

# Um Método para Localização de Nós em Redes Sem Fio usando Otimização Não Linear

Luis M. Trevisan, Marcelo E. Pellenz e Manoel C. Penna

**Resumo**— As redes em malha sem fio estão se tornando populares devido ao seu baixo custo, facilidade de instalação e operação, além de suas características únicas de flexibilidade e alta disponibilidade. O desempenho destas redes depende fundamentalmente do balanceamento de carga na rede e da atribuição de canais às interfaces de rádio. Estes aspectos são fundamentais para se minimizar os efeitos de interferência e contenção, permitindo assim um aumento da capacidade média da rede. Portanto, o planejamento e operação eficiente de uma rede em malha depende da estimativa do posicionamento dos nós e dos níveis de interferência a que são submetidos. Neste trabalho propomos um algoritmo de localização de nós para redes em malha baseado num método numérico de otimização não-linear. A métrica considerada para localização é a potência média recebida em cada nó da rede. Resultados de simulação e uma discussão detalhada das aplicações do algoritmo proposto são apresentados.

**Palavras-Chave**— Redes Sem Fio, Redes Mesh, Redes Ad-Hoc, Métodos de Localização, Detecção de Interferência.

**Abstract**— Wireless Mesh Networks are becoming popular thanks to its low cost, easy of maintenance and operation, besides its outstanding characteristics of flexibility and reliability. The network performance depends heavily on the load balance and on the channel assignment to the radio interfaces. Both are fundamental aspects to minimize effects of interference and contention, this way allowing an improvement on the average network throughput. Therefore, the efficient planning and operation of a mesh network depends on the nodes position estimation and on the interference level they are submitted. In this work we propose an algorithm for nodes localization for mesh networks based on a numeric method of non-linear optimization. The considered metric for the localization is the mean signal to noise ratio in each mesh node. Simulation results and detailed application discussion of proposed algorithm are presented.

**Index Terms**— Wireless Networks, Mesh Networks, Ad-Hoc Networks, Localization Methods, Interference Detection.

## I. INTRODUÇÃO

As redes em malha sem fio, também denominadas de WMNs (Wireless Mesh Networks), têm muito a contribuir na disponibilização de aplicações de tempo real em redes de

Luis M. Trevisan, Marcelo E. Pellenz e Manoel C. Penna, PPGIa, PUCPR, Curitiba-PR, Brasil, e-mails:{trevisan.luis,marcelo, [penna](mailto:penna}@ppgia.pucpr.br)}@ppgia.pucpr.br. Este trabalho foi parcialmente financiado pela Fundação Araucária (9609-03/2006)

banda larga. A indústria considera suas características de alta escalabilidade e baixo custo fatores chave para ampliar a cobertura dos serviços de banda-larga na última milha [1], [2], [3], [4]. Em uma WMN os pacotes são transportados através de múltiplos saltos, onde cada nó da rede conta com seus vizinhos para receber e enviar pacotes. Esta estratégia de roteamento, originalmente aplicada pelas redes *ad-hoc*, deve suportar mobilidade dos nós, energia limitada e interferência dos nós vizinhos. Redes *ad-hoc* tem por objetivo prover comunicação onde não haja qualquer outro tipo de infraestrutura e são mais indicadas para a formação de redes transientes. Seu desenvolvimento foi dirigido por aplicações como jogos iterativos, conferências, redes para campo de batalha e situações de emergência, como terremotos. Nestes tipos de aplicações os nós se conectam espontaneamente formando a malha da rede que auto-configura suas rotas. Celulares, computadores portáteis: *Lap Top*, *Palm Top*, PDAs são típicos terminais *ad-hoc*. Nós WMN cooperam entre si para o provisionamento de conectividade em alta velocidade para todos os nós da rede até o *backbone* da operadora [1], [4]. Este objetivo é atingido por cada nó, que não apenas trata seu próprio tráfego, mas também retransmite o tráfego dos nós adjacentes. Quando os nós da rede não geram e nem recebem tráfego, apenas cooperam para o fluxo de dados dos nós vizinhos, atuando como roteadores, a WMN é dita estruturada [1].

Numa WMN estruturada, os nós roteadores são fixos e podem dispor de uma fonte apropriada de energia [5], [1]. Este tipo de rede possui nós dedicados que atuam como *gateways* para a *internet* e para o usuário final, cujas interfaces podem ser com ou sem fio. De forma a suportar roteamento autônomo de pacotes em redes de malha sem fio, muitos protocolos foram desenvolvidos, como por exemplo: DSDV (Dynamic Destination-Sequenced Distance-Vector Routing) [6], DSR (Dynamic Source Routing) [7], AODV (Ad-hoc On-Demand Distance Vector Routing) [8] e OLSR (Optimized Link State Routing Protocol) [9].

Estes protocolos utilizam-se de métricas que estabelecem o custo de cada possível enlace da rede. As tabelas de roteamento são construídas de forma que os pacotes trafeguem pelas rotas de menor custo. Para computar o custo as métricas levam em consideração inúmeros fatores: número de saltos na rota, taxas de perda de pacotes e principalmente a interferência. Dentre as métricas desenvolvidas, podemos citar: Minimum Hop Count, ETX (Expected Transmission Count) [10], WCETT (Weighted Expected Transmission

Time) [11], MIC (Metric Of Interference and Channel Switching) [5] e iAware (Interference Aware) [4]. Estas são as principais métricas que proporcionam confiabilidade e auto-organização às redes em malha sem fio, boa parte delas derivadas das redes *ad-hoc*. Algumas destas se aplicam melhor às *ad-hoc* e outras às WMNs, devido às diferentes características destas redes. Por exemplo, o padrão de tráfego é muito diferente: enquanto numa rede *ad-hoc* os dados fluem entre pares de nós arbitrariamente distribuídos, em redes de malha o tráfego é escoado do *backbone* em direção ao nó do usuário final e vice-versa [1],[2]. A mesma métrica pode ser usada por diferentes protocolos e há muito esforço de pesquisa aplicado ao desenvolvimento delas. Houve muito progresso desde a primeira delas (*Minimum Hop Count*) e um aspecto que tem sido bastante explorado é a influência da interferência e dos mecanismos de contenção das camadas de enlace no desempenho da rede como um todo.

Em uma WMN é importante diferenciar entre a região de transmissão e a região de interferência [12] ao redor do nó transmissor. A região de transmissão é aquela ao redor do nó transmissor, dentro da qual os nós vizinhos sofrerão contenção. A região de interferência é maior que a região de transmissão e dentro dela o sinal percebido pelos nós receptores sofre degradação devido às transmissões simultâneas. Gupta [13] afirma que o conhecimento da posição dos nós e das demandas de tráfego possibilita a criação de algoritmos de escalonamento de transmissões para se evitar ao máximo as colisões e interferências, desde que os nós sejam fixos. Neste trabalho propomos um algoritmo de localização, baseado no modelo de programação não-linear de Nelder-Mead [14], que é capaz de localizar nós de uma rede em malha baseado na potência média do sinal recebido. Embora existam técnicas de localização baseadas no ângulo e no tempo de chegada do sinal [15], [17] a métrica de relação sinal-ruído é comumente disponibilizada nas interfaces de rádio e não requer funcionalidades adicionais de hardware para ser implementada.

A motivação para este estudo é que uma vez conhecida a posição dos nós, é possível estipular melhor o custo de cada enlace na rede, estimar a interferência que um nó da rede provoca nos outros, assim como aplicar mecanismos de escalonamento de pacotes e balanceamento de carga de forma mais eficiente. O algoritmo proposto se aplica a redes em malha estruturadas, visto que estas possuem nós roteadores fixos, que servem como coordenadas de referência para o algoritmo de localização, permitindo estimar a posição de novos nós clientes acessando a rede ou mesmo de nós interferentes de redes adjacentes. Além disso, também é possível estimar as demandas de tráfego. Há a necessidade de um processamento centralizado, como o que muitas redes utilizam para fins de gerência e manutenção da operação. Assumimos que cada nó da rede coleta as informações de potência média de sinal recebido e correspondente endereço MAC de cada nó transmissor que lhe cause contenção. Esta informação é então transmitida a um nó central que executa o

algoritmo de localização.

O restante do artigo está estruturado da seguinte maneira: Na Seção II discutimos o problema da contenção e interferência em WMNs, bem como suas implicações nas métricas de roteamento e capacidade da rede. A Seção III introduz algumas metodologias clássicas de localização em redes sem fio. O algoritmo de localização proposto e os resultados obtidos são apresentados na Seção IV. A seção V conclui o trabalho.

## II. CONTENÇÃO E INTERFERÊNCIA EM REDES DE MALHA SEM FIO

Em [2] é definido o conceito de *domínio de colisão* para uma rede em malha. O domínio de colisão é a área geográfica na qual todos os enlaces devem permanecer inativos enquanto um dado enlace está transmitindo. A banda disponível é disputada por todos os enlaces no domínio de colisão. O enlace ativo é aquele do qual faz parte o nó transmissor e determina portanto o domínio de colisão. A medida que os pacotes trafegam pela rede em direção aos *gateways* de acesso à Internet, novos domínios de colisão são observados e para cada um deles mais capacidade de banda é tipicamente requerida. O domínio de colisão que demanda mais capacidade de tráfego é denominado de *domínio gargalo* e se localiza próximo dos *gateways*, pois é composto por enlaces que fazem partes das inúmeras rotas da rede até a Internet. Para se reduzir a contenção, podemos usar múltiplos canais, caso os nós possuam mais de uma interface de rádio. Isto é mostrado em trabalhos desenvolvidos em [1],[4],[16]. Algumas métricas de roteamento costumam penalizar o reuso consecutivo de canais que fazem parte da mesma rota. O reuso de canais é definido como a utilização simultânea do espectro por nós distantes o suficiente para não interferirem um no outro. Quando tal alocação não é factível, interferências entre nós da própria rede acabam ocorrendo. O estudo da interferência dentro da malha pode proporcionar melhor distribuição dos canais para cada enlace a fim de promover o reuso adequado. Como a capacidade de transmissão é degradada por interferências internas e externas à rede, este fenômeno não pode ser desprezado no planejamento de uma rede em malha. Um único nó transmissor pode afetar diversos outros em grau que dependente de suas posições relativas, potência de transmissão e padrões de tráfego. No estudo da interferência é importante considerar modelos capazes de descrever uma transmissão bem sucedida. Gupta [13] apresentou dois modelos de interferência: de protocolo e físico. Em nosso estudo consideramos o modelo físico, que estabelece como transmissão bem sucedida entre dois nós aquela em que a relação Sinal-Interferência+Ruído (Signal-to-Interference+Noise Ratio – SINR) é maior que um limiar pré-estabelecido. No receptor a SINR é definida como a razão entre a potência recebida pela potência de ruído mais a potência interferente recebida.

Este modelo de interferência foi adotado em [4] para propor

a métrica *iAware* que leva em consideração as interferências *inter-fluxo* e *intra-fluxo* em uma rede Ad-Hoc. Em ambos os casos o nó é interferido por transmissões não dirigidas a ele, mas que usam o mesmo canal. A interferência *inter-fluxo* significa que o nó sofre interferência de outros nós da mesma rota e na *intra-fluxo* sofre interferência de nós de outras rotas. A métrica *iAware* tenta capturar a interferência nos enlaces de cada rota levando em conta o comportamento de tráfego de cada nó. A métrica *iAware* está definida pela equação (1), onde  $P_{ij}$  representa a potência percebida pelo nó  $j$  relativa a uma transmissão do nó  $i$ ,  $P_{kj}$  representa a potência percebida por  $j$  relativa à transmissão de qualquer nó  $k$  que interfira na comunicação do par  $(i, j)$  e  $N$  a potência de ruído na recepção do nó  $j$ . A intensidade de tráfego do nó interferente  $k$  é dado por  $\rho_k$ , onde  $0 \leq \rho_k \leq 1$ . Um valor zero indica que o nó está inativo e um valor unitário indica transmissão à plena carga.

$$SINR = \frac{P_{ij}}{N + \sum_{k \neq \{i, j\}} \rho_k \cdot P_{kj}} \quad (1)$$

Este modelo não apenas considera a presença de nós vizinhos, como também o grau de interferência por eles gerado. Isso depende da distribuição e do padrão de tráfego gerado pelos nós vizinhos. Portanto esta métrica exige a implementação específica em hardware de um mecanismo para medida de interferência em cada nó, além da determinação da quantidade de nós vizinhos e do seu padrão de tráfego. O fator *SINR* depende principalmente da potência de transmissão dos nós interferentes e sua posição relativa em relação aos nós interferidos.

É interessante observar que cada nó exerce os dois papéis: de interferente e interferido. Isto ocorre porque, considerando-se uma rede em malha, cada nó está na região de interferência ou contenção de um ou mais nós diferentes. Portanto, é possível a criação de um mecanismo no qual cada nó identifica, via endereço de camada de enlace (endereço MAC), os nós que lhes causam contenção e baseado num algoritmo de localização estimar sua distância até o mesmo. Coletando a mesma informação de diferentes nós é possível se determinar a posição relativa de cada um deles. Isto pode ter inúmeras aplicações no combate aos efeitos da interferência, como por exemplo: a) distribuição dos canais de rádio: cada interface de rádio recebe um canal de trabalho a fim de se promover o reuso espacial; b) determinação da interferência de cada nó: conhecida a posição relativa de cada nó na rede é possível se determinar a potência de interferência originada por outro nó da rede; c) melhor distribuição de carga: como estamos focando em redes em malha estruturadas, a distribuição de carga (fator determinante da interferência) pode ser influenciada para que fique dentro de padrões e faixas estabelecidos.

Adicionalmente é possível se estabelecer um roteamento através de coordenadas geográficas virtuais [14], onde a precisa posição do nó não é tão importante quanto à percepção de sua posição pelos nós vizinhos. Certamente o uso do processamento centralizado deve ser empregado de modo que não se perca a flexibilidade e autonomia das redes em malha. Isso permite oferecer suporte à sua funcionalidade por meio de informações mais precisas que proporcionem uma visão mais clara de toda a rede, o que não é possível numa rede operando de forma totalmente descentralizada.

### III. MÉTODOS DE LOCALIZAÇÃO

Mecanismos de localização foram primeiramente desenvolvidos para aplicação nas redes de sensores, pois muitas vezes os dados medidos, como por exemplo temperatura, umidade, pressão, luminosidade, ruído, etc, fazem sentido apenas caso se conheça a posição do sensor [14]. Métodos de localização tradicionais seriam caros ou impraticáveis dependendo do tamanho do sensor. Os métodos tradicionais mais conhecidos são o GPS (*Global Positioning System*) ou os usados na rede de telefonia celular. O GPS faz uso de triangulação entre satélites geo-estacionários e métodos da rede móvel de telefonia precisam da intermediação de uma estação rádio base. Os métodos de localização mais conhecidos usados em redes de sensores são baseados no tempo de chegada (Time Of Arrival - TOA) do sinal, ângulo de chegada (Angle Of Arrival - AOA) do sinal e na relação sinal-ruído recebida, disponibilizada através do RSSI (*Received Signal Strength Indication*). Todos estes métodos estão sujeitos a erros que podem ser agrupados em estáticos e variáveis. O ruído aditivo e o desvanecimento de multipercorso são erros variáveis e podem ser combatidos por meio de inúmeras medidas ao longo do tempo. Erros estáticos são aqueles causados pelo arranjo dos objetos no ambiente da rede, como árvores, prédios, mobílias, etc [14].

O problema da localização pode ser formalmente expresso como a tarefa de se determinar a posição de  $n$  nós de uma rede composta por  $n+m$  nós, onde  $m$  nós possuem posição conhecida e por isso são chamados de *nós de referência*. A solução de um problema de posicionamento pode empregar um ou mais métodos de localização. A técnica *TOA* estima a distância relativa entre o par de nós  $(i, j)$  baseado no tempo que decorre,  $T_{ij}$ , desde a transmissão do sinal pelo nó  $i$  até sua chegada ao nó  $j$ . Este valor é melhor estimado se o nó  $j$  ecoar imediatamente o sinal recebido de  $i$ . Neste caso o intervalo de tempo necessário para que o nó  $i$  receba o eco é dado por  $\Delta = 2 \cdot T_{ij} + \delta_j$ , onde  $\delta_j$  é o tempo que o nó  $j$  demora para retransmitir o sinal recebido, e que é considerado um valor conhecido. Deste modo, medindo-se o valor  $\Delta$  é possível se determinar  $T_{ij}$ . Na prática os valores  $T_{ij}$  caracterizam amostras de uma variável aleatória com distribuição normal [15][14].

A técnica *AOA* não indica distância, mas sim a direção dos nós vizinhos. Pode ser usada de forma complementar ao *TOA* e ao *RSSI*, mas requer o uso de um conjunto de sensores para prover a informação do ângulo de chegada e que precisa ser processada em um *DSP* (*Digital Signal Processor*) para que haja indicação da direção do sinal.

A técnica baseada em *RSSI*, que faz uso da potência do sinal recebido ou da relação sinal-ruído recebida, pode ser empregada com baixo custo ou baixo consumo adicional de energia, pois não requer tanto processamento de hardware adicional como o *TOA* e o *AOA*. Baseado no modelo de perda de percurso é possível estimar a distância entre os nós através do *RSSI*, se a potência de transmissão for conhecida. A potência média recebida para medidas em diferentes locais, numa mesma distância do transmissor, sofre variações devido a topologia do ambiente. Este efeito, denominado de sombreamento, é modelado estatisticamente pela distribuição lognormal [15]:

$$P_r^{dBm}(d) = P_t^{dBm} - 10 \cdot \alpha \cdot \log_{10}(d) + \chi^{dB}, \quad (2)$$

onde  $P_r^{dBm}(d)$  é o valor médio da potência recebida (dBm) à uma distância  $d$ ,  $P_t^{dBm}$  é a potência de transmissão (dBm) e  $\alpha$  é o expoente de perda de percurso. O parâmetro  $\chi^{dB}$  é uma variável aleatória Gaussiana, com média zero (dB) e desvio padrão típico de  $\sigma_\chi \approx 1,7 \cdot \alpha$  (dB) [15], que representa o efeito do sombreamento no modelo de propagação de larga escala. Contudo, quando um nó de referência monitora a potência de um nó desconhecido (assumindo ambos em posições fixas), a variabilidade de potência percebida se deve ao modelo de propagação de pequena escala, ou seja, ao efeito do desvanecimento. Coletando-se diversas medidas é possível minimizar significativamente o erro na estimativa da potência média, realizando-se uma média temporal dos valores coletados.

#### IV. ALGORITMO DE LOCALIZAÇÃO PROPOSTO

O algoritmo de localização proposto se utiliza do método numérico de otimização não-linear de Nelder-Mead [14]. Este método permite minimizar uma função custo em um espaço multi-dimensional, encontrando a solução ótima para um problema de  $N$  variáveis. O método de Nelder-Mead [14] baseia-se no conceito *simplex*, que é um poliedro de  $N+1$  vértices em  $N$  dimensões.

Para o problema de localização nos restringimos ao caso bidimensional, considerando uma rede com  $m$  nós de referência e  $n$  nós a localizar. Passamos a nos referir a este último grupo como nós de posição desconhecida ou simplesmente nós desconhecidos. Os nós de referência são designados pela letra  $j$ , onde  $1 \leq j \leq m$  e os nós

desconhecidos pela letra  $i$ , onde  $1 \leq i \leq n$ . A posição de cada nó é representada por suas coordenadas cartesianas, sendo  $(x_j, y_j)$  para nós de referência e  $(x_i, y_i)$  para os nós desconhecidos. O algoritmo é composto por 7 passos principais, que são detalhados a seguir.

**Passo 1:** Os dados de entrada do algoritmo são as posições dos nós de referência,  $(x_j, y_j)$ ,  $1 \leq j \leq m$  e a matriz de potências medidas,

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & \cdots & M_{1m} \\ M_{21} & M_{22} & \cdots & M_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ M_{n1} & M_{n2} & \cdots & M_{nm} \end{bmatrix},$$

com dimensão  $n \times m$ , cujo elemento  $M_{ij}$  corresponde à potência média das transmissões de  $i$  medidas em  $j$ . Para efeito das simulações, consideramos todos os nós transmitindo na mesma potência. As potências medidas se baseiam no modelo de perda de percurso definido na equação (2). Numa aplicação real, a matriz  $\mathbf{M}$  não seria calculada, pois cada nó é responsável por reportar com que potência média recebe o sinal dos demais nós em seu raio de abrangência. Cada linha desta matriz corresponde a um nó  $i$  que se pretende localizar e cada coluna corresponde a um nó  $j$  de referência. Cada elemento  $M_{ij}$  contém a potência média experimentada em  $j$  devido às transmissões de  $i$ . Por esta razão designamos  $\mathbf{M}$  de matriz de medidas de potência. Esta matriz pode ser esparsa, ou seja, possuir vários elementos nulos, pois nem todos os nós desconhecidos irão estar na abrangência de todos os nós de referência.

**Passo 2** - O segundo passo do algoritmo é definir o conjunto  $\mathbf{H}$  que contém as coordenadas dos nós de referência para cada nó a localizar,  $\mathbf{H}_k = [H_{k1}, H_{k2}, \dots, H_{kp}]$ . Os elementos deste conjunto estão ordenados pelo nível de potência, ou seja, nós de referência mais próximos do nó a localizar. Para o  $k$ -ésimo nó vão existir no máximo  $p$  nós de referência, onde  $p \leq m$ . Para aplicações bidimensionais  $p \geq 3$  e para aplicações tridimensionais  $p \geq 4$ , para que haja solução.

**Passo 3** – Para a localização do  $k$ -ésimo nó desconhecido, define-se  $H_{k1}$  como sendo as coordenadas iniciais de busca para o método de otimização e que corresponde ao nó de referência mais próximo do  $k$ -ésimo nó desconhecido.

**Passo 4** - Baseado nesta coordenada inicial,  $\mathbf{H}_{k1} = (x_k, y_k)$ , é calculado um vetor de distâncias,  $\mathbf{D}_k = [d_{k1}, d_{k2}, \dots, d_{kp}]$ , entre o  $k$ -ésimo nó a se localizar e os nós de referência, onde  $d_{kj}$  é a distância estimada entre o nó desconhecido  $k$  e  $j$ ,

$$d_{kj} = \sqrt{(x_k - x_j)^2 + (y_k - y_j)^2}.$$

**Passo 5** - Emprega-se o modelo de *path loss* para cálculo do vetor  $\mathbf{P}_k = [P_{k1}, P_{k2}, \dots, P_{kp}]$  de potência estimada de recepção em cada nó de referência. Dada a potência de transmissão  $P_t^{dBm}$  de cada nó desconhecido, e a distância estimada no  $d_{kj}$  (passo 4), até seus respectivos nós de referência, calcula-se  $P_{kj}$  que é a potência média teórica esperada em  $j$  devido às transmissões de  $i$ .

**Passo 6** – A função custo é dada pela diferença entre a potência média experimentada pelos nós de referência e a potência teórica calculada no passo 5. Portanto o custo é tanto menor quanto mais próxima a estimativa das coordenadas do nó desconhecido estiver da sua real posição,

$$custo_k = \sum_{j=1}^p |M_{kj} - P_{kj}|.$$

A minimização desta função custo é realizada pelo método numérico de otimização não linear de Nelder e Mead [14]. A função de otimização irá realizar uma série de iterações, refinando as coordenadas do  $k$ -ésimo nó desconhecido,  $(x_k, y_k)$ , com o objetivo de se minimizar a função custo. Caso a otimização não termine com um valor de custo satisfatório recalcula-se o vetor  $\mathbf{H}$  desprezando-se o nó de referência mais próximo e adicionando outro em seu lugar. A busca pelo nó desconhecido re-começa do passo 4 considerando-se como posição inicial o resultado obtido da otimização anterior.

**Passo 7:** Quando o  $k$ -ésimo nó é localizado, ele passa a funcionar como referência para a localização do  $k+1$ -ésimo nó e assim por diante. Isto é bastante importante, pois a localização é mais precisa quanto mais próximos estiverem os nós de referência [15]. O algoritmo continua a partir do passo 2 enquanto houver nós a localizar.

## V. EXEMPLO DE APLICAÇÃO

Tomemos como exemplo a aplicação deste algoritmo na rede mostrada na Figura 1. Esta rede possui 9 nós dispostos em grade, numa área retangular de 20m x 20m, sendo 5 nós desconhecidos e 4 nós de referência localizados nos cantos. Os nós de referência estão representados por um quadrado e os

nós a localizar por um círculo. Assumimos  $\alpha = 2,5$  e potência de transmissão de cada nó,  $P_i = 15$  dBm.

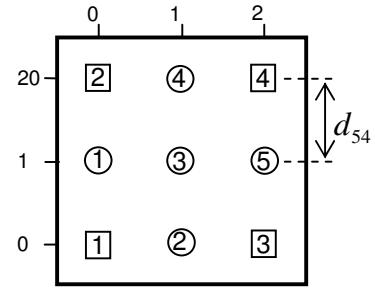


Figura 1: Rede em malha com topologia em grade.

**Passo 1:** Parâmetros de entrada: posições dos nós de referência  $(x_j, y_j)$ ,  $1 \leq j \leq m$  e matriz de potências medidas  $\mathbf{M}$  de tamanho (5,4).

**Passo 2:** O vetor  $\mathbf{H}_k$  obtido para o nó desconhecido número 5 da rede exemplo é:  $\mathbf{H}_5 = [3, 4, 1]$ . Isto significa que os nós de referência 3, 4 e 1 são os mais próximos do nó desconhecido 5.

**Passo 3:** A busca se inicia nas proximidades do nó de referência mais próximo do  $k$ -ésimo nó desconhecido,  $H_{k1}$ . Portanto, para o caso do quinto nó desconhecido, as coordenadas iniciais de busca correspondem à posição do nó de referência 3.

**Passo 4:** Uma vez estabelecida a posição inicial de busca, calcula-se o vetor de distâncias até os nós de referência, que para o quinto nó desconhecido é:  $\mathbf{D}_5 = [d_{53}, d_{54}, d_{51}]$ .

**Passo 5:** Aplica-se o modelo de *path loss* para cálculo do vetor de potências estimadas de recepção:  $\mathbf{P}_5 = [P_{53}, P_{54}, P_{51}]$ . Na simulação consideramos um desvio padrão de  $\alpha * 1,7$  dB nas medidas de potência devido ao sombreamento.

**Passo 6:** O custo para cada um dos  $k$ -ésimos nós desconhecidos é:  $custo_k = \sum_{j=1}^p |M_{kj} - P_{kj}|$ .

**Passo 7:** Os passos de 2 à 6 são repetidos até que todos os nós desconhecidos sejam encontrados. Cada nó localizado passa a fazer parte do possível conjunto de nós de referência para a próxima iteração.

Avaliamos o desempenho do algoritmo de localização, em dois cenários de rede com topologia em grade, um com

dimensão de 20mx20m e outro com dimensão 100mx100m. A topologia em grade possui  $p$  nós dispostos na linha e  $p$  nós disposto na coluna. O gráfico da Figura 2 apresenta o erro médio de localização nos dois cenários, para diferentes números de nós na rede ( $3 \leq p \leq 9$ ). O erro médio é definido como à distância média entre a posição real dos nós e as posições retornadas pelo algoritmo de localização. O algoritmo também foi avaliado para dois valores distintos do expoente de perda de percurso,  $\alpha = 2,5$  e  $\alpha = 3,5$ .

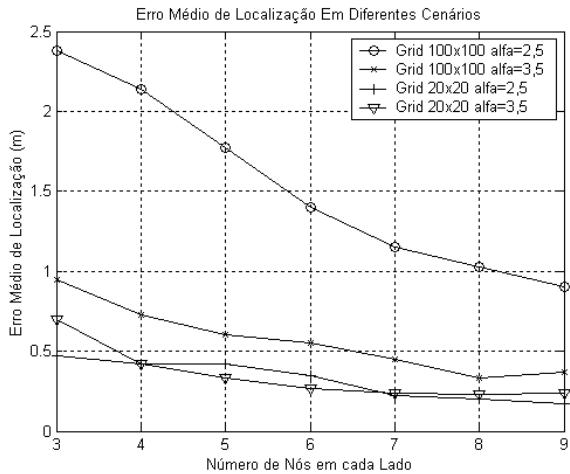


Figura 2: Erro Médio de Localização

Observamos que o erro médio de localização diminui com o aumento da densidade de nós na rede e isto é mais evidente para a rede de maior área. Neste caso, inclusive o expoente  $\alpha$  tem mais influência no erro de localização, pois podemos observar que as curvas para diferentes valores de  $\alpha$  ficaram mais distantes do que para a rede menor. À medida que se aumenta a densidade de nós na rede,  $\alpha$  perde influência no erro de localização.

## VI. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou a proposta de um algoritmo centralizado de localização de nós em redes em malha. Assumimos que os nós da rede são fixos e que existem nós de referência cujas posições são conhecidas. Exploramos a importância de se entender o fenômeno da interferência e contenção e suas implicações. Explicamos princípios de métodos de localização e mostramos como funciona o algoritmo proposto. A informação de localização obtida pode ser utilizada para se otimizar o desempenho da rede, pois fornece informações sobre cada nó da rede como: quais outros nós lhe causam contenção, e com qual nível de potência que as transmissões de cada outro nó lhe afeta. Estes dados podem ser úteis para suporte à algoritmos de roteamento geográfico virtual e escalonamento de transmissões.

Melhoramentos no algoritmo são recomendados para que

se possa fazer a localização multidimensional, isto é, localizar todos os nós em uma única rodada do algoritmo. Também há a necessidade de se estipular o expoente  $\alpha$  de perda por multipercursos de forma independente para cada percurso. O investimento na melhoria do algoritmo se justifica devido à sua simplicidade e ao baixo custo do uso da métrica RSS como medida para estimativa de distância.

## REFERÊNCIAS

- [1] K. N. Ramachandran, M. M. Buddhikot, G. Chandranmenon, S. Miller, E. M. Belding-Royer and K. C. Almeroth, "On the Design and Implementation of Infrastructure Mesh Networks", *Proceedings of IEEE WiMesh2005*, San Jose, CA, Sept 2005.
- [2] J. Jun and M. L. Sichitiu, "The Nominal Capacity of Wireless Mesh Networks", *IEEE Wireless Communicatios*, pp. 8-14, Oct 2003.
- [3] M. Alicherry, R. Bhatia and L. E. Li, "Joint Channel Assignment and Routing for Throughput Optimization in Multi-radio Wireless Mesh Networks", *IEEE Selected Areas in Communications*, Nov. 2006.
- [4] A. P. Subramanian, M. M. Buddhikot and S. Miller, "Interference Aware Routing in Multi-Radio wireless Mesh Networks", *IEEE Workshop on Wireless Mesh Networks (WiMesh)*, 2006.
- [5] Y. Yang, J. Wang and R. Kravets, "Designig Routing Metrics for Mesh Networks", *Proceedings of the IEEE Workshop on Wireless Mesh Networks*, 2005.
- [6] C. E. Perkins and P. Bhagwat, "Highly Dynamic Destination-Sequenced Distance-Vector Routing (DSDV) for Mobile Computers", In *SIGCOMM'94 Conference on Communication Architecture, Protocols and Application*, pp. 234–244, 1994.
- [7] D. B. Johnson and D. A. Maltz, "Dynamic Source Routing in Ad Hoc Wireless Networks", *Mobile Computing*, pp. 353, 1996.
- [8] Charles E. Perkins, Elizabeth M. Royer, "Ad-hoc On-Demand Distance Vector Routing," *wmcsa*, p. 90, *Second IEEE Workshop on Mobile Computer Systems and Applications*, 1999.
- [9] Jacquet, P., Muhlethaler, P., Clausen, T., Laouiti, A., Qayyum, A., Viennot, L., "Optimized Link State Routing Protocol for ad-hoc networks", *Multi Topic Conference, IEEE INMIC 2001. Technology for the 21st Century. Proceedings. IEEE International*.
- [10] D.S.J. Couto, D. Aguayo, J. Bicket, and R. Morris, "A High-Throughput Path Metric for Multi-Hop Wireless Routing", In *MOBICOM*, 2003.
- [11] Jitendra Padhye, Richard Draves, Brian Zill, "Routing in Multi-Radio, Multi-Hop Wireless Mesh Networks", In *Proceedings of ACM MobiCom Conference, September 2003*.
- [12] Jinyang Li, Charles Blake, Douglas S. J. De Couto, Hu Imm Lee, and Robert Morris, "Capacity of ad hoc wireless networks". In *Proceedings of the 7th ACM International Conference on Mobile Computing and Networking*, pages 61/69, Rome, Italy, July 2001.
- [13] Piyush Gupta, P. R. Kumar, "The Capacity of Wireless Networks", *IEEE Transactions On Information Theory*, Vol. 46, NO.2, March 2000.
- [14] J. A. Nelder and R. Mead, "A simplex method for function minimization", *Computer Journal* 7 (1965), 308-313.
- [15] Neal Patwari, Joshua N. Ash, Spyros Kyperountas, Alfred O. Hero III, Randolph L. Moses, and Neiyer S. Correal. "Locating the Nodes - Cooperative localization in wireless sensor networks". *IEEE SIGNAL PROCESSING MAGAZINE*. JULY 2005.
- [16] K. Ramachandran, K. Almeroth, E. Belding-Royer, and M. Buddhikot. "Interference Aware Channel Assignment in Multi-Radio Wireless Mesh Networks". In *Dept. of Computer Science Technical Report, University of California, Santa Barbara, CA*, July 2004.
- [17] Chin-Der Wann, Hao-Chun Chin, "Hybrid TOA/RSSI Wireless Location with Unconstrained Nonlinear Optimization for Indoor UWB Channels", *WCNC 2007 proceedings*.