

# Planejamento de Redes Comunitárias Sem Fio

K. P. S. Chagas, W. M. de Sousa Jr., L. A. DaSilva e F. R. P. Cavalcanti

**Resumo**—A tecnologia IEEE 802.11 é atualmente a mais popular dentre as alternativas de rede local sem fio (WLAN). Inicialmente desenvolvida para prover conectividade sem fio de baixo custo e sem garantias de qualidade de serviço, a família de padrões IEEE 802.11x vem sendo aplicada não somente em redes de pequeno porte e sem planejamento como também em sistemas de larga escala que necessitam de planejamento. Um exemplo disso são as redes de acesso público em ambientes externos, conhecidas como redes comunitárias. Este artigo propõe uma metodologia de planejamento simples para aplicação em redes comunitárias sem fio baseadas no padrão IEEE 802.11. O método de planejamento proposto utiliza algoritmos de otimização para os processos de dimensionamento e distribuição dos pontos de acesso de comunicação sem fio. A viabilidade da metodologia de planejamento proposta foi verificada por meio de um estudo de aplicação prática concebido para uma rede comunitária para cidade de Shreveport, no estado de Louisiana, EUA.

**Palavras-Chave**—WLAN, IEEE 802.11, redes comunitárias, metodologia de planejamento

**Abstract**—The IEEE 802.11 standard for wireless local area networks, WLANs, is currently the most popular choice of WLAN technology. Initially developed to provide low cost wireless connectivity without any assurances of quality of service, the IEEE 802.11x family of standards has been applied from small-scale networks, developed without any planning, to large-scale outdoors public access systems, known as wireless community networks, which require planning. In this article, a simple planning methodology has been proposed for application in wireless community networks based on the IEEE 802.11 standard. The proposed methodology uses optimization algorithms to solve the problems of dimensioning the system and distributing wireless communication access points throughout the network. The feasibility of the proposed planning methodology is verified by means of a study of a practical application conceived for a community network for the city of Shreveport, LA.

**Keywords**—WLAN, IEEE 802.11, wireless community networks, planning methodology

## I. INTRODUÇÃO

O padrão IEEE 802.11 [1], popularmente conhecido como tecnologia Wi-Fi (*Wireless Fidelity*), foi desenvolvido como uma solução simples e de baixo custo para a criação de redes locais sem fio ou WLANs (*Wireless Local Area Networks*). Atualmente, a aplicação dessa tecnologia tem ido muito além das pequenas redes residenciais, cafés e saguões de aeroportos. Originalmente planejado visando aplicações em ambientes internos, o padrão IEEE 802.11, incluindo suas extensões a/b/g/n, está se tornando cada vez mais popular como solução tecnológica para aplicações em ambientes externos.

K. P. S. Chagas e F. R. P. Cavalcanti, Departamento de Engenharia de Teleinformática, Universidade Federal do Ceará, Ceará, Brasil, E-mails: karla.patricia@globo.com, rodrigo@gtel.ufc.br. W. M. de Sousa Jr. e L. A. DaSilva, Department of Electrical and Computer Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginia, EUA, E-mails: waltemar@vt.edu, ldsilva@vt.edu. Este trabalho foi financiado pela CAPES.

Redes de larga escala baseadas no padrão IEEE 802.11, abrangendo áreas amplas como bairros e até pequenas cidades, têm sido implementadas tanto sem fins lucrativos como comercialmente. Tais redes são denominadas *redes comunitárias sem fio*. São exemplos de implementações sem fins lucrativos as redes que abrangem as cidades de Sud Mennucci, no estado de São Paulo, e Piraí, no estado do Rio de Janeiro. Um exemplo comercial é o da rede instalada na cidade de Grand Haven, no estado do Michigan, nos EUA, que utiliza 60 pontos de presença sem fio para cobrir a área de 17 km<sup>2</sup> da pequena cidade e servir cerca de mil assinantes.

Uma rede comunitária sem fio é uma rede de área metropolitana ou MAN (*Metropolitan Area Network*) formada por uma coleção de WLANs, interligadas por meio de tecnologia sem fio (e.g., IEEE 802.16, também conhecido como WiMax) ou de uma infra-estrutura com fio (e.g., através de xDSL), estabelecida para prover acesso interno ao sistema e/ou à Internet numa área abrangendo desde um campus universitário a uma cidade inteira.

Um dos problemas encontrados pelos organizadores de redes comunitárias sem fio — em sua maioria grupos de entusiastas e comunidades que visam compartilhar o acesso à Internet com a vizinhança e visitantes que possuam equipamento Wi-Fi — é a fase de planejamento da rede. A instalação sem coordenação e estratégia de longo prazo de um grande número de pontos de acesso sem fio (APs) gera ineficiências em termos de cobertura e desempenho do sistema que forçam a realização de uma fase de planejamento da rede. Entretanto, as sofisticadas metodologias existentes, desenvolvidas para o planejamento de redes celulares, normalmente estão além das possibilidades financeiras, ou mesmo técnicas, desses projetos. Nesses casos, técnicas simples de planejamento podem fazer toda a diferença, equilibrando as necessidades às possibilidades de projetos de baixo custo e assegurando uma alocação racional dos recursos de rádio capaz de satisfazer os requisitos de desempenho ou cobertura do sistema.

Este artigo propõe uma metodologia de planejamento de uma rede de baixo custo com cobertura de larga escala utilizando tecnologia disponível comercialmente, sem a necessidade de modificar configurações de equipamento ou mesmo requerer mudanças no padrão IEEE 802.11. A viabilidade da metodologia de planejamento proposta é verificada por meio de um estudo de aplicação prática concebido para uma rede comunitária para a cidade de Shreveport, no estado de Louisiana, nos EUA. Simulações dinâmicas de rede são utilizadas para estimar o desempenho do sistema em um cenário realístico de distribuição de usuários e tráfego de dados.

O restante deste artigo está assim organizado. Na seção II, detalha-se as etapas da metodologia de planejamento proposta, incluindo os métodos escolhidos para a realização de cada uma delas. Na seção III, descreve-se o cenário utilizado

como estudo de aplicação da metodologia de planejamento, juntamente com os parâmetros adotados. O planejamento e a análise de desempenho do sistema são realizados nas seções IV e V, respectivamente. Finalmente, o artigo é concluído na seção VI.

## II. METODOLOGIA DE PLANEJAMENTO

Neste trabalho, utiliza-se a terminologia *planejamento do sistema* para caracterizar o processo de alocação de recursos de rádio capaz de satisfazer os requisitos de desempenho ou cobertura do sistema. O planejamento, assim definido, consiste de uma etapa de *dimensionamento do sistema*, responsável pela estimativa da quantidade de recursos (i.e., pontos de acesso) necessária para satisfazer a meta de planejamento, uma etapa de localização desses recursos e uma de alocação de frequências.

A figura 1 resume o algoritmo de planejamento proposto. Utiliza-se uma abordagem que realiza as etapas de dimensionamento e de posicionamento dos APs conjunta e iterativamente até ser alcançada a meta de cobertura desejada. A etapa de planejamento de frequências é realizada separadamente, utilizando como entrada o resultado da fase anterior.

Primeiramente, especifica-se um retângulo que contenha a região de serviço. Em seguida, distribui-se pontos de acesso uniformemente sobre a área do retângulo a fim de prover total cobertura. Essa distribuição uniforme é utilizada como solução inicial para a primeira iteração do algoritmo *Pruning* de remoção de APs, descrito na seção II-B. A solução desenvolvida por esse algoritmo é alimentada no algoritmo VNS (*Variable Neighborhood Search*) de reposicionamento de APs, apresentado na seção II-C. Os dois algoritmos são repetidos nessa ordem, realimentando a solução de saída de um como entrada para o outro, até que seja encontrada uma solução de cobertura que satisfaça o critério de SNR mínima com o menor número de APs possível. Finalmente, realiza-se o planejamento de frequências sobre a solução de posicionamento de APs encontrada.

### A. Algoritmos de Otimização

A escolha dos algoritmos de otimização baseou-se em um estudo feito em [2], onde são discutidos métodos de otimização de cobertura baseados em busca aleatória (*random search*) e descida em gradiente (*gradient descent*). Entretanto, o desempenho desses métodos, incluindo algoritmos genéticos, depende fortemente da escolha das condições iniciais e dos parâmetros de simulação. Além disso, tais métodos sofrem também de convergência lenta, podendo inclusive sequer convergir, o que os torna inapropriados para este trabalho. Optou-se, portanto, pela utilização do algoritmo *Pruning* de otimização combinatorial na etapa de dimensionamento do sistema e do algoritmo heurístico VNS na etapa de posicionamento dos pontos de acesso. Esses algoritmos, descritos detalhadamente em [2], têm como objetivo encontrar a melhor localização dos APs de forma a prover uma cobertura satisfatória de intensidade do sinal em toda a área de serviço.

As soluções propostas utilizam uma modelagem matemática descrita em [3]. O ponto central dessa modelagem reside

### Procedimento *Planejamento*

Seja  $R_S$  a região de serviço;  
 Seja  $W$  a largura e  $H$  a altura de um retângulo contendo  $R_S$ ;  
 Seja  $N$  o número inicial de APs;  
 Seja  $R$  o alcance de um AP e  $L = \sqrt{2} \cdot R$  o lado do quadrado inscrito na circunferência de cobertura deste AP;  
 Seja  $S_0$  uma solução inicial de posicionamento uniforme dos APs  $A_i$ ;  
 Seja  $SNR_{min}$  o valor mínimo de SNR da meta de cobertura e  $u_{SNR}$  o 10º percentil da SNR medida em vários pontos de  $R_S$  distribuídos segundo a caracterização da demanda de tráfego;  
 $N \leftarrow \lfloor W/L \rfloor \cdot \lfloor H/L \rfloor$ , em que  $\lfloor x \rfloor$  retorna o inteiro  $x_i$   $x_{i-1} < x_i \leq x$ ;  
 $S_0 = \{A_1, A_2, \dots, A_N\}$ ;  
 $S \leftarrow S_0$ ;  
**Enquanto**  $u_{SNR} > SNR_{min}$  **faça**  
    $S_V \leftarrow S$ ; (armazena a última configuração válida)  
    $S_0 \leftarrow S$ ;  
   Procedimento *Pruning* para remoção de 1 AP;  
   (*Pruning* opera sobre  $S_0$ , retornando  $S$ )  
    $S_0 \leftarrow S$ ;  
   Procedimento *VNS* para reposicionar os  $K$  APs restantes;  
   (*VNS* opera sobre  $S_0$ , retornando  $S$ )  
**Fim Enquanto**  
 Procedimento *Planejamento de Frequências* aplicado em  $S_V$ ;  
**Fim Procedimento**

Fig. 1. Pseudocódigo do algoritmo de *planejamento*.

na definição de uma função, denominada *função objetivo* (FO), resultante da combinação de duas funções, denominadas *minsum* e *minmax*.

A função *minsum*, definida pela equação 1, tem por finalidade minimizar a soma das predições de perda de percurso (PL, do inglês *Path Loss*) medidas na área de serviço.

$$f_1 = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M w_i \left( g_i^{(k)} + \mu \max \left\{ 0, g_i^{(k)} - s_i \right\} \right), \quad (1)$$

em que  $M$  é o número de estações presentes na área de serviço,  $w_i$  é um fator de peso proporcional à importância da  $i$ -ésima estação, possibilitando assim que algumas regiões na área de serviço sejam priorizadas, e  $g_i^{(k)}$  é a perda de percurso na  $i$ -ésima estação servida pelo  $k$ -ésimo AP. Cada estação associa-se ao AP do qual recebe o sinal mais forte, ou seja, o que proporciona menor perda de percurso, conforme mostra a equação (2).

$$g_i^{(k)} : k = \arg \min_{j=1, \dots, K} \left\{ g_i^{(j)} \right\} \quad \forall i = 1, \dots, M, \quad (2)$$

em que  $K$  é o número total de APs. O termo  $s_i$ , presente na equação (1), define a máxima perda de percurso tolerada pela  $i$ -ésima estação. Dessa forma, sempre que a perda de percurso exceder o limiar  $s_i$ , adiciona-se a  $g_i^{(k)}$  o termo de penalidade  $\mu(g_i^{(k)} - s_i)$ , em que  $\mu$  é o fator de penalidade.

A otimização da função *minsum* tende a melhorar a cobertura média na área de serviço. Contudo, estações localizadas

```

Procedimento Pruning
  Seja  $S_0$  uma solução inicial de posicionamento uniforme dos APs;
   $S_0 = \{A_1, A_2, \dots, A_N\}$ ;
  Seja  $N$  o número inicial de APs;
  Seja  $K$  o número desejado de APs;
   $S \leftarrow S_0$ ;
   $noAPs \leftarrow N$ ;
  Enquanto  $noAPs > K$  faça
     $k \leftarrow 1$ ;
    Enquanto  $k \leq noAPs$  faça
      Retire o AP  $A_k$ ;
      Calcule  $FO(S_k)$ ;
      Reponha AP  $A_k$ ;
       $k \leftarrow k + 1$ ;
    Fim Enquanto
     $k \leftarrow \underset{k=1, \dots, noAPs}{\operatorname{argmin}} \{FO(S_k)\}$ ;
    Retire AP  $A_k$  de  $S$ ;
     $noAPs \leftarrow noAPs - 1$ ;
  Fim Enquanto
  Retorne  $S$ ; //  $S = \{A_1, A_2, \dots, A_K\}$ ;
Fim Procedimento

```

Fig. 2. Pseudocódigo do algoritmo *Pruning*.

remotamente podem ser negligenciadas à medida que a função atinge níveis de boa qualidade média de sinal.

A função *minmax*, por outro lado, tem o objetivo de minimizar as situações de pior caso, ou seja, minimizar a perda de percurso máxima da área servida por cada AP, como mostra a equação 3.

$$f_2 = \frac{1}{K} \sum_{j=1}^K \max_{i \in S_j} \left( w_i \left( g_i^{(j)} + \mu \max \{0, g_i^{(j)} - s_i\} \right) \right), \quad (3)$$

em que  $S_j$  representa o conjunto de estações associadas ao  $j$ -ésimo AP. A otimização dessa função procura assegurar uma cobertura aceitável na estação pior localizada associada a cada AP. Assim, enquanto a função *minsum* prioriza a cobertura média na área de serviço, a função *minmax* concentra-se apenas nas situações de pior caso.

A função objetivo é o resultado da combinação convexa (média ponderada) das funções *minsum* e *minmax*. Sua otimização reflete os objetivos dessas duas funções, ou seja, proporciona uma boa cobertura em toda a área de serviço, enquanto mantém uma cobertura aceitável nas estações posicionadas remotamente. O parâmetro de balanceamento  $\psi \in [0, 1]$  define as contribuições relativas das equações (1) e (3) na função objetivo, como mostra a equação (4).

$$FO = \psi f_1 + (1 - \psi) f_2. \quad (4)$$

É importante notar que o procedimento descrito acima mede a cobertura de sinal em termos de perda de percurso. Por esse motivo, a função objetivo definida pela equação (4) deve ser

```

Procedimento VNS
  Seja  $S_0$  uma solução inicial de posicionamento dos APs;
   $S_0 = \{A_1, A_2, \dots, A_K\}$ ;
   $S \leftarrow S_0$ ;
   $S_{Antigo} \leftarrow S_0$ ;
  Enquanto TRUE faça
     $k \leftarrow 1$ ;
    Enquanto  $k \leq K$  faça
      Encontre o melhor vizinho  $S' \in N_k(S)$ ;
      Se  $FO(S) < FO(S')$  então
         $S \leftarrow S'$ ;
         $FO(S) \leftarrow FO(S')$ ;
      Fim Se;
       $k \leftarrow k + 1$ ;
    Fim Enquanto
    Se  $FO(S) = FO(S_{Antigo})$ 
      então
        Retorne  $S$ ; // Sai do laço
      senão
         $FO(S_{Antigo}) = FO(S)$ ;
    Fim Se
  Fim Enquanto
  Retorne  $S$ ;
Fim Procedimento

```

Fig. 3. Pseudocódigo do algoritmo *Variable Neighborhood Search* (VNS).

minimizada. As seções II-B e II-C apresentam os algoritmos utilizados neste trabalho que fazem uso da função objetivo.

### B. Remoção de Pontos de Acesso: Algoritmo *Pruning*

O algoritmo *Pruning*, também conhecido como algoritmo de poda, tem como objetivo principal diminuir (podar) o número de APs no sistema causando o menor impacto possível à cobertura. A idéia é iniciar o sistema com uma arquitetura de dimensão elevada e ir retirando APs progressivamente até se atingir a dimensão desejada. A figura 2 ilustra o pseudocódigo do algoritmo, proposto em [2]. O algoritmo *Pruning* reduz o número de APs de  $N$  para  $K$ , ou seja, retira  $N - K$  APs do sistema. A cada iteração, o algoritmo calcula o valor da função objetivo, definida pela equação (4), correspondente à retirada de cada um dos APs do sistema e exclui permanentemente aquele cuja remoção resulta no menor valor de FO.

### C. Reposicionamento de Pontos de Acesso: Algoritmo VNS

O algoritmo de Busca em Vizinhança Variável (VNS, do inglês *Variable Neighborhood Search*), proposto em [4], é baseado na simples idéia de empregar diferentes vizinhanças em um algoritmo de busca local, explorando vizinhanças gradativamente mais “distantes” da solução corrente, focalizando a busca em torno de uma nova solução quando um movimento de melhora é realizado. O pseudocódigo do algoritmo é apresentado na figura 3.

O algoritmo é iniciado com uma solução inicial  $S_0$  de posicionamento dos APs. Efetua-se uma busca local na vizinhança

de cada AP  $A_k$  contido na solução  $S$ . A vizinhança de  $A_k$ ,  $N_k(S)$ , é definida como o conjunto dos  $n$  pontos da grade (o retângulo que contém a área de serviço é subdividido numa grade discreta uniforme) que estão mais próximos (distância Euclidiana) de  $A_k$ . O algoritmo faz uma busca local em todos os pontos pertencentes a  $N_k(S)$  e seleciona aquele correspondente ao menor valor da função objetivo, originando a solução  $S'$ . Se a solução ótima local,  $S'$ , for melhor que a solução corrente,  $S$ , isto é, se  $FO(S') < FO(S)$ , a solução ótima local passa a ser a solução corrente. Dessa forma, o algoritmo VNS atua em todos os APs contidos em  $S$ , investigando todas as possíveis soluções presentes na vizinhança da solução corrente. Finalmente, o algoritmo chega a uma solução definitiva quando não é mais possível melhorar o valor de FO.

Neste trabalho, o algoritmo VNS é usado para refinar a solução dada pelo algoritmo *Pruning*. E, apesar de não garantir uma solução de mínimo global, o algoritmo garante ao menos uma solução de mínimo local.

#### D. Planejamento de Frequências

Uma vez determinada a localização dos pontos de acesso, deve-se determinar em qual frequência cada AP deve operar. Esse é um passo importante no processo de planejamento do sistema, pois a alocação adequada de frequências reduz a interferência co-canal e a contenção pelo meio, melhorando o desempenho do sistema.

Neste artigo, considerou-se apenas a alocação de 3 canais não-sobrepostos do espectro de frequência ISM (*Industrial, Scientific, and Medical*), minimizando assim a interferência co-canal. Os canais escolhidos foram 1, 6 e 11, cujas portadoras adjacentes são separadas de 25 MHz.

Uma grande variedade de algoritmos de planejamento de frequências, tais como algoritmos heurísticos e o de busca exaustiva, pode ser utilizada quando a cobertura dos APs é conhecida. No entanto, em linha com o objetivo de realizar um planejamento de baixa complexidade, adotou-se uma alocação de frequências manual, também utilizada em [5]. Esta se apresenta como uma solução simples, porém eficaz, quando o número de APs é pequeno. Utiliza-se o mapa de cobertura dos pontos de acesso a fim de se visualizar as sobreposições das regiões de cobertura individuais. A alocação de frequências é realizada de modo a maximizar as distâncias entre APs operando na mesma frequência.

### III. CENÁRIO DE APLICAÇÃO

A metodologia de planejamento descrita anteriormente foi empregada no planejamento de uma rede comunitária para uma região da cidade de Shreveport, no estado de Louisiana, EUA. A escolha deu-se em função da disponibilidade dos mapas de demografia e dados de morfologia da região, além de um estudo de demanda de tráfego realizado em [6] para o dimensionamento de um sistema celular. Desse modo, a eficiência do planejamento proposto neste artigo é testada em um cenário realista de distribuição geográfica de usuários e de tráfego gerado por estes.

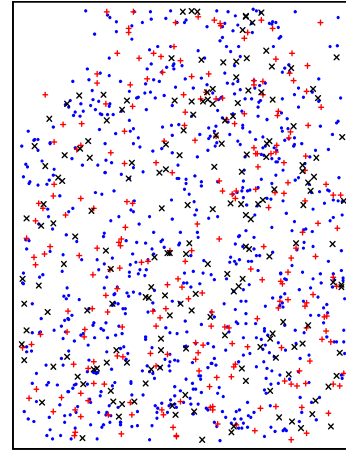


Fig. 4. Região de serviço  $R_S$  e distribuição geográfica dos perfis de usuário com taxa média de 8 kbps (círculo), 64 kbps (cruz) e 144 kbps ('x').

A figura 4 mostra a região de serviço  $R_S$  e a distribuição geográfica dos usuários. Os usuários são divididos em três perfis que compartilham diversas características, dentre as quais o ambiente *outdoor* onde os usuários estão localizados, o padrão de mobilidade pedestre e de baixa velocidade, e a modelagem do tráfego de dados (distribuição de Pareto com parâmetro  $\alpha$  igual a 1,1 [7]). Os fatores diferenciadores são o tipo de terminal de dados (portáteis de mão de baixa capacidade, portáteis de mão de alta capacidade e computadores portáteis) e a taxa média de geração de dados (8, 64 e 144 kbps) [6]. A proporção de usuários no sistema dos três perfis é de 12 usuários com taxa média de 8 kbps para cada 4 usuários de 64 kbps e cada 3 usuários de 144 kbps.

O sistema considerado utiliza o padrão IEEE 802.11b como tecnologia de acesso de rádio. Assume-se neste estudo que não há restrições quanto à localização de pontos de acesso na área de cobertura. A localização exata dos APs depende do procedimento de planejamento e estes são posicionados a 2,4 metros acima do nível do solo. Os APs possuem potência de transmissão fixa de 15 dBm, antena omnidirecional com ganho de 2 dBi e receptor com figura de ruído de 10 dB. Os equipamentos de usuário possuem potência de transmissão fixa de 15 dBm, antena omnidirecional com ganho de 0 dBi e receptor com figura de ruído de 10 dB. Assume-se altura de 1,2 metros em relação ao solo.

### IV. PLANEJAMENTO DO SISTEMA

A primeira etapa do algoritmo de planejamento consiste em achar uma solução de posicionamento uniforme de APs  $S_0$  tal que a área retangular contendo a região de serviço  $R_S$  (figura 4) seja completamente coberta.

A solução  $S_0$  depende do alcance de transmissão dos APs, que pode ser estimado a partir do modelo de propagação (modelo de perda de percurso de dois raios [7]). Assumindo operação a 1 Mbps (IEEE 802.11b usando modulação BPSK) e taxa de erro de quadro (FER, do inglês *Frame Error Rate*) máxima tolerada de 10%, verifica-se que a razão sinal-ruído mínima aceitável é de 10,24 dB. Considerando-se uma margem contra interferência de 10 dB, calcula-se então uma

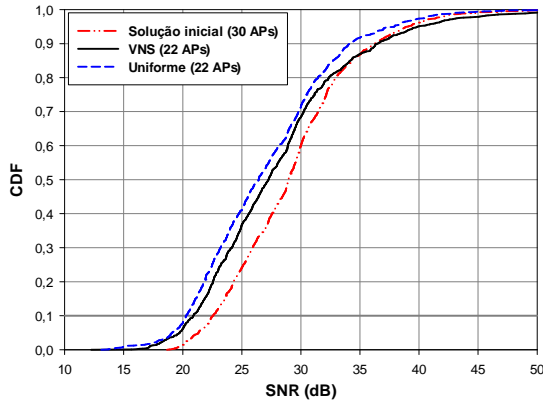


Fig. 5. Função distribuição cumulativa da SNR verificada a partir de soluções com 22 e 30 APs distribuídos uniformemente e 22 APs com distribuição dada pela metodologia de planejamento.

perda de percurso máxima de 97, 73 dB, que corresponde a um alcance de transmissão  $R$  de aproximadamente 471 metros. Obtém-se, assim, uma solução inicial  $S_0$  com 30 pontos de acesso distribuídos uniformemente. Durante a etapa que se segue, assume-se os seguintes parâmetros no cálculo da função objetivo (ver equações 1 a 4): fator de peso  $w_i = 1$ , limiar de perda de percurso  $s_i = 97, 73$  dB, fator de penalidade  $\mu = 2$  e fator de balanceamento  $\psi = 0, 8$ .

Obtida uma solução  $S_0$ , inicia-se o ciclo de operações de remoção de 1 AP e reposicionamento dos APs restantes. O ciclo de redução da solução inicial é continuamente repetido até que seja encontrada uma solução  $S_V$  com um número mínimo de APs satisfazendo a condição  $u_{SNR} > SNR_{min}$ . A variável  $u_{SNR}$  corresponde ao 10º percentil da SNR medida em uma amostra de 1140 pontos da região  $R_S$ . A constante  $SNR_{min} = 20, 24$  dB é o valor mínimo aceitável de SNR acrescido da margem contra interferência.

A solução encontrada pela metodologia de planejamento proposta contém 22 pontos de acesso. A figura 5 compara a função distribuição cumulativa da SNR medida em três cenários de distribuição dos pontos de acesso: 30 APs distribuídos uniformemente; 22 APs com distribuição aproximadamente uniforme; e 22 APs distribuídos pelo algoritmo VNS.

Em termos de cobertura, o desempenho da solução do algoritmo de planejamento é ligeiramente inferior ao obtido com a solução inicial de 30 APs. Isso revela uma vantagem óbvia em se aplicar a metodologia de planejamento, uma vez que, no caso em estudo, foi possível reduzir o número de APs utilizados em cerca de 27% em relação à solução inicial e ainda manter a cobertura acima do limiar de 20, 24 dB no ponto de 10º percentil da SNR.

Vê-se também na figura 5 que 22 APs com distribuição aproximadamente uniforme provêm uma cobertura inferior à obtida com o algoritmo VNS, porém ainda acima do requisito de qualidade estabelecido. Em termos de cobertura, esse resultado leva a crer que o ganho obtido com a metodologia de planejamento apresentada neste trabalho é apenas marginalmente vantajoso. Aparentemente, é possível reduzir ainda mais a complexidade das etapas de dimensionamento

e localização de bases — contornando-se completamente os algoritmos *Pruning* e VNS — com uma abordagem de simples busca de uma solução que satisfaça o requisito de qualidade com número mínimo de APs distribuídos uniformemente na região de serviço. Porém, como mostra a seção seguinte, o que pode parecer uma vantagem em complexidade, ao custo de uma pequena desvantagem de cobertura, pode resultar em uma redução considerável em termos de capacidade do sistema.

## V. AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DO SISTEMA

Uma vez planejado, o desempenho do sistema é avaliado através de simulações dinâmicas da comunicação entre os pontos de acesso do sistema e vários usuários com sessões em andamento. Utilizou-se para isso a ferramenta de modelagem de redes *QualNet*®. A figura 6 ilustra o modelo de simulação do sistema. Utiliza-se na camada de transporte o protocolo UDP e na camada de rede o protocolo IP e o protocolo de roteamento Bellman-Ford para atualizar as tabelas de rotas do roteador e dos pontos de acesso [7].

A fim de quantificar o desempenho sistêmico, utilizam-se duas métricas. Uma delas, o grau de serviço (GOS), mede a fração de usuários cujo nível de qualidade de serviço verificado é considerado satisfatório. Define-se um usuário como satisfeito com a qualidade percebida se, ao final da sessão, a fração de pacotes perdidos for inferior a 1% e a vazão média de dados medida na camada de aplicação for superior a 90%, 80% e 70% para os usuários de 8, 64 e 144 kbps, respectivamente. O grau de serviço de 90% é utilizado como nível de referência da capacidade do sistema. A outra métrica de desempenho sistêmico é a vazão média agregada medida na camada de aplicação. A vazão de dados por usuário em ambas as métricas é medida como a razão entre o volume de dados gerado durante a sessão e o intervalo de tempo desde a geração do primeiro pacote até o recebimento do último pacote. Dessa forma, a vazão média agregada é dada como a soma dos valores de vazão verificados por cada um dos usuários do sistema.

Os resultados de planejamento do sistema, discutidos anteriormente, mostraram que a cobertura provida por uma

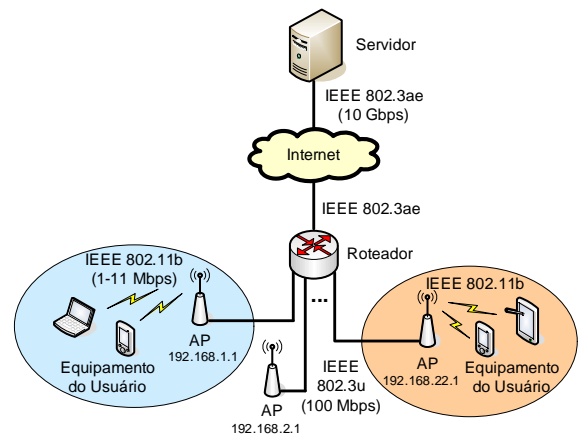


Fig. 6. Modelo do sistema utilizado no simulador de redes *QualNet*®. Um único servidor gera os fluxos de dados de cada usuário do sistema que são então encaminhados por um roteador até os respectivos pontos de acesso.

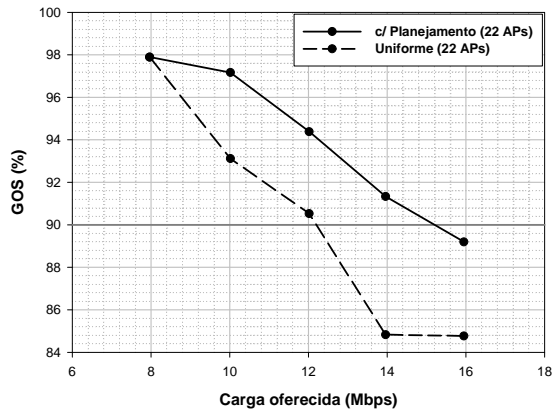


Fig. 7. Comparação de desempenho em termos de grau de serviço (GOS) entre o sistema com 22 APs distribuídos uniformemente e o sistema planejado.

distribuição aproximadamente uniforme de 22 APs é apenas marginalmente inferior àquela provida por uma quantidade semelhante de APs localizados de acordo com a metodologia de planejamento proposta neste trabalho. Analisa-se a seguir o desempenho dessas soluções de planejamento.

A figura 7 mostra que, para valores muito baixos de carga oferecida (por exemplo, 8 Mbps), o grau de serviço é semelhante para ambas as soluções de planejamento. Para cargas mais elevadas, entretanto, o desempenho do sistema com distribuição uniforme de APs é bastante inferior em termos de grau de serviço. Isso significa que, para uma dada carga oferecida, verifica-se um número maior de usuários satisfeitos no sistema obtido a partir da metodologia de planejamento. E, de acordo com a figura 8, constata-se que a perda de pacotes é o principal fator limitante do desempenho do sistema. Isso pode ser concluído a partir do fato de que, para vários níveis de carga oferecida, a razão entre carga de saída e carga de entrada é aproximadamente constante e igual a um.

Uma possível explicação para o melhor desempenho da solução obtida com a metodologia de planejamento reside na correlação existente entre esta e as grades de tráfego, que refletem a distribuição espacial dos usuários. Em outras palavras, a solução da metodologia de planejamento promove uma melhor distribuição dos APs em relação à distribuição espacial dos usuários, enquanto que a solução de distribuição uniforme dos APs resulta num maior desbalanceamento do número de usuários por AP, levando a uma maior ocorrência de casos extremos como APs sub-utilizados e sobrecarregados. Naturalmente, a redução de desempenho do sistema deve-se aos APs congestionados.

## VI. CONCLUSÕES

Neste trabalho, apresentou-se uma metodologia de planejamento de baixo grau relativo de complexidade, visando sua aplicação em sistemas de comunicação pública baseados em redes locais sem fio, WLANs. Esses sistemas têm como requisito básico planejamento, implantação e operação simples e de baixo custo. A metodologia proposta inclui uma fase de dimensionamento do sistema e posicionamento de pontos de acesso realizada iterativamente até satisfazer um critério de

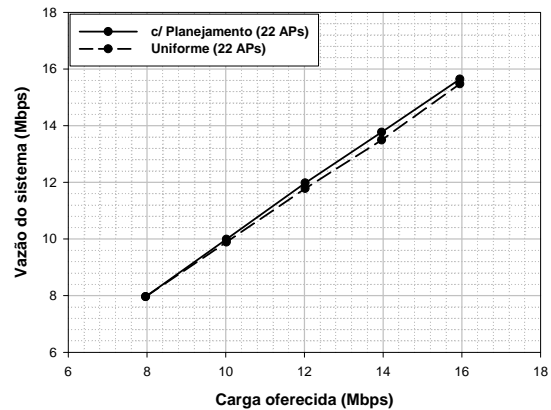


Fig. 8. Comparação de desempenho em termos de vazão do sistema entre o sistema com 22 APs distribuídos uniformemente e o sistema planejado.

cobertura. O planejamento é então concluído com a etapa de alocação de frequências.

A fim de se estudar a aplicabilidade e o desempenho da metodologia de planejamento proposta, escolheu-se um cenário realista de distribuição geográfica de usuários e do tráfego gerado por estes. O cenário escolhido corresponde a uma seção da cidade de Shreveport, nos EUA, cujos mapas demográficos e morfológicos foram utilizados a fim de se estimar a demanda de tráfego da região de serviço do sistema.

Os resultados de planejamento do sistema mostraram que a metodologia proposta resulta numa alocação eficiente de recursos de rádio capaz de satisfazer o critério de cobertura desejado (cerca de 21 dB no 10º percentil de SNR). No caso estudado, a área de aproximadamente 17 km<sup>2</sup> foi satisfatoriamente coberta com 22 pontos de acesso. A avaliação de desempenho mostrou que o sistema com essa configuração atinge uma vazão de aproximadamente 15 Mbps com um grau de serviço (GOS) de 90% de usuários satisfeitos. Essa capacidade do sistema é cerca de 25% superior ao obtido com uma distribuição uniforme de pontos de acesso, evidenciando a vantagem da metodologia de planejamento proposta.

## REFERÊNCIAS

- [1] IEEE Std. 802.11, Part 11, "Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications", Tech. Rep., IEEE, 1999.
- [2] M. Unbehaun, "On the Design and Deployment of Low-cost Wireless Infrastructure", Tese de doutorado, Royal Institute of Technology, Suécia, 2002.
- [3] H. D. Sherali, C. M. Pendyala e T. S. Rappaport, "Optimal location of transmitters for micro-cellular radio communication system design", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, v. 14, n. 4, p. 662-673, Maio 1996.
- [4] N. Mladenovic e P. Hansen, "Variable neighborhood search", *Computers and Operational Research*, v. 24, p. 097-1100, 1997.
- [5] A. Hills, "Large-scale wireless LAN design", *IEEE Communications Magazine*, v. 39, n. 11, p. 98-104, Novembro 2001.
- [6] L. Z. Ribeiro, "Traffic Dimensioning for Multimedia Wireless Systems", Tese de doutorado, Virginia Polytechnic Institute and State University, EUA, Abril 2003.
- [7] K. P. S. Chagas, "Planejamento de Redes Comunitárias Sem Fio", Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Ceará, Brasil, Fevereiro 2005.