

# Análise Comparativa de Simuladores de Redes Baseados em Pacotes versus Simuladores Utilizando Abstração de Fluidos\*

Acélio Sousa Carvalho de Aguiar, Marcial Porto Fernandez,  
Jorge Luiz de Castro e Silva, Jeandro de Mesquita Bezerra

<sup>1</sup>Laboratório de Redes de Computadores e Segurança (LARCES)  
Universidade Estadual do Ceará (UECE)  
Av. Paranjana, 1700 – Fortaleza – CE – Brasil

{acelio,marcial,jlcs,jeandro}@larces.uece.br

**Abstract.** *In traditional network simulators, all packets that pass through the network receive individual treatment of the events that occur on them. When high rates of transmission are simulated, this scheme causes large computational cost resulting in a delayed process to obtain the desired results. A simulator that works on fluid abstraction level treats all flows of the network on a continuous basis and through resolution of differential equations modeled on the behavior of the network. We performed several tests of accuracy and performance on fluid simulators and packets simulators. The results pointed out that this new method may be able to achieve rapid and accurate enabling a new technique for evaluating performance of high-speed networks.*

**Resumo.** *Nos simuladores de redes tradicionais, todos pacotes que trafegam pela rede recebem tratamento individual dos eventos que ocorrem sobre eles. Quando altas taxas de transmissão são simuladas, esse esquema provoca grande custo computacional resultando em um processo demorado para a obtenção dos resultados desejados. Um simulador que trabalha em um nível de abstração de fluidos trata todos os fluxos da rede de forma contínua e por meio de resolução de equações diferenciais modeladas com base no comportamento da rede. Realizamos diversos testes de precisão e desempenho sobre simuladores baseados em fluidos e simuladores baseados em pacotes. Os resultados apontaram que essa nova metodologia pode ser capaz de obter resultados rápidos e precisos possibilitando uma nova técnica para avaliar desempenho de redes de alta velocidade.*

## 1. Introdução

A avaliação de desempenho de sistemas permite compreensão e tomada de decisões. A cada tipo de sistema pode-se aplicar diferentes técnicas de análise que melhor se adaptam a ele. Os simuladores são ferramentas com esse fim, capazes de representar o comportamento da aplicação. O uso de simuladores de redes é fundamental nas atividades dos pesquisadores dessa área, uma vez que dentre outras vantagens, permite a viabilização e teste de novos protocolos de comunicação propostos.

---

\*Esta pesquisa foi desenvolvida com o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq e Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico - FUNCAP

Dependendo do grau de abstração da simulação, os dados podem ser vistos como um conjunto de pacotes ou um fluido que atravessa o meio. Os simuladores de redes tradicionais trabalham em nível de pacotes, ou seja, todos os pacotes, operações e gerenciamento das políticas das filas são tratados individualmente. Assim sendo, quando grandes redes, constituídas por muitos nós, enlaces de alta velocidade e grandes cargas, precisam ser simuladas, surge a problemática do elevado tempo necessário para a execução da simulação. Dessa forma, o tamanho da rede torna-se um fator crítico e limitador para essas atividades.

Recentemente intensificaram-se as pesquisas em novos modelos de simulação que permitam maior abstração dos componentes. Observou-se, dado o crescimento das redes a elevadas taxas de transmissão, a real necessidade de obter técnicas que apresentem maior escalabilidade. O modelo de fluidos é uma modelagem abstrata que representa o tráfego da rede como um fluxo de fluido contínuo, ao invés de uma seqüência discreta de pacotes.

Neste trabalho apresentamos diversos cenários de testes que ilustram situações diferenciadas e que proporcionam inclusive a observação de aspectos que precisam ser melhorados nessa nova metodologia de simulação. Para efeito de validação e aceitação é necessário verificar a precisão e os ganhos de desempenho desses simuladores em relação aos tradicionais simuladores de pacotes.

Após esta breve introdução, fazemos um estudo mais detalhado sobre a simulação de redes de computadores, mais especificamente em relação à modelagem em nível de abstração de fluidos. Em seguida realizamos uma série de experimentos com a simulação de fluidos, confrontando aspectos de desempenho e precisão em relação aos tradicionais simuladores em nível de pacotes. Por fim, concluímos dissertando sobre as possibilidades de trabalhos futuros a serem realizados neste mesmo ramo de pesquisa.

## **2. Simulação de redes utilizando abstração de fluidos**

### **2.1. Motivação**

Os simuladores de redes tradicionais, trabalham em nível de pacotes, precisando manipular todos os pacotes, operações, e gerenciamento de filas, o que resulta em alto custo computacional. Por essa razão, o tamanho da rede a ser simulada é um importante aspecto limitador desse tipo de simulação.

Entende-se por um sistema escalável, aquele que permite aumento de tamanho e recursos do cenário simulado sem afetar significativamente aspectos do seu desempenho ou precisão de execução da análise.

Na atualidade, com a necessidade de se simular redes cada vez maiores e mais complexas, e com o advento das redes ópticas a taxas gigabit, é inviável, pela baixa escalabilidade, a simulação tradicional de uma rede com essas características. A simulação de grandes redes com intenso tráfego de dados implica um oneroso tempo para se obter os resultados desejados.

Podemos considerar três dimensões em que teríamos ganho de velocidade na simulação dessas redes: a dimensão física, que se aplica ao aumento da velocidade dos processadores ou ao processamento paralelo; a dimensão lógica, relacionada com a melhora nos algoritmos implementados no simulador; e por fim, a dimensão da modelagem

matemática, onde os ganhos podem ser obtidos por meio de mudanças na forma de tratar o objeto que está sendo submetido ao processo de simulação. [Figueiredo et al. 2006]

Com relação a essa terceira dimensão, a modelagem matemática, vem-se estudando um mais alto nível de abstração no tratamento dos pacotes que circulam pela rede, o modelo de fluidos. Com uma maior abstração haverá menor tratamento de eventos a serem simulados, podendo haver ganho de eficiência com a mínima penalização da precisão dos resultados. Dessa forma, o modelo de fluidos pode ser uma boa alternativa para a simulação das redes de grande escala.

## 2.2. Estado da arte

O modelo de fluidos pode ser simulado por meio da implementação de seus eventos em software ou resolvido analiticamente.

Algumas das pesquisas concentram-se na implementação e interpretação dos eventos simulados que caracterizariam o comportamento dos fluidos na rede [Figueiredo et al. 2006]. Quando simulado, os eventos do modelo de fluidos são tratados de forma diferenciada em relação a simulação baseada em pacotes. Enquanto esta monitora e dedica atenção a todos os pacotes que circulam na rede, no nível de fluidos, a monitoração é sensível apenas à variação das taxas de fluxo (vazão) das fontes e das filas da rede.

A outra forma de simular redes de computadores usando modelos de fluidos é a elaboração e resolução de equações diferenciais [Padhye et al. 1998, Misra et al. 2000, Baccelli and Hong 2003, Shakkottai and Srikant 2002, Marsan et al. 2005], que aproveitando a natureza contínua das equações de fluidos, representam o comportamento de protocolos, políticas e desempenho de redes. Modelos de fluidos puros, assim chamados, fornecem simplicidade ao framework de simulação, porém não fornecem informações detalhadas acerca de um pacote específico, por exemplo.

Por essa razão há também outro ramo de pesquisas que apostam na mesclagem de modelos de fluidos aos atuais esquemas de simulação baseados em pacotes. Nesta metodologia, busca-se um nível de informações mais detalhado, sem porém perder a principal característica dos modelos de fluidos, a escalabilidade. Dessa forma, nesses modelos de fluidos híbridos [Gu et al. 2004, Kiddle et al. 2003, Riley et al. 2002, Kavimandan et al. 2005, Liu et al. 2003], o simulador implementado apresenta uma rede mista, onde por alguns trechos trafegam pacotes e por outros, trafegam fluidos.

## 2.3. Eventos na simulação de fluidos

A simulação de fluidos é uma modelagem abstrata que representa o tráfego da rede como um fluxo de fluido contínuo, ao invés de uma seqüência discreta de instâncias de pacotes. Dessa forma, um grande número de pacotes pode ser representado por um único fluido.

São considerados eventos nos simuladores de pacotes:

- Geração de pacotes pelas fontes
- Entrada e saída de cada pacote das filas
- Recebimento de pacotes pelos nós
- Entre outros eventos como descartes, colisões etc.

São considerados eventos nos simuladores de fluidos:

- Mudanças nas taxas de saída de cada fluxo nas fontes
- Mudanças nas taxas de entrada ou saída de cada fluxo nas filas

Nos simuladores tradicionais novos eventos são gerados sempre que cada pacote chega, sai ou é descartado por um determinado nó. Nos simuladores de fluidos, esse mesmo processo que resulta em uma variação da vazão de pacotes, é representado por apenas um evento informando a mudança na taxa de fluxo que passou pelo nó.

Se a taxa de transmissão de um nó fosse  $N$  vezes maior, o simulador de pacotes necessitaria tratar na ordem de  $N$  vezes mais pacotes gerando assim  $N$  vezes mais eventos. Porém quando utilizado o simulador de fluidos, a quantidade de eventos processados permanece a mesma, evidenciando a escalabilidade desse modelo de simulação.

### 2.3.1. Efeito *ripple*

Quando dois ou mais fluxos concorrem e juntos extrapolam a capacidade de processamento de uma fila ou do canal de destino, a taxa de saída relativa ao fluxo de cada fonte é sempre proporcional à sua taxa de entrada na fila em questão.

O acúmulo e redução de dados nas filas provocam mudanças nas taxas de saída dos fluxos concorrentes. Essas variações de taxas ficam ainda mais frequentes quando os fluxos passam por diversas filas e sofrem influência de outros fluxos. Como os eventos no simulador de fluidos são gerados sempre que a taxa de saída da fila sofre mudanças, isso resulta em perda de eficiência na simulação de fluidos. Esse efeito é conhecido como *ripple effect* [Figueiredo et al. 2006].

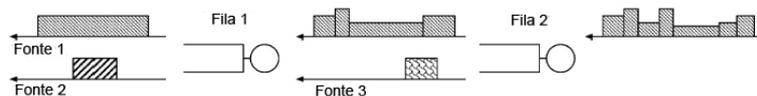


Figura 1. Efeito *Ripple* [Figueiredo et al. 2006]

## 2.4. Equações da simulação de fluidos

Os modelos de fluidos consistem em equações contínuas que representam o comportamento dos pacotes na rede. Um simulador que implementa cada evento gerado, pode obter os mesmos resultados através das resoluções analíticas dessas equações. Essas equações, mais uma vez, oferecem a escalabilidade tão desejada aos simuladores de redes desde que comprovada a precisão de suas soluções. Normalmente a precisão é verificada através de confronto de resultados de um conceituado simulador de pacotes com os resultados do modelo de fluidos proposto.

A rede modelada nas equações apresentadas a seguir, são tratadas como um grafo direcionado  $G = (V, E)$  onde  $V$  representa um conjunto de roteadores AQM (*Active Queue Management*) e  $E$  um conjunto de enlaces  $l \in E$  de capacidade  $C_l$ . [Liu et al. 2004, Gu et al. 2004]

Uma classe  $i$  é o conjunto de fluxos TCP com uma origem e um destino específicos. Fluxos com mesma origem mas destinos diferentes, pertencem a classes distintas. O mesmo acontece com fluxos de mesmo destino porém origens diversas.

Pela rede  $G$  atravessam  $N$  classes TCP com  $n_i$  fluxos, cujas conexões são permanentes e consomem toda a capacidade do canal. Fluxos de uma mesma classe  $i = 1, \dots, N$  têm as mesmas características e suas rotas têm a mesma seqüência  $S_i = (l_{i,1}, l_{i,2}, \dots, l_{i,s_i})$  de  $s_i$  links [Liu et al. 2004, Gu et al. 2004].

Quando um fluxo de classe chega a uma fila que não está inicialmente vazia, é necessário esperar que todo o conteúdo dela, anterior a sua chegada, seja processado. Assim, o retardo  $R_i(t)$  para esse fluxo é dado por:

$$R_i(t) = \sum_{l \in S_i} \left( r_l + \frac{q_l(t_l)}{C_l} \right)$$

Onde  $r_l$  é o tempo de propagação do fluxo no enlace  $l$  de capacidade  $C_l$  e  $q_l(t_l)$  é o tamanho da fila em  $l$  no instante em que os dados chegam nela permitindo calcular o tempo gasto em cada fila do percurso do fluxo [Liu et al. 2004, Gu et al. 2004].

A perda de pacotes é descrita por um processo de Poisson de taxa  $\lambda$  onde as fontes recebem as notificações de perda com base no congestionamento dos enlaces da rede, ao invés de os pacotes já saírem de suas origens com uma probabilidade de descarte [Misra et al. 1999].

O algoritmo que determina o tamanho da janela TCP, conhecido como AIMD (*Additive-Increase Multiplicative-Decrease*), é representado no modelo de fluidos pela equação:

$$\frac{dW_i(t)}{dt} = \frac{1(W_i(t) < M_i)}{R_i(t)} - \frac{W_i(t)}{2} \lambda_i(t)$$

O primeiro termo do segundo membro da equação corresponde ao aumento aditivo onde cada vez que o recebimento do pacote é confirmado, o tamanho da janela  $W_i(t)$  é incrementado de uma unidade desde que a janela máxima ( $M_i$ ) ainda não tenha sido alcançada. Por sua vez, o segundo termo corresponde à redução multiplicativa, onde sempre que uma perda com taxa  $\lambda_i(t)$  é identificada, o tamanho da janela é reduzido pela metade [Liu et al. 2004, Gu et al. 2004].

Quando um fluxo atravessa uma ou mais filas e por elas passam vários fluxos, não necessariamente a taxa de saída de um fluxo de sua origem será a sua taxa de chegada no destino. O fluxo, ao concorrer o seu processamento por um nó intermediário com outros fluxos TCP, tem sua taxa de saída da fila modificada em função da capacidade limite desse nó ou do próximo link de sua rota [Liu et al. 2004].

A taxa de chegada  $a_i^l(t)$  de um fluxo  $i$  numa fila  $l$  corresponde a sua taxa de saída na fila imediatamente anterior, ou caso ela seja a primeira da rota, corresponde a razão entre a janela e o retardo do fluxo naquele instante. A taxa de chegada na última fila do percurso, ou seja, o destino, corresponde ao *throughput* do fluxo analisado.

Quando não há fluxos de dados acumulados em fila é fácil perceber que a taxa de saída  $d_i^l(t)$  será idêntica àquela de entrada. Porém, se a fila não está vazia e vários fluxos acessam simultaneamente aquele nó, a capacidade de processamento em relação a cada

fluxo, e em conseqüência suas taxas de saída na fila tornam-se proporcionais a suas taxas de chegada uma vez que eles concorrem ao mesmo recurso.

$$a_i^l(t) = \begin{cases} \frac{W_i(t)}{R_i(t)}, & l = l_{i,1} \\ d_i^{l,j-1}(t - r_{l_{i,j-1}}), & l = l_{i,j}, \quad 2 \leq j \leq s_i \end{cases}$$

$$d_i^l(t) = \begin{cases} a_i^l(t), & q_l(t) = 0 \\ \frac{a_i^l(t')}{\sum_{j \in N_i} a_j^l(t')} C_l, & q_l(t) > 0 \end{cases}$$

Nas equações acima, temos que  $t'$  é o instante em que o fluxo em questão chega na fila analisada e  $N_l$  é o conjunto de classes TCP que atravessam o enlace  $l$  [Liu et al. 2004, Gu et al. 2004].

O tamanho de cada fila é calculado pela diferença entre o somatório dos fluxos que entram e a sua capacidade de processamento (taxa de saída) levando em consideração a probabilidade  $p_l(t)$  de descarte nessa fila [Liu et al. 2004, Gu et al. 2004].

$$\frac{dq_l(t)}{dt} = -1(q_l(t) > 0)C_l + \left( \sum_{i \in N_l} n_i a_i^l(t) \right) (1 - p_l(t))$$

### 3. Experimentos

#### 3.1. Metodologia

A fim de verificar a precisão e confirmar as vantagens de simuladores que trabalham no nível de fluidos, realizamos diversos experimentos sobre esses simuladores em confronto com tradicionais simuladores de pacotes.

Utilizamos uma recente proposta de simulador híbrido, o *FFM (Fluid Flow Model)* [Gu et al. 2004], que suporta a criação de cenários de redes estruturadas, com roteadores AQM e tráfego TCP. Por meio de nossos testes, esperamos confirmar os resultados obtidos em [Gu et al. 2004] apresentando cenários adicionais que representam situações diferenciadas e que proporcionam a observação de ocorrências que evidenciam pontos fracos na modelagem implementada.

O *ns-2* é o simulador baseado em pacotes utilizado para comparação de resultados com o *FFM*. O *ns-2* foi escolhido porque é um simulador confiável e largamente difundido na comunidade acadêmica. Devido a confiança adquirida pelo longo tempo de uso, pode ser usado para validação de outros simuladores.

Como o *FFM* é um simulador híbrido mas que também permite ser utilizado como um simulador de fluidos puro, realizamos 3 grupos de testes. O primeiro verifica a precisão e o desempenho de uma simulação de fluidos pura frente ao *ns-2*. Neste grupo, são observadas situações em que os nós sob análise estão no interior de uma rede de fluidos. O segundo grupo trata de uma rede híbrida, onde desta vez, são observadas situações em que os nós a serem analisados estão no exterior da rede de fluidos, ou seja, o nó estará

no trecho de modelo de pacotes. No último conjunto de testes, avaliamos ambientes que previamente apresentam indícios de desempenho aquém do desejado.

Para todos os cenários montados para o simulador de fluidos, para efeito de validade dos testes, são construídos cenários equivalentes para o simulador de pacotes.

### 3.2. Testes do modelo de fluidos puro

A figura 2 ilustra o cenário em que os testes desta seção são executados. Trata-se de uma rede cabeada com roteadores AQM de tamanho máximo de fila 500 e fluxos que consomem toda a capacidade dos *links* por onde passam. Temos 7 nós (A, B, C, D, E, F e G) e 6 classes de tráfego nos seguintes sentidos: A-F, A-G, B-F, B-G, C-F, C-G. Cada classe contém 25 fluxos TCP com janela máxima 128, onde aqueles que pertencem a uma mesma classe seguem o mesmo percurso no cenário. Todos os canais da rede têm capacidade 10Mb/s e latência de propagação de 10ms, com exceção do enlace B-E cuja latência é 20ms.

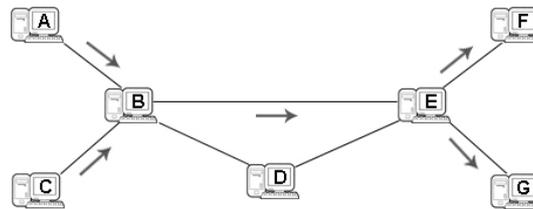


Figura 2. Cenário de testes para a simulação de fluidos pura

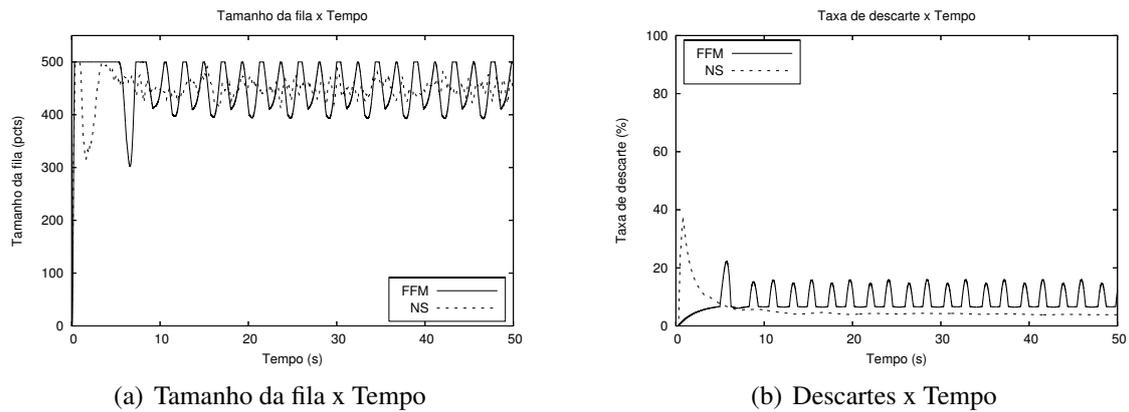
O objetivo de inserirmos 25 fluxos em cada classe foi proporcionar crescimento das filas e descarte de pacotes para fins de análise estatística. Por sua vez, o uso de latência 20ms no canal B-E, diferenciada dos demais, foi proporcionar aos simuladores em teste, a adoção de um critério de tomada de decisão quanto ao caminho seguido pelo fluxo, uma vez que ao custo de um salto a mais, o fluxo tem a opção de percorrer por exemplo um caminho equivalente B-D-E. Desde já informamos que em ambos os simuladores, a alternativa escolhida adotou como primeiro critério a quantidade de saltos mínima para se alcançar o destino.

O cenário foi montado também de forma que permita a análise de cinco medidas principais de análise em aplicações TCP: o tamanho da fila no nó examinado, o descarte nessa fila, a janela de congestionamento do fluxo TCP em análise, o *throughput* e o retardo desse fluxo.

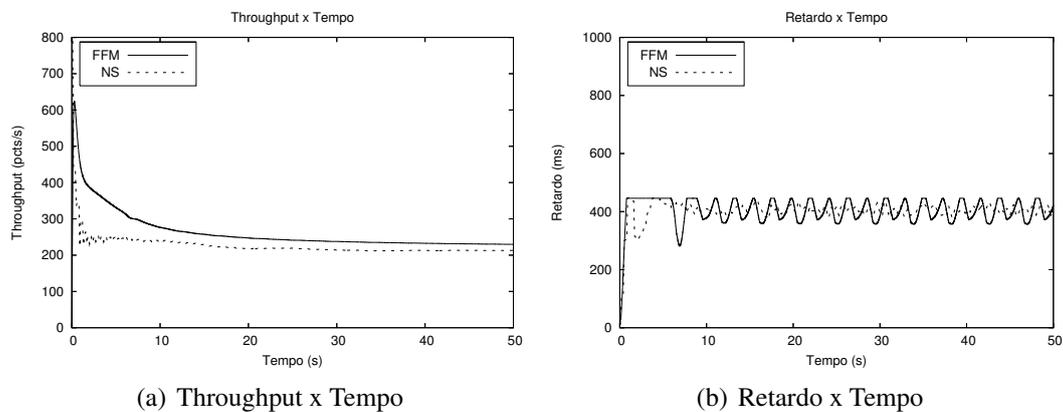
#### 3.2.1. Testes de precisão

Os testes desta seção avaliaram as informações de um nó localizado no interior do cenário proposto modelado apenas por equações de fluidos em comparação ao mesmo cenário modelado no simulador de pacotes. Os gráficos da figura 3 se referem à fila B, e os gráficos da figura 4 se referem ao fluxo B-F.

Consideramos os resultados satisfatórios, uma vez que os valores obtidos com o simulador *FFM* foram muito semelhantes aos obtidos com o *ns-2*. As pequenas oscilações nos resultados do simulador *FFM* são devidas à modelagem matemática das equações



**Figura 3. Informações da fila em B em ambos os tipos de simuladores**



**Figura 4. Informações do tráfego B-F em ambos os tipos de simuladores**

descritas na seção 2.4, mais especificamente relacionadas ao processo de *Poisson* utilizado para as notificações de perda.

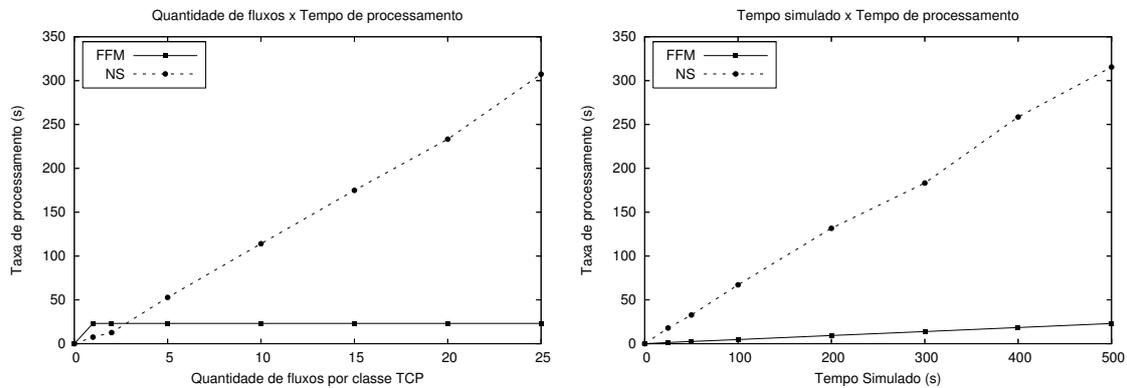
### 3.2.2. Testes de desempenho

Espera-se que quanto maior a complexidade da rede, melhor será o desempenho de um simulador de fluidos, ou seja, os ganhos serão significativos quando grandes redes forem simuladas.

Todos os testes foram realizados na mesma máquina e sob as mesmas condições de software. São considerados apenas o tempo de processamento das simulações, sendo descartados os tempos gastos na geração de arquivos *traces* e saídas em tela.

Foram realizados dois testes para comparação de desempenho entre os simuladores *ns-2* e *FFM* sobre o cenário da figura 2. O primeiro apresenta a relação entre o tempo de processamento e a variação da quantidade de fluxos por classe TCP, ou seja, a variação da taxa de transmissão. Por sua vez, o segundo teste mostra a relação entre o tempo de processamento e a variação do tempo simulado dentro da ferramenta de simulação. Em ambos os testes alteramos a capacidade de transmissão de cada enlace para 100Mb/s a fim de representar a potência das redes modernas evidenciando as variações de desempenho

entre os dois tipos de simulação.



(a) Desempenho em função da quantidade de fluxos por classe (b) Desempenho em função do tempo simulado

### Figura 5. Informações de desempenho entre os dois tipos de simuladores

Os gráficos da figura 5 resumem os resultados obtidos e as significantes diferenças de desempenho entre as duas metodologias de simulação.

No primeiro teste desta seção variamos a quantidade de fluxos por classe TCP e observamos o efeito provocado no tempo necessário para o processamento da simulação. Inicialmente inserimos 1 (um) fluxo, depois 2 (dois), 5 (cinco), 10 (dez), 15 (quinze), 20 (vinte) e finalmente 25 (vinte e cinco) fluxos em cada uma das três classes do cenário.

Quando aplicamos apenas 1 fluxo em cada classe TCP, a rede permite a adoção de uma janela de congestionamento elevada (máximo 128). Porém, quando inserimos por exemplo 25 fluxos, a janela de congestionamento será reduzida para apenas 4 pacotes em média por rajada (como pudemos observar em testes não apresentados aqui). Logo, para realizarmos exatamente a análise que desejamos no primeiro teste (o tempo de processamento em função do número de fluxos por classe), precisamos limitar a janela de congestionamento TCP em 4, para que tenhamos apenas uma variável (a quantidade de fluxos), enquanto a janela permanece constante.

Em virtude do aumento do número de fluxos por classe TCP, observamos na figura 5(a) um crescimento aproximadamente linear e bastante acentuado do tempo necessário de processamento no simulador baseado em pacotes. Por sua vez, no *FFM* esse tempo de processamento permaneceu constante. Como já era esperado, isso ocorreu porque o desempenho de um simulador que trabalha em nível de fluidos é independente da taxa de transmissão, quantidade de enlaces na rota do fluxo, entre outros aspectos apresentados anteriormente neste trabalho.

No segundo teste desta seção retornamos os valores originais do cenário da figura 2, com janela máxima 128 e 25 fluxos por classe TCP. Variamos o tempo a ser simulado em 50 (cinquenta), 100 (cem), 200 (duzentos), 300 (trezentos), 400 (quatrocentos) e 500 (quinhentos) segundos.

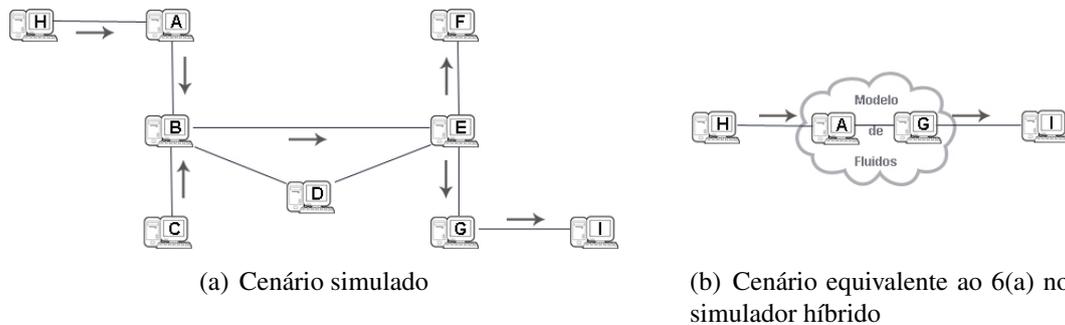
Desta vez, na figura 5(b) temos um crescimento do tempo de processamento em ambos os simuladores. Esse comportamento linear do *ns-2* e com elevada inclinação, se deve à carga de transmissão (quantidade de fluxos TCP) e a potência de processamento

do hardware que mantiveram-se constantes. Porém, no *FFM*, com crescimento bem menos acentuado, se deve não porque a quantidade de fluxos permaneceu a mesma, mas sim porque as equações de fluidos dentro do simulador são resolvidas a cada intervalo de tempo específico. Logo, quanto maior o tempo de simulação, maior a quantidade de vezes em que essas equações precisarão ser solucionadas, aumentando o tempo de processamento do simulador de fluidos. Como vimos anteriormente, se mantivermos o tempo de simulação constante, o desempenho de um simulador de fluidos permanece fixo mesmo variando taxa de transmissão, janela de congestionamento etc.

### 3.3. Testes do modelo de fluidos híbrido

Neste momento, nosso objetivo é verificar as informações relativas a um nó localizado no exterior de uma rede definida por modelos de fluido.

O cenário de testes é semelhante ao anterior, diferindo apenas que foram adicionados dois outros nós (H, I) e uma nova classe de tráfego H-I também com 25 fluxos TCP, como ilustrado na figura 6(a).



**Figura 6. Cenário de testes para a simulação híbrida**

Para o simulador híbrido *FFM* a rede equivalente é definida como mostrado na figura 6(b), onde o fluxo de pacotes com origem em H é sincronizado e transformado em um fluxo de fluido ao entrar na subrede representada pelas equações diferenciais. Ao sair dessa subrede, há nova sincronização e os dados são novamente transformados em pacotes para então chegar ao destino I. Com esse tipo de simulação (híbrida), temos informações detalhadas de todos os pacotes do fluxo H-I no espaço da simulação regido por pacotes.

Os gráficos da figura 7 correspondem às informações de retardo e throughput do fluxo H-I.

Mais uma vez os resultados obtidos, inclusive os não apresentados aqui, foram considerados bastante satisfatórios, uma vez que os dados de ambos os tipos de simuladores foram muito semelhantes, concluindo assim, que o *FFM* apresenta boa precisão em suas informações tanto para nós localizados no interior do modelo de fluidos, como para nós oriundos de uma simulação híbrida.

Abstivemos de exibir os resultados referentes aos testes de desempenho desta seção, uma vez que as informações são semelhantes às apresentadas no cenário de fluidos puro. Porém, informamos que naturalmente o tempo de processamento da simulação híbrida é mais elevado que em uma simulação de fluidos pura, afinal, o trecho de manipulação de pacotes demanda o tempo correspondente ao de um simulador de pacotes tradicional.

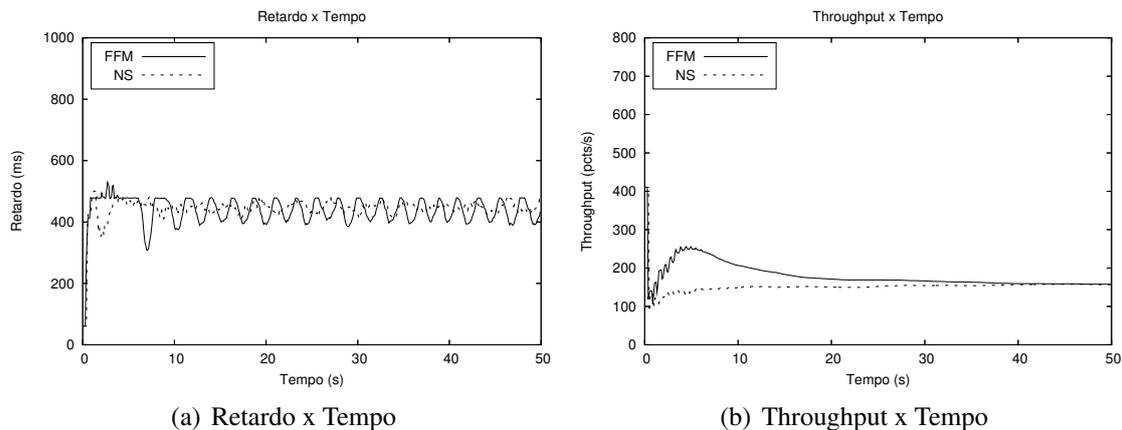


Figura 7. Informações da fila em H e do tráfego H-I

### 3.4. Testes em cenários não favoráveis

Com base em conhecimentos anteriores a respeito de possíveis pontos fracos da modelagem de fluidos, com destaque para o *efeito ripple*, preparamos um ambiente de testes que apresenta essas características.

Como nosso objetivo é gerar um *efeito ripple*, precisamos que um determinado fluxo de fluido atravessasse diversas filas em concorrência com outros fluxos distintos, havendo assim, uma grande variação da vazão de um fluido dentro dos canais por onde ele passa.



Figura 8. Cenário que apresenta *efeito ripple*

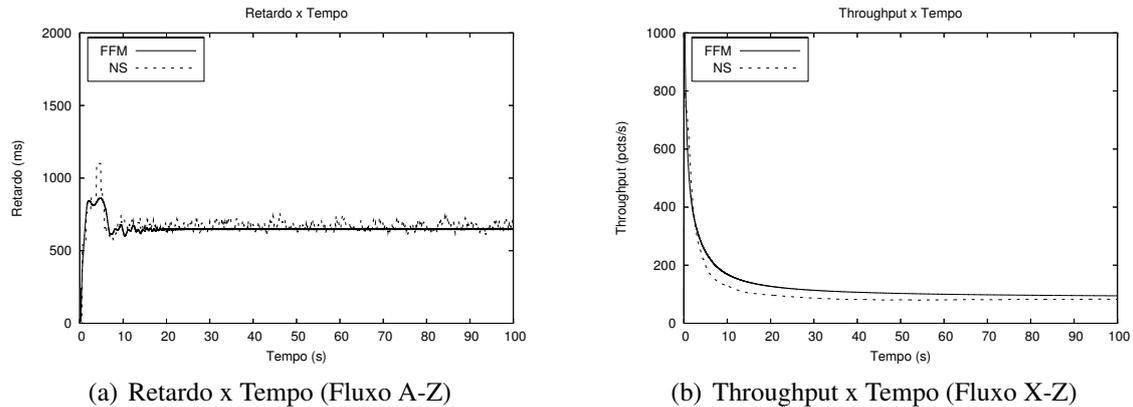
Nosso novo cenário consiste mais uma vez de uma rede cabeada com roteadores AQM alinhados de forma que haja uma única rota possível para que um destino seja alcançado. As filas têm tamanho máximo de 500 pacotes e os canais têm capacidade de 10Mb/s e latência de 10ms. Todos os nós geram classes de tráfego TCP com 10 fluxos para um mesmo destino e com janela máxima 32. Assim sendo, a concorrência com os demais fluxos que vieram de origens anteriores é inevitável. Em consequência, como sabemos, haverá variação das taxas de transmissão e então, o aumento de eventos a serem tratados pelo simulador de fluidos.

O cenário pode ser visualizado na figura 8, onde o nó A envia dados para o nó Z, por sua vez, o nó B além de encaminhar os dados de A, gera seu próprio tráfego formando o fluxo B-Z, o mesmo acontece com o nó C, que encaminha os dados de A, B e gera o fluxo C-Z. O processo se repete em todos os elementos da rede.

#### 3.4.1. Testes de precisão

Antes de realizarmos os testes de desempenho, precisamos verificar a correção e precisão das simulações executadas para garantir a validade dos mesmos.

Simulamos uma rede com 25 nós e analisamos os fluxos A-Z e X-Z. Por motivos de limitação de espaço deste artigo, apresentamos apenas os gráficos estatísticos da figura 9, mas asseguramos que a precisão dos resultados das demais informações mostrou-se bastante satisfatória. Observamos também que mesmo quando os links não operam com o máximo de suas capacidades, os resultados mantiveram-se precisos.



**Figura 9. Informações da fila em B em ambos os tipos de simuladores**

### 3.4.2. Testes de desempenho

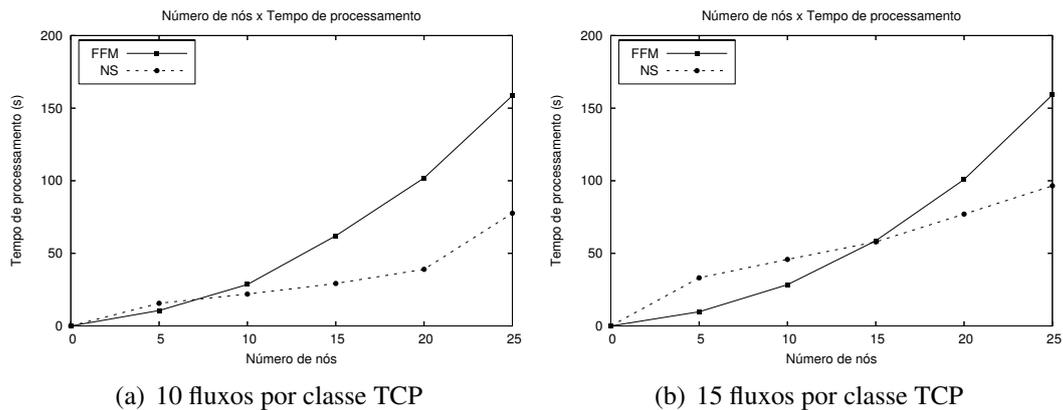
Com relação ao teste de desempenho, que de fato é o que nos interessa neste momento, variamos a quantidade de nós dentro do cenário entre 5 (cinco), 10 (dez), 15 (quinze), 20 (vinte) e 25 (vinte e cinco). Com essa variação foi possível identificar as diferenças de desempenho em função da quantidade de nós no cenário dispostos da forma relatada anteriormente.

Como podemos ver na figura 10, o tempo de processamento no *FFM* apresentou crescimento mais acentuado que no *ns-2*.

O importante é observar o fato do crescimento exponencial do tempo de processamento do simulador de fluidos com o aumento da quantidade de filas no caminho de um fluxo. Mostrou-se assim, o impacto negativo do *efeito ripple*, que como vimos, afeta o desempenho, não a precisão. As intensas variações nas taxas de transmissão em cada fluxo exigiram eventos extras, ou seja, cálculos adicionais das equações de fluidos para cada modificação na vazão dos mesmos.

Lembramos que os resultados obtidos para fluidos são sempre os mesmos independentemente da quantidade de fluxos por classe, ao passo que no *ns-2*, quanto maior a quantidade de fluxos, mais demorado é o processo. Assim sendo, se aumentássemos essa carga sobre os canais, o ponto de cruzamento entre as duas funções ocorreria mais tardiamente. Para demonstrar esse fato, na imagem 10(b) ao invés de 10 fluxos por classe, atribuímos 15 fluxos e aumentamos a capacidade dos canais para 20Mb/s.

Nosso objetivo também foi mostrar que embora nesse cenário específico o simulador de pacotes apresentou melhor desempenho que o *FFM*, diante de uma rede de alta velocidade não ocorrerá o mesmo. O aumento considerável de pacotes em circulação



**Figura 10. Desempenho na presença de efeito ripple**

afetará o desempenho dons-2s enquanto o simulador de fluidos manterá seus índices de execução.

#### 4. Conclusões e Trabalhos Futuros

Neste trabalho abrangemos a análise de desempenho de sistemas, mais especificamente uma recente linha de pesquisa que visa atribuir escalabilidade aos tradicionais simuladores de redes. Em uma das propostas, considera-se um maior nível de abstração, onde os pacotes que trafegam discretamente pela rede são tratados como um fluxo de fluido contínuo. Dessa forma, as diversas medidas de desempenho entre outras informações, podem ser obtidas através da resolução de equações diferenciais que representam o comportamento do sistema modelado.

Realizamos diversos testes que visavam comprovar a precisão e ganhos de desempenho dos simuladores em nível de fluidos em comparação com os simuladores tradicionais baseados em pacotes. A maioria dos resultados foi bastante satisfatória, encontramos porém, cenários desfavoráveis e aspectos do modelo de fluidos que podem provocar degradação das informações. Alguns problemas em aberto dão continuidade às pesquisas relacionadas ao assunto. O *efeito ripple* é o mais notável.

Um importante aspecto que evoca expansão do simulador de fluidos que nós utilizamos, é a modelagem da janela de transmissão TCP, cujo crescimento ocorre sempre de forma linear, não sendo modelado o processo de inicialização lenta (*slow start*) adotado na maioria das implementações do protocolo TCP e entre outros algoritmos. Além do mais, as possibilidades de incremento da modelagem de fluidos é facilmente perceptível com os diversos outros protocolos e políticas de filas que podem ser modelados aumentando seu potencial de simulação.

A simulação de redes em nível de fluidos é de fato uma técnica promissora consistindo em uma boa alternativa para a simulação de grandes redes. Mostrou-se bastante confiável, e se acompanhada de alguns ajustes e expansões pode ser amplamente adotada nos processos de avaliação de desempenho de sistemas e de novos protocolos.

## Referências

- Baccelli, F. and Hong, D. (30 March-3 April 2003). Flow Level Simulation of Large IP Networks. *INFOCOM 2003. Twenty-Second Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. IEEE*, 3:1911–1921 vol.3.
- Figueiredo, D., Liu, B., Guo, Y., Kurose, J., and Towsley, D. (2006). On the Efficiency of Fluid Simulation of Networks. *Computer Networks*, 50(12):1974–1994.
- Gu, Y., Liu, Y., and Towsley, D. (7-11 March 2004). On Integrating Fluid Models with Packet Simulation. *INFOCOM 2004. Twenty-third Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*, 4:2856–2866 vol.4.
- Kavimandan, A., Lee, W., Thottan, M., Gokhale, A., and Viswanathan, R. (17-19 Oct. 2005). Network Simulation Via Hybrid System Modeling: a Time-Stepped Approach. *Computer Communications and Networks, 2005. ICCCN 2005. Proceedings. 14th International Conference on*, pages 531–536.
- Kiddle, C., Simmonds, R., Williamson, C., and Unger, B. (2003). Hybrid Packet/Fluid Flow Network Simulation. *Proceedings Seventeenth Workshop on Parallel and Distributed Simulation, 2003.(PADS 2003)*, pages 143–152.
- Liu, Y., Presti, F. L., Misra, V., Towsley, D., and Gu, Y. (2003). Fluid Models and Solutions for Large-Scale IP Networks. In *SIGMETRICS '03: Proceedings of the 2003 ACM SIGMETRICS international conference on Measurement and modeling of computer systems*, pages 91–101, New York, NY, USA. ACM.
- Liu, Y., Presti, F. L., Misra, V., Towsley, D. F., and Gu, Y. (2004). Scalable Fluid Models and Simulations For Large-Scale IP Networks. *ACM Trans. Model. Comput. Simul.*, 14(3):305–324.
- Marsan, M., Garetto, M., Giaccone, P., Leonardi, E., Schiattarella, E., and Tarello, A. (Dec. 2005). Using Partial Differential Equations to Model TCP Mice and Elephants in Large IP Networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 13(6):1289–1301.
- Misra, V., Gong, W., and Towsley, D. (1999). Stochastic differential equation modeling and analysis of TCP-window size behavior. *Proc. Performance99*.
- Misra, V., Gong, W.-B., and Towsley, D. (2000). Fluid-based Analysis of a Network of AQM Routers Supporting TCP Flows with an Application to RED. *SIGCOMM Comput. Commun. Rev.*, 30(4):151–160.
- Padhye, J., Firoiu, V., Towsley, D., and Kurose, J. (1998). Modeling TCP Throughput: a Simple Model and its Empirical Validation. *SIGCOMM Comput. Commun. Rev.*, 28(4):303–314.
- Riley, G., Jaafar, T., and Fujimoto, R. (2002). Integrated Fluid and Packet Network Simulations. *Proceedings. 10th IEEE International Symposium on Modeling, Analysis and Simulation of Computer and Telecommunications Systems, 2002. MASCOTS 2002.*, pages 511–518.
- Shakkottai, S. and Srikant, R. (2002). How Good are Deterministic Fluid Models of Internet Congestion Control? *INFOCOM 2002. Proceedings. Twenty-First Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies.*, 2:497–505 vol.2.