaram-se os cenários de topologia aleatória descritos na Tabela I, que compreendem topologias de 25, 50 e 100 nós, com 1, 3 e 5 *gateways* posicionados de forma a maximizar a capacidade da rede. O número de topologias foi considerado de modo a garantir um intervalo de confiança de 90%.

Os resultados obtidos estão mostrados na Figura 1, para a capacidade por nó G_m . Observa-se a boa concordância dos resultados gerados através do modelo, com valores obtidos com a ferramenta NS-2. Pode-se ainda verificar a diminuição da capacidade com o aumento do número de nós, que é mais acentuada quanto maior o número de *gateways*, indicando que em topologias menos densas, obtém-se maior ganho de capacidade com o aumento da quantidade de *gateways*.

TABELA I
CENÁRIOS DE VALIDAÇÃO DO MODELO DE CAPACIDADE.

Número de nós	25, 50 e 100
Número de <i>gateways</i>	1,3 e 5
Área de simulação	2,5 km x 2,5 km
Número de topologias	15
Tempo de simulação	300s
Modelo de propagação	<i>Two-Ray Ground</i>
Raio de cobertura	750 m
Potência de transmissão	20 dBm
Protocolo de roteamento	DSR
Protocolo MAC	IEEE 802.11b
Modelo de Tráfego	<i>Constant Bit Rate (CBR)</i>
Taxa de transmissão (PHY)	11 Mbps

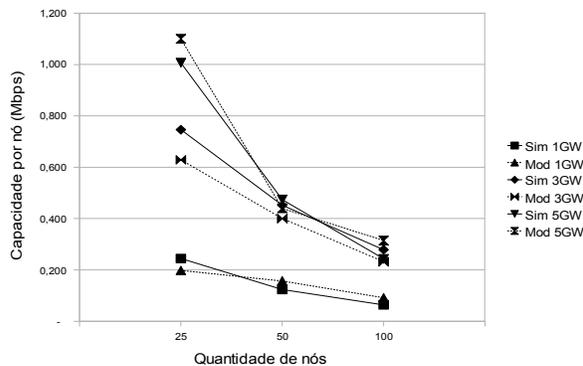


Fig. 1 - Comparação entre resultados obtidos através do modelo proposto e da ferramenta NS-2 para a capacidade por nó G_m .

IV. ANÁLISE DA CAPACIDADE

Para análise da capacidade, utilizou-se o cenário descrito na Tabela I. Contudo, foi adotado como parâmetro, a densidade de nós da rede, visando eliminar a dependência em relação à área de topologia. Para tanto, no método de Monte Carlo descrito na Seção II, foram utilizadas 10 topologias aleatórias com diferentes áreas para cada densidade de nós. Esta abordagem foi adotada para evitar a dependência de um valor específico de área ocupada pela topologia, permitindo a adoção da densidade de *gateways* como parâmetro único de análise. Os valores para as densidades de nós utilizados foram 7,5; 12,5; 25; 37,5; 50 nós/km².

A. Impactos do aumento da densidade de gateways

A quantidade de *gateways* em uma rede *mesh* sem fio tem impacto significativo na capacidade média disponibilizada a cada usuário (G_m) [3], sendo, portanto, um parâmetro essencial no dimensionamento da rede. A Figura 2 ilustra os resultados obtidos para

capacidade média G_m em função do número de *gateways*, adotando a densidade de nós como parâmetro. Observa-se que, independentemente da densidade de nós, o aumento da densidade de *gateways* não implica no aumento de G_m na mesma proporção. De fato, independentemente da densidade de nós na rede, existe um valor de densidade de *gateways* a partir do qual um aumento nesta densidade não resulta em um aumento significativo da capacidade por nó. Deste modo, existe um número suficiente de *gateways* que permite aproximar a capacidade máxima do sistema, o qual pode ser adotado para minimizar os custos de implantação, isto é, uma quantidade ótima de *gateways*. Isso se deve ao fato de que, ao aumentar a quantidade de *gateways*, tem-se inicialmente uma redução no tráfego transportado por cada *gateway*. Porém, a partir de uma certa densidade de *gateways*, começa a haver sobreposição entre os respectivos domínios de colisão, que impede o aumento da capacidade por nó G_m .

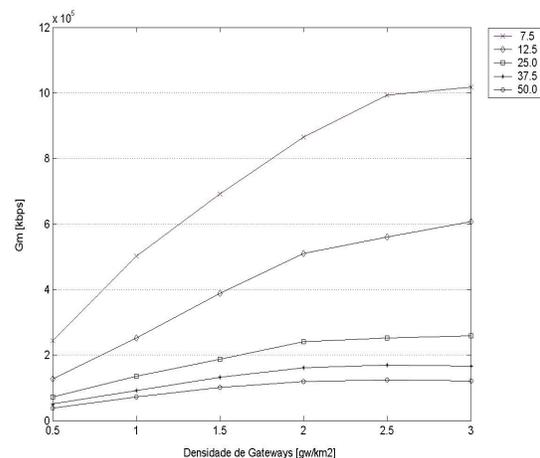


Fig. 2 - Capacidade G_m por usuário em função densidade de *gateways*, para diferentes densidades de nós.

A Figura 3 ilustra a relação entre a capacidade máxima por usuário obtida para o posicionamento e a quantidade ótimos de *gateways*, sendo esta extraída do gráfico mostrado na Figura 2, e a densidade de nós. A Figura 3 também mostra uma curva de aproximação para a curva obtida pela simulação, dada pela expressão

$$G_{\max}^* = \frac{7,4}{\rho_n}, \quad (10)$$

em que G_{\max}^* é a capacidade máxima expressa em Mbps e ρ_n corresponde à densidade de nós, considerando distribuição uniforme em uma área. Portanto, é possível concluir que G_{\max}^* obedece a

seguinte relação $G_{\max}^* \propto 1/\rho_n$, que coincide com a relação descrita em [3] e confirma a consistência dos resultados obtidos.

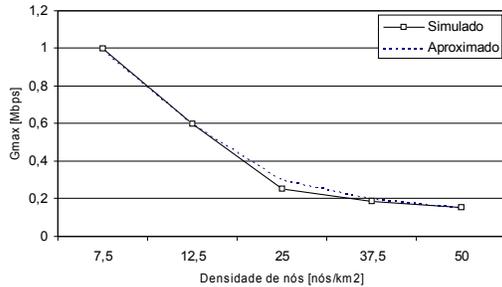


Fig. 3 - Capacidade máxima simulada e aproximada em função da densidade de nós, para número ótimo de *gateways*.

B. Posicionamento de *gateways*

Com base no algoritmo descrito na Seção II, é possível determinar a posição dos *gateways* que maximiza a banda G_m disponível aos usuários. Para exemplificar os resultados gerados, foram considerados cenários com cinco *gateways* em uma topologia de 50 nós. A Figura 4 ilustra a posição ótima dos *gateways* (nós 3, 7, 21, 34 e 44). Observa-se que os *gateways* são posicionados de modo a maximizar o número de nós cobertos e se concentram nas regiões com maior densidade de nós, de modo a minimizar a tendência de maior congestionamento dos domínios de colisão nestas áreas. Conclui-se, portanto, que o posicionamento ótimo dos *gateways* tende a minimizar a sobrecarga dos domínios de colisão da rede, de modo que as regiões com maior densidade de nós concentrem a maior parte dos *gateways* disponíveis.

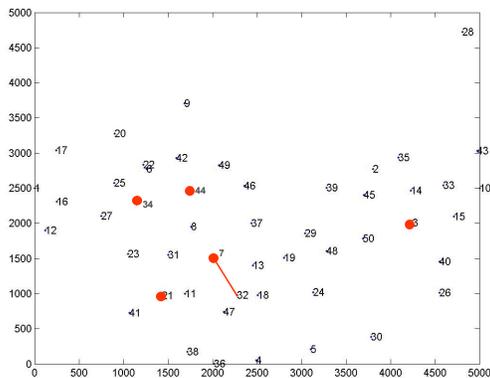


Fig. 4 - Posicionamento ótimo de *gateways* e enlace gargalo em uma topologia de 50 nós.

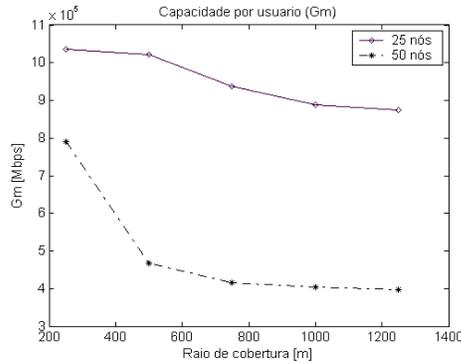
C. Identificação de enlaces congestionados

A determinação dos enlaces gargalo constitui uma importante etapa no planejamento e otimização da rede, pois permite determinar com antecedência os prováveis pontos de congestionamento da rede, possibilitando a adoção de medidas para prevenir ou

minimizar a ocorrência de congestionamento. Através do modelo de capacidade proposto, são determinados os enlaces com maior volume de tráfego da rede, que representam gargalos para o escoamento do tráfego. Por exemplo, a Figura 4 mostra o enlace de maior congestionamento naquela topologia de 50 nós (linha entre nós 7 e 32). O nó gargalo sempre pertence ao domínio de colisão de um dos *gateways*, como é característico de redes *mesh*, visto que o *gateway* é origem ou destino de todo o tráfego da rede.

D. Impacto do raio de cobertura

O raio de cobertura de cada nó representa um fator de grande relevância no comportamento de uma rede *ad hoc* ou *mesh* sem fio, pois tem impacto direto no comprimento das rotas a serem estabelecidas. Visando quantificar este impacto em topologias de menor densidade de nós, adotou-se um cenário de simulação com grade de 2,5 km x 2,5 km e três *gateways*. Os demais parâmetros são aqueles descritos na Tabela 1. A Figura 5 ilustra os resultados obtidos para topologias de 25 e 50 nós, considerando raios de 300 m, 500 m, 750 m, 1000 m e 1250 m. Observa-se que a capacidade por usuário G_m diminui com o aumento do raio de cobertura, seguida de uma estabilização. O aumento do raio de cobertura leva ao aumento do carregamento dos domínios de colisão, devido ao aumento da disputa pelo meio em enlaces CSMA/CA, resultando na redução de G_m . Por outro lado, o aumento dos raios de cobertura dos nós provoca a redução do comprimento das rotas, o que contribui para o aumento da capacidade G_m . Para valores elevados de raio de cobertura, observa-se que ocorre uma compensação dos dois efeitos, resultando na estabilidade observada de G_m . A redução da capacidade em uma topologia com maior densidade de nós tende a ser bem mais abrupta, devido à maior intensidade do efeito de congestionamento dos domínios de colisão. De fato, a Figura 5 indica que para raios de cobertura acima de 500 m, a capacidade G_m corresponde praticamente à metade da observada para raios abaixo de 500 m no caso das topologias com 50 nós. No caso das topologias de 25 nós, observa-se uma menor redução da capacidade com o aumento da cobertura.

Fig. 5 - Capacidade G_m em função do raio de cobertura por nó.

V. METODOLOGIA DE PLANEJAMENTO

A partir dos resultados descritos nas seções anteriores, propõe-se nesta seção uma metodologia para o planejamento de redes *ad hoc* sem fio com foco na maximização da capacidade disponível aos usuários. A metodologia consiste no conjunto de procedimentos descritos a seguir.

Inicialmente, deve-se realizar um levantamento da quantidade e posicionamento dos nós fixos da rede, bem como da área total a ser coberta pela rede. A partir deste levantamento, são obtidas informações como a densidade de nós e a cobertura média necessária para cobrir as regiões de interesse.

Em seguida, os parâmetros que caracterizam o sistema de transmissão a ser adotado são levantados, correspondendo às entradas necessárias para o modelo de simulação de capacidade. São necessários: modelo de propagação, sensibilidade do receptor, raio de cobertura, frequência de operação, potência de transmissão, ganho da antena de transmissão, ganho da antena de recepção, altura das antenas transmissora, e receptora.

A seguir, estima-se a demanda de tráfego de cada nó da rede, bem como da caracterização dos níveis de qualidade de serviço (QoS), identificando os tipos de tráfego, e definindo critérios de QoS, como perda de pacotes e jitter. Os parâmetros que caracterizam a demanda de tráfego são tipicamente a taxa de chegada de pedidos, taxa de envio e o grau de utilização.

Dimensiona-se então a quantidade e determina-se as posições dos *gateways*, procurando garantir capacidade e cobertura. A quantidade de *gateways* para a máxima capacidade é encontrada através da Figura 2. Se esta quantidade não for suficiente para garantir que todos os nós tenham pelo menos uma rota até o *gateway*, novos *gateways* são adicionados.

Uma vez definida a quantidade e o posicionamento dos *gateways*, deve-se estimar a vazão a ser suportada pelos enlaces concentradores (*backhaul*) de cada *gateway*. Contudo, observando a relação entre as densidades de nós e *gateways*, pode-se também obter

uma estimativa de vazão média por *gateway* (S_{GW}) através da equação:

$$S_{GW} = \frac{\rho_n \cdot v_u}{\rho_{GW}} G_m, \quad (11)$$

em que ρ_n é a densidade de nós, v_u é o fator de utilização e ρ_{GW} é a densidade de *gateways* da topologia.

VI. CONCLUSÕES

As redes *ad hoc* e *mesh* sem fio apresentam diversas características que dificultam o dimensionamento de capacidade. Através do modelo de capacidade proposto neste artigo, foram construídas curvas de referência para o dimensionamento da capacidade média por nó em redes *ad hoc* e *mesh* sem fio, em função da densidade de nós, da densidade de *gateways*, do raio de cobertura por nó, do perfil de usuários e dos serviços e do comprimento médio das rotas. Com base no algoritmo proposto, podem ainda ser determinados o posicionamento ótimo dos *gateways* e os enlaces gargalo de uma topologia específica, bem como os impactos sobre a capacidade média por usuário suportada.

Em comparação com outras abordagens, a metodologia proposta simplifica significativamente a obtenção de estimativas preliminares de capacidade em redes *ad hoc* e *mesh* sem fio, na medida em que minimiza a necessidade de simulações pelo emprego de uma família de curvas de capacidade construída, que poderá ser estendida através de novas simulações para ampliar sua abrangência.

VI. REFERÊNCIAS

- [1] P. Gupta e P. R. Kumar, "The Capacity of Wireless Networks", *IEEE Trans. on Information Theory*, vol. 46, no. 2, pp. 388–404, Março 2000.
- [2] J. Li, C. Blake, D. de Couto, H. Lee e R. Morris, "Capacity of *Ad hoc* Wireless Networks", *Proceedings of 7th MobiCom*, pp. 61–69, 2001.
- [3] J. Jun e M. L. Sichitiu, "The Nominal Capacity of Wireless *Mesh* Networks". *IEEE Wireless Communications*, vol. 10, no. 5, pp. 8–14, Outubro 2003.
- [4] M. M. Carvalho e J.J. Garcia-Luna-Aceves, "A Scalable Model for Channel Access Protocols in Multihop *Ad hoc* Networks", *Proceedings of the 10th MOBICOM*, pp. 330–344, Setembro 2004.
- [5] IEEE Standard 802.11-2007. *IEEE Standard - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications*; Junho 2007.
- [6] Simulador de Redes NS-2, <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>.
- [7] F.L. Figueiredo, *Capacidade e Roteamento em Redes Metropolitanas Sem Fio Híbridas*, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, UNICAMP, Tese de Doutorado; Dezembro 2008.