

# Proposta de uma técnica de seleção dos pares de pacotes para estimar a capacidade de contenção\*

Antonio A. de A. Rocha, Rosa M. M. Leão, Edmundo de Souza e Silva

Universidade Federal do Rio de Janeiro  
COPPE/Prog. de Eng. de Sistemas e Computação e  
Depto. de Ciência da Computação do IM  
Caixa Postal 68511, Rio de Janeiro, RJ 21941-972  
{arocha, rosam, edmundo}@land.ufrj.br

**Resumo.** *A crescente demanda por aplicações multimídia torna o conhecimento das características da rede fundamental para o uso dessas aplicações. Uma importante característica a ser estimada em uma rede é a capacidade de contenção, que representa a menor capacidade de transmissão dentre todos os enlaces ao longo de um caminho da rede. O conhecimento desta métrica pode auxiliar a implementação de aplicações com estreitos requisitos de qualidade de serviço (QoS) em redes onde as capacidades nominais não são conhecidas. O método de pares de pacotes é utilizado para estimar esta métrica. No entanto, avaliações feitas deste método demonstram uma vulnerabilidade desta técnica quando a rede medida está com uma alta utilização dos seus roteadores. Neste trabalho é proposta uma técnica para seleção dos pares utilizados pelo método de pares de pacotes. Simulações demonstram que o novo método reduz a influência do tráfego concorrente na estimativa da capacidade de contenção de um caminho de rede. O método proposto de pares de pacotes selecionados foi implementado em uma ferramenta e foi utilizada em uma série de experimentos na Internet.*

**Abstract.** *With the increasing demand for multimedia applications, the knowledge of the internal network characteristics became essential for improving the quality of these applications. An important network characteristic is the bottleneck link capacity. This metric determines the minimum transmission capacity on the path and can help the development of applications that require some quality of service. The packet pair method has been used to estimate the bottleneck capacity. However, the results of some evaluations have shown that this method can not be used in high loaded network paths. In this work, we propose a technique for selecting pairs to be used by the packet pair method. We present the results of simulations to demonstrate the effectiveness of this technique for measuring the bottleneck capacity in high loaded network paths. The proposed technique was implemented in a tool that was used in several experiments in the Internet.*

---

\*Este trabalho é parcialmente financiado pelo CNPq e FAPERJ.

## 1. Introdução

A métrica capacidade de contenção, também denominada capacidade de transmissão (ou largura de banda) no gargalo, representa a menor capacidade de transmissão dentre todos os enlaces ao longo de um caminho de rede. O conhecimento desta métrica pode auxiliar na implementação de determinados serviços de rede. A partir dessa estimativa é possível avaliar se a largura de banda exigida por uma aplicação pode ser alcançada no caminho entre duas máquinas. Isso pode ser fundamental para a execução de aplicações como as de multimídia que possuem estreitos requisitos de *QoS* (Qualidade de Serviço), principalmente em redes onde a capacidade nominal dos enlaces nem sempre é conhecida, como por exemplo na Internet. A métrica capacidade de contenção é utilizada também como parâmetro em mecanismos de controle de congestionamento [3, 10] e para estimar outras métricas, como o tamanho do *buffer* e a taxa de descarte no enlace de contenção [16].

Diversos métodos foram propostos para estimar medidas de desempenho relacionadas à capacidade de transmissão. *Packet-pair*, *packet-train*, *packet-tailgating*, *one-packet* e *mult-packet* são alguns dos métodos existentes. Capacidade de contenção, capacidade de transmissão dos enlaces de um caminho, utilização, vazão e capacidade (ou largura de banda) disponível são algumas das métricas mais utilizadas para determinar as características de uma rede. Vários autores já se propuseram a avaliar os métodos existentes e as ferramentas que os implementam, algumas dessas avaliações estão em [1, 8, 9, 17, 20, 24].

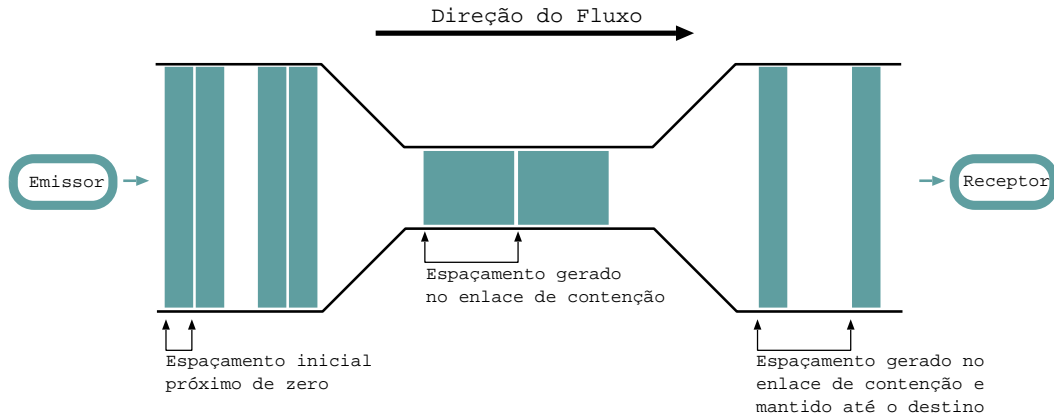
Resultados das avaliações feitas dos métodos, como os apresentados em [1, 8], demonstram que o estado da rede durante a medição é fator crucial para a precisão da estimativa. Condições, como de alto tráfego concorrente, podem influenciar negativamente as medições de tal forma que resultados errados sejam estimados. Portanto, o desenvolvimento de novos modelos para estimar a capacidade de contenção, mas que sofram menor influência do tráfego concorrente, é uma motivação para as pesquisas desenvolvidas na área de monitoramento e medições em redes.

O estudo desenvolvido neste artigo abrange apenas o método de pares de pacotes. O trabalho tem como objetivos avaliar a influência do tráfego concorrente sobre as estimativas da capacidade de contenção utilizando o método de pares de pacotes simples, propor uma nova técnica para seleção dos pares de pacotes utilizados nas estimativas, e comparar os resultados obtidos com as duas técnicas através de simulações e experimentos. Os resultados obtidos através de simulações e experimentos reais feitos na Internet demonstram que o modelo proposto de seleções de pares, se comparado ao modelo sem seleção, é mais acurado e menos influenciado pelo tráfego concorrente presente na rede medida.

A organização deste trabalho é feita da seguinte forma. Na Seção 2 será descrito o método de pares de pacotes, os problemas inerentes a esta técnica e os trabalhos relacionados. Na Seção 3 será apresentada uma proposta para seleção dos pares de pacotes utilizados na estimativa da capacidade de contenção. Modelos de simulação desenvolvidos para comparar os métodos são apresentados na Seção 4. Resultados de experimentos realizados na Internet serão mostrados na Seção 5. Por fim, na Seção 6 serão abordadas as conclusões deste trabalho.

## 2. Método de pares de pacotes e trabalhos relacionados

O método pares de pacotes consiste na emissão de dois pacotes de mesmo tamanho e de uma mesma origem, separados por um intervalo de tempo bem próximo de zero. Os pacotes atravessam o mesmo caminho na rede até chegarem a um único destino, onde são coletados. A partir da coleta destes pacotes é possível identificar algumas características do caminho de rede atravessado pelo par, como a capacidade de contenção.



**Figura 1: Ilustração do funcionamento do método Pares de Pacotes com a dispersão imposta pelo enlace de menor capacidade.**

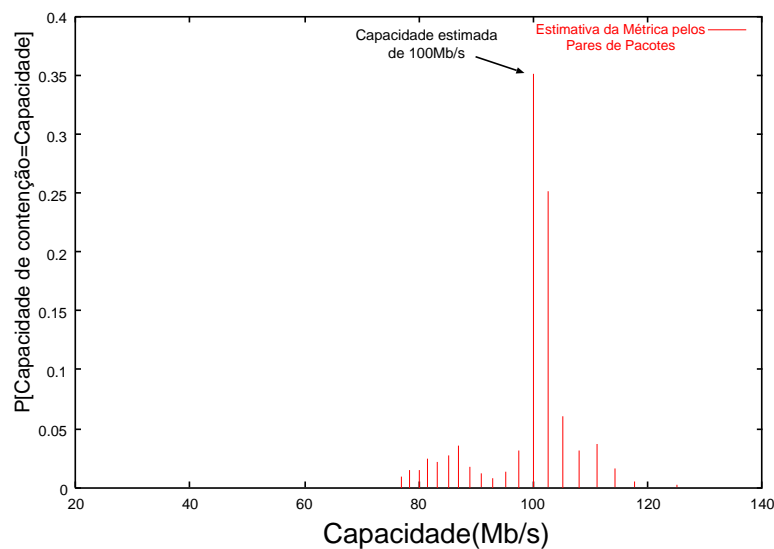
Para estimar a capacidade do enlace de contenção, a técnica pares de pacotes toma como base o intervalo entre as chegadas dos pacotes. Esse comportamento foi originalmente ilustrado em [11], mas no trabalho apresentado por Jacobson não foi considerada a existência de tráfego concorrente, e dessa forma não foi feita uma distinção entre as medidas largura de banda disponível e capacidade de contenção. Keshav, em [13], foi o primeiro a usar o método para medir a capacidade de contenção levando em consideração a existência de um tráfego concorrente. Bolot também utilizou os pares de pacotes para medir a capacidade de um canal intercontinental [2]. Depois disso, diversas propostas e ferramentas utilizaram o método, ou variações dele, para estimar a mesma métrica [5, 6, 8, 12, 14, 15] ou outras medidas baseadas no envio de pares de pacotes [16].

A suposição principal da técnica é que a dispersão entre os pacotes do par, identificada na coleta, é causada pela menor capacidade de transmissão ao longo do caminho. Os pacotes, que são gerados de uma mesma origem e separados por intervalos de tempo bem próximos de zero, possuem o espaçamento entre eles mantido até que passem por um enlace com capacidade de transmissão inferior à do emissor. Essa dispersão, causada pelo tempo de transmissão deste enlace que é superior aos tempos experimentados nos enlaces anteriores, é mantida até o destino dos pacotes. A menos que seja encontrado ao longo do resto do caminho um outro enlace com uma capacidade ainda menor. Uma figura semelhante à Figura 1 foi utilizada por Jacobson, em [11], para ilustrar a causa da dispersão entre os pacotes em sua recepção.

Com o valor do intervalo de tempo entre as chegadas e o tamanho dos pacotes é possível estimar a capacidade de contenção. Seja  $T$  o intervalo de tempo entre as chegadas dos dois pacotes dado em segundos, e seja  $B$  o tamanho dos pacotes dado em *bits*. A capacidade de contenção, representada em *bits* por segundo, pode ser obtida a partir da divisão do tamanho do pacote pelo intervalo de tempo entre as chegadas:

$$C = \frac{B \text{ bits}}{T \text{ segundos}}.$$

Assumindo a inexistência de tráfego concorrente, apenas um par de pacotes já é o suficiente para a obtenção desta métrica. Porém, nem sempre esta suposição é verdadeira. O tráfego concorrente na rede pode interferir na estimativa desta métrica. A influência causada por este tráfego pode ser caracterizada de duas formas: primeiro, a presença de pacotes em frente aos pares na fila dos roteadores, após já terem passado pelo nó de contenção do caminho, pode ocasionar uma redução na dispersão existente entre os pacotes. A consequência disso é a super-estimativa da capacidade de contenção; segundo, a inserção de tráfego concorrente entre os dois pacotes do par. Este evento pode resultar em um acréscimo da dispersão dos pacotes e causar uma estimativa inferior à capacidade real de transmissão do enlace de contenção. Para incrementar a precisão da estimativa pode ser utilizado uma série de pares e gerado um histograma das capacidades estimadas por todos os pares. A capacidade de contenção estimada para o experimento equivale à capacidade que apresenta o maior valor de probabilidade no histograma obtido.



**Figura 2: Estimativa da capacidade de contenção de uma rede local.**

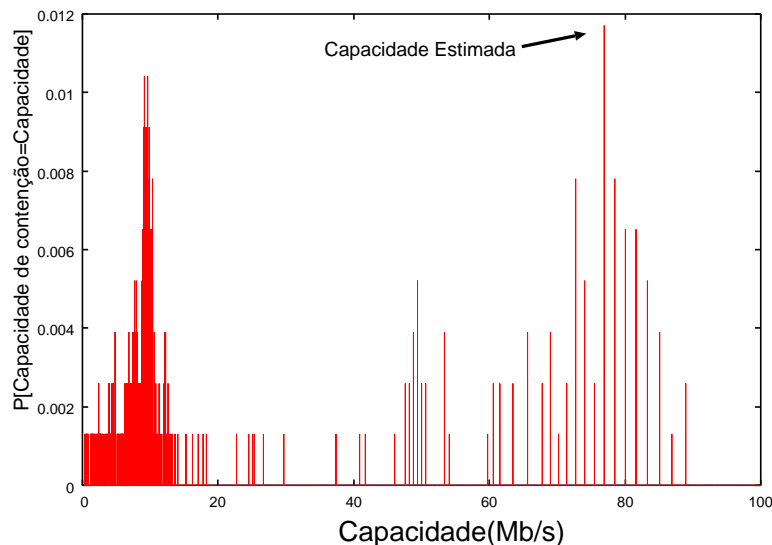
Programas para geração e coleta de pares de pacotes, assim como algoritmos para calcular a métrica capacidade de contenção a partir da coleta, foram implementados na ferramenta *TANGRAM-II Traffic Generator* [4, 7]. A Figura 2 ilustra um resultado obtido com esta ferramenta no ambiente de rede do laboratório LAND<sup>1</sup>/UFRJ<sup>2</sup>. Todas as interfaces disponíveis nesta rede têm capacidade de transmissão igual a 100 Mb/s, equivalente ao resultado estimado pela ferramenta.

Na Figura 2 percebe-se que outros valores, além dos estimados para 100 Mb/s, são representados no histograma. Isso ocorre devido à interferência do tráfego concorrente na dispersão dos pares. A Figura 3 ilustra o resultado de outro experimento executado com a ferramenta *TANGRAM-II Traffic Generator*. A geração dos pares de pacotes foi feita entre a UFRJ e a UMass<sup>3</sup>. O histograma da capacidade medida no experimento apresenta como resultado um valor próximo a 80 Mb/s, no entanto, um outro pico próximo a 10 Mb/s também se destaca no gráfico. Como a capacidade de contenção do caminho medido não é conhecida, não é possível afirmar se a capacidade indicada pelo maior pico do histograma é realmente equivalente à capacidade de contenção do caminho ou se este

<sup>1</sup>Laboratório de ANálise, modelagem e Desenvolvimento de redes e sistema de computação

<sup>2</sup>Universidade Federal do Rio de Janeiro

<sup>3</sup>University of Massachusetts



**Figura 3: Resultado do experimento entre a UFRJ e a UMass, onde mais de um pico é apresentado no gráfico.**

resultado foi influenciado por um elevado tráfego concorrente. Dovrolis, em [8], mostrou que para casos de alto tráfego concorrente o método de pares de pacotes é falho. Simulações apresentadas ilustram estimativas erradas da capacidade de contenção em redes cuja utilização dos enlaces do caminho estão próximas a 80%, em contrapartida as estimativas apresentadas para utilizações dos enlaces em torno de 20% foram precisas.

### 3. Estimando a capacidade de contenção com pares selecionados

Devido a influência do tráfego concorrente sobre as estimativas obtidas pela técnica pares de pacotes, foi desenvolvido um novo método que reduz esta influência na medição da capacidade de contenção. A proposta desenvolvida neste trabalho baseia-se também no intervalo entre as chegadas dos pares de pacotes. No entanto, apenas pares selecionados são usados para fazer o cálculo da métrica.

#### 3.1. Método de seleção dos pares

O objetivo da seleção é que a medida da capacidade de contenção seja estimada a partir de pares que, supostamente, sofreram pouca ou nenhuma influência do tráfego concorrente durante a travessia do caminho na rede. O método proposto prevê a escolha das sondas que serão, ou não, usadas para o cálculo da medida. O parâmetro para esta seleção é o atraso em um sentido sofrido pelo primeiro pacote do par.

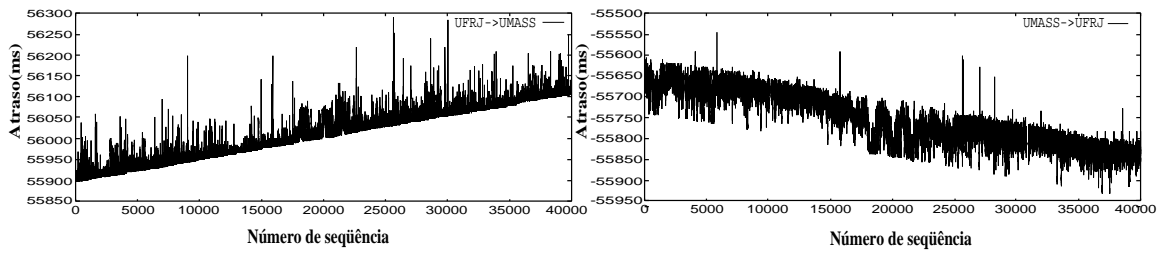
É suposto que os pares, cujo os primeiros pacotes sofreram um retardo pequeno na rede, têm uma menor probabilidade de terem experimentado situações de alto tráfego concorrente. Para isso, é calculado o atraso em um sentido de todos os pacotes coletados e identificado o menor retardo sofrido por um pacote em toda a medição. Assim, um par, para ser considerado no cálculo da capacidade de contenção, deve ter o atraso de seu primeiro pacote próximo ao menor retardo encontrado em todo o experimento.

O algoritmo implementado, para fazer a seleção dos pares a serem usados, considera um valor de retardo próximo quando este tem no máximo dez por cento a mais do que o menor atraso encontrado entre todas as amostras. Apesar de qualquer outro fator

de variação para os atrasos poder ser usado na seleção dos pares, esse valor se mostrou satisfatório com os resultados obtidos a partir dos experimentos (vide Seção 5).

### 3.2. Problemas para estimar o atraso em um sentido.

Para fazer a seleção dos pares com a técnica proposta é necessário conhecer o atraso em um sentido de todos os pacotes utilizados no experimento. O cálculo desta medida é considerado trivial quando as máquinas envolvidas na medição estão ligadas a equipamentos para sincronizar seus relógios. Neste caso, o atraso é calculado como  $D = T_r - T_s$ , onde  $T_s$  é o instante de envio do pacote e  $T_r$  o instante de chegada. Entretanto, em geral a medição da capacidade de contenção desejada refere-se à menor capacidade de transmissão do enlace de um determinado caminho em sentido único (*one-way*), e nem sempre equipamentos de sincronização estão disponíveis nas máquinas envolvidas.



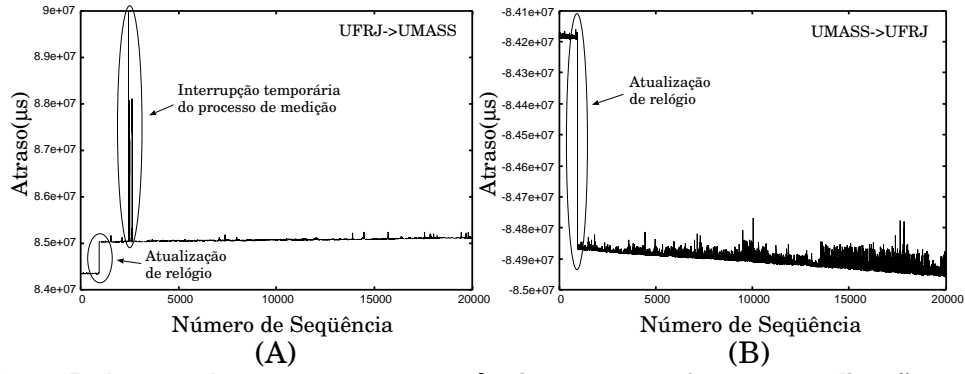
**Figura 4: Atraso de pacotes entre máquinas com relógios diferentes.**

Os problemas para estimar o atraso em um sentido de pacotes, quando não é garantida a sincronia dos relógios, já foram amplamente discutidos na literatura, assim como soluções já foram propostas [17, 18, 20, 21, 23, 26, 27]. Dois dos problemas estão ilustrados na Figura 4. Neste experimento as sondas<sup>4</sup> foram geradas entre duas máquinas, nos dois sentidos. Para cada sentido, uma sequência  $\Omega := [v_i = (i, d_i) : i = 1, \dots, N]$  foi calculada a partir das sondas enviadas, onde  $i$  equivale ao número de sequência da  $i$ -ésima sonda enviada e  $d_i$  ao atraso obtido pela simples diferença entre os tempos de envio e recebimento da sonda  $i$ .

O primeiro problema, chamado de *Offset*, surge em consequência dos relógios das máquinas envolvidas na medição possuírem valores distintos no início da medição. O valor dessa diferença pode estar sendo somado ou diminuído do valor total do atraso, resultando até mesmo em valores negativos para as estimativas  $d_i$ . O segundo, chamado de *Skew*, é resultante da diferença na taxa de crescimento dos relógios das máquinas. Considerando que os relógios não são atômicos, o intervalo de um microssegundo em uma máquina pode ser maior ou menor do que o intervalo de um microssegundo em outra. Em consequência, o resultado do cálculo do atraso entre duas máquinas sofre um crescimento ou decrescimento constante. Quando o experimento é executado por um tempo maior que poucos segundos, o erro causado pela diferença nas taxas de crescimento dos relógios é significativo.

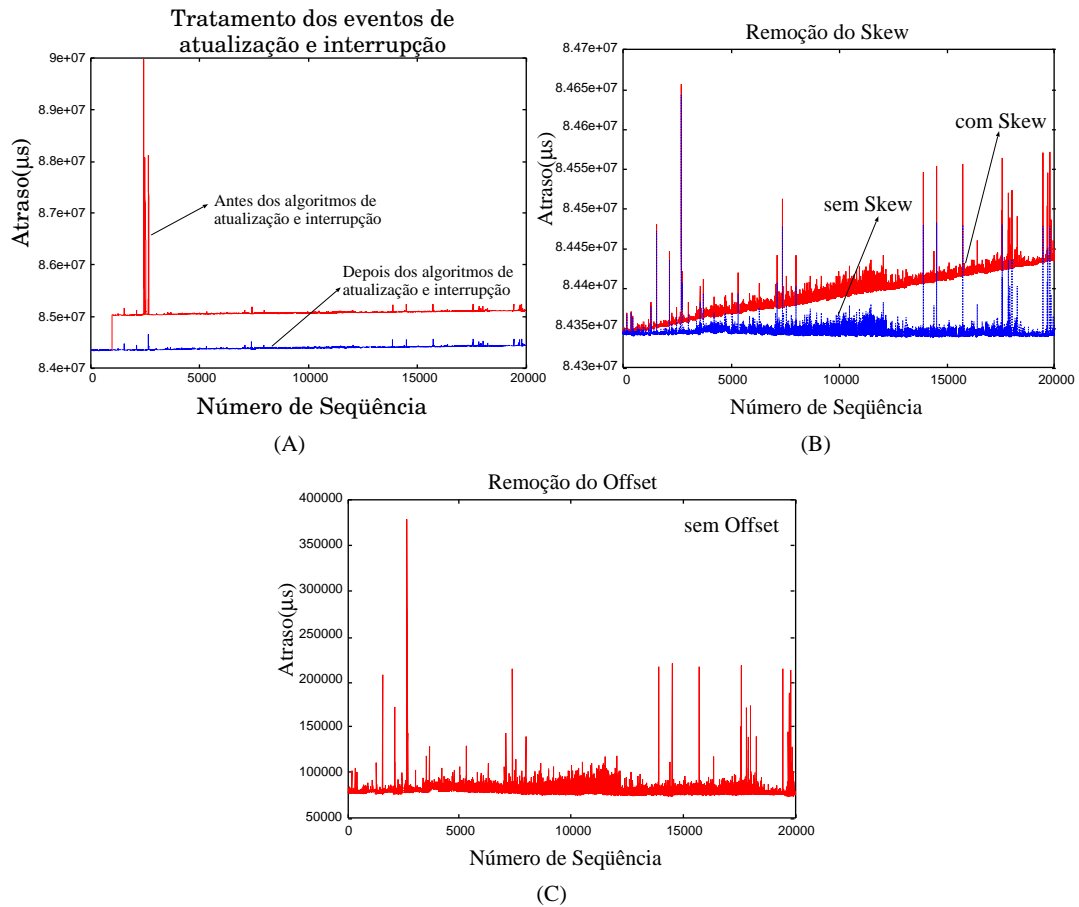
Diversos algoritmos foram propostos para tratar os problemas de *Skew* e *Offset* nas coletas de sondas para estimativa de métricas, como por exemplo o atraso [17, 18, 19, 20, 26, 27]. Estes algoritmos possibilitam a estimativa do atraso sofrido pelos pacotes em sentido único, sem a necessidade de uma infra-estrutura especial. Entretanto, outros dois problemas são inerentes à estimativa do atraso em um sentido. Um deles é que as

<sup>4</sup>Pacotes enviados por ferramentas de medição



**Figura 5: Atraso de pacotes entre máquinas que sofreram atualização nos relógios e interrupções temporárias na execução dos processos de medição.**

técnicas propostas para remoção do *Skew* e *Offset* podem obter resultados incorretos caso os relógios das máquinas envolvidas sejam atualizados durante o processo de medição [20, 21, 23, 27]. O outro, identificado nos experimentos apresentados em [23], revelaram a existência de erros na estimativa do atraso em sentido único quando a aplicação coletora deixa de receber temporariamente, do sistema operacional, as sondas enviadas. A Figura 5 ilustra os problemas de atualização e de interrupção temporária do sistema em uma coleta de sondas.



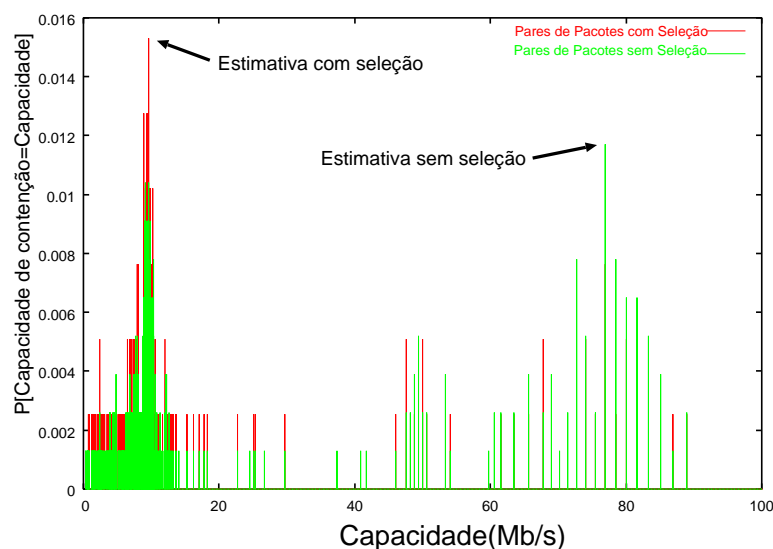
**Figura 6: Atraso estimado por uma medição da ferramenta *TANGRAM-II Traffic Generator*.**

Em [23] foram avaliadas as principais técnicas propostas para estimar o atraso em um sentido de sondas enviadas por ferramentas de medição ativa. Neste trabalho foi

definido um método que possibilita estimar o atraso de pacotes em um sentido. A proposta de [27] para remoção do *Skew*, de [17] para remoção do *Offset*, e os algoritmos propostos em [23] para tratar os problemas de atualização de relógios e interrupção temporária do processo de medição foram implementados e integrados ao módulo *Traffic Generator* do ambiente *TANGRAM-II* [4, 7]. Do nosso conhecimento, a ferramenta *TANGRAM-II Traffic Generator* é a única que permite a estimativa do atraso em um sentido sem uso de equipamentos GPS. A Figura 6 ilustra o resultado de um experimento executado entre a UFRJ e a UMass para estimar o atraso em um sentido das sondas geradas pela ferramenta *TANGRAM-II Traffic Generator*. Após o término da coleta os algoritmos são executados na seguinte ordem: (i) tratamento de atualizações de relógios, (ii) tratamento de interrupções temporárias do processo de medição, (iii) remoção de *Skew* e (iv) remoção de *Offset*. A Figura 6(A) ilustra valores de atraso obtidos após a execução dos algoritmos (i) e (ii). O passo seguinte é a remoção do *Skew* (Figura 6(B)) e do *Offset* (Figura 6(C)) com os algoritmos (iii) e (iv).

Para estimar o atraso em um sentido dos pares de pacotes, o tráfego gerado pela ferramenta deve seguir os padrões definidos pelos algoritmos descritos acima. Por isso, a geração dos pares deve ser feita da seguinte forma: com intervalo determinístico entre pares, nas duas direções e com o tamanho dos pares variando entre 40, 80, 200, e 500 (*bytes*). Esses valores foram escolhidos para prevenir a segmentação dos pacotes, evitando a possibilidade de erro no cálculo da métrica. Apesar da grande maioria dos pacotes nas redes IP's manterem o tamanho máximo de 1500 *bytes*, existem *MTU's* bem menores que podem chegar a 576 *bytes*. Como as avaliações feitas do método de pares de pacotes [1, 8, 24] relatam imprecisões nas estimativas quando são utilizados pacotes muito pequenos, as estimativas feitas pela ferramenta *TANGRAM-II Traffic Generator* se restringem aos pares com pacotes de tamanho 500 *bytes*. Os demais pacotes são descartados para a estimativa da capacidade de contenção, no entanto, são necessários para a estimativa do atraso em um sentido.

### 3.3. Aplicação da técnica



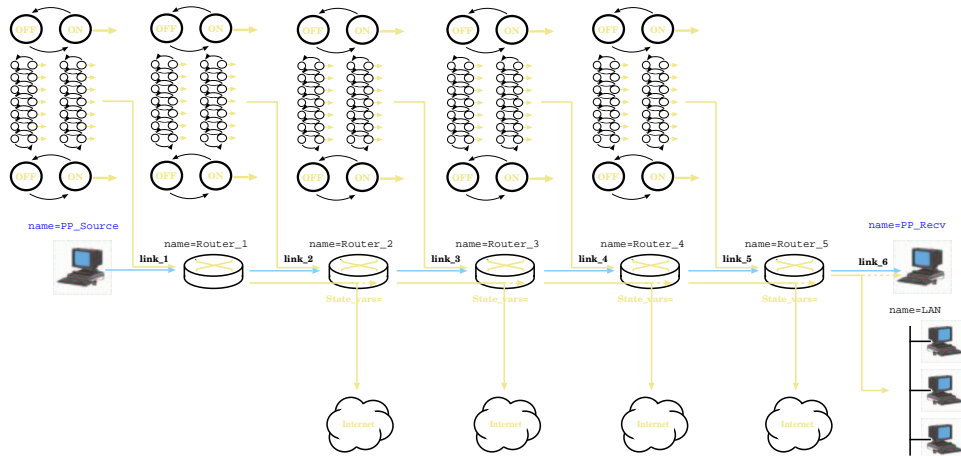
**Figura 7: Resultado do experimento entre a UFRJ e a UMass, com a técnica de seleção dos pares.**

A técnica para estimar a capacidade de contenção através de pares selecionados foi aplicada às coletas que apresentaram mais de um pico no histograma resultante, como



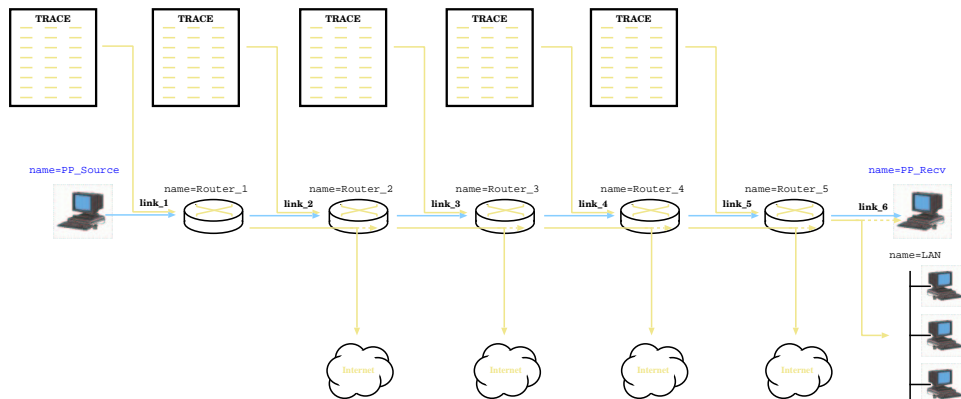
a ilustrada na Figura 3. Os resultados obtidos com o novo método e o método tradicional sem seleção dos pares, estão ilustrados na Figura 7. As capacidades estimadas pelos dois métodos são diferentes. Certamente o resultado obtido pelo método com seleção de pares reduziu a influência do tráfego concorrente, através da eliminação dos pares cujo os primeiros pacotes tiveram atrasos muito grandes. No entanto, não é possível afirmar que a estimativa correta é a obtida pelo método de seleção, pois as capacidades de transmissão dos enlaces entre a UFRJ e a UMass não são conhecidas.

#### 4. Simulações



**Figura 8: Modelo de simulação com fontes *On-Off* Pareto.**

A fim de avaliar a eficácia da técnica proposta e possibilitar uma comparação mais precisa dos métodos de pares de pacotes com e sem seleção, experimentos de simulação foram realizados. Dois modelos de simulação foram desenvolvidos, as Figuras 8 e 9 ilustram os cenários modelados. A diferença existente entre os dois modelos são as fontes geradoras de tráfego concorrente.



**Figura 9: Modelo de simulação com fontes baseadas em coletas reais.**

No primeiro modelo, o tráfego concorrente injetado em cada roteador da rede é gerado por dezesseis fontes *On-Off*. O tempo de permanência nos estados *On* e *Off* dessas fontes são modelados por uma distribuição Pareto com parâmetro  $\alpha < 2$ . Em [25] foi mostrado que a agregação destas fontes produz um tráfego com características de dependência de longa duração e que este modelo é adequado para caracterizar o tráfego real de uma rede. Modelos semelhantes ao ilustrado na Figura 8 foram utilizados em [8, 16, 24] para avaliar o método de pares de pacotes.

No segundo modelo são utilizados *traces* para alimentar as fontes de geração de tráfego concorrente. Os *traces* foram coletados através de monitorações executadas no roteador de saída do Programa de Engenharia de Sistemas e Computação da COPPE/UFRJ. A coleta indica a média do tráfego de entrada/saída na rede em intervalos de um segundo. O tráfego concorrente gerado para cada roteador da rede representado no modelo foi obtido de diferentes coletas.

Além das fontes geradoras de tráfego concorrente, os dois modelos possuem mais alguns objetos descritos abaixo:

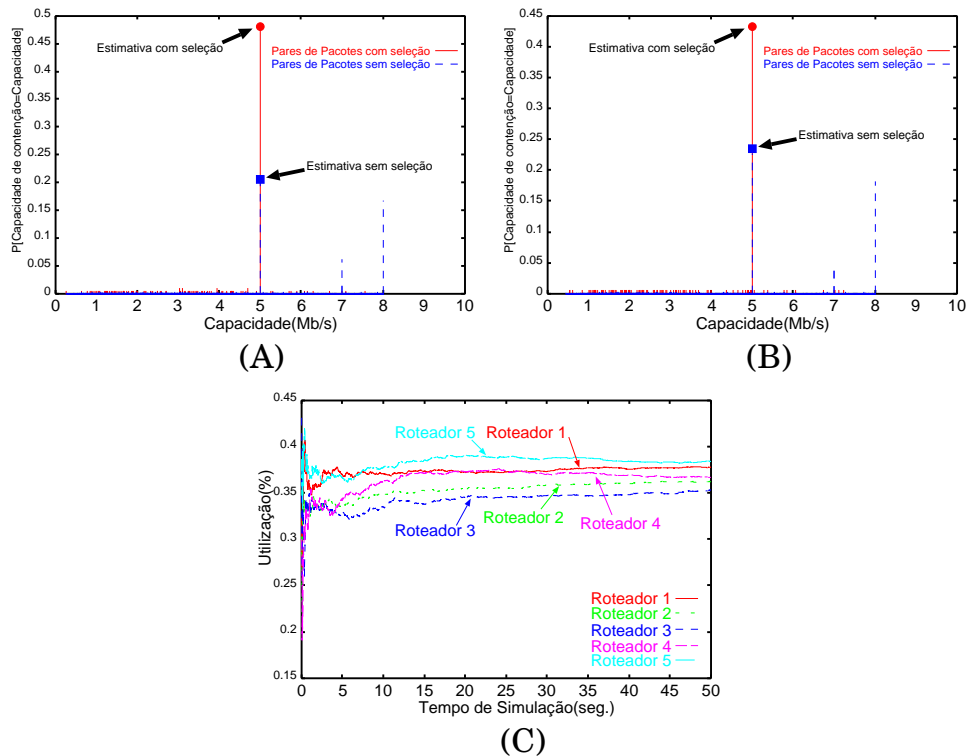
- **PP\_Source:** Fonte geradora dos pares de pacotes. São gerados 20 pares de pacotes por segundo. A geração dos pares só é iniciada após 5 minutos de simulação, para prevenir que pares atravessem a rede antes da inicialização de todas as fontes de tráfego concorrente.
- **PP\_Recv:** Objeto coletor dos pares de pacotes. Neste objeto são gerados *traces* contendo informações semelhantes às geradas pelo coletor de pares da ferramenta *TANGRAM-II Traffic Generator*. As capacidades de contenção são estimadas pelo método proposto neste trabalho e o da literatura a partir dos *traces* coletados por este objeto.
- **Router:** Cinco roteadores são definidos em cada modelo. Nestes objetos é feito o roteamento dos pacotes, tanto os de pares quanto os de tráfego concorrente. Os pares de pacotes são gerados na máquina origem (**PP\_Source**) e são encaminhados do roteador  $i$  para o roteador  $i + 1$ ,  $i = 1, 2, 3, 4, 5$ , com probabilidade 1 pois o destino dos pares é a máquina coletora (**PP\_Recv**). Já para os pacotes de tráfego concorrente, os roteadores definem a rota a ser seguida por cada um deles. Com probabilidade  $P$  eles são encaminhados do roteador  $i$  para o  $i + 1$ ,  $i = 1, 2, 3, 4, 5$ , e com probabilidade  $1 - P$  eles são roteados para fora do caminho e enviados ao objeto Internet. Quando um pacote do tráfego concorrente chega no último roteador ele é encaminhado com probabilidade  $P$  para a rede local (objeto LAN) e com probabilidade  $1 - P$  para o objeto Internet. Foi definido um valor de  $P$  específico para cada roteador. Este valor variou também de uma simulação para outra.  
Os roteadores de um modelo não possuem capacidades de transmissão iguais. As capacidades definidas para os roteadores 1, 2, 3, 4 e 5 foram 10 Mb/s, 8 Mb/s, 5 Mb/s, 7 Mb/s, 8 Mb/s respectivamente. Estes valores foram mantidos em todas as simulações executadas para os dois modelos.
- **Internet e LAN:** Os objetos Internet e LAN recebem todos os pacotes do tráfego concorrente. Esses pacotes são descartados do modelo.

#### 4.1. Resultados das simulações

##### 4.1.1. Modelo usando fontes *On-Off* Pareto

Diversas simulações foram executadas para os modelos em que o tráfego concorrente era representado por fontes *On-Off* Pareto. Os parâmetros das fontes, assim como as probabilidades de rota do tráfego concorrente definida nos roteadores, foram variadas de uma simulação para outra. O objetivo foi avaliar o comportamento dos dois métodos de “Pares de Pacotes”, com e sem seleção dos pares, para diferentes utilizações dos roteadores no caminho de rede. Os resultados que são apresentados em seguida evidenciam que

o método de seleção de pares sofre menor influência do tráfego concorrente do que o método tradicional, sem seleção dos pares.



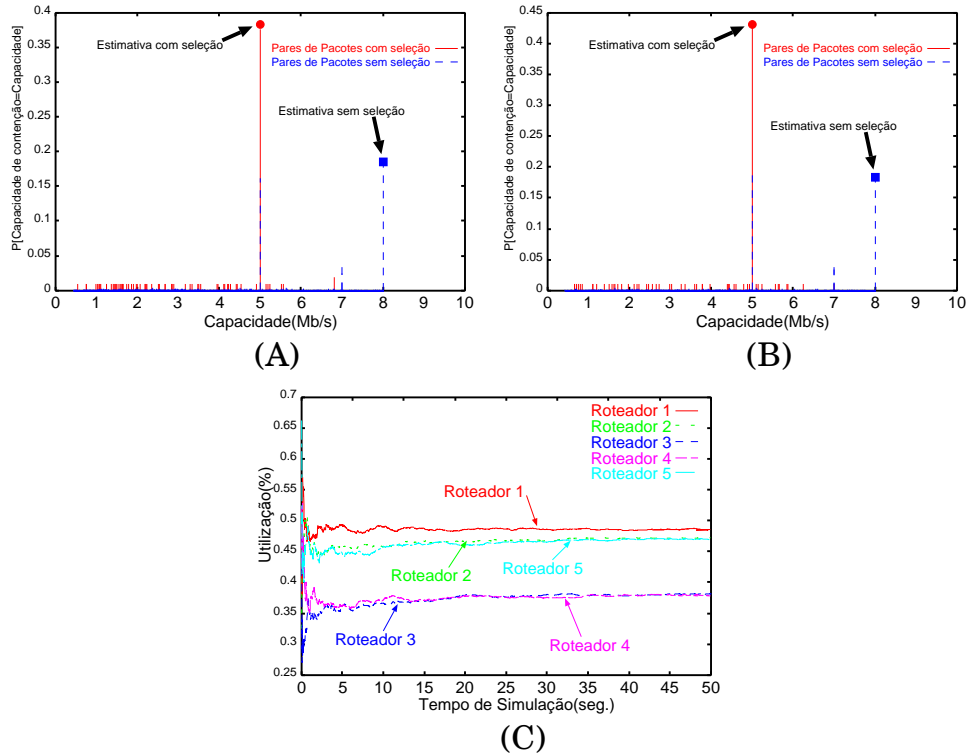
**Figura 10: Resultado do experimento para utilização da rede entre 30% e 40%.**

As Figuras 10 (A) e (B) ilustram duas estimativas feitas pelos métodos avaliados. Os histogramas apresentados demonstram que as duas estimativas feitas para a capacidade de contenção são corretas, pelos dois métodos. Nas duas simulações foram utilizados os mesmos parâmetros para as fontes de tráfego concorrente. As utilizações dos roteadores da rede nos dois experimentos foram semelhantes. A Figura 10 (C) ilustra a utilização de cada roteador ao longo do tempo de simulação. Pelo gráfico é possível verificar que a carga da rede para este experimento foi baixa, variando de 30% a 40%.

Mesmo com a carga baixa é possível verificar a influência do tráfego concorrente sobre a estimativa feita pelo método de pares sem seleção. Nos histogramas apresentados na Figura 10 (A) e (B), a capacidade estimada é de 5 Mb/s, pois possui a maior probabilidade de ocorrência. No entanto, as capacidades de 7 e 8 Mb/s possuem probabilidade semelhante à obtida para a capacidade de 5 Mb/s. É possível verificar, também, através do histograma obtido para o método de seleção dos pares que a influência do tráfego concorrente não é tão grande.

Dois resultados de simulações, ilustrados na Figura 11, demonstram estimativas das capacidades de contenção feitas para redes com utilizações em torno de 35 e 50%. Com os resultados dos histogramas apresentados na figura é possível verificar que a estimativa feita pelo método de pares de pacotes sem seleção é incorreta. Já a estimativa feita pelo método com seleção de pares foi exatamente o valor da capacidade de contenção da rede.

A Figura 12 ilustra o resultado de outros dois experimentos. Neste caso, as utilizações dos roteadores variaram entre 40% e 55%. Verifica-se, mais uma vez, que



**Figura 11: Resultado do experimento para utilização da rede entre 35% e 50%.**

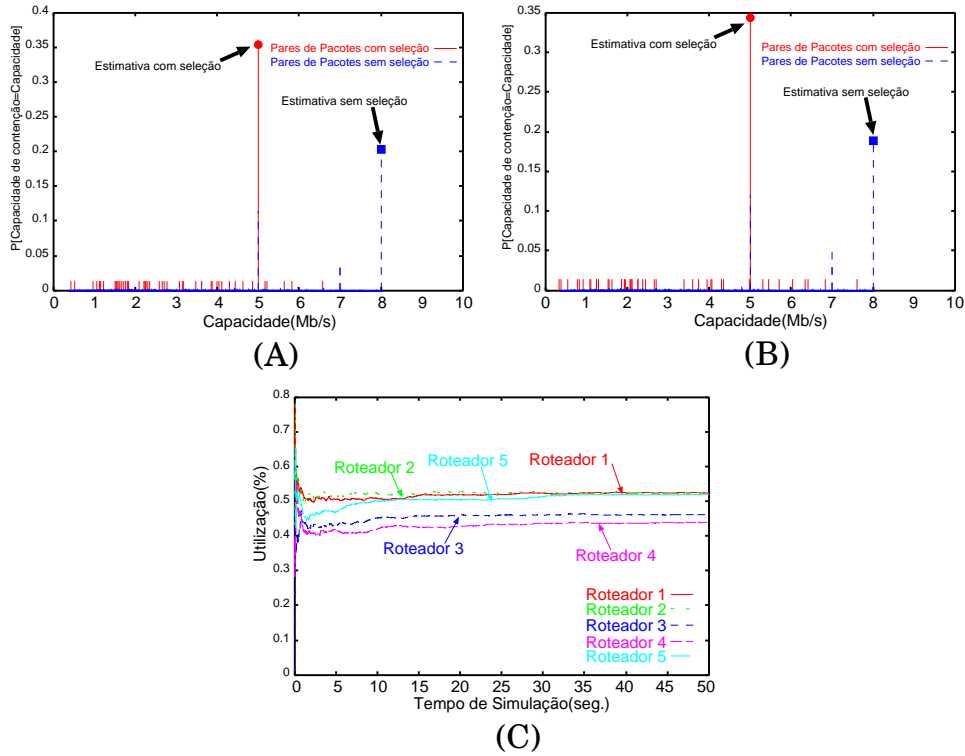
o histograma obtido pelo método sem seleção dos pares indica como resultado do experimento uma capacidade de contenção errada. Novamente, o resultado apresentado pelo método proposto neste trabalho estima corretamente a métrica desejada.

Os resultados ilustrados pela Figura 13 foram obtidos de simulações com a utilização dos roteadores da rede entre 60% e 70%. Os resultados obtidos pelo método sem seleção foram mais uma vez incorretos, como mostra a Figura 13 (A) e (B). No entanto, uma das estimativas apresentadas pelo método de seleção dos pares estima diversos valores de mesma probabilidade no histograma indicando imprecisão do método proposto para este cenário. Note que de todos os experimentos realizados somente um deles apresentou uma estimativa incorreta para a capacidade de contenção. Neste experimento a utilização dos enlaces da rede estava próxima de 70%.

#### 4.1.2. Modelo de fonte de tráfego real

Coletas do tráfego real de uma rede também foram utilizadas para geração de tráfego concorrente nos modelos. O objetivo é comparar os métodos usando como tráfego concorrente o tráfego coletado em uma rede real. Vinte e cinco coletas foram utilizadas em cinco experimentos. Os resultados obtidos para as estimativas da capacidade de contenção com os métodos estão ilustrados na Figura 14. Dos cinco experimentos, em apenas um deles o método sem seleção de pares fez a estimativa correta para a capacidade de contenção. Em contrapartida, o método que prevê a seleção dos pares obteve êxito em todas as suas estimativas.

A utilização dos roteadores em três experimentos usando coletas de tráfego real estão ilustrados na Figura 15. Os gráficos (A), (B) e (C) referem-se às utilizações calculadas para os experimentos A, D, e E da Figura 14, respectivamente. Vale destacar



**Figura 12: Resultado do experimento para utilização de rede entre 40% e 55%.**

que as estimativas corretas obtidas, pelo método com seleção de pares, foram feitas sobre condições de alto tráfego concorrente. Por exemplo, no experimento E a carga dos roteadores variou entre 70 e 80%, como mostra a Figura 15 (C).

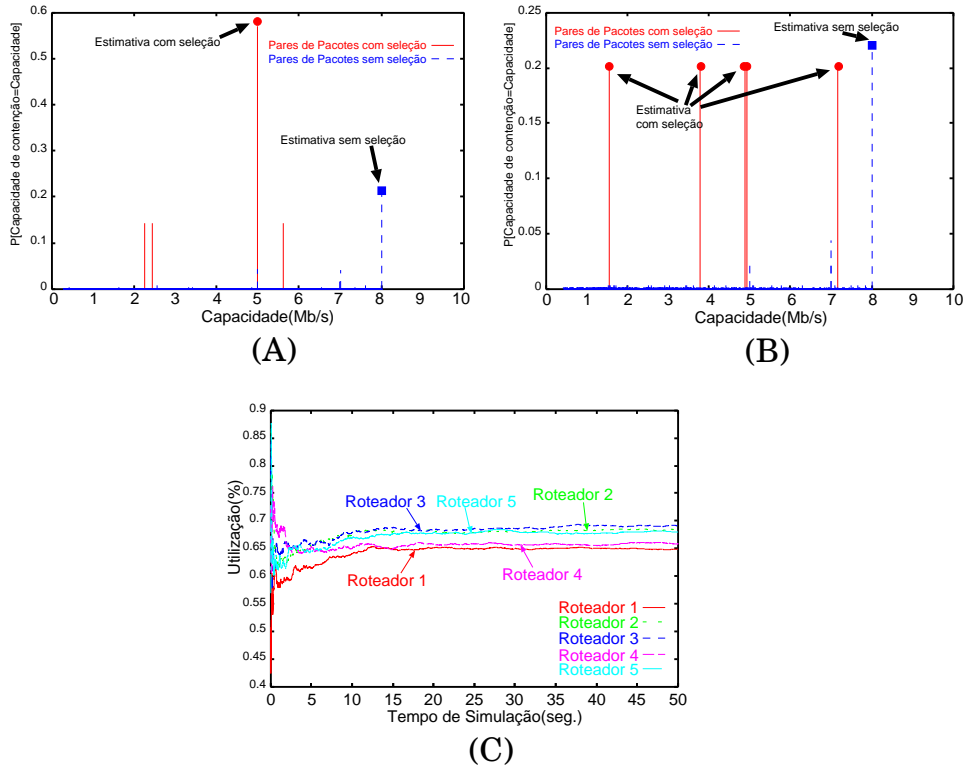
## 5. Experimentos na Internet

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos com a ferramenta *TANGRAM-II Traffic Generator* executados na Internet. Durante seis meses foram feitas medições de diversas métricas na Internet. Além da capacidade de contenção, foram medidos: os atrasos em um sentido e de ida-e-volta (*RTT*), a variação do atraso (*jitter*), perda, e vazão. Os resultados das demais medições foram apresentados em [21, 22, 23].

Os experimentos foram realizados entre a UFRJ e a UMass. Alguns dos resultados obtidos, a partir dessa coleta, estão ilustrados na Figura 16. Os resultados da métrica capacidade de contenção foram todos obtidos utilizando o método proposto neste trabalho.

Pelos gráficos apresentados é possível identificar uma diferença nas estimativas obtidas nos experimentos. Os resultados da capacidade de contenção no sentido UMass-UFRJ foram os mesmos para todos os experimentos, aproximadamente 9.5 Mb/s. No entanto, para as estimativas obtidas da métrica no sentido UFRJ-UMass verificou-se uma variação na capacidade estimada no decorrer dos seis meses de experimentos. Essa alteração está ilustrada na Figura 16 nos resultados obtidos no sentido UFRJ-UMass.

A diferença dos resultados apresentados para o sentido UFRJ-UMass pode ser justificada. Durante o período de experimentos nem sempre foi utilizada a mesma topologia de rede. Além da possibilidade de rotas diferentes entre os dois pontos de medição, o roteador de saída de uma das redes foi alterado ao longo dos meses em que as coletas foram feitas. Tanto a possibilidade de diferentes rotas, quanto as alterações na estrutura



**Figura 13: Resultado do experimento para utilização da rede entre 60% e 70%.**

da rede, explicam a diferença nas estimativas entre os dias do mês de outubro e do mês de dezembro.

## 6. Conclusão

Conhecer parâmetros como a capacidade de contenção de um caminho de rede pode ser fundamental para a execução de aplicações com estreitos requisitos de *QoS*. O método de pares de pacotes vem sendo utilizado para estimar esta capacidade através do envio de dois pacotes e da medição da dispersão no recebimento destes dois pacotes. Neste trabalho foi avaliada a precisão das estimativas obtidas por este método e foi verificada a vulnerabilidade dele para situações de alto tráfego concorrente.

Um método de seleção dos pares a serem utilizados na estimativa da capacidade de contenção foi proposto. Modelos de simulação foram apresentados para avaliar o método e comparar os resultados com os obtidos pelo método tradicional, sem seleção dos pares. Os resultados das simulações mostraram que o método proposto é menos vulnerável à utilização dos roteadores na rede medida. A seleção dos pares, baseada no atraso sofrido pelos primeiros pacotes de cada par, reduz a influência do tráfego concorrente na estimativa da capacidade de contenção.

A melhoria no desempenho da estimativa foi identificada também com experimentos realizados na Internet. Os métodos de pares de pacotes, com e sem seleção, foram implementados na ferramenta *TANGRAM-II Traffic Generator*. Diversos experimentos entre a UFRJ e a UMass foram executados com a ferramenta. Alguns resultados obtidos com o método tradicional apresentaram estimativas influenciadas pela carga presente na rede, enquanto que o método proposto conseguiu eliminar esta influência.

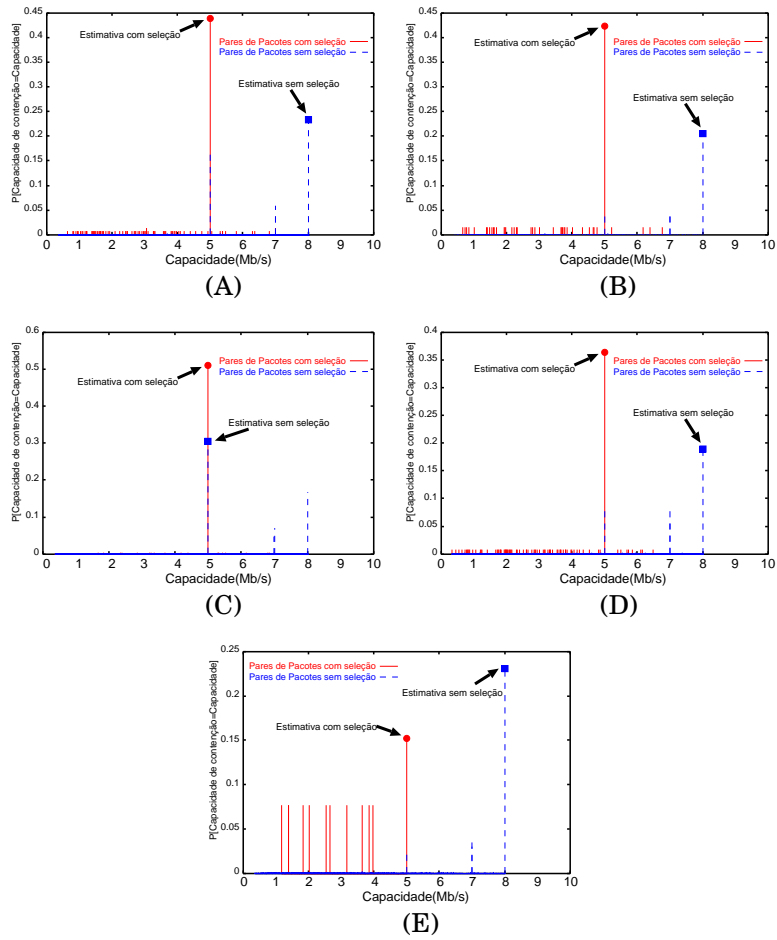


Figura 14: Resultado do experimento utilizando coletas de tráfego real.

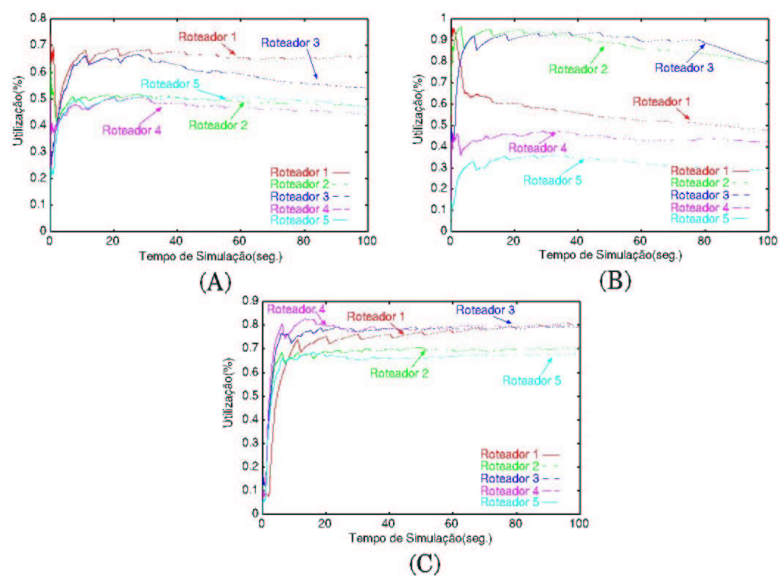
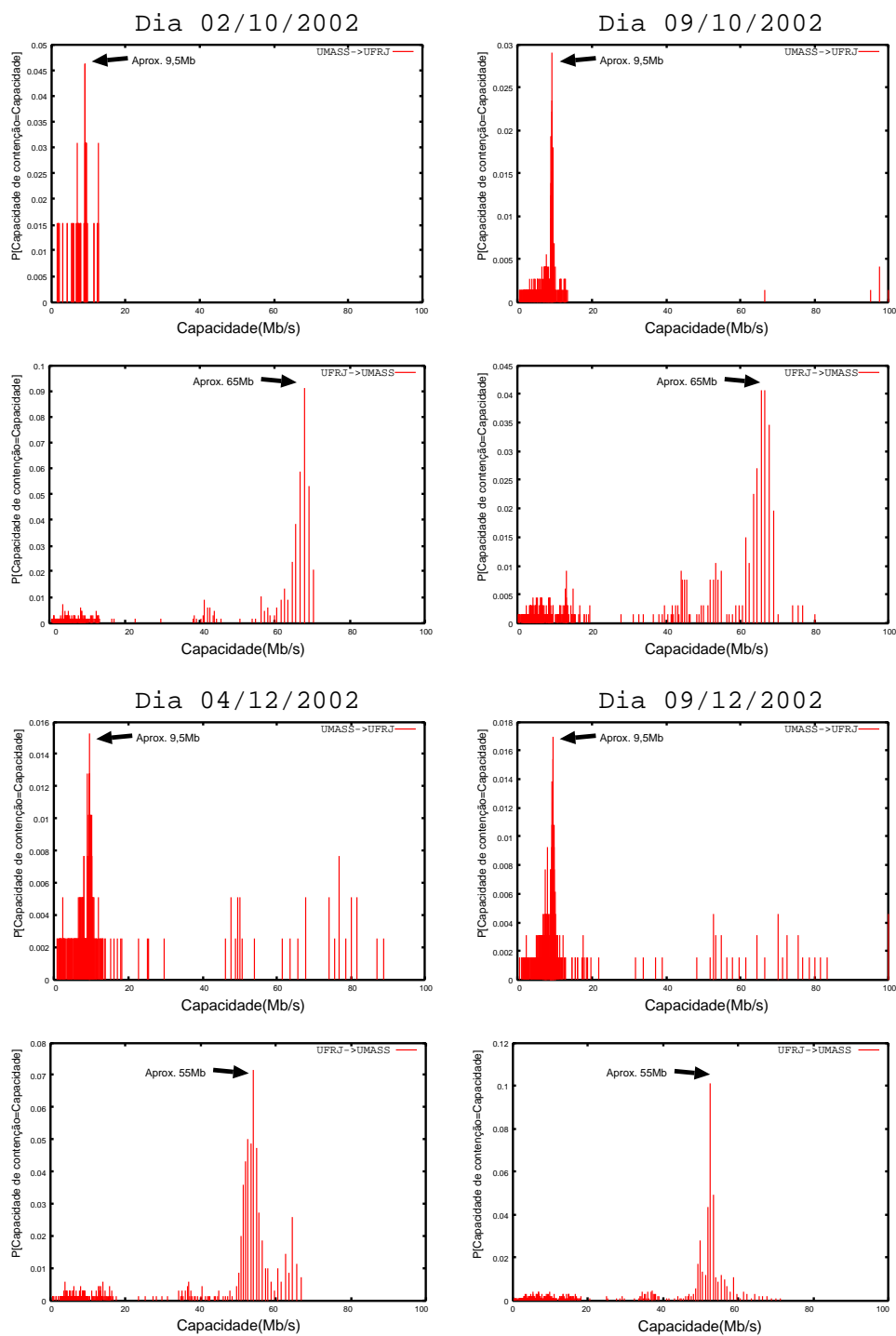


Figura 15: Utilização dos roteadores no experimento usando coletas de tráfego real para o tráfego concorrente.



**Figura 16: Estimativa da capacidade de contenção no caminho UFRJ e a UMass.**



## Agradecimentos

Agradecemos aos grupos dos professores José Augusto Suruagy Monteiro, da UNIFACS, e Don Towsley, de UMass, por disponibilizarem seus laboratórios para que pudéssemos realizar os experimentos relatados neste trabalho.

## Referências

- [1] M. E. Augusto and C. D. Murta. Avaliação Experimental de Ferramentas para Medição de Capacidade em Redes de Computadores. In *SBC/WPerformance*, pages 129–142, Campinas, Brasil, Agosto 2003.
- [2] J. C. Bolot. Characterizing End-to-End Delay and Loss in the Internet. In *ACM/Sigcomm*, pages 289–298, San Francisco, USA, Setembro 1993.
- [3] L. S. Brakmo, S. W. O'Malley, and L. L. Peterson. TCP Vegas: New Techniques for Congestion Detection and Avoidance. In *ACM/Sigcomm*, pages 24–35, London, England, Maio 1994.
- [4] R.M.L.R. Carmo, L.R. de Carvalho, E. de Souza e Silva, M.C. Diniz, and R.R. Muntz. Performance/Availability Modeling with the TANGRAM-II Modeling Environment. *Performance Evaluation*, 33:45–65, 1998.
- [5] R. L. Carter and M. E. Crovella. Bprobe Tool. <http://www.cs.bu.edu/faculty/crovella/src/bprobe/Tools.html>.
- [6] R. L. Carter and M. E. Crovella. Measuring Bottleneck Link Speed in Packet-Switched Networks. In *Performance Evaluation*, volume 27, 28, pages 297–318, 1996.
- [7] E. de Souza e Silva and R.M.M. Leão. Modelagem e Análise de Redes com o Conjunto de Ferramentas TANGRAM II. In *XXI SBRC - Workshop de Ferramentas*, pages 897–904, Natal, Brasil, Maio 2003.
- [8] C. Dovrolis, P. Ramanathan, and D. Moore. What do Packet Dispersion Techniques Measure? In *IEEE/Infocom*, volume 1, pages 905–914, Anchorage, USA, Abril 2001.
- [9] A. B. Downey. Using Pathchar to Estimate Internet Link Characteristics. In *ACM/Sigcomm*, pages 241–250, Cambridge, USA, Setembro 1999.
- [10] M. Gerla, M. Y. Sanadidi, R. Wang, and A. Zanella. TCP Westwood: Congestion Window Control Using Bandwidth Estimation. In *Globecom*, volume 3, pages 1698–1702, San Antonio, USA, Novembro 2001.
- [11] V. Jacobson. Congestion Avoidance and Control. In *ACM/Sigcomm*, pages 314–329, Stanford, USA, Setembro 1988.
- [12] A. Bestavros K. Harfoush and J. Byers. Measuring Bottleneck Bandwidth of Targeted Path Segments. In *IEEE/Infocom*, volume 3, pages 2079–2089, San Francisco, USA, Abril 2003.
- [13] S. Keshav. A Control-Theoretic Approach to Flow Control. In *ACM/Sigcomm*, pages 3–15, Zürich, Switzerland, Setembro 1991.
- [14] K. Lai and M. Baker. Measuring Bandwidth. In *IEEE/Infocom*, pages 235–245, New York, USA, Março 1999.
- [15] K. Lai and M. Baker. Nettimer: A Tool for Measuring Bottleneck Link Bandwidth. In *3rd USENIX Symposium on Internet Technologies and Systems*, San Francisco, USA, Março 2001.
- [16] J. Liu and M. Crovella. Using Loss Pairs to Discover Network Properties. In *ACM/Sigcomm/IMW*, pages 127–138, San Francisco, USA, Novembro 2001.
- [17] D.D. Loung and J. Biro. Needed Services for Network Performance Evaluation. In *IFIP Workshop on Performance Modeling and Evaluation of ATM Networks*, Inglaterra, Julho 2000.

- [18] S.B. Moon, P. Skelly, and D. Towsley. Estimation and Removal of Clock Skew for Network Delay Measurements. In *IEEE/Infocom*, pages 227–234. New York, USA, Março 1999.
- [19] A. Pasztor and D. Veitch. PC Based Precision Timing Without GPS. In *ACM/Sigmetrics*, pages 1–10. Marina Del Rey, CA, USA, Junho 2002.
- [20] V. Paxson. On Calibrating Measurements of Packet Transit Times. In *ACM/Sigmetrics*, pages 11–21, Madison, Wisconsin, USA, Junho 1998.
- [21] A.A.A. Rocha. Medições ativas na Internet: algoritmos baseados em retardo fim-a-fim e experimentos. Master’s thesis, UFRJ-COPPE/Sistemas, Agosto 2003.
- [22] A.A.A. Rocha, E. de Souza e Silva, and R.M.M. Leão. Uma Ferramenta para Estimar Características Fim-a-Fim na Internet. In *SBRC/WRNP’IV*, Natal, Brasil, Maio 2003.
- [23] A.A.A. Rocha, R.M.M. Leão, and E. de Souza e Silva. Metodologia para Estimar o Atraso em um Sentido e Experimentos na Internet. In *XXII SBRC*, Gramado, Brasil, Maio 2004.
- [24] V. Roesler, P. Finzsch, M. Andrade, and J. V. Lima. Análise do Mecanismo de Pares de Pacotes Visando Estimar a Banda da Rede via UDP. In *XXI SBRC*, pages 103–118, Natal, Brasil, Maio 2003.
- [25] M. S. Taqqu, W. Willinger, and R. Sherman. Proof of a Fundamental Result in Self-Similar Traffic Modeling. In *ACM/Computer Communications Review*, pages 5–23, Abril 1997.
- [26] M. Tsuru, T. Takine, and Y. Oie. Estimation of Clock Offset from One-way Delay Measurement on Asymmetric Paths. In *SAINT International Symposium on Applications and the Internet*, pages 126–133, Nara, Japão, Fevereiro 2002.
- [27] L. Zhang, Z. Liu, and C.H. Xia. Clock Synchronization Algorithms for Network Measurements. In *IEEE/Infocom*, pages 160–169, New York, USA, Junho 2002.