

Capacidade de Chamadas Voz Sobre IP em Redes Em Malha Sem Fio

Eduardo Mendes Tavares, Bruno Lima Wanderley, Luiz Cláudio Schara Magalhães

Resumo - Este trabalho apresenta um estudo do desempenho de aplicações de tempo real, particularmente de voz sobre IP (VoIP), diante das características peculiares de uma rede em malha 802.11. Este tipo de aplicação exige que a rede forneça determinadas garantias com relação aos parâmetros de vazão, atraso, jitter e perda. A abordagem apresentada lança mão de experimentos realizados em uma rede em malha sem fio real, com o intuito de analisar os principais fatores de degradação de qualidade das aplicações de tempo real. Paralelamente, os experimentos trazem à luz o impacto destes fatores na capacidade de tráfego de voz na rede.

Palavras-chave - Redes em malha, Redes Mesh, VoIP, Desempenho, Capacidade.

Abstract— This work presents a study of the performance of real time applications, particularly of voice over IP (VoIP), in an 802.11 Mesh network. This type of application requires that the network can supply guarantees in terms of throughput, delay, jitter and loss parameters. This work combines analytical, simulation and experiments carried out in a real network to analyze the main factors that degrade the quality of real time applications in Mesh networks. In addition, the experimental results reveal the impact of these factors over the network voice traffic capacity.

Keywords— Mesh Networks, VoIP, Performance, Capacity.

I. INTRODUÇÃO

As redes 802.11 com topologia em malha (*mesh*) têm sido amplamente utilizadas ao redor do mundo. Diversas implantações têm sido feitas em universidades, empresas, comunidades e escolas [2, 3, 4]. As redes em malha surgiram a partir das redes ad hoc e se caracterizam por possuírem seu núcleo (*backbone*) formado por uma rede sem fio através da qual os elementos se interconectam. O acesso a estes elementos por parte dos usuários pode ser realizado também através de dispositivos sem fio ou por meio de cabos. O *backbone* pode cobrir uma extensa área com um custo menor de infra-estrutura. A partir deste, os usuários podem ter acesso à Internet através de *gateways*. Na proporção em que a

tecnologia destas redes amadurece, cresce o interesse na sua utilização para os mais diversos fins, abrindo um vasto horizonte para o uso de aplicações de dados e multimídia.

Um serviço que pode ser agregado às redes em malha são as soluções em voz sobre IP, que se constituem hoje uma tendência mundial, oferecendo uma enorme gama de facilidades como mobilidade e flexibilidade de recursos. O seu uso cresce vertiginosamente assim como a quantidade de soluções possíveis para sua utilização. Devido a esses fatores, é de extrema importância a validação da utilização desta modalidade de comunicação nas redes sem fio em malha.

Outro fator que justifica o uso da solução de voz sobre redes em malha é que, apesar de o Brasil ser atualmente o primeiro país da América Latina e o quinto no mundo em números de usuários da Internet, ele é o quarto na América Latina e o sexagésimo segundo no mundo, considerando o percentual da população que usa a rede. Contudo, segundo [1], apenas 21% da população brasileira têm acesso à Internet. A mesma porcentagem também vale para assinantes de telefonia fixa. A implantação de redes em malha em comunidades que ainda não dispõe destes serviços seria uma das possíveis soluções de baixo custo para a inclusão digital da população. Desta forma é possível disponibilizar serviços de voz sobre IP, tanto para chamadas em outras localidades como dentro da própria comunidade.

Este artigo apresenta um estudo das aplicações de voz em redes em malha sem fio, verificando a capacidade de provimento de chamadas de voz com qualidade aceitável. Dezenas de testes foram realizados com o intuito de avaliar a quantidade máxima de chamadas simultâneas e o impacto dos fatores responsáveis pela degradação da qualidade destas chamadas.

O restante do texto está estruturado da seguinte maneira. A Seção 2 resume os principais objetivos dos experimentos realizados. A Seção 3 descreve resumidamente outras abordagens de capacidade de redes 802.11. Já a Seção 4 apresenta uma avaliação da capacidade de tráfego e da capacidade de chamadas de voz suportadas em redes mesh. A Seção 5 descreve uma série de experimentos realizados através de medições em uma rede mesh real. A Seção 6 exhibe os resultados dos testes realizados. Finalmente, na Seção 7 são apresentadas as conclusões e as sugestões de trabalhos futuros.

II. OBJETIVOS

Na medida em que as redes 802.11 tornam-se cada vez mais populares e seu uso gradativamente mais difundido, discutir como os serviços de voz podem ser disponibilizados nestas redes ganha uma profunda importância. Este é o objetivo deste trabalho. É investigada neste artigo a viabilidade de utilização de dispositivos 802.11 para prover serviços de voz com níveis aceitáveis de qualidade, considerando-se os fatores responsáveis pela degradação da qualidade de um serviço VoIP que são intrínsecos às redes em malha.

Para a investigação da viabilidade do uso de VoIP, é apresentado inicialmente um estudo avaliando a capacidade de chamadas de voz, considerando-se diversas idealizações. Para isto, é conduzida uma abordagem analítica baseada em modelos propostos para estimar a capacidade de tráfego em redes em malha 802.11. A partir desta análise, a capacidade teórica de chamadas de voz neste tipo de rede pode ser deduzida.

Além na abordagem teórica, é apresentado um estudo com o intuito de avaliar o impacto dos diversos fatores que reduzem a capacidade da rede e degradam a qualidade das chamadas de voz. Estes fatores foram investigados através de experimentos, realizados por meio de medições em uma rede em malha real.

III. TRABALHOS RELACIONADOS

Algumas abordagens para a estimativa de capacidade de redes 802.11 têm sido propostas ao longo dos últimos anos. A maior parte, porém, possui um enfoque voltado apenas para redes em configuração infra-estrutura ou ad hoc. Jangeun Jun, Pushkin Peddabachagari e Mihail Sichitiu [5], por exemplo, apresentam uma fórmula para o cálculo da vazão máxima teórica obtida em uma rede 802.11b em modo infra-estrutura. O trabalho assume algumas condições ideais como ausência de erro, de colisão e de perda por descarte devido à *overflow* no receptor.

O trabalho de Kamesh Medepalli, Praveen Gopalakrishnan, David Famolari e Toshikazu Kodama [6], também voltado para redes infra-estrutura, apresenta um modelo analítico probabilístico mais completo, considerando, por exemplo, os efeitos de colisões entre os pacotes transmitidos.

Garg e Kappes [7] propõem um modelo analítico que considera algumas simplificações na camada MAC. O modelo é validado por meio de medições em uma rede 802.11.

David P. Hole e Fouad A. Tobagi [8] sugerem um modelo para redes infra-estrutura que considera o canal em condições não ideais, incluindo uma simplificação que representam tais condições através de uma taxa de erro constante (*Bit Error Rate* – BER). A validação do modelo é realizada através de simulações.

Os trabalhos que abordam a capacidade de redes em malha são mais escassos. Encontramos na obra de Jinyang Li, Charles Blake, Douglas S. J. De Couto, Hu Imm Lee e Robert Morris [9] um estudo de capacidade para redes ad hoc que pode ser aplicado em alguns cenários de uma rede em malha.

Já a abordagem de Jangeun Jun e Mihail L. Sichitiu em [10] é voltada especificamente para redes em malha. Porém, os resultados são obtidos levando-se em conta algumas simplificações tais como: todos os nós da rede geram a mesma taxa de tráfego; o tráfego considerado é unidirecional.

O trabalho de Bin Hong Lee, Guan Yan Cai, Yu Ge e Winston K. G. Seah [11] apresenta resultados de capacidade de voz em redes em malha baseados apenas em medições em uma rede real.

IV. CAPACIDADE DE CHAMADAS VOIP EM REDES MESH

Toda chamada de voz é iniciada pelo protocolo de sinalização. Os mais conhecidos são o *Session Initiation Protocol* (SIP) [12] da IETF e o H.323 [13] da ITU-T. As aplicações de voz utilizam o protocolo *Real-Time Transport Protocol* (RTP), descrito na RFC 3550 [14] para transmissão do fluxo de mídia, como voz e videoconferência. O RTP é independente do protocolo de camada de transporte, porém o UDP normalmente é utilizado, uma vez que o mecanismo de controle de congestionamento do TCP traz prejuízos para o tráfego de voz.

O RTP opera em conjunto com o protocolo *Real-Time Transport Control Protocol* (RTCP). O RTCP é utilizado para fins monitoração da qualidade do serviço e transporte de informações úteis aos envolvidos na comunicação. Pacotes de controle são periodicamente enviados entre os participantes para este objetivo.

Entende-se por capacidade de chamadas a quantidade máxima de chamadas de voz simultâneas com qualidade aceitável que pode ser estabelecida na rede. No contexto deste artigo, a capacidade nominal de chamadas refere-se ao número máximo de chamadas que uma rede em malha pode suportar ao mesmo tempo. Existem quatro fatores que estão relacionados com a qualidade e capacidade de chamadas em uma rede: a vazão, o *jitter*, o atraso e a perda de pacotes. Cada um deles afeta de uma forma particular a qualidade das chamadas, conseqüentemente reduzindo a capacidade e, de certa forma, todos estão inter-relacionados.

Um dos primeiros requisitos a ser avaliado no processo de estimativa da capacidade de chamadas de voz em uma rede é a vazão. Aqui, vazão refere-se à capacidade máxima de tráfego que a rede pode suportar. No caso das redes em malha, por exemplo, um grande fator limitador é a redução da capacidade de tráfego na medida em que aumenta o número de saltos que o fluxo de dados deve cursar na rede. Desta forma, com o aumento do número de saltos, a vazão máxima diminui e, conseqüentemente, a capacidade máxima teórica de chamadas também é reduzida. O primeiro passo para a avaliação da capacidade de chamadas, considerando-se apenas o fator vazão, consiste em estimar a vazão máxima do nó da rede a ser avaliado. Diversos modelos têm sido propostos com esta finalidade, conforme apresentado na seção III. Neste trabalho foram tomados como referência os modelos de estimativa de vazão máxima descritos em [5] e [9]. O segundo passo consiste em dimensionar a banda consumida pelo tráfego de

uma chamada de voz cursando na rede. Para isto, inicialmente o tamanho de um pacote de voz (*payload*) pode ser obtido a partir da seguinte equação:

$$\text{Tamanho do Pacote} = \text{Cabeçalhos IP/UDP/RTP} + \text{payload de voz}$$

A quantidade de pacotes transmitida por segundo depende da taxa do *codec* e do tamanho do *payload* de voz utilizado, e pode ser calculado pela equação:

$$\text{pacotes por segundo} = \text{pps} = \frac{\text{taxa de bit do codec (bit/s)}}{\text{tamanho do payload de voz (bit)}}$$

A taxa de bit gerada pelo *codec* está relacionada ao tamanho do *payload* de voz segundo a equação abaixo:

$$\text{taxa de bit do codec} = \frac{\text{tamanho do payload de voz (bit)}}{\text{tempo do payload de voz (s)}}$$

Desta forma, a banda ocupada por uma chamada VoIP, apenas em um sentido, é obtido pela equação abaixo:

$$\text{banda consumida} = (\text{cabeçalhos IP,UDP,RTP} + \text{payload}) \times 8 \times \text{pps}$$

Como em uma rede em malha o meio é compartilhado pelos dois fluxos de uma chamada de voz, este valor deve ser multiplicado por dois. De posse dos valores da banda ocupada por uma chamada, a capacidade máxima de chamadas de voz de um determinado nó pode ser estimada dividindo-se a capacidade máxima de tráfego que pode ser obtida por este nó pela banda ocupada por cada chamada, conforme mostra a equação a seguir.

$$\text{capacidade de chamadas} = \frac{\text{Vazão Máxima do Nó}}{\text{Banda de Cada Chamada}}$$

Desta forma, podemos estimar a quantidade de chamada para vários tipos de *codec*. Estes valores de capacidade de chamadas são aproximados, uma vez que são derivados de valores estimados de capacidade de tráfego da rede, obtidos através de abordagens em sua maioria condicionadas a várias considerações e restritas a cenários específicos, conforme descrito anteriormente. Além disto, embora uma chamada VoIP possa ser suportada havendo banda disponível na rede, existem diversos fatores que afetam sua qualidade, o que pode conduzir a conversação a níveis inaceitáveis de degradação. Com isto, apesar dos resultados encontrados através dos métodos descritos até aqui serem extremamente úteis na elaboração de projetos de dimensionamento de tráfego em redes em malha, os valores efetivos de capacidade de chamadas encontrados no mundo real serão consideravelmente menores devido a fatores responsáveis por degradar a qualidade das chamadas de voz.

Por tudo isto, para uma aferição mais precisa da capacidade de chamadas VoIP em uma rede em malha é necessário incluir na avaliação os fatores que afetam diretamente a percepção do usuário quanto à qualidade da fala recebida, tais como a pouca tolerância a atraso, perda de pacotes e *jitter*.

Diversos métodos têm sido propostos para a medição fim a fim desta qualidade. Um dos mais conhecidos é o *Mean Opinion Score (MOS)*, descrito nas recomendações ITU-T P.800 [20] e P.830 [21], que consiste em uma avaliação subjetiva que atribui valores entre 1 (ruim) a 5 (excelente). A dificuldade de se utilizar os métodos subjetivos, no entanto, conduziu a propostas de aferição da qualidade de chamadas através de métodos objetivos. Um deles é o Modelo E, definido na recomendação ITU-T G.107 [22]. Este modelo avalia os efeitos de diversos parâmetros que afetam a qualidade da conversação. O Modelo E resulta em um valor numérico denominado fator R, que varia de 0 a 100. O fator R, por sua vez, pode ser convertido posteriormente para um valor de MOS equivalente.

Para uma avaliação mais completa da capacidade de chamadas foram realizados diversos experimentos com a utilização do Modelo E, conforme descrito na próxima seção.

V. AVALIAÇÃO

Um dos grandes desafios no processo de estimativa da capacidade de uma rede em malha é discriminar e modelar os fatores responsáveis pela degradação da qualidade das aplicações. A capacidade de chamadas de voz que uma rede em malha pode suportar está intrinsecamente ligada ao comportamento dos valores de capacidade de tráfego da rede e dos parâmetros de atraso, *jitter* e perda. Tais requisitos podem ter seus valores afetados diretamente por diversas causas, presentes tanto em redes cabeadas quanto em redes sem fio. Entretanto, alguns dos fatores que contribuem para a diminuição da vazão máxima obtida na rede, bem como o aumento dos valores de atraso, *jitter* e perda de pacotes são inerentes às redes em malha 802.11. Dois dos principais fatores são a interferência e o desvanecimento.

Os principais tipos de interferência podem ser classificados como interferência do próprio sistema, interferência de outros sistemas e interferências externas. A interferência do próprio sistema refere-se à interferência gerada entre os nós de uma mesma rede em malha. Neste caso, o meio é compartilhado entre os nós da rede que interferem entre si. Assim, a capacidade de tráfego da rede é distribuída entre estes nós e conseqüentemente, a capacidade máxima de chamadas é afetada diretamente por este tipo de interferência. A interferência de outro sistema, por sua vez, é a interferência gerada por outras redes 802.11, utilizando o mesmo canal ou um canal adjacente em uma área próxima. Uma maneira de se evitar este problema seria a proibição do reuso do canal em uma mesma região, como é realizado em sistemas de comunicação móvel celular. Porém, esta alternativa seria viável somente em um ambiente altamente controlado. Na maioria das vezes isto é inviável, uma vez que as redes 802.11 utilizam uma banda de frequências que não exige nenhum tipo de licenciamento e na medida em que o tempo passa, estas redes têm se tornado cada vez mais populares, sendo utilizados livremente pelos mais diversos tipos de usuários.

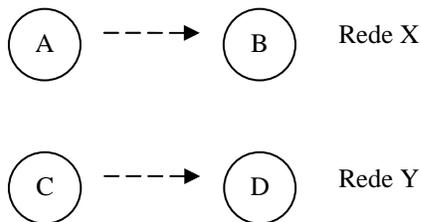


FIG 1. Topologia utilizada no experimento para avaliar interferência de outras redes 802.11

Este fenômeno pode ser compreendido melhor através do seguinte experimento. Uma rede X, constituída de dois elementos A e B, foi configurada para utilizar o canal 11. Uma segunda rede Y, formada pelos elementos C e D, foi configurada para operar no mesmo canal. Enquanto o nó A transmitia um fluxo UDP em sua capacidade máxima para um nó B, um nó C transmitia também em sua capacidade máxima para um nó D, conforme apresentado na Figura 1. Para a geração do tráfego foi utilizada a ferramenta Iperf [16]. Os nós A e B eram roteadores Linksys WRT56G enquanto os nós C e D eram *Laptops* com adaptador de rede sem fio. A vazão média obtida pelos fluxos A-B e C-D isoladamente foi de 6,3 Mbit/s e 5,3 Mbit/s, respectivamente. O fluxo A-B foi iniciado isoladamente e aos 30 segundos deu-se início à transmissão do fluxo C-D. Após 60 segundos do experimento, o fluxo C-D passou a ser transmitido isoladamente. Como observado na Figura 2, quando a transmissão foi realizada simultaneamente, o fluxo A-B passou a ter um valor médio de 4,4 Mbit/s, enquanto o fluxo C-D obteve 2,2 Mbit/s de taxa média de transmissão. Estes resultados sugerem que os recursos do meio foram divididos entre as duas redes.

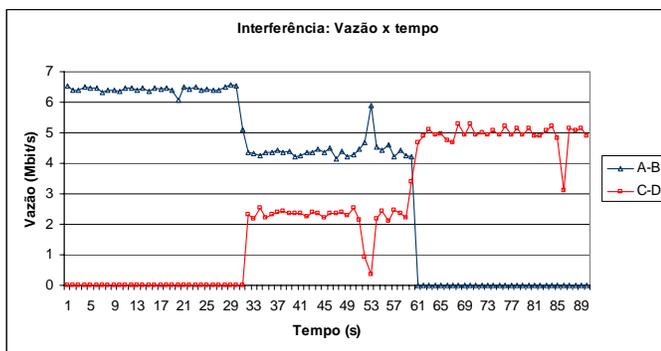


FIG 2. Exemplo de interferência de outro sistema

A interferência externa é ocasionada pelos diversos tipos de dispositivos e tecnologias de transmissão de dados que compartilham a mesma faixa de frequência das redes 802.11, gerando interferência que podem degradar consideravelmente seu desempenho. Este tipo de interferência é ocasionada por alguns modelos de forno microondas, por redes Bluetooth, telefones, mouses, teclados e outros dispositivos sem fio. A Figura 3 apresenta os resultados de um experimento realizado para a averiguação da interferência gerada por um forno

microondas. Durante a transmissão de um fluxo UDP entre um *Laptop* e um PC, utilizando o padrão 802.11b, um forno microondas foi ligado nas proximidades dos dois nós. O fluxo foi gerado através da ferramenta Iperf, de forma a obter-se a vazão máxima entre os dois nós. Inicialmente, a taxa de transmissão, sem interferência, obteve uma média de 5,27 Mbit/s. Aos 30 segundos, o forno microondas foi ligado e a vazão foi então reduzida a um valor médio de 3,07 Mbit/s, como pode ser observado no gráfico. O forno microondas permaneceu ligado durante 1 minuto, sendo desligado aos 90 segundos do experimento. A partir daí, a transmissão entre os dois nós, novamente sem interferência, continuou a ser realizada por mais 30 segundos. Percebe-se, no gráfico, o retorno da vazão entre os dois nós para valores próximos a 5,2 Mbit/s quando o forno microondas é desligado. Fica evidente pelos resultados do experimento a degradação na capacidade de tráfego na rede devido à interferência externa.

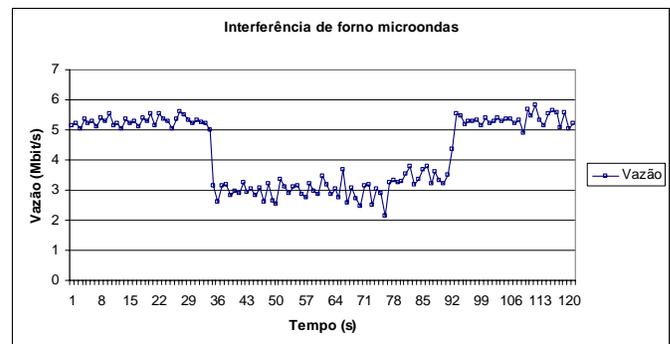


FIG 3. Interferência gerada por forno microondas em transmissão de dados

Como comenta o próprio padrão 802.11, as áreas de cobertura não são bem definidas. As características de propagação das ondas eletromagnéticas são imprevisíveis e mudam a todo instante. O perfil da intensidade do campo é capaz de mudar drasticamente mesmo a partir de pequenas alterações de localização da estação. Isto ocorre em grande parte porque os sinais transmitidos por um canal de rádio experimentam o fenômeno de desvanecimento (*fading*). Alguns dos principais tipos de desvanecimento são os desvanecimentos devido à distância (*path loss*), o desvanecimento lento e o desvanecimento rápido. O desvanecimento devido à distância refere-se ao desvanecimento ocasionado pela atenuação da densidade de potência da onda eletromagnética à medida que ela se propaga no espaço. Ocorre devido à expansão da frente de onda na medida em que aumenta a distância percorrida. Este tipo de perda é diretamente proporcional à distância e seu valor pode ser dado por d^n , onde n depende do tipo de ambiente considerado. O desvanecimento lento é gerado devido a obstáculos entre origem e destino, é normalmente representado por uma distribuição log-normal e afeta o valor da potência média do sinal. O desvanecimento rápido, por sua vez, é produzido pela soma de componentes de um mesmo sinal que chegam ao destino por diferentes percursos e com diferentes fases. O valor resultante da soma destas

componentes pode ser maior ou menor que o sinal original, gerando um desvanecimento seletivo em frequência.

Com o objetivo de incluir na análise estes fatores, diversos experimentos foram conduzidos em uma rede em malha real.

A. Metodologia dos experimentos

Os experimentos de medição em um ambiente real foram realizados em uma rede de testes sem fio faixa larga com configuração em malha, em ambiente *indoor*, desenvolvida por meio de um projeto da Universidade Federal Fluminense e localizada no prédio de Engenharia da Universidade Federal Fluminense, na cidade de Niterói, estado do Rio de Janeiro. Um total de cinco roteadores foram distribuídos ao longo do 3º pavimento do prédio e um sexto roteador foi instalado em uma sala do andar superior. Uma planta baixa simplificada dos dois pavimentos com a disposição dos nós é apresentada na Figura 4.

No desenvolvimento desta rede optou-se pela utilização de roteadores que oferecessem baixo custo de instalação, sistema operacional e ferramentas de código aberto e protocolos de roteamento já disponíveis. Os nós da rede de teste são compostos de roteadores Linksys, modelos WRT54G, que opera na faixa de frequência de 2.4GHz segundo os padrões 802.11b e 802.11g, e WRT55AG, nas faixas de 2.4 GHz e de 5GHz, conforme o padrão 802.11a. Foi utilizado nos roteadores o sistema operacional OpenWRT [23], uma distribuição Linux desenvolvida para roteadores sem fio. Para o roteamento na rede foi utilizado o protocolo OLSR com uma métrica modificada, denominada ML [15].

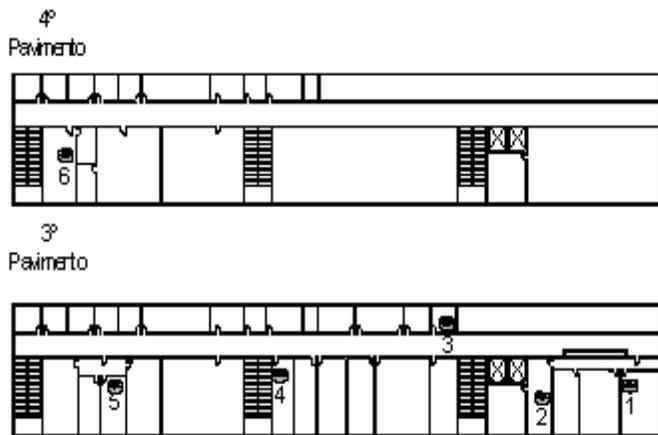


Fig 4. Planta baixa com a disposição dos roteadores.

A Figura 5 mostra a topologia lógica da rede de testes. Para a medição de capacidade de tráfego foi utilizada a ferramenta de medição de desempenho de redes denominada Iperf. Para as medições de qualidade de chamadas de voz, foram geradas chamadas simultâneas a partir de um *Laptop* conectado diretamente ao nó avaliado e destinadas a um PC interligado diretamente ao *gateway*. Para tanto, foi utilizado um *softphone* denominado callgen, no qual foram realizadas modificações de forma a gerar relatórios contendo diversos parâmetros

referentes às chamadas, dentre os quais perdas e atraso, conforme descrito em [17] e [18]. Estes relatórios foram posteriormente manipulados com o intuito de aplicar o modelo E para a obtenção do fator R das chamadas e posterior conversão para o valor referente de MOS. Todos os testes foram efetuados em um número entre 10 a 30 repetições, realizadas em horários e dias da semana diferentes, com o intuito de obter uma amostra representativa da variação do comportamento da rede.

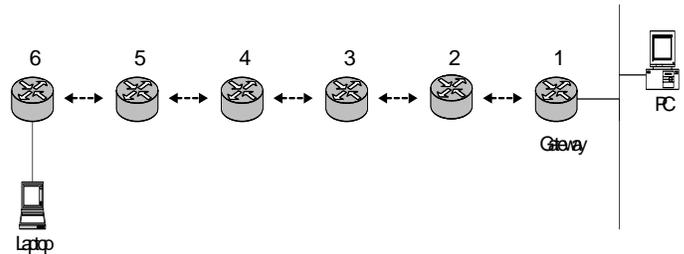


Fig 5. Topologia lógica dos testes.

Foi utilizado o codec G.729 para a realização das chamadas, tendo cada uma o tempo de duração de 10 minutos. As chamadas foram efetuadas através do envio de arquivos com extensão *wav*, gerados previamente, nos dois sentidos da conversação, com gravações de fala, seguindo as recomendações do padrão ITU-T P.59 [19].

Para evitar a presença de tráfego indesejado durante os experimentos, o acesso dos usuários à rede foi bloqueado com a utilização do utilitário *iptables*, um *firewall* integrante do *kernel* Linux, uma vez que a rede de teste é também utilizada por usuários comuns da Universidade Federal Fluminense.

VI. RESULTADOS

Diversas chamadas simultâneas foram geradas e para cada chamada foi computado um valor de MOS [20] [21]. Assim, um valor médio de MOS foi obtido para cada grupo de *n* chamadas simultâneas geradas. Aumentando-se gradativamente o número de chamadas simultâneas, o valor resultante de MOS é reduzido. Desta forma, foi obtida a quantidade máxima de chamadas com $MOS \geq 3,5$, valor estabelecido como limiar de qualidade aceitável. Os resultados obtidos nas medições são apresentados na Tabela 1, juntamente com os valores encontrados de forma analítica segundo os métodos descritos na Seção IV.

Observa-se que valores medidos são consideravelmente menores do que os valores calculados. Quanto maior o número de saltos, maior também é a disparidade entre os valores. Isto sugere que os efeitos da perda de pacotes, o atraso e o *jitter*, os maiores responsáveis pela degradação da qualidade das chamadas segundo o modelo de avaliação utilizado, são muito mais significativos nos nós que se situam mais distantes do *gateway*.

TABELA I
NÚMERO MÁXIMO DE CHAMADAS

N ó	Número de chamadas	
	Análise	Medição
2	61	57
3	30	23
4	20	16
5	15	6
6	12	4

VII. CONCLUSÕES

O desempenho de uma rede em malha e o comportamento dos parâmetros vazão, atraso, jitter e perda depende de diversos fatores. Alguns fatores, por sua vez, dependem das características da aplicação utilizada (ex.: tamanho de pacote, taxa de dados transmitidos), outros dependem das condições em que se encontra a rede (ex.: número de nós disputando o meio, número de saltos até o destino, taxa de transmissão do nó, obstruções e desvanecimento), e alguns dependem de fatores externos (ex.: interferência de outras redes ou dispositivos eletro-eletrônicos). O atraso na camada de aplicação pode ser reduzido aumentando-se a taxa de transmissão de pacotes, reduzindo-se assim o atraso de empacotamento. Por outro lado, o aumento da taxa de transmissão de pacotes aumenta a carga na rede devido ao acréscimo de bytes de cabeçalho. Taxas mais altas geram mais colisões, aumentando a probabilidade de perda de pacotes e a janela de contenção da camada MAC, o que ocasiona um maior atraso na camada MAC. Observa-se então que todos estes parâmetros não podem ser analisados separadamente, pois estão inter-relacionados. Modelar o comportamento deles e assim, estimar a capacidade real de uma rede em malha, bem como a capacidade de chamadas de voz é, portanto, uma tarefa extremamente desafiadora.

Uma conclusão que pode ser obtida é que a qualidade de chamadas de voz, bem como a capacidade de uma rede em malha em suportar este tipo de aplicação dependem não somente do controle de parâmetros da rede. Diversas variáveis externas devem ser consideradas e algumas delas são de difícil controle, tais como interferências geradas por outras redes 802.11, por outras tecnologias sem fio ou até mesmo dispositivos eletroeletrônicos como o forno microondas.

A principal contribuição deste trabalho é a avaliação da quantidade máxima de chamadas de voz em uma rede em malha real. Os resultados são comparados com resultados analíticos evidenciando o efeito de diversos fatores responsáveis pela degradação da qualidade das chamadas.

Em futuros trabalhos, mecanismos para a implementação de Qualidade de Serviço (QoS) podem ser avaliados na rede em malha utilizada para os experimentos. Mesmo com a influência dos fatores externos é importante o tratamento adequado do tráfego que cursa na rede através da utilização de mecanismos de QoS. Outros tipos de codec e o impacto na capacidade máxima de chamadas podem também ser analisados.

REFERÊNCIAS

- [1] IBGE, PNAD 2005, Síntese de Indicadores. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/trabalhoerendimento/pnad2005/default.shtm>>. Acesso em: abr. 2008.
- [2] W. G. Griswold, P. Shanahan, S. W. Brown, R. Boyer, M. Ratto, R. B. Shapiro and T. M. Truong, "ActiveCampus - Experiments in Community-Oriented Ubiquitous Computing", IEEE Computer, 2004.
- [3] R. Bruno, M. Conti, and E. Gregori, "Mesh Networks: Commodity Multihop Ad Hoc Networks", IEEE Communications Magazine, 2005.
- [4] Projeto ReMesh. Disponível em: <<http://mesh.ic.uff.br>>. Acesso em: jun. 2008.
- [5] JUN, Jangeun; PEDDABACHAGARI, Pushkin; SICHITIU, Mihail, "Theoretical Maximum Throughput of IEEE 802.11 and its Applications", Second IEEE International Symposium on Network Computing and Applications. Cambridge, Massachusette, USA: IEEE, p. 249.256, abr, 2003.
- [6] MEDEPALLI, Kamesh; GOPALAKRISHNAN, Praveen; FAMOLARI, David; KODAMA, Toshikazu, "Voice Capacity of IEEE 802.11b, 802.11a and 802.11g Wireless LANs", IEEE Global Telecommunications Conference (Globecom), Dallas, Texas, United States, nov, 2004.
- [7] GARG, S; KAPPES, M., "Can I add a VoIP call?", IEEE Int. Conf. on Communications, (ICC '03), p. 779-783, vol.2, Anchorage, Alaska, 2003.
- [8] HOLE, David P.; TOBAGI, Fouad A., "Capacity of an IEEE 802.11b Wireless LAN supporting VoIP", IEEE Int. Conference on Communications (ICC), 2004.
- [9] LI, Jinyang; BLAKE, Charles; COUTO, Douglas S. J. De; LEE, Hu Imm; MORRIS, Robert, "Capacity of Ad Hoc Wireless Networks", ACM MobiCom, Rome, Italy, p. 61-69, jul, 2001.
- [10] JUN, Jangeun; SICHITIU, Mihail L., "The Nominal Capacity of Wireless Mesh Networks", IEEE Wireless Communications, out, 2003.
- [11] LEE, Bin Hong; CAI, Guan Yan; GE, Yu; SEAH, Winston K. G., "VoIP capacity over Wireless Mesh Networks", 31st Annual IEEE Conference on Local Computer Networks (LCN2006), p. 14-17, nov, 2006.
- [12] BERGER, A.; ROMASCANU, D.. SIP: Session Initiation Protocol. RFC 3261. IETF, 2002.
- [13] ITU-T Recommendation H.323. Packet-based multimedia communications systems. Genève, jun, 2006.
- [14] SCHULZRINNE, H.; CASNER, S.; FREDERICK, R.; JACOBSON, V.. RTP: A Transport Protocol for real-Time Applications. RFC 3550, jul, 2003.
- [15] PASSOS, Diego; TEIXEIRA, Douglas Vidal; MUCHALUAT-SAADE, Débora C; MAGALHÃES, Luiz C. Schara; ALBUQUERQUE, Célio V. N., "Mesh Network Performance Measurements", 5th International Information and Telecommunication Technologies Symposium (I2TS 2006), p. 48-55, Cuiabá, MT, Brasil, dez. 2006.
- [16] Iperf. Disponível em: <<http://dast.nlanr.net/Projects/Iperf/>> Acesso em: 10 mar. 2008
- [17] Grupo de Redes de Computadores Multimídia (GRCM). Disponível em: <<http://grcm.dcc.ufam.edu.br>> Acesso em: 10 mar. 2008
- [18] LUSTOSA, L. C. G.; CARVALHO, L. S. G.; RODRIGUES, P. H. A. & MOTA, E. S., "Utilização do Modelo E para avaliação da qualidade da fala em sistemas de comunicação baseados em voz sobre IP", in: Anais do XXII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores. Gramado, maio 2004. p.603-616
- [19] ITU-T Recommendation P.59. Artificial Conversational Speech. Genève, mar. 1993.
- [20] ITU-T Recommendation P.800. Methods for subjective determination of transmission quality. Genève, ago, 1996.
- [21] ITU-T Recommendation P.830. Subjective performance assessment of telephoneband and wideband digital codecs. Genève, fev, 1996.
- [22] ITU-T Recommendation G.107, The E-Model, a computational model for use in transmission planning. Genève, mar, 2003.
- [23] OpenWrt. Disponível em: <<http://openwrt.org/>>. Acessado em: abr. 2007.