PLANEJAMENTO DE REDES *MESH* COM APLICAÇÃO DO MODELO HIPERCUBO PARA VERIFICAÇÃO DE PARÂMETROS DE QoS

Marlon da Silva
Mestrado em Computação Aplicada - CAP
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Avenida dos Astronautas, 1758, São José dos Campos - SP
marlon.silva@lac.inpe.br

Edson Luiz França Senne
Departamento de Matemática - DMA
Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá - UNESP
Av. Dr. Ariberto Pereira da Cunha, 333, Guaratinguetá - SP
elfsenne@feg.unesp.br

Nandamudi Lankalapalli Vijaykumar
Laboratório Associado de Computação e Matemática Aplicada - LAC
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Avenida dos Astronautas, 1758, São José dos Campos - SP
vijay@lac.inpe.br

RESUMO

O crescimento da utilização de redes sem fio vem contribuindo para o avanço tecnológico desta área. Uma destas tecnologias é a rede *mesh*. Neste trabalho discute-se o planejamento de redes *mesh*, nas quais, imagina-se, são utilizados serviços de dados, áudio e vídeo, de modo a garantir a qualidade de serviço desejada. Para isto, apresenta-se um algoritmo que elabora o planejamento da rede *mesh*, levando em conta um parâmetro de QoS: a taxa de perda de pacotes. O algoritmo baseia-se na simulação Monte Carlo, associada ao modelo hipercubo de filas.

PALAVRAS CHAVE. Redes *mesh*. Modelo hipercubo. QoS. Simulação.

ABSTRACT

Use of wireless networks has been increasing and has contributed to technological advances in the area of networks. One such technology is mesh networks. This paper discusses mesh network planning, in which, guarantee of Quality of Service (QoS) must be considered taking into account that data, audio and video information are used in the network. In order to guarantee the quality of the networks, it is necessary that they comply with QoS parameters. So, an algorithm has been developed to plan a mesh network by observing whether the QoS parameters satisfy the expected values. QoS parameters include package loss. The algorithm is based on Monte Carlo simulation applied to Hypercube model.

KEYWORDS. Mesh networks. Hypercube queuing model. QoS. Simulation.

1. Introdução

Recentemente, redes sem fio tornaram-se populares, sendo cada vez mais utilizadas por empresas, instituições de ensino e pesquisa e até mesmo por usuários domésticos. A tecnologia mais utilizada é a Wi-Fi (Lee et al. 2006). Com o aumento da demanda de mercado da tecnologia sem fio, outras tecnologias foram criadas, como a rede WiMAX e as redes em malha (redes *mesh*). A tecnologia WiMAX possui uma área de cobertura extensa, com conexão via rádio. As redes *mesh* interligam vários roteadores em uma mesma rede. Estas tecnologias possibilitam a utilização de um serviço portátil em qualquer lugar dentro de uma área de cobertura.

As redes sem fio em malha, ou redes *mesh*, acompanham este crescimento. As redes em malha utilizam como característica a transmissão multissalto para estender a área de cobertura de uma rede sem fio para outras localidades em que o sinal de um roteador não é capaz de alcançar, permitindo a transmissão de dados para vários outros roteadores até alcançar o cliente desejado.

A estrutura de uma rede *mesh* se assemelha à estrutura de uma rede *ad hoc*, onde todos os nós da rede estão em uma mesma hierarquia, não havendo a existência de um servidor que administre toda a rede.

Basicamente, uma rede *mesh* é composta por nós que utilizam o serviço oferecido – os clientes – e por nós encarregados de transmitir ou repassar as informações que atenderão os clientes da rede – os *Access Points*, ou APs, também classificados como roteadores. Estes roteadores possuem tecnologia para transmitir em múltiplos canais de radiotransmissão e podem ser conectados a outros dispositivos semelhantes, sendo responsáveis por fazer a comunicação dos clientes à rede. Existem outros APs específicos, que estão conectados a uma outra rede que fornece à rede *mesh* conexão com a Internet – os *gateways*.

Ao longo do tempo tem crescido a utilização de variados tipos de informações que trafegam na Internet. Com o aumento da velocidade de transmissão, o uso de dados multimídia (áudio e vídeo) cresceu e as aplicações que utilizam estes recursos vêm sendo muito utilizadas, como o caso da telefonia e televisão. Entretanto, informações multimídia necessitam de grande quantidade de pacotes de dados e de maior rapidez em seu atendimento, por serem informações sensíveis a atrasos. Para medir se uma rede atende ou não um dado tráfego de dados são utilizados parâmetros de QoS (Qualidade de Serviço) tais como: taxa de transmissão, atrasos, jitter, perda de pacotes, dentre outros, a partir dos quais pode-se aferir se a rede apresenta o nível de desempenho desejado.

Algumas técnicas são utilizadas para medir os parâmetros de QoS. Estas métricas influenciam diretamente no planejamento da rede e podem indicar a necessidade de adequação na topologia da rede. Um dos modelos possíveis para simular o comportamento dos parâmetros de QoS em uma rede *mesh* é o modelo hipercubo. Este modelo leva em conta as taxas de demanda de serviço dos clientes e as taxas de atendimento dos APs. Além disso, o modelo considera que cada AP possui uma fila de atendimento e pode se encontrar em dois estados: ocupado e disponível.

O planejamento de uma rede *mesh* precisa decidir quais e quantos equipamentos devem compor a malha, de modo a satisfazer as necessidades dos clientes e oferecer um serviço de qualidade, levando em conta a minimização de custos. Neste trabalho, deseja-se verificar se a rede atende a uma taxa tolerada de perda de pacotes. Inicialmente, por meio do problema de p-medianas capacitado (Senne et al., 2005; Lorena e Senne, 2004), são escolhidos *p gateways* e, através de uma verificação dos clientes que ainda não estão cobertos pela rede, novos APs são ativados para compor a topologia inicial. Em seguida, através do algoritmo de simulação de Monte Carlo aplicado ao modelo hipercubo (Atkinson et al., 2008) determina-se a taxa atual de perda de pacotes. Caso os valores do parâmetro de QoS fornecidos pelo algoritmo sejam maiores do que a taxa tolerada que se espera atingir, a topologia da rede deve ser alterada de modo a incluir novos APs.

O trabalho está estruturado da seguinte maneira: a Seção 2 enumera os principais trabalhos referentes às características, planejamento e medição de parâmetros de QoS em uma rede *mesh*, além das principais características do modelo hipercubo. A Seção 3 mostra o

algoritmo de planejamento da rede *mesh* utilizando o modelo hipercubo para avaliar a probabilidade de perda de pacotes durante o tráfego de informações na rede. Na Seção 4, são apresentados alguns resultados da aplicação do algoritmo em um planejamento de rede a ser instalada em um bairro de uma cidade. As conclusões do trabalho são encontradas na Seção 5.

2. Trabalhos Relacionados

2.1 Redes *Mesh*

Akyldiz et al. (2005) apresentam um panorama geral das principais definições, características e aplicações de redes *mesh* sem fio. As redes *mesh*, ou redes em malha (Figura 1), são redes que possuem como principais componentes equipamentos conhecidos como pontos de acesso ou APs e equipamentos clientes. Os APs podem ser classificados como roteadores ou como *gateways*. Os roteadores possuem várias interfaces de rede e se comunicam para manter a conectividade da rede. Possuem uma potência de transmissão pequena e, em geral, utilizam a tecnologia multissalto, que transmite a informação desejada de AP a AP até alcançar o cliente desejado. Os *gateways* são APs conectados à rede cabeada e provêm o acesso à Internet para a rede, permitindo também que a rede *mesh* possa ser integrada a outras redes sem fio. Os clientes são equipamentos que possuem apenas uma interface de rede e podem demandar acesso à Internet, além de poderem trabalhar como roteadores, em alguns casos.

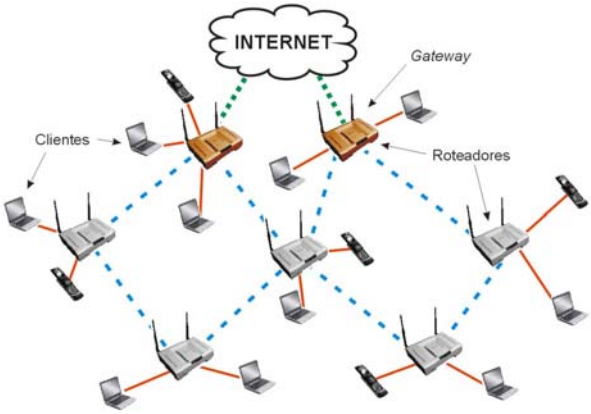

Figura 1 - Uma rede em malha

Redes sem fio estão sendo adotadas por diversos tipos de consumidores e vêm sendo instaladas em residências, edifícios, universidades, empresas, estabelecimentos comerciais e em meios de transporte. Lee et al. (2006) afirmam que a tecnologia em malha sem fio permite que redes possam ser constituídas em áreas cuja cobertura seja grande, onde é difícil a instalação de cabos condutores e em locais que se encontram em situação de emergência. Destacam-se três padrões adotados para redes sem fio em malha – o padrão IEEE 802.16a, que abrange as redes WiMAX, o IEEE 802.11s, mais conhecidas como redes Wi-Fi e o IEEE 802.15.5, que correspondem às redes ZigBee.

Cabral e Mateus (2009) mostram que as redes *mesh* são uma abordagem interessante na tecnologia de redes de computadores, pelo fato de possibilitarem a comunicação entre redes cabeadas com roteadores sem fio, a fim de atender simultaneamente clientes fixos e móveis.

2.1.1 Planejamento de Redes *Mesh*

O planejamento de redes *mesh* tem como principal objetivo atender, da melhor maneira possível, todos os clientes. Para isto, no planejamento de redes *mesh* procura-se determinar o número e a localização de APs necessários para prover a cobertura desejada e quais destes APs deverão ser *gateways*.

Em Sen e Raman (2007), o planejamento de redes *mesh* é feito para um conjunto de vilas que devem ser equipadas com conectividade de rede de um dado nó fixo. O objetivo é determinar o custo mínimo, a fim de atender às condições de *throughput*, potência e interferência no enlace entre nós. No problema, são adotadas como variáveis a topologia de rede multissalto (layout), altura da antena – ambas afetam o custo do sistema – e o tipo de antena e suas orientações e a potência de transmissão no sistema – que afetam toda a performance da rede.

Em Badia et al. (2009), o planejamento parte de um grafo G(N, E), em que N é o conjunto de roteadores e E suas respectivas ligações. O objetivo é pesquisar conjuntamente o roteamento e a atribuição na entrega de um pacote de dados de um nó da rede a um outro nó específico, sujeito às condições de fluxo, compatibilidade e interferência que são encontradas na rede.

Em Amaldi et al. (2008), o planejamento de redes *mesh* é tratado como um modelo de programação linear inteira e visa minimizar o custo total de instalação, otimizar o número e os locais de roteadores e *gateways* e a atribuição de canal, levando-se em conta ambos os requisitos de localização e de conectividade multissalto. Dado um conjunto de pontos candidatos para instalar os dispositivos (roteadores e *gateways*) e um conjunto de pontos de teste, o objetivo é minimizar os custos para cobrir todos os pontos de teste espacialmente distribuídos.

Cabral (2008) define como meta para o planejamento de redes *mesh*, determinar a quantidade de recursos necessários para atender à demanda estimada para os clientes, levando em conta a topologia da rede, mobilidade, modelo de tráfego, custo e capacidade. Os nós possuem valores para a capacidade de comunicação da rede e existem restrições de energia associadas aos clientes. Um modelo de programação matemática visa encontrar a topologia ótima para um conjunto fixo de clientes, roteadores e *gateways*, minimizando a soma de custos de instalação e dos custos de enlaces entre clientes e roteadores, com o intuito de atender às demandas dos clientes e garantir que o modelo atenda primeiramente às demandas exigidas pelos clientes, de acordo com as limitações de roteadores, interfaces e enlaces disponíveis.

2.1.2 QoS em Redes *Mesh*

Para Abelem et al. (2007), a qualidade de serviço (QoS) da rede é a capacidade da rede de oferecer garantias de serviço para determinados tipos de tráfego, através das tecnologias disponíveis. Neste trabalho, são enumeradas as principais características de QoS em uma rede *mesh*, como métricas que são adotadas para medir quão boa está a rede, de acordo com critérios estabelecidos para atender determinadas demandas. As medidas de desempenho são aplicadas, principalmente, para atender demandas de pacotes multimídia (áudio e vídeo).

Hilário et al. (2007) apresentam alguns protocolos de comunicação em redes *ad hoc*, onde não há a necessidade de um nó centralizador e todos os nós estão em um mesmo nível hierárquico, pois são importantes para o estabelecimento dos parâmetros de QoS na rede. Os principais protocolos são divididos em dois tipos: pró-ativos e reativos. Os reativos elaboram as rotas de roteamento de acordo com a demanda e os pró-ativos possuem uma tabela com as rotas já definidas, independentemente se os roteadores estão ociosos ou não.

Silva e Albuquerque (2009) mostram a priorização de pacotes de áudio sobre uma rede *mesh*. O trabalho utiliza três importantes parâmetros para a avaliação da qualidade da rede: perda de pacote, atraso e taxa de atraso (*jitter*). As redes *mesh* são consideradas como redes IP comuns (padrão IEEE 802.11) e não oferecem garantia de QoS, por serem baseadas no modelo de melhor esforço (*best efforts*), ou seja, realiza o melhor esforço para transportar o pacote de dados o mais rápido possível, mas não oferece garantia em relação a atraso. Outro fator desfavorável é que redes IP costumam trafegar dados onde o atraso não influencia na qualidade, além de possíveis interferências devido à proximidade de outros dispositivos que não compõem a rede.

2.2 Modelo Hipercubo

Segundo Larson e Odoni (1981), Mendonça e Morabito (2001) e Iannoni e Morabito (2006), o modelo hipercubo baseia-se na teoria de filas espacialmente distribuídas e em aproximações markovianas, e consiste em expandir o espaço de estados de modelos de filas simples com múltiplos servidores, tratando cada servidor individualmente. O modelo envolve a solução de um sistema linear com 2^N equações, em que N é o número de servidores, cujas variáveis correspondem às probabilidades do estado em que o sistema se encontra, onde são representados os estados de todos os servidores.

Para Larson e Odoni (1981), o modelo hipercubo é aplicado em situações que atendam demandas de serviços em situações complexas ou em políticas de despachos de unidades de atendimento de modo uniforme e com um modelo analiticamente tratável. Alguns elementos são fundamentais para a aplicação do modelo hipercubo em um determinado problema, dentre os quais, destacam-se:

- *Átomos*, que são subdivisões da área de abrangência do serviço;
- As requisições de serviço são geradas como um processo de Poisson, independente para cada átomo. As taxas são conhecidas ou estimadas;
- *Servidores* de onde partem o atendimento para um determinado átomo, cujos locais são conhecidos, sendo alocados em um ou mais átomos. Uma única unidade de resposta é enviada ao local da requisição. Caso ela esteja ocupada, o pedido entra na fila de atendimento, ou é perdido, ou é encaminhado para um outro posto secundário (*backup*).
- Tempo de atendimento, desde o tempo de viagem, de preparo e de atendimento, com um valor médio previamente conhecido, originando as taxas de atendimento.

O nome hipercubo é derivado do espaço de estados do sistema, onde cada estado corresponde a um vértice do hipercubo. Um estado é representado pelo conjunto de servidores que estão livres e ocupados. Os servidores livres são representados por 0 e os servidores ocupados são representados por 1, sempre respeitando a ordem dos servidores (Figura 2).

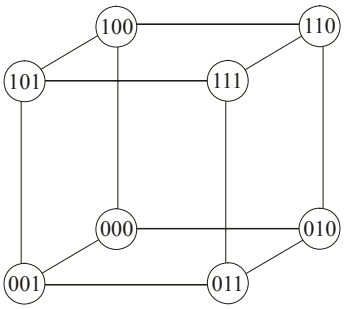

Figura 2 – Modelo hipercubo com três servidores (Larson e Odoni, 1981)

Com estes elementos, é possível representar o modelo por meio de uma cadeia de Markov, com base em um sistema de filas M/M/N, onde cada estado da cadeia representa um determinado conjunto de valores que representam a disposição dos servidores da rede e as transições entre os estados possuem os valores das taxas de chegada e de atendimento com base nos servidores envolvidos na transição.

Iannoni e Morabito (2006) mostram que é possível obter medidas de desempenho, como tempo médio de resposta, cargas de trabalho dos servidores, fração de despacho e medidas agregadas ao tempo de viagem, através de um algoritmo genético para encontrar a solução para o problema, onde os cromossomos representam o espaço de estados do modelo e, a partir da análise do comportamento do sistema, as medidas de desempenho são obtidas.

Em Atkinson et al. (2006), é proposta uma solução analítica para a obtenção das probabilidades-limite dos estados que representam a disponibilidade total dos servidores, onde encontra-se, por meio de equações, medidas de desempenho como probabilidade de perda, carga de trabalho e *throughput*. São propostas duas heurísticas para o problema. A heurística H1 trata

cada servidor separadamente, adotando inicialmente apenas as taxas de chegada de primeira preferência de atendimento para obter a probabilidade de perda de chamadas e a carga de trabalho de cada servidor. A heurística H2 possui a mesma base da heurística H1, mas os cálculos estimados para as medidas de desempenho são feitos de três em três servidores, tratando cada grupo como um subsistema e é calculada a probabilidade-limite de cada estado do sistema com os três servidores, obtendo um sistema com 2^3 equações.

Os mesmos autores (2008) propuseram um sistema onde cada servidor se encontra em três situações – disponível (0), ocupado atendendo um átomo de primeira (1) e segunda (2) preferências – obtendo um sistema com 3^N equações. Para o problema, são propostas mais duas heurísticas e um algoritmo de simulação Monte Carlo. A primeira heurística, denominada H2*, é uma adaptação da heurística H2 para o espaço de estados. A heurística H3 baseia-se na ideia de, a partir do cálculo da probabilidade de perda, obter por meios iterativos, um valor satisfatório para a probabilidade de perda de chamadas. O algoritmo de simulação Monte Carlo é aplicado para sistemas onde o número de bases é grande e o funcionamento do sistema é simulado, a fim de verificar o comportamento do sistema, através de chamadas pseudoaleatórias. As medidas de desempenho são obtidas por meio de frequência relativa dos dados e obtém-se um valor aproximado de um conjunto grande de servidores em um tempo computacional reduzido.

Com base nestas informações, é possível adequar o modelo hipercubo dentro do planejamento de redes *mesh*. Considerando que, cada AP pode ser um servidor para um grupo de clientes, considerados como átomos e que demandam serviço para os APs. Sua principal função é avaliar a qualidade da rede, como a probabilidade de perda de pacotes de dados. Uma das maneiras possíveis de obter tais medidas é pela utilização da simulação Monte Carlo para o modelo hipercubo. A vantagem de utilizar a simulação Monte Carlo para a verificação dos parâmetros de QoS é a possibilidade de ajustar o comprimento das filas de uma maneira que não altera no tamanho do modelo.

3. O Algoritmo Proposto

Inicialmente, são dados no problema dois conjuntos espacialmente distribuídos. Seja um conjunto $P = \{1, 2, ..., n\}$ de locais pré-fixados onde poderão ser instalados os APs e um conjunto $C = \{1, 2, ..., m\}$ de clientes fixos que irão se conectar à rede por meio dos roteadores. Os clientes e os APs são representados em um sistema de coordenadas no plano cartesiano, por meio de suas coordenadas (x, y).

Uma solução para o problema de planejamento da rede é construída inicialmente. É aplicado o problema das p-medianas capacitado, utilizando a heurística Lagrangeana/Surrogate (Senne et al., 2005; Lorena e Senne, 2004) para identificar quais dos APs serão os *gateways*, cuja quantidade será determinada inicialmente. Os demais (n - p) pontos serão APs alimentados por estes *gateways* e que garantam uma cobertura para todos os clientes. No entanto, é escolhido apenas um AP por vez que esteja dentro do raio de cobertura de cada *gateway* e que cobre o maior número de clientes ainda não cobertos para serem incluídos na topologia. Em seguida, o processo é repetido nos APs que foram selecionados anteriormente, até que todos os clientes estejam cobertos na rede.

Uma vez definida uma estrutura para a rede, é preciso verificar se esta estrutura atende aos parâmetros de QoS estabelecidos para que os clientes estejam satisfeitos com o serviço oferecido. Se os valores dos parâmetros não atingirem aos estabelecidos para qualidade de serviço, a rede não atende às especificações de qualidade e são feitas algumas alterações na sua topologia, como a inclusão de um AP na rede.

Considera-se que o trafego na rede possua taxas de chegada de pacotes em um AP e de atendimento de um AP a clientes e a outros APs conectados a ele. As taxas de chegada podem ser aproximadas por um processo de Poisson. As três taxas se distinguem devido ao fato das informações sofrerem algum tipo de prioridade em seu atendimento pelo roteador. Essa prioridade é estabelecida por causa dos pacotes de áudio e vídeo serem mais sensíveis a possíveis

perdas de pacote, devendo ser atendidos prontamente para que a qualidade dos serviços da rede não seja comprometida. Cada cliente demanda serviço por meio de três taxas:

- λ_{di} é a taxa de requisição de dados;
- λ_{ai} é a taxa de requisição de áudio;
- λ_{vi} é a taxa de requisição de vídeo, para $i \in C$.

As taxas de atendimento possuem um comportamento de uma distribuição exponencial. Como o modelo de tráfego de informações basicamente comporta apenas uma memória de armazenamento, então é tratada apenas uma fila de atendimento, independente do tipo de dados que trafega na rede. Neste modelo, para cada AP utilizado, haverá uma taxa de atendimento μ_j, com $j \in P$.

Com estes valores, a aplicação do modelo hipercubo em uma rede *mesh* consiste em avaliar o comportamento da rede, dada a sua topologia, com o objetivo de obter medidas de desempenho que possam atender aos parâmetros de qualidade de serviço (QoS) ideais para atender a demanda dos clientes. A grande diferença do modelo utilizado em relação ao modelo hipercubo original é que um AP pode servir a outro da mesma forma que um cliente, porém, com suas taxas de chamada resultantes dos clientes e APs que estão ligados a ele.

Seja $u = (u_1, u_2, ..., u_n)$ o vetor que representa o estado em que se encontram os n APs. Cada roteador, devido ao seu estado de trabalho, pode estar disponível para atender a um cliente ou, no momento em que chega uma requisição da rede, pode estar ocupado para o atendimento de outro cliente. Quando o i-ésimo AP está disponível, $u_i = 0$ e quando estiver ocupado, $u_i = 1$. Na simulação, será admitido que u_i é igual a um número qualquer que pertença ao conjunto {0, 1, 2, ..., c}, sendo que c corresponde ao número máximo de pacotes que podem ser inclusos na fila de atendimento de cada AP.

Usualmente, são adotados modelos analíticos para a obtenção das medidas de desempenho através do cálculo das probabilidades-limite dos estados encontrados no modelo (Atkinson et al., 2006; 2008; Mendonça e Morabito, 2001; Iannoni e Morabito, 2006). Porém, a utilização do modelo analítico para a obtenção dos resultados pode gerar uma grande quantidade de equações. Neste caso, pelo fato de existir filas nos servidores e cada AP se encontrar em dois estados, seria utilizado um sistema linear com $(c + 1)^n$ equações, com c sendo o tamanho da fila, o que seria muito custoso em termos computacionais para casos reais com uma grande quantidade de APs.

Para evitar este grande esforço computacional, uma das estratégias utilizadas é a utilização de simulação Monte Carlo (Atkinson et al., 2008). Com a simulação, é possível verificar o comportamento da rede e extrair os parâmetros necessários para medir sua qualidade de serviço em um tempo computacional satisfatório. As principais diferenças do algoritmo de simulação Monte Carlo utilizado neste trabalho com o algoritmo usado em (Atkinson et al., 2008) são: o fato de que um servidor (AP) pode atender a vários átomos (clientes) ao invés de apenas dois, cada cliente poder demandar três tipos de taxas distintas, que variam de acordo com o tipo de dado que está sendo requerido e, uma requisição, uma vez chegada, entra na fila de todos os APs que compõem o trajeto que a informação necessita percorrer.

Com a simulação Monte Carlo, a aplicação do modelo hipercubo em uma rede *mesh* consiste nos seguintes passos:

1) Definição dos valores iniciais, dados os valores de λ_d, λ_a, λ_v e μ:

k = 0 (instante de tempo ou época);
$u^{(k)} = (0, 0, 0, ..., 0)$;
$\gamma_d^{(k)} = 0$ (número de chamadas que entraram no sistema até o instante k);
$\gamma_{d,loss}^{(k)} = 0$ (número de chamadas perdidas no sistema até o instante k);

$\gamma_a^{(k)} = 0$ (número de chamadas que entraram no sistema até o instante k);
$\gamma_{a,loss}^{(k)} = 0$ (número de chamadas perdidas no sistema até o instante k);

$\gamma_v^{(k)} = 0$ (número de chamadas que entraram no sistema até o instante k);
$\gamma_{v,loss}^{(k)} = 0$ (número de chamadas perdidas no sistema até o instante k);

$\Theta^{(k)} = 0$ (valor total de serviços de todas as chamadas até o instante k);
cap_j = (capacidade da fila de dados do AP $j \in P$).
$\Lambda = \sum_i (\lambda_{di} + \lambda_{ai} + \lambda_{vi})$ (somatória de todas as taxas de demanda do sistema)

2) Obter a variável aleatória ω na distribuição uniforme no intervalo [0, 1]

3) Se $\omega < \frac{\Lambda}{\Lambda + \Theta^{(k)}}$ (1), então $\gamma_d^{(k+1)} = \gamma_d^{(k)} + 1$, se a requisição for dados, $\gamma_a^{(k+1)} = \gamma_a^{(k)} + 1$, se for áudio e $\gamma_v^{(k+1)} = \gamma_v^{(k)} + 1$, se for vídeo.

Simular aleatoriamente $\sigma \in C$ e x sendo qualquer um dos tipos com probabilidade

$$\frac{\lambda_{x\sigma}}{\Lambda}. \qquad (2)$$

Se $u_\sigma^{(k)} = 0$, então $u_\sigma^{(k+1)} = 1$.
Senão, se $u_\sigma^{(k)} < cap_\sigma$, então a requisição entra na fila, $u_\sigma^{(k+1)} = u_\sigma^{(k)} + 1$ e $u_y^{(k+1)} = u_y^{(k)} + 1$, para todo $y \in P$ que faça parte do caminho entre σ e o *gateway* que compõe a rota de atendimento.
Caso contrário, o pacote é perdido, $u_\sigma^{(k+1)} = u_\sigma^{(k)}$ e $\gamma_{d,loss}^{(k+1)} = \gamma_{d,loss}^{(k)} + 1$, se a requisição for dados, $\gamma_{a,loss}^{(k+1)} = \gamma_{a,loss}^{(k)} + 1$, se for áudio e $\gamma_{v,loss}^{(k+1)} = \gamma_{v,loss}^{(k)} + 1$, se for vídeo.

4) Se $\omega > \frac{\Lambda}{\Lambda + \Theta^{(k)}}$ (3), então $\gamma^{(k+1)} = \gamma^{(k)}$.

Simular aleatoriamente $\delta \in P$, com probabilidade

$$\frac{\theta_\delta^{(k)}}{\Theta^{(k)}}, \qquad (4)$$

sendo que $\theta_\delta^{(k)} = 0$ se $u_\delta^{(k)} = 0$, para todo tipo de informação e $\theta_\delta^{(k)} = \mu_i$,
se $u_\delta^{(k)} > 0$, $u_\delta^{(k+1)} = u_\delta^{(k)} - 1$ e $u_j^{(k+1)} = u_j^{(k)}$ para qualquer $j \in P$ e diferente de δ.

5) Se $u_j^{(k+1)} > 0$, para algum $j \in P$, então

$$\Theta^{(k+1)} = \sum_{i:u_i=1} \mu_i, \qquad (5)$$

para todo tipo de informação e repita a partir do passo 2 até N épocas.

Terminada a simulação, a estimativa da época é feita, $\gamma_x = \gamma_x^{(k+1)}$ e $\gamma_{x,loss} = \gamma_{x,loss}^{(k+1)}$, para x sendo todo o tipo de informação:

$$p_{x,loss}^{(k+1)} = \frac{\gamma_{x,loss}^{(k+1)}}{\gamma_x^{(k+1)}}, \qquad (6)$$

O cálculo da probabilidade de perda dos tipos de informação é gerado a partir da média aritmética das execuções feitas na simulação.

$$p_{x,loss} = \frac{\sum_{i=0}^{N} p_{x,loss}^{(i)}}{N} \qquad (7)$$

Ao final da simulação, os valores obtidos das probabilidades de perda para cada tipo de dados são comparados com os valores esperados de QoS para a rede. Uma vez que os valores desses parâmetros são atingidos, a solução adotada para a rede pode ser considerada satisfatória e o algoritmo termina.

Caso contrário, uma nova topologia deve ser adotada. Para a construção de uma nova solução, são ativados os APs que pertencem à área de cobertura dos APs que já compõem a rede. A estratégia utilizada é verificar qual dos APs possui uma carga de trabalho maior e, assim, ativar um ponto candidato que esteja inativo. Após a inclusão de um novo AP, os clientes mais próximos serão atribuídos a este AP, tornando a demanda que chega a um outro AP utilizado anteriormente menor e, também, evitando que outros APs sejam utilizados desnecessariamente.

Neste caso, é ativado um AP candidato no lugar onde há a maior concentração de demanda da rede. Novamente os clientes são atribuídos aos APs mais próximos e a simulação é novamente executada para a extração de uma outra probabilidade de perda, até que seja atingido o parâmetro de QoS desejado para a rede.

4. Resultados

O algoritmo foi aplicado considerando um bairro com 25000 m², contendo 20 pontos candidatos onde é possível instalar os APs e 100 clientes espalhados ao longo da área, que representa um bairro residencial e comercial (Figura 3). São definidos 3 *gateways* inicialmente para a rede.

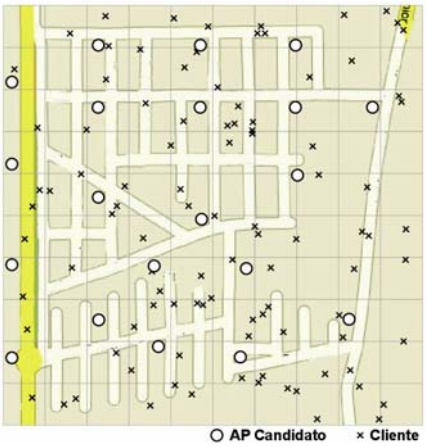

Figura 3 – Mapa de aplicação da rede (Fonte: Google Maps)

Dado que todos os APs são do mesmo modelo e com a mesma especificação (a utilizada em questão é a IEEE 802.11), a capacidade de armazenamento de *buffer* é igual para todos, além de possuírem o raio de cobertura de até 150 metros omnidirecionalmente e capacidade de armazenamento em buffer de até 300 pacotes.

Inicialmente, pela aplicação do algoritmo de p-medianas, foram determinadas as localizações de três *gateways*. Em seguida, para obter a cobertura necessária para que a rede atendesse todos os clientes, foram escolhidos outros quatro APs para serem os roteadores.

Em seguida, admitindo que os valores para perda de pacotes na rede podem, no máximo, atingir 5% para dados, 2% para áudio e 2% para vídeo, aplicou-se 100 vezes a simulação Monte Carlo com 200000 épocas cada e foram extraídos os valores de probabilidade de perda de pacotes, além da quantidade total de pacotes trafegados e a quantidade de pacotes perdidos. Os resultados obtidos são mostrados na Tabela 1, adimitindo-se que as taxas de atendimento dos APs é igual a 2 Mbps e que as taxas de demanda dos clientes são de, no máximo, 160 kbps por cliente. Admite-se também que as demandas dos clientes são geradas aleatoriamente, distribuídas proporcionalmente em até 6,25% para dados, 31,25% para áudio e 62,5% para vídeo.

Tabela 1 – p_{loss} para demandas até 160 kbps/cliente

Nº de APs	p_{loss}			Número de Pacotes	
	Dados	Áudio	Vídeo	Enviados	Perdidos
7	0.092897	0.058784	0.084536	4 812 203	371 437
8	0.007312	0.004432	0.006398	4 229 686	24 755

Percebe-se que, já na segunda iteração, com 8 APs, a rede já conseguiu atingir os parâmetros de qualidade exigidos, com probabilidades de perda variando entre 0,4 a 0,7%. A Figura 4 mostra a topologia encontrada e a alocação dos clientes aos APs.

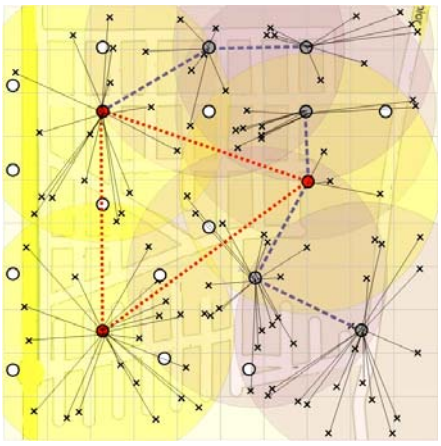

Figura 4 – Topologia encontrada com demanda total de até 160 kbps

Os resultados obtidos com o acréscimo das taxas de demanda dos clientes aumentadas para 256 kbps, distribuídas proporcionalmente em até 20% para dados, 35% para áudio e 45% para vídeo são mostrados na Tabela 2.

Tabela 2 – p_{loss} para demandas até 256 kbps/cliente

Nº de APs	p_{loss}			Número de Pacotes	
	Dados	Áudio	Vídeo	Enviados	Perdidos
7	0.284084	0.281771	0.276465	11 132 948	3 116 877
8	0.134038	0.132504	0.126103	9 696 381	1 261 135
9	0.056455	0.057939	0.054212	9 143 877	512 301
10	0.028397	0.029551	0.028081	8 806 837	252 568
11	0.011974	0.012200	0.012377	8 443 892	103 275

Com o acréscimo da faixa de demanda dos clientes, houve um aumento do número de APs na topologia da rede, visto que os clientes foram realocados para os mais próximos e, desta forma, houve uma redistribuição das demandas resultantes dos clientes para outros APs que estariam potencialmente sem atender a nenhum cliente e, consequentemente, descongestionando as filas de atendimento que estavam sobrecarregadas. Neste caso, percebe-se que foram utilizados 11 APs para que a probabilidade de perda atingisse um patamar satisfatório para os níveis de QoS estabelecidos na rede. A Figura 5 ilustra a topologia da rede ao atender a demanda de 256 kbps/cliente.

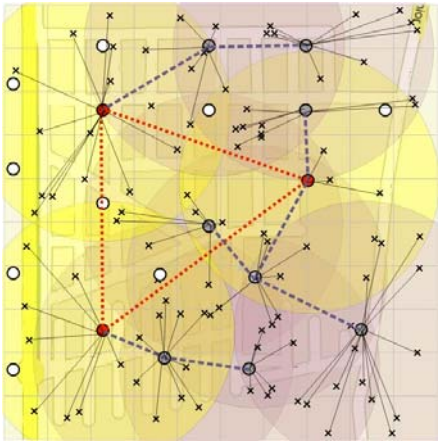

Figura 5 – Topologia encontrada com demanda total de até 256 kbps

5. Conclusão

As redes *mesh* trazem maior comodidade para aqueles que utilizam serviços de Internet sem fio, pois, por meio delas, o usuário pode acessá-las em uma área mais abrangente, podendo integrar em uma mesma rede uma determinada localidade, tanto nos setores industrial, comercial, rural e outras localidades urbanas. O custo de uma rede *mesh* não é elevado, o que atrai ainda mais clientes que buscam uma tecnologia barata e eficiente para a instalação de uma rede em uma área de cobertura ampla.

No entanto, como é uma abordagem nova de rede, ainda encontra dificuldades na instalação e na manutenção e que serão corrigidas ao longo do tempo. Os estudos de QoS em redes *mesh* ainda necessita de um aprofundamento, já que serviços multimídia na Internet estão sendo cada vez mais utilizados.

Para trabalhos futuros, deverá ser avaliado outros parâmetros de QoS, como atraso e *jitter*. Além disso, a simulação utilizada neste trabalho não leva em conta possíveis problemas encontrados na rede, como interferência entre os APs ou uma possível queda de energia, o que devem ser incluídos em trabalhos futuros.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro do CNPq. Em especial, o primeiro autor agradece ao CNPq pela concessão de bolsa de Mestrado (132847/2009-4). Os autores agradecem também a Rosinei de Sousa Oliveira e Gerson da Penha Neto pelas valiosas contribuições e discussões referentes ao trabalho desenvolvido.

Referências

Akyildiz, I. F.; Wang, X.; Wang, W. (2005), Wireless mesh networks: a survey. *Computer Networks*, vol. 47, pp. 445-487.

Amaldi, E.; Capone, A.; Cesana, M.; Filippini, I.; Malucelli, F. (2008), Optimization Models and Methods for Planning Wireless Mesh Networks. *Computer Networks*, vol. 52, pp. 2159-2171.

Atkinson, J. B.; Kovalenko, I. N.; Kuznetsov, N.; Mykhalevych, K. V. (2006) Heuristic methods for the analysis of a queueing system describing emergency medical service deployed along a highway. *Cybernetics and Systems Analysis*, vol. 42, no. 3, pp. 379-391.

_____. (2008), A hypercube queueing loss model with customer-dependent service rates. *European Journal of Operational Research*, vol. 191, pp. 223-239.

Badia, L.; Botta, A.; Lenzini, L. (2008) A genetic approach to joint routing and link scheduling for wireless mesh networks. *Ad Hoc Networks*. Vol. 7, pp. 654-664.

Cabral, G. A. (2008) Uma arquitetura para otimização do acesso à Internet em redes em malha sem fio. *Dissertação de Mestrado*. Belo Horizonte, UFMG.

Cabral, G. A.; Mateus, G. R. (2009), Uma abordagem baseada em simulação para o planejamento de redes em malha sem fio. *Anais da XLI SBPO*, pp. 2157-2168.

Hilario, L. E. N.; Silva, R. H.; Leite, J. C. B.; Albuquerque, C. V. N. (2007) QoSMesh – Qualidade de Serviço em Redes *Mesh*. *In: XXXIII Conferência Latinoamericana de Informática*, San José, Costa Rica.

Iannoni, A. P.; Morabito, R. (2006) Modelo hipercubo integrado a um algoritmo genético para análise de sistemas médicos emergenciais em rodovias. *Gestão e Produção*, vol. 13, pp. 93-104.

Larson, R. C. (1973), A hypercube queuing model for facility location and redistricting in urban emergency services. *The New York Rand Institute*.

Larson, R. C.; Odoni, A. R. (1981), Urban Operations Research. Prentice Hall: Englewood Cliffs. New Jersey.

Lee, M. J.; Zheng, J.; Ko, Y. B.; Shrestha, D. M. (2006) Emerging Standards for Wireless

Mesh Technology. *IEEE Wireless Communications*, pp. 56-63.
Lorena, L. A. N.; Senne, E. L. F. (2004) A Column Generation Approach to Capacitated p-Median Problems. *Computers and Operations Research*, v.31, p. 863 - 876.
Mendonça, F. C.; Morabito, R. (2001) Analysing emergency medical service ambulance deployment on a Brazilian highway using the hypercube model. *Journal of the Operational Research Society*, no. 52, pgs. 261-270.
Sen, S.; Raman, B. (2007), Long Distance Wireless Mesh Network Planning: Problem Formulation and Solution. *WWW '07: Proceedings of the 16th international conference on World Wide Web*, New York, pp. 893-902.
Senne, E. L. F.; Lorena, L. A. N.; Pereira, M. A. (2005), A Branch-and-Price Approach to p-Median Location Problems. *Computers and Operations Research*, v.32, p.1655 - 1664.
Silva, C. R.; Albuquerque, C. V. N. (2009) Priorização de chamadas de voz em redes em malha sem fio. *XXVII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações*.