

# Aspectos do Dimensionamento de Capacidade de Redes Ad Hoc Sem Fio

Heloísa Peixoto de Barros Pimentel, Fabrício Lira Figueiredo e José Antônio Martins

**Resumo**—O objetivo deste trabalho é apresentar uma visão geral dos fatores que influenciam a capacidade das redes ad hoc. São descritas as características destas redes, e por que estas concorrem para a dificuldade no dimensionamento das mesmas. Também são apresentados os aspectos que influenciam a capacidade máxima que pode ser obtida de uma rede ad hoc, como devem ser considerados no projeto e o que tem sido proposto como soluções ou maneiras de equacionar cada questão.

**Palavras-Chave**—Redes Ad Hoc Sem Fio, capacidade

**Abstract**—The aim of this work is to present an overview of the issues that have an influence on the ad hoc networks capacity. The ad hoc networks' characteristics are described and it is mentioned why any of them can change the dimensioning of the final capacity to be obtained. Next we present the factors that have a key role on the maximum capacity that can be achieved from an ad hoc network, the way they have to be accounted on the design of the system and the solutions and approaches that have been used for each issue.

**Keywords**—wireless ad hoc networks, capacity

## I. INTRODUÇÃO

Ad hoc é uma expressão original do latim, freqüentemente usada em textos jurídicos para atribuir a um substantivo uma finalidade específica: para isto, para um determinado ato, investido em função provisória, para um fim especial. No campo de Teoria da Informação, rede ad hoc é aquela em que os dispositivos comunicam-se diretamente, sem a necessidade de um controle centralizado, sendo uma boa alternativa para implantação rápida de uma rede provisória, sobretudo em locais sem infra-estrutura disponível ou sem disponibilidade dos serviços desejados. Nas redes ad hoc não há número pré-determinado de nós, nem uma definição exata da posição desses. Os nós, que são roteadores móveis e hosts associados, estão conectados por enlaces sem fio, e podem mover-se aleatoriamente (a topologia não é fixa), o que não deve impedir a conectividade da rede (auto-configurável). Os nós cooperam entre si para encaminhar os pacotes de dados uns dos outros por encaminhamento direto (quando fonte e destino estiverem dentro da área de cobertura) ou via outros nós (daí o nome multi-hop).

As redes ad hoc sem fio impõem vários obstáculos a serem superados, tais como a otimização da largura de banda disponível (pode ser insuficiente para o transporte da informação desejada), a capacidade de busca de rotas alternativas em caso de interrupção de tráfego, a confiabilidade

do enlace, a interferência de sinais, etc. As redes ad hoc sem fio adotam esquemas de acesso aleatório ao meio, o que também concorre para perda adicional de capacidade devido a problemas específicos de conectividade, tais como o problema do nó exposto e do nó escondido [1].

Além disso, sendo uma rede de pacotes, ocorrem retransmissões em caso de erro na mensagem original, o que diminui a eficiência do sistema. O fato dos nós da rede trafegarem seus próprios dados e os dos vizinhos também aumenta a chance de congestionamento pelo consumo de recursos de faixa por parte dos cabeçalhos de sinalização necessários para manter a conectividade dos nós.

Devido a essas características, o cálculo de capacidade e dimensionamento dessas redes é uma tarefa bastante complexa. Torna-se necessário fixar algumas condições iniciais para que se possam construir modelos de análise. Algumas características que podem ser consideradas são o número total de nós, a quantidade de informação a ser transmitida e o número máximo de hops para esta transmissão.

A função de roteamento executada pelos nós da rede afeta a vazão de todos os seus nós. No final, a capacidade da rede (vazão e escalabilidade) será o parâmetro a ser otimizado.

Este artigo apresenta as condições que influenciam a capacidade da rede ad hoc, e que portanto devem ser analisadas para o seu dimensionamento. Divide-se nas seguintes seções:

- A questão da alimentação dos nós
- A questão do nível de potência de transmissão dos nós
- Estudo analítico de capacidade em redes ad hoc sem fio
- Simulação de modelos para avaliação de capacidade em redes Ad Hoc sem fio
- Considerações sobre localização dos nós e padrão de tráfego utilizado
- O Impacto da mobilidade
- Escalabilidade de redes ad hoc

## II. A QUESTÃO DA ALIMENTAÇÃO DOS NÓS

A rede ad hoc, por sua própria característica de ser implantada em locais de infraestrutura restrita, deverá ser alimentada por baterias que devem apresentar a maior autonomia possível. Devido a isto deve-se buscar atingir o menor consumo de energia nos nós da rede que não cause impacto nas aplicações trafegando na mesma. Estratégias de economia de energia foram largamente investigadas em várias camadas da pilha de protocolos [2], aqui enumeradas segundo a camada de atuação:

- Camada Física: uso de antenas direcionais, controle da potência de transmissão através da monitoração da

vizinhança [3] [4]. Projetos de circuitos de antena modernos permitem recepção de múltiplos pacotes livres de colisão.

- Camada de enlace de dados: evitar retransmissões desnecessárias, evitar colisões no canal de acesso e procurar colocar o receptor em modo stand-by sempre que possível, desligar o rádio (modo sleep) quando não estão sendo feitas transmissões ou recepções através deste.
- Camada de Rede: otimizar os protocolos de roteamento (levando em consideração a rota em que trafega a carga sendo retransmitida e usando técnicas eficientes de reconfiguração de rotas), considerar a vida da bateria dos nós na seleção das rotas, reduzir a frequência de envio de mensagens de controle, otimizar o tamanho dos cabeçalhos de controle.
- Camada de Transporte: evitar retransmissões repetidas. Procurar otimizar o tratamento de perdas de pacotes de forma localizada, utilizar esquemas de controle de erro que sejam eficientes sob o ponto de vista do uso da potência.

Como exemplo, considerar que um nó leve em conta o comportamento anterior de seus vizinhos e suas prioridades em termos de energia antes de iniciar o encaminhamento de pacotes, verificando a relação de compromisso entre consumo de energia e vazão de rede.

Em [5] é apresentada uma solução para fazer o equilíbrio entre o consumo de energia e os requisitos de QoS (Qualidade de Serviço). Isto foi conseguido com o desenvolvimento de uma arquitetura (Modelo de TCP indireto) para reduzir o consumo de potência de hosts móveis em um cenário de internet móvel, mantendo o mesmo nível de QoS.

Embora na arquitetura TCP indireto o móvel faça uso de um ponto de acesso localizado na fronteira entre a rede cabeada e a rede sem fio (restringido portanto a aplicação desta solução para redes ad hoc que disponham de ponto de acesso), ela permite a economia de energia devido à melhoria da largura de faixa disponível na camada de transporte e pelo fato do host móvel desligar sua interface de rede sem fio quando não há dados a serem enviados ou recebidos através deste enlace [5]. Isto é conseguido com o algoritmo de atualização de compartilhamento variável que prediz os tempos entre chegadas de pacotes e o tempo de duração dos períodos ociosos, gerenciando a interface de rede dos hosts móveis de acordo com os resultados obtidos. O protótipo implementado foi exaustivamente analisado, apresentando resultados experimentais que resultaram na economia de até 68% da energia consumida pela arquitetura tradicional TCP-IP. Esta economia foi obtida sem grande degradação de QoS percebida pelos usuários [5].

Outra alternativa para reduzir o consumo prolongando a vida útil das baterias dos nós móveis, além de melhorar a vazão fim-a-fim do sistema foi proposto em [6], através do gerenciamento de potência da rede ad hoc. Para isto buscou-se uma relação de compromisso entre minimizar os alcances de interferência, de reduzir o número médio de hops para atingir o destino, de considerar a probabilidade de haver clusters isolados e de levar em conta o número médio de transmissões (incluindo retransmissões devido à colisões). A proposta incluiu aprimoramento

dos protocolos que influenciavam na determinação do alcance de conectividade, que foi alterada dinamicamente de forma a conseguir uma vazão quase ótima. Além disso, foi usado um roteamento que minimizasse o consumo de potência. A análise de desempenho foi baseada em simulações que mostraram que uma rede com esse esquema de gerenciamento de potência teria maior vazão e menor dispêndio de potência do que uma rede sem o esquema.

### III. A QUESTÃO DO NÍVEL DE POTÊNCIA DE TRANSMISSÃO DOS NÓS

É importante considerar a questão do controle de potência na análise da camada física das redes sem fio, devido aos problemas de interferência nos demais nós (limitante superior) e à conectividade da rede (limitante inferior) para garantir a recepção do sinal. Deve-se lembrar que a interferência afeta a rede sem fio como um todo, e não somente nós isolados.

Para atingir este objetivo, vários algoritmos de controle de potência foram desenvolvidos [7]. Levando em conta os parâmetros de relação sinal ruído no receptor, de interferência percebida pelo terminal e de taxa de erro, procura-se derivar resultados estatísticos para controlar a potência de transmissão de forma a garantir a qualidade de serviço desejada.

Em [8], analisou-se esse problema a partir de outro ponto de vista: uma vez que os nós das redes ad hoc cooperam encaminhando pacotes uns dos outros, cada nó deveria transmitir com uma potência mínima que possibilitasse a conectividade da rede. Para isto, calculou qual seria o alcance crítico dos nós de uma rede para garantir grande probabilidade da rede estar conectada, demonstrando que se os nós estiverem aleatoriamente colocados num disco de área unitária, cada nó terá um alcance de transmissão  $A(i)$  dado por:

$$A(i) = \sqrt{\frac{\log(n) + k_n}{\pi \cdot n}} \quad (1)$$

onde  $n$  é o número de nós da rede e  $k_n$  é uma constante relacionada com  $n$ .

Além disso, a probabilidade de que a rede esteja conectada vai convergir para 1 à medida que  $n$  cresce para infinito se e somente se  $k_n$  tender a infinito. Isto fornece uma caracterização precisa da dependência do número de nós por parte do alcance de transmissão comum para conectividade assintótica das redes sem fio.

O alcance de transmissão causa impacto na conectividade e na vazão. Quanto maior o alcance, mais fácil é o encontro de rotas, e quanto menor o reuso espacial, maior a interferência. Observa-se também que a alta conectividade aumenta o número de rotas possíveis, mas um alcance curto e uniformizado para os nós reduz a conectividade porém aumenta a vida útil das baterias.

### IV. ESTUDO ANALÍTICO DE CAPACIDADE EM REDES AD HOC SEM FIO

Na análise feita para avaliação da capacidade de uma rede ad hoc deve-se levar em conta a largura de faixa que está de fato disponível para a aplicação, uma vez que ela é diminuída por diferentes funções de camada de rede.

Uma das maneiras de analisar a capacidade das redes ad hoc faz uso de modelos matemáticos para a determinação dos limites teóricos de capacidade. Estes modelos devem ser precisos para que a previsão seja confiável.

A análise feita em [9] para o cálculo de capacidade de redes ad hoc mostrou que a capacidade de transporte de tráfego de redes ad hoc de múltiplos hops pode ser estimada dentro de condições de não interferência, e que a vazão média obtida por nós de uma rede sem fio em duas dimensões decresce à razão inversa da raiz quadrada do número de nós da rede.

Em [9] foram estimados os limites teóricos de capacidade das redes ad hoc empregando dois modelos de recepção bem sucedida dos pacotes através de um único hop supondo sistema sem interferência: modelo de protocolo e o modelo físico.

Tais modelos foram elaborados supondo-se que a rede ad hoc era composta de  $n$  nós arbitrariamente dispostos em uma área circular plana de tamanho unitário. Cada nó tem um destino escolhido arbitrariamente, para o qual se deseja transmitir informações a uma taxa também arbitrária; Cada nó pode escolher um nível de potência de alcance para sua transmissão de forma igualmente arbitrária. Os padrões de tráfego devem seguir trajetórias aleatórias uniformemente distribuídas no espaço das possíveis rotas ao longo de toda a rede. Nestas condições:

- A capacidade por nó apresenta um limitante superior dado por  $1/\sqrt{(n \cdot \log(n))}$ , onde  $n$  é o número de nós;
- Se a localização dos nós for estabelecida de forma otimizada, o limitante seria aproximadamente de  $1/\sqrt{(n)}$

O modelo de protocolo é baseado na existência de uma zona de guarda de cada nó determinada por  $\Delta$  (que quando maior que zero indica que ela tem influência), prevenindo através da atuação do protocolo que um nó vizinho faça uma transmissão simultânea através do mesmo sub-canal. Deve-se lembrar que nesse modelo supõe-se que vários nós da rede podem enviar dados ao mesmo tempo.

O método define uma relação matemática, ligando uma transmissão bem sucedida em tais condições com o tamanho da zona de guarda. Por exemplo, se um nó  $X_i$  transmite dados para o nó  $X_j$  através do  $n$ -ésimo sub-canal, esta transmissão será considerada recebida com sucesso se:

$$|X_k - X_j| \geq (1 + \Delta) \cdot |X_i - X_j| \quad (2)$$

para qualquer outro nó  $X_k$  que estiver transmitindo simultaneamente através do mesmo  $n$ -ésimo canal.

Já o modelo físico impõe a condição de que um nível mínimo de relação sinal-interferência seja percebido para que haja uma recepção bem sucedida. Supor que  $\{X_k; k \in \tau\}$  seja o subconjunto de nós que estão transmitindo simultaneamente em algum momento através de um determinado sub-canal; Seja  $P_k$  o nível de potência escolhido pelo nó  $X_k$ , uma vez que  $k \in \tau$ . Então a transmissão de um nó  $X_i$ , tal que  $i \in \tau$  será recebida com sucesso por um nó  $X_j$  se

$$\frac{P_i}{|X_i - X_j|^\alpha} \geq N + \sum_{k \in \tau, k \neq i} \frac{P_k}{|X_k - X_j|^\alpha} \quad (3)$$

onde  $P_i$  é o nível de potência escolhido pelo nó  $X_i$ ,  $N$  é o nível de potência de ruído ambiente (ruído de fundo que está

presente durante todo o tempo em uma linha de transmissão),  $\beta$  é o valor mínimo de relação sinal/interferência necessário para que haja recepção bem sucedida. A potência do sinal diminui com a distância  $r$  à razão de  $1/r^\alpha$ . Foi suposto que  $\alpha > 2$ , que é um modelo usual para uma vizinhança próxima do transmissor.

Os resultados obtidos por estes modelos são bem semelhantes entre si, e os autores concluem que a capacidade  $C_n$  por nó de uma rede sem fio (para um número de nós limitado porém suficientemente grande) pode ser expressa por:

$$C_n < k_1 \cdot \frac{1}{\sqrt{n \cdot \log(n)}} \quad (4)$$

Onde  $n$  é o número de nós e  $k_1$  uma constante. Se todos os nós fossem colocados otimamente, a maior vazão dentro do modelo de protocolo seria limitada por:

$$C_n < k_2 \cdot \frac{1}{\sqrt{n}} \quad (5)$$

onde  $C_n$  é dado em *bps*, para cada nó e  $k_2$  é uma constante. Este limite superior é possível de ser obtido em condições de melhor caso, como o de um sistema em que o alcance de transmissão fosse selecionado de forma ótima, em que o padrão de tráfego fosse o mais favorável possível (levando em conta todas as demais condições de contorno, tais como a demanda de tráfego, mobilidade), em que a localização dos nós pudesse ser conhecida durante todo o tempo, em resumo uma rede ad hoc ideal.

Cenários do mundo real apresentam desempenhos ainda piores e a escalabilidade obtida não é satisfatória. Observa-se aqui a importância do projeto do sistema de acesso à camada MAC.

## V. SIMULAÇÃO DE MODELOS PARA AVALIAÇÃO DE CAPACIDADE EM REDES AD HOC SEM FIO

Dois simuladores de rede têm sido mais utilizados na avaliação de modelos ad hoc: o Network Simulator (NS-2, [10] e o OPNET [11]).

O NS-2 é um simulador de eventos discretos direcionado para pesquisa em redes de comunicação. Dispõe de extensos recursos para simulação de protocolos TCP, de roteamento e de multicast em redes cabeadas e sem fio (local ou de satélites). O NS-2 foi iniciado como uma variante do simulador de redes REAL em 1989 e tem evoluído continuamente. Ainda que seja largamente utilizado para avaliar modelos de redes, não é considerado um produto finalizado, mas uma ferramenta aberta recebendo diversas contribuições inclusive de seus usuários, que são responsáveis por estabelecer a validade dos modelos que utilizam. Em [12] e [13] foram utilizados resultados do NS-2 na avaliação dos modelos propostos.

Já o simulador de redes OPNET é um software proprietário, que depende de aquisição e pagamento de licença. Dispõe de vários modelos e de bibliotecas já testadas que incluem protocolos específicos para redes ad hoc, como AODV (ad-hoc on demand distance vector), DSR (dynamic source routing), OLSR (optimized link state routing) e TORA (temporary ordered routing algorithm).

Em [13] são mostrados resultados de simulações feitas no OPNET para avaliação de capacidade, e em [14] é apresentado um protocolo para uso em redes ad hoc nos quais os nós são equipados com "smart antennas", ou sistemas de antenas que podem identificar a direção do sinal desejado e a direção dos sinais interferentes de forma a maximizar a relação sinal ruído. Com a simulação no OPNET e MATLAB, conseguiu-se um aumento da capacidade de vazão.

Em [15] é desenvolvida uma técnica empírica para determinar a capacidade de uma rede ad hoc. Foi observado que a capacidade da rede cresce com a mobilidade dos nós, mas o roteamento e os protocolos de acesso ao meio não conseguem obter vantagem desse aumento de capacidade. Conclui-se que deve ser possível desenvolver protocolos de roteamento otimizados que fazem uso da capacidade da rede de forma a melhorar o desempenho do roteamento.

## VI. CONSIDERAÇÕES SOBRE LOCALIZAÇÃO DOS NÓS E PADRÃO DE TRÁFEGO UTILIZADO

A localização dos nós não é um parâmetro que se pode arbitrar com liberdade, mas o conhecimento de como se comporta a rede em termos de vazão e conectividade pode dar indícios de quais padrões de tráfego seriam adequados para que se obtivesse uma capacidade ótima na rede [16].

Em [12] foi apresentada a análise e a simulação de redes ad hoc estáticas (supondo que os nós não se movessem por distâncias significativas durante os tempos de trânsito dos pacotes). Depois de analisar redes com distribuição de nós e tráfego dentro de um padrão regular usando treliças, fez-se o mesmo procedimento para rede aleatória, na qual cada nó envia pacotes, e cada pacote tem como destino um outro nó escolhido aleatoriamente. As taxas de transmissão foram ajustadas para manter a taxa de queda de pacotes inferior a 20%, sem uso de protocolos de roteamento. Concluiu-se que a rede aleatória tem uma capacidade presumivelmente inferior que a capacidade das treliças (de distribuição regular dos nós no espaço), ainda que esta diferença não seja dramática.

O projeto do protocolo da MAC deve levar em conta o padrão de tráfego previsto para a rede. Padrões de tráfego que causem aumento da capacidade e que permitam que a rede possa ter crescimento escalável são os mais desejados.

## VII. ANÁLISE DA CAMADA MAC

Trabalhos que analisam a capacidade das redes ad hoc sob o ponto de vista da camada MAC mostram como o protocolo de acesso relaciona-se com a camada física, limitando a capacidade da banda de transmissão [17]. De fato, a eficiência do algoritmo de acesso ao meio influencia a vazão do sistema [18].

Através de uma análise teórica para uma rede ad hoc em [19], verificou-se que existe um limiar em termos de número de nós acima do qual a capacidade de transporte cresce proporcionalmente até o valor de  $\sqrt{n}$  e abaixo da qual ela cai rapidamente para zero, sendo  $n$  o número de nós da rede.

## VIII. INFLUÊNCIA DO ROTEAMENTO

A atuação dos protocolos de roteamento também causa impacto na capacidade das redes ad hoc.

Deve-se buscar a maximização da eficiência destes protocolos, porém procurando manter a capacidade num nível ótimo. Como visto anteriormente, o roteamento afeta a vazão de todos os nós. Além disso, se forem utilizadas técnicas eficientes será possível ampliar a vida útil das baterias dos nós. O roteamento também deve concorrer para o devido balanceamento de carga, evitando congestionamento em alguns nós específicos e também a concentração de tráfego nos nós de acesso às redes externas (e seus nós vizinhos), através de mecanismos como a busca de rotas alternativas e controle de admissão distribuído [20]

Quando ocorrem perdas decorrentes de congestionamento, conclui-se que existe falha de comunicação quando a rede está operando próxima ao seu limite de capacidade (um grande volume de demandas ou atualização de dados de tráfego resulta em congestionamento). Para evitar o esgotamento da capacidade do sistema, as soluções apresentadas implicam em baixas taxas de dados de transmissão. Por exemplo, [21] afirma que em uma rede ad hoc simulada com 100 nós, com enlaces de 2 Mbps, a vazão disponível para cada nó é da ordem de alguns kbits por segundo. A área da rede apresentada nesse trabalho [21] é grande o suficiente para que possam ocorrer sete transmissões simultâneas sem interferência entre si. Isto significa que a vazão por nó disponível atualmente é da ordem de 50 vezes menor do que a capacidade bruta. As cargas usadas em outros estudos de roteamento ad hoc apresentam resultados em consonância com este trabalho.

## IX. O IMPACTO DA MOBILIDADE

A mobilidade dos nós acrescenta novas variáveis ao dimensionamento da capacidade de redes ad hoc, afetando dinamicamente a capacidade destas, pois causam variações no roteamento, na vazão, na conectividade e nas características da transmissão sem fio dos nós. Os estudos de mobilidade partem, em geral, de modelos (desde o estático, usado em [12] a partir da premissa de que os nós não se movem por distâncias significativas durante os tempos de trânsito dos pacotes), até o dinâmico, muitos dos quais propostos na literatura (modelos de mobilidade de terminais e modelos de mobilidade de grupo) [22].

Estudos demonstram que a com a exploração da mobilidade pode-se conservar, a longo prazo, a vazão constante mesmo que a densidade do número de nós cresça [24]. Este aprimoramento foi obtido explorando-se uma forma de diversidade do encaminhamento dos pacotes através de diferentes rotas.

## X. ESCALABILIDADE DE REDES AD HOC

As primeiras experiências com redes ad hoc sem fio indicaram que a capacidade das mesmas pode ser surpreendentemente baixa, resultado do encaminhamento de dados dos nós vizinhos, que resulta na diminuição da vazão por nó. Fatores que concorrem para o valor nominal da capacidade dependem do número de nós e área, dos padrões de tráfego e de detalhes das interações das transmissões de rádio que

ocorrem localmente. Em [12] esses fatores foram examinados de forma isolada e combinada, verificando interações entre a camada MAC 802.11 e o encaminhamento ad hoc e também o efeito na capacidade para várias configurações simples e padrões de tráfego.

A escalabilidade da rede fica comprometida quando existem muitos nós originadores de tráfego. Em [12] estimou-se a largura de faixa disponível que cada nó pode esperar do seu próprio tráfego. Para isto foram levados em conta os relacionamentos de escala: a carga cresce com o número de nós, cresce também com a distância através da qual cada nó deseja comunicar-se, e a capacidade total de um hop cresce com a área física coberta pela rede.

Assumindo que a densidade dos nós ( $\delta$ ) é uniforme, a área física da rede ( $A$ ), apresenta a relação com o número de nós  $n$  dada por  $A = n/\delta$ . Portanto, a capacidade  $C$  de um nó da rede poderia ser proporcional à área  $A$ , ou  $C = k \cdot A = k \cdot n/\delta$  para alguma constante  $k$ . Concluiu-se que  $k$  é aproximadamente  $1 \text{ Mbps/km}^2$  para simulações de redes aleatórias. Supondo-se que um nó origine pacotes à taxa de  $\lambda$ , e que o padrão de tráfego na rede tem um comprimento de caminho físico esperado de  $\bar{L}$  entre a fonte e o destino, o menor número de hops necessário para entregar o pacote é  $\bar{L}/r$ , onde  $r$  é o alcance da transmissão do rádio fixo. Portanto, a capacidade de um hop total da rede necessária para enviar e encaminhar pacotes obedece à relação:

$$C > n \cdot \lambda \frac{\bar{L}}{r} \quad (6)$$

Combinando-se este resultado com  $C = k \cdot n/\delta$ , têm-se  $k \cdot n/\delta > n \cdot \lambda \cdot \bar{L}/r$ . Portanto, a capacidade disponível para cada nó,  $\lambda$ , está limitada a

$$\lambda < \frac{k \cdot r}{\bar{L} \cdot \delta} = \frac{C/n}{\bar{L}/r} \quad (7)$$

A inequação acima mostra que à medida que cresce o comprimento do caminho, diminui a largura de faixa disponível para cada nó para transmitir pacotes. Portanto, o padrão de tráfego tem grande impacto na escalabilidade.

Observa-se que a vazão por nó é inferior à capacidade total dividida pelo número de nós, aproximando-se de zero à medida em que o número de usuários cresce. A causa disso é resultado do compartilhamento dos recursos de canalizações disponíveis na vizinhança de um nó entre seus próprios dados e os dos demais nós. Como há múltiplos hops na rede, a vazão por nó é reduzida e a capacidade decresce (quanto mais longa a rota, menos largura de faixa estará disponível).

O ideal seria que todo o tráfego atravessasse o menor número de enlaces possível para atingir o seu destino, e que a carga fosse igualmente distribuída entre os nós, correspondendo a uma situação de tráfego balanceado.

Mostrou-se que o padrão de tráfego determina se a capacidade por nó de uma rede ad hoc será escalável, ou seja, se a capacidade por nó de uma rede ad hoc irá crescer acompanhando o crescimento desta. Para que a capacidade total cresça na mesma proporção do crescimento da rede, a distância média entre nós fonte e destino deve manter-se pequena na rede ampliada.

Os resultados que utilizam estes modelos mostram que a capacidade total da rede deve crescer, embora a taxa de transmissão por nó continue caindo. O tamanho da rede em si não garante uma taxa de transmissão conhecida para seus nós individuais.

A capacidade da rede também será proporcional à quantidade de reuso espacial possível da mesma, e quanto maior a área ocupada, maior será a capacidade. Além disso, redes com menor número de usuários, ou que fizessem conexões com vizinhos mais próximos, seriam mais viáveis para implementação e operação.

O trabalho proposto em [9] foi estendido em [8] e também em [25], feito neste último caso para uma topologia em três dimensões fazendo divisão em slots na capacidade de Shannon no modelo de enlace, através da qual se concluiu que a capacidade por nó de uma rede ad hoc (sem agregar a capacidade de todas as estações), quando o número de nós for grande o suficiente, é limitado por:

$$k_2 \cdot \frac{n^{1/3}}{\log(n)} \leq C_n \leq k_3 \cdot \log(n) \cdot n^{1/2} \quad (8)$$

onde  $n$  é o número de nós na rede e  $k_2$  e  $k_3$  são constantes.

Portanto, a taxa de transmissão por nó cai apesar do fato do número de usuários fazer crescer a capacidade total da rede. Assim, caso se deseje garantir uma certa taxa por usuário, deve-se obedecer a um limite de tamanho de rede.

De fato, o estudo experimental apresentado em [23] mostra que a lei de escalabilidade (capacidade de ser escalonado) das redes ad hoc pode ser até mais restritiva do que a que foi apresentada anteriormente em [9], uma vez que a capacidade por nó  $C_n$  no seu experimento caiu a uma taxa em bits por segundo da ordem de:

$$C_n = \frac{c}{n^{1.68}} \quad (9)$$

Ainda em [23] sugeriu-se que o hardware e os protocolos implementados deveriam ser mais aperfeiçoados, sobretudo a eficiência dos protocolos de acesso ao meio e de roteamento.

Todos esses estudos procuram demonstrar que as redes ad hoc não são escaláveis em alguns cenários. No entanto, em [12] mostrou-se que estes estudos prévios consideram um padrão de comunicação aleatório no qual cada nó tem igual probabilidade de transmitir para qualquer outra estação na rede, independentemente da localização. Isto pode ser pressuposto para redes pequenas, mas não para as grandes, nas quais a maioria das transmissões de uma dada estação será para estações próximas.

Ainda segundo [12], a capacidade de uma rede ad hoc deve levar em conta o tamanho da rede com os padrões de tráfego e das interferências locais sobre as emissões de rádio. O padrão de tráfego determina se a capacidade por nó de uma rede ad hoc será viável em redes maiores. Nesse trabalho foi demonstrado que para que a capacidade total possa aumentar quando a rede cresce em número de nós, a distância média entre os nós fonte e destino devem manter-se aproximadamente constante em relação à rede original.

O conjunto das limitações intrínsecas de capacidade de uma rede ad hoc impõe restrições ao nível de acessibilidade dos

assinantes ao sistema, que se tornam mais críticas durante os períodos de pico de tráfego. Em geral, a acessibilidade pode ser medida em termos de probabilidade de bloqueio, que deve ser mantida abaixo de limiares aceitáveis. Em [26], mostra-se que um valor apropriado para a probabilidade de bloqueio em sistemas de alta disponibilidade (RTPC) deve ser menor que 2 % nos horários de maior movimento.

## XI. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma visão geral dos aspectos a serem considerados no dimensionamento da capacidade de redes ad hoc. Foram descritas as dificuldades para dimensionar estas redes, e a seguir, as questões sobre a alimentação dos nós e do nível de potência de transmissão destes. Descreve-se como o uso do cálculo analítico da capacidade de redes ad hoc sem fio permitiu a obtenção desses limitantes, e como se pode comprovar estes cálculos através do uso de simuladores de rede em vários trabalhos que foram realizados. Outros fatores apresentados foram considerações sobre a posição dos nós na rede, padrões de tráfego utilizado e o impacto da mobilidade. Por suas características intrínsecas, a capacidade das redes ad hoc não apresenta uma relação linear com o número de nós, e aspectos de escalabilidade foram igualmente apresentados.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos colegas Raulison Alves Resende e Roberto Petry a orientação e o esclarecimento de dúvidas a respeito do uso do  $\LaTeX$  para edição deste trabalho.

## REFERÊNCIAS

- [1] P. Cardieri, "Estado da Arte de Técnicas de Controle de Acesso ao Meio em Sistemas Ad Hoc Multihop", Relatório Técnico, PA RAHSF, CPqD, Fevereiro 2004.
- [2] S. Sesay, Z. Yang, J. He, "A Survey on Mobile Ad Hoc Wireless Network", Information Technology Journal, 2004
- [3] A. Spyropoulos, C. S. Raghavendra, "Asymptotic Capacity Bounds for Ad-hoc Networks Revisited: The Directional and Smart Antenna Cases", GLOBECOM 2003 - IEEE Global Telecommunications Conference, vol. 22, no. 1, Dec 2003 pp. 1216-1220
- [4] S. Yi, Y. Pei, S. Kalyanaraman. "On the Capacity Improvement of Ad Hoc Wireless Networks Using Directional Antennas", in Proceedings of the 4th ACM MOBIHOC, pages 108-116, October 2003
- [5] G. Anastasi, M. Conti, E. Gregori, A. Passarella, "Balancing Energy Saving and QoS in the Mobile Internet: An Application-Independent Approach", Proceedings of the 36th Annual Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS'03), 2003
- [6] T. ElBatt, S. Krishnamurthy, D. Connors, S. Dao, "Power Management for Throughput Enhancement in Wireless Ad Hoc Networks", IEEE International Conference on Communications, v.3, pp 1506-1513, June 2000
- [7] S. Ulukus, R. D. Yates, "Stochastic Power Control for Cellular Radio Systems", IEEE Transactions on Communications, Vol 46, NO. 6, JUNE 1998
- [8] P. Gupta, "Design and Performance Analysis of Wireless Networks", PhD Thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign, 2000
- [9] P. Gupta, P. R. Kumar, "The Capacity of Wireless Networks", IEEE Transactions on Information Theory, March 2000.
- [10] The ns Manual (formerly ns Notes and Documentation), July 25, 2005, disponível em <http://www.isi.edu/nsnam/ns/doc/ns4oc.pdf>
- [11] OPNET Technologies, Inc, informações disponíveis em: <http://www.opnet.com>
- [12] J. Li, C. Blake, D. S. J. Couto, H. I. Lee, R. Morris, "Capacity of Ad Hoc Wireless Networks", Proceedings of the 7th (ACM) International Conference on Mobile Computing and Networking, Rome, Italy, August 2001.
- [13] J. Li, Z. J. Haas e M. Sheng, "Capacity Evaluation of Multi-Channel Multi-Hop Ad Hoc Networks", IEEE International Conference on Personal Wireless Communications, pp 211-214, December 2002.
- [14] H. Singh and S. Singh. "Improving Wireless Network Capacity using Smart Antennas in OPNET", OPNETWORK 2003
- [15] Nishant Gupta, Samir R. Das, "A Capacity and Utilization Study of Mobile Ad Hoc Networks", 26th Annual IEEE Conference on Local Computer Networks- Tampa, Florida- USA, 2001
- [16] J. F. Redondo Antón, "Ad Hoc Networks- Design and Performance Issues", Master Degree Thesis, Helsinki University of Technology y Universidad Politécnica de Madrid, May 2002.
- [17] M. D. Yacoub, P. Cardieri, A. A. M. Medeiros, D. M. Gallego, "Avaliação do Estado da Arte em Capacidade de Redes Ad Hoc", Relatório Funttel, dezembro de 2004
- [18] S. Kumar, V. S. Raghavan, J. Deng, "Medium Access Control Protocols for Ad-Hoc Wireless Networks: A Survey", disponível em: <http://people.clarkson.edu/~skumar/MACsurvey.pdf>
- [19] G. Ferrari, O. K. Tonguz, "MAC Protocols and Transport Capacity in Ad Hoc Wireless Networks: Aloha versus PR-CSMA", Proceedings of IEEE Military Communications Conference, 2003
- [20] F. L. Figueiredo, M. A. Siqueira, H. P. B. Pimentel, D. Fernandes, A. Paganuchi, F. M. F. Rocha, "Arquitetura de Referência de uma Rede de Acesso Ad Hoc", Relatório Funttel-CPqD, PD.30.11.69A.0025A/RT - 02 - AB, julho de 2004
- [21] S. Das, C. Perkins, E. Royer, "Performance Comparison of Two On-demand Routing Protocols for Ad hoc Networks", International Proceedings of IEEE Infocom, March 2000.
- [22] F. L. Figueiredo, H. P. B. Pimentel, M. A. Siqueira, R. A. Resende, M. C. Castro, A. Paganuchi, A. C. A. Carvalho, "Protocolos de Roteamento Ad Hoc com Suporte a QoS, Mobilidade e Segurança", Relatório Funttel-CPqD, PD.30.11.69A.0025A/RT - 05 - AA, fevereiro de 2005
- [23] P. Gupta, R. Gray, and P. R. Kumar, "An Experimental Scaling Law for Ad Hoc Networks", University of Illinois at Urbana-Champaign, May 2001
- [24] M. Grossglauser e D. Tse, "Mobility Increases the Capacity of Ad Hoc Wireless Networks", IEEE/ACM Transactions on Networking, pp 477-486, August 2002
- [25] S. Toumpis and A. Goldsmith, "Ad Hoc Networks Capacity", In Conference Record of the 34th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, volume 2, pages 1265-1269, November 2000
- [26] B. Weinberg, "Open Availability Architecture: Building Highly Available Systems with Linux and CompactPCI", disponível em <http://www.mvista.com/dswp/CPCL.pdf>.
- [27] IEEE Standard 802.11, "Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHI) Specification", 1999.