

Avaliando Estratégias de Controle de Admissão para implementação de Garantias de QoS de Fluxos Individuais em Redes *DiffServ* usando Métodos de Otimização

Ricardo Nabhen^{1,2}, Edgard Jamhour², Manoel C. Penna²,
Mauro Fonseca², Carlos Maziero², Guy Pujolle¹

¹Université Pierre et Marie Curie - Paris - França
Laboratoire d'Informatique de Paris 6, LIP6

Guy.Pujolle@lip6.fr

²Pontifícia Universidade Católica do Paraná - PUCPR
Programa de Pós-Graduação em Informática Aplicada - PPGIA

{nabhen, jamhour, penna, mauro.fonseca, maziero}@ppgia.pucpr.br

Abstract. *This paper presents a study that intends to investigate the QoS deployment in DiffServ networks for delay sensitive applications considering performance guarantees established at the micro-flow level. It is known that, due to statistical guarantees, the performance level experienced by individual flows can not be enough to meet QoS requirements. In this study, we present an evaluation methodology based on optimization methods that implements a measurement based admission control mechanism. Based on this methodology, we show that it is possible to use the system resources efficiently and to meet the QoS requirements at the micro-flow level taking into account the variation of provisioning levels and required performance parameters.*

Resumo. *Este trabalho apresenta um estudo que tem por objetivo investigar a implementação de garantias de QoS a nível do micro-fluxo em Redes DiffServ considerando aplicações sensíveis ao atraso. Como se sabe, devido às garantias estatísticas de desempenho oferecidas, o nível de desempenho observado pelos fluxos individuais pode não atender aos níveis de QoS requeridos. Neste estudo, será apresentada uma metodologia de avaliação baseada em métodos de otimização que implementa um mecanismo de controle de admissão baseado em medições. Através desta metodologia, este estudo mostra que é possível utilizar de forma eficiente os recursos do sistema e garantir o cumprimento dos requisitos de QoS a nível do micro-fluxo considerando a variação dos níveis de provisionamento e dos parâmetros de desempenho requeridos.*

1. Introdução

A arquitetura dos Serviços Diferenciados (*DiffServ*) [Blake et al. 1998] permite a oferta de serviços em classes de tráfego diferenciadas e tem sido considerada como a principal estratégia para a implementação de QoS de forma escalável na Internet. Baseado na agregação de tráfego, o uso do *DiffServ* passa pela escolha de técnicas para a implementação das funcionalidades nos planos de controle e de dados. Deve-se procurar adotar técnicas simples, no sentido do baixo consumo de recursos e da facilidade de

implementação. Embora diversas técnicas tenham sido propostas com sucesso para estabelecer garantias de *QoS* relacionadas ao tráfego agregado, implementar estratégias de *QoS* em aplicações sensíveis ao atraso baseado no estabelecimento de garantias em termos de fluxos individuais permanece um assunto ainda a ser investigado. Como se sabe, devido a garantias estatísticas, o nível de desempenho observado pelos fluxos individuais (ou, micro-fluxos) pode não atender aos níveis de *QoS* estabelecidos mesmo quando os níveis associados ao tráfego agregado (ou, macro-fluxo) são suficientes. De fato, estratégias de implementação de *QoS* permitem que alguns micro-fluxos observem maiores níveis de atraso, de variação do atraso e de perdas de pacotes do que outros, o que muitas vezes pode representar uma violação dos requisitos de desempenho.

No contexto da implementação de *QoS*, o Controle de Admissão desempenha um papel fundamental. A idéia central é não permitir a entrada de novo tráfego que possa degradar o nível de desempenho do tráfego já admitido. Diversas técnicas de controle de admissão foram propostas e podem ser classificadas em duas classes: Centralizada e Distribuída [Rhee et al. 2004]. Na Centralizada, uma entidade central, denominada *Bandwidth Broker* (BB), é responsável pelas decisões do controle de admissão. As propostas apresentadas em [Liao and Campbell 2001], [Zhang et al. 2001] e [Bouras and Stamos 2004] são exemplos de mecanismos centralizados, enquanto [Elek et al. 2000] e [Breslau et al. 1999] abordam o método distribuído, onde as decisões do controle de admissão são tomadas pelos dispositivos de borda ou sistemas finais [Kelly et al. 2000]. Associados a estas estratégias, dois métodos são considerados para implementação do controle de admissão: O *PBAC* - Controle de Admissão baseado em Parâmetros - e o *MBAC* - Controle de Admissão baseado em Medições. No *PBAC*, parâmetros definidos estaticamente a priori são utilizados para a tomada de decisão, enquanto no *MBAC*, medidas efetuadas dinamicamente são utilizadas para obter o estado corrente da rede. Por conta disto, o *PBAC* tem sido considerado conservador para a maioria das implementações [Rhee et al. 2004] e o *MBAC* tem recebido maior atenção por realizar um uso mais eficiente dos recursos disponíveis.

Independentemente da estratégia escolhida, a complexidade dos mecanismos propostos varia bastante, sendo comum propostas contendo novos protocolos de sinalização e esquemas para medição da carga da rede através de pacotes de sonda. Assim, face a esta complexidade, também é comum a adoção do superprovisionamento¹. Neste caso, a rede receberia um nível de dimensionamento de recursos baseado na taxa de pico do tráfego agregado [Filsfils and Evans 2005], o que permitiria o cumprimento das garantias de *QoS* requerida em termos do atraso, da variação do atraso e do nível de perda de pacotes. Considerando tanto as diversas estratégias de controle de admissão propostas quanto a regra empírica do superprovisionamento, fica claro que a implementação de garantias de *QoS* a nível do micro-fluxo ainda precisa ser investigada. De fato, algumas propostas de controle de admissão estabelecem mecanismos para compartilhamento da largura de banda disponível sem considerar as conseqüências em termos dos níveis de atraso e perda observados pelos fluxos individuais. Da mesma forma, considerar a solução dada pelo aumento da quantidade de recursos alocados pode ser uma grande simplificação, e, ainda, muito custosa para implementação se forem considerados enlaces de baixa capacidade, como os

¹ Este termo refere-se ao procedimento de dimensionar os recursos da rede acima da quantidade nominal necessária.

das redes de acesso e as redes sem-fio.

Este trabalho apresenta um estudo que tem por objetivo investigar a implementação de garantias de *QoS* a nível do micro-fluxo em Redes *DiffServ* considerando aplicações sensíveis ao atraso. Para tanto, será apresentada uma metodologia que implementa um mecanismo de controle de admissão baseado em medições que visa controlar a quantidade de fluxos admitidos em um determinado intervalo de tempo, objetivando maximizar o uso da rede e o número de clientes bem atendidos, isto é, fluxos que tiveram seus requisitos de *QoS* respeitados. Este mecanismo de controle de admissão se baseia no uso de métodos de otimização para a descoberta dos valores ótimos para a implementação de *QoS*. Através do método de otimização adotado, este trabalho investiga qual a melhor estratégia para esta implementação, apresentando um estudo que compara as possíveis abordagens a serem utilizadas no controle de admissão. Baseado nesta proposta, este trabalho mostra que é possível utilizar de forma eficiente os recursos do sistema e garantir o cumprimento dos requisitos de *QoS* a nível do micro-fluxo considerando a variação dos níveis de provisionamento e dos parâmetros de desempenho requeridos.

Este trabalho está organizado como segue. A seção 2 apresenta alguns trabalhos que abordam estudos relacionados ao desempenho de fluxos individuais. A seção 3 apresenta o método de otimização utilizado para a obtenção dos parâmetros ótimos a serem adotados na avaliação das estratégias de controle de admissão. A seção 4 apresenta a metodologia proposta para comparar possíveis estratégias para implementação do controle de admissão. A seção 5 mostra a estratégia de simulação adotada e a análise dos resultados obtidos. Por fim, a seção 6 conclui este trabalho e aponta alguns direcionamentos futuros.

2. Trabalhos Relacionados

As propostas para gerenciamento de *QoS* em redes *DiffServ* se baseiam na definição de classes de tráfego associadas a um agregado de fluxos. Neste caso, diversas abordagens propostas para implementação de *QoS* assumem que os níveis de desempenho associados a uma classe tráfego seriam supostamente suficientes para atender os níveis de desempenho associados aos fluxos que compõem este tráfego agregado. Naturalmente, devido à natureza estocástica, essas garantias podem não ser suficientes para atender o desempenho no nível do micro-fluxo, fazendo com que essa estratégia não tenha sucesso, o que leva os operadores de rede tenderem a elevar os níveis de provisionamento por questões de segurança. De fato, alguns estudos mostraram que o atraso fim-a-fim e o nível de perdas de pacotes podem variar substancialmente, produzindo uma importante degradação do serviço. O estudo apresentado em [Jiang and Yao 2003] investigou o impacto da agregação de fluxos no desempenho em termos do atraso fim-a-fim em serviços baseados no *EF-PHB* [Jacobson et al. 1999]. Este estudo considera uma única classe de tráfego agregado e apresenta uma avaliação utilizando vários cenários, com a variação da carga da rede e do nível de *burstiness* do tráfego. Os resultados sugerem que o atraso observado não tem um comportamento estável quando o sistema atinge certos níveis de sobrecarga e que ele também é influenciado pelo nível de *burstiness* de cada fluxo que compõem a classe do tráfego *EF-PHB*. O trabalho apresentado em [Siripongwutikorn and Banerjee 2002] investigou o atraso fim-a-fim observado pelos fluxos individuais associados a uma classe de tráfego agregado considerando diversas dis-

ciplinas de escalonamento, tais como *FIFO* e *WFQ*. Os resultados indicam que a heterogeneidade do tráfego, a carga da rede e as disciplinas de escalonamento afetam o desempenho observado pelos fluxos individuais. O estudo em [Xu and Guerin 2005] avaliou o desempenho dos fluxos individuais em termos da taxa de perda de pacotes em um cenário onde as garantias dos níveis de serviço são estabelecidas em termos de classes de tráfego agregado. Ele apresenta um modelo analítico que permite realizar uma previsão do desempenho a ser observado pelos fluxos individuais a partir de medições efetuadas sobre o tráfego agregado. Os resultados sugerem que quando há um grande número de usuários é desejável evitar a agregação de fluxos com diferentes perfis de tráfego. Por fim, este trabalho também permite avaliar qual a quantidade de recursos adicionais é necessária com o objetivo de atender o requisito de atraso associado aos fluxos individuais.

Este trabalho difere em diversos pontos dos estudos acima. Primeiro, da mesma maneira que estes estudos, este trabalho também aborda o impacto da estratégia de agregação do *DiffServ* nos níveis de desempenho dos fluxos, no entanto, considera os requisitos de *QoS* a nível do micro-fluxo levando em conta simultaneamente o atraso fim-a-fim e o nível de perdas de pacotes, que são as duas métricas de desempenho mais importantes para implementação de *QoS* em aplicações sensíveis ao atraso. Segundo, este trabalho apresenta uma metodologia baseada em métodos de otimização que visa obter os parâmetros ótimos para implementação das garantias de *QoS* a partir de um requisito de desempenho definido. Terceiro, este estudo leva em conta o efeito da ocorrência simultânea de eventos importantes, como a variabilidade da duração dos fluxos, a variabilidade nas taxas *ON-OFF* na modelagem de cada fluxo e a captura do efeito, no médio e longo prazos, do processo de nascimento e morte de fluxos, em cenários envolvendo a variação da taxa de chegada de fluxos, a variação dos níveis de provisionamento e dos requisitos de desempenho. Por fim, será apresentada uma metodologia que pode ser utilizada para comparar estratégias de controle de admissão baseado em medições.

3. Métodos de Otimização

3.1. Introdução

Diversos problemas práticos envolvendo um processo de decisão podem ser caracterizados de forma matemática como um problema de otimização [Boyd and Vandenberghe 2004]. Por exemplo, a otimização é usada na solução de questões de projeto e operação de redes, onde se destacam problemas da seleção do melhor caminho [Mitchell 1998] e do dimensionamento de capacidade [Grundel et al. 2005] [Goldberg and Tarjan 1988]. Este uso é motivado pelo fato de que muitas vezes é difícil conceber modelos analíticos para formular com precisão a solução de problemas complexos. Problemas de otimização podem ser vistos como uma função custo $f(x)$ que mapeia os elementos de um conjunto X de valores. Para cada elemento x deste conjunto X , há um valor calculado a partir de $f(x)$ que especifica o nível de rejeição em escolher uma dada decisão x . O valor ótimo da decisão, x^* , é tal como apresentado na expressão (3.1) [Bertsekas 1999]. Baseado nesta estratégia, os métodos de otimização podem ser úteis se existe um teste objetivo envolvendo dois ou mais resultados diferentes. Dependendo do problema de otimização, pode ser definido um critério para solução baseado na minimização ou maximização da função custo. A primeira forma é mais comum e será adotada na solução dos problemas de otimização apresentados na seção 4. Assim, o problema de otimização abordado neste trabalho,

é definido de acordo com a expressão (3.2). Esta expressão indica um problema de otimização sem restrições. Para maiores informações, consulte [Bertsekas 1999].

$$f(x^*) \leq f(x), \forall x \in X \quad (3.1) \quad \text{minimize } f(x), \forall x \in R^n \quad (3.2)$$

3.2. O Método de Otimização do Poliedro Flexível

O método de otimização adotado neste trabalho é conhecido como o Método do Poliedro Flexível [Nelder and Mead 1965]. Ele também é classificado como método de busca direta da linha de solução de problemas de programação não linear. Neste caso, um conjunto de avaliações consecutivas da função custo é executado com objetivo de obter o valor ótimo. A principal motivação para escolha deste método é que devido ao fato de ser da categoria de Ordem Zero, as funções objetivo que caracterizam o problema de otimização podem ser mapeadas diretamente a partir de resultados obtidos em simulações complexas efetuadas em um sistema computacional. A principal idéia deste método é calcular uma direção de busca usando um conjunto formado pelos melhores valores obtidos nas iterações anteriores. Uma figura geométrica, denominada poliedro, é formada por um conjunto de vértices, cada um correspondendo a uma solução obtida até uma determinada fase de execução do método. O número de vértices do poliedro é equivalente ao número de variáveis do problema de otimização acrescido de um. Assim, se o vetor X do problema de otimização contém n variáveis, a dimensão do poliedro será $n + 1$. Durante cada iteração, uma nova solução é gerada, quando o pior vértice é descartado. Somente os melhores vértices (os que possuem menores custos da função objetivo) são mantidos no poliedro. Considerando um conjunto sucessivo de iterações, a tendência é que o poliedro se ajuste em torno da região ótima do problema e seu diâmetro (distância entre os vértices) vá se reduzindo até atingir o critério de convergência estabelecido.

Este método de otimização define um conjunto de operações para obter o deslocamento correto em direção ao espaço de solução ótima. Essas operações são conhecidas como reflexão, expansão e contração. Inicialmente, é calculado um vértice especial denominado centróide. Este vértice é obtido a partir da média das coordenadas dos vértices correntes do poliedro excetuando-se o pior. Posteriormente, uma tentativa de deslocamento em direção à posição dada pelo vértice de reflexão é feita. Caso essa tentativa tenha sido satisfatória, ou seja, caso tenha ocorrido a geração de um valor menor da função custo, constatou-se que o poliedro se deslocou para uma direção correta e, portanto, uma nova tentativa mais à frente na mesma direção é efetuada, com o cálculo do vértice de expansão. Se as operações anteriores falharem, isto é, produzirem valores maiores da função custo, as operações de contração serão efetuadas, objetivando mover o poliedro em uma direção oposta, que seria, supostamente, o espaço em direção à região ótima. Para informações adicionais sobre esse método e para obter o algoritmo completo, consulte [Nelder and Mead 1965].

4. Metodologia de Avaliação das Estratégias de Controle de Admissão

O controle de admissão desempenha um papel fundamental para o estabelecimento de garantias de QoS em redes IP. Uma das grandes dificuldades é a escolha do mecanismo adequado para sua implementação, considerando-se fatores como a escalabilidade e a facilidade de operação. Esta questão fica ainda mais evidenciada quando se leva em conta

o estabelecimento de garantias de *QoS* a nível do micro-fluxo. Experiências anteriores, como no uso do *IntServ* [Braden et al. 1994], mostraram grandes limitações em termos de escala para a implementação de garantias a nível de fluxos individuais. Por outro lado, garantias estabelecidas em termos do tráfego agregado podem não ser suficientes para atender os níveis de desempenho necessários. Além disso, o superprovisionamento da rede, técnica mais usada como alternativa ao controle de admissão, representa um desperdício desnecessário de recursos, dada a grande dificuldade em determinar precisamente, para demandas de tráfego variáveis, os níveis de provisionamento adequados para o cumprimento das necessidades de *QoS*. Nesta seção é apresentada uma metodologia de avaliação de estratégias de controle admissão baseada no método de otimização descrito na seção 3.

4.1. Formulação do Problema

A principal questão relativa à metodologia de avaliação proposta neste trabalho é a formulação do problema de otimização, de modo a representar corretamente os fenômenos considerados. Os seguintes itens devem ser contemplados:

- As métricas de desempenho que serão analisadas durante a fase de otimização;
- A função custo que servirá de base para o algoritmo de otimização;
- As variáveis que serão objeto do processo de otimização;
- Os requisitos de desempenho alvo.

Os requisitos de *QoS* associados a fluxos individuais são descritos através de um par (*Percentil*, *Atraso*), indicando um atraso fim-a-fim máximo a ser observado por um dado percentil de pacotes de cada micro-fluxo. Por exemplo, um requisito de *QoS* descrito como (97, 50ms) indica um atraso máximo de 50ms a ser observado por 97% dos pacotes de cada fluxo individual. Na especificação deste requisito, também é considerado o nível de descarte de pacotes observado por cada fluxo individual. Neste caso, a quantidade de pacotes descartados é computada na composição de um dado percentil, onde esses pacotes farão parte daqueles que tiveram seu requisito de *QoS* violado. Referindo-se ao exemplo do requisito (97, 50ms), pode ser dito que um fluxo individual teve seu requisito de *QoS* violado quando a quantidade de pacotes com atraso fim-a-fim superior a 50ms acrescida da quantidade de pacotes descartados superar os 3% da totalidade de pacotes do fluxo. Assim, definindo P_s, P_d e P_t , respectivamente, como a quantidade de pacotes com atrasos fim-a-fim superiores ao requisito de *QoS*, a quantidade de pacotes descartados e o total de pacotes de fluxo, para não ocorrer violação de (*Percentil*, *Atraso*), a seguinte expressão define a condição a ser respeitada para cada micro-fluxo:

$$\frac{P_s + P_d}{P_t} \leq \frac{100 - \text{Percentil}}{100} \quad (4.1)$$

A Tabela 1 apresenta as métricas de desempenho que serão analisadas durante a aplicação do método de otimização. O número de fluxos aceitos F_a representa a quantidade de fluxos que foram admitidos pela estratégia de controle de admissão avaliada durante um determinado cenário. De modo similar, F_n representa o número de fluxos que tiveram sua entrada negada ao sistema. F_v representa, do total de fluxos admitidos, ou seja, F_a , quantos tiveram o requisito de desempenho violado.

A função custo é definida a partir das métricas de desempenho apresentadas na Tabela 1:

Tabela 1. Métricas de Desempenho

Métrica de Desempenho	Sigla	Significado
Fluxos Aceitos	F_a	Número de Fluxos Servidos.
Fluxos Negados	F_n	Número de Fluxos que tiveram seu pedido por serviço negado.
Fluxos Violados	F_v	Número de Fluxos que tiveram seu requisito de desempenho violado.

$$f_c(X) = 1 - \frac{F_a - F_v}{F_a + F_n} \quad (4.2)$$

onde X representa o vetor contendo as variáveis que serão otimizadas. Ou seja, utiliza-se o método de otimização do Poliedro Flexível para resolver o problema definido pela expressão (3.2). Para um dado cenário de avaliação, F_v representa o número de fluxos para os quais a expressão (4.1) não foi satisfeita. A partir da expressão (4.2), observa-se que o critério utilizado na otimização visa maximizar o número de fluxos bem servidos ($F_a - F_v$), isto é, aqueles cujos requisitos de desempenho foram atendidos. Observa-se também que a função custo penaliza soluções onde ocorre um grande número de fluxos negados, já que se pretende maximizar a utilização da rede. Sumarizando, o método de otimização proposto neste trabalho se baseia nos requisitos de desempenho definidos pela expressão (4.1), define como métricas de desempenho aquelas mostradas na Tabela 1, e utiliza a função custo definida pela expressão (4.2), restando selecionar as variáveis que devem ser otimizadas, o que depende da estratégia de controle de admissão. A seguir, serão apresentadas quatro estratégias diferentes que podem ser implementadas no controle de admissão e suas respectivas variáveis envolvidas no problema de otimização. As estratégias de controle de admissão avaliadas neste trabalho são distribuídas e baseadas em MBAC, ou seja, o controle de admissão é realizado nos nós de borda e as decisões relativas à admissão ou não de novos fluxos tomam como base o estado corrente da rede.

A Tabela 2 apresenta as quatro estratégias de implementação do controle de admissão selecionadas neste estudo. As duas primeiras envolvem a medição da carga corrente do sistema, a terceira adota o número de fluxos admitidos, e a última utiliza a variação da ocupação da fila. É importante realizar um comentário sobre as duas primeiras estratégias. É comum o uso de estratégias que impõem limites à taxa média de ocupação de enlaces para estabelecer garantias de níveis de desempenho. No entanto, um parâmetro fundamental para a obtenção desta taxa média é o intervalo de tempo em que ela é aferida. Este aspecto pode influenciar de modo importante os critérios de admissibilidade de fluxos. Neste sentido, na primeira estratégia citada, este estudo busca investigar qual é o par *taxa de ocupação, janela de medição* ótimo para implementação do controle de admissão. Na segunda, é investigado o uso da *média móvel exponencial* da taxa de ocupação, considerando um processo de otimização conjunto com um *filtro* para atenuação da variação da taxa de ocupação, conforme será descrito posteriormente nesta seção.

Na estratégia *Utilização da Rede x Janela de Medição*, a variável ρ representa a taxa de utilização do sistema dada pelos fluxos já admitidos pelo controle de admissão medida em intervalos consecutivos com duração ω , ou seja, $\rho_{corrente} = \frac{A(t_{i+1}) - A(t_i)}{\omega \cdot L}$, onde $(t_{i+1} - t_i) = \omega$, para qualquer medição i . $A(t_i)$ representa o processo de chegada acumulado medido em bits até o instante t_i e L a capacidade do enlace. Como critério usado para admissão, um novo fluxo só deverá ser admitido caso, no ins-

Tabela 2. Variáveis do Problema de Otimização para implementação do Controle de Admissão

Estratégia	Variáveis
Utilização da Rede x Janela de Medição	ρ, ω
Utilização da Rede x Filtro da Média Móvel	ρ_m, α
N. Fluxos Máximo x Janela de Admissão	F_m, Φ
Ocupação da Fila	B_{max}, B_{min}

tante da sua chegada, a expressão $\rho_{corrente} \leq \rho$ seja verdadeira, ou seja, a variável otimizada ρ é usada como referência para decidir sobre a entrada do fluxo. A estratégia *Utilização da Rede x Filtro da Média Móvel* segue um procedimento similar ao do caso anterior, mudando apenas a forma do cálculo do parâmetro ρ : Ao invés de considerar o valor absoluto de $\rho_{corrente}$, calcula-se um valor médio dado por $\rho_{médio} = (1 - \alpha) \cdot \rho_{corrente} + (\alpha) \cdot \rho_{médio}$, que é atualizado em pequenos intervalos consecutivos de tempo, como, por exemplo, 5 ms. Esta estratégia visa eliminar o efeito de grandes oscilações do tráfego com a suavização dada pela variável da otimização α . O critério de admissão passa a ser $\rho_{médio} \leq \rho_m$. Na estratégia *N. Fluxos Máximo x Janela de Admissão*², existem dois critérios para decisão da entrada de um novo fluxo. O primeiro é dado pela quantidade máxima de fluxos ativos simultaneamente F_m e o segundo define um intervalo mínimo de tempo ϕ entre a admissão de dois fluxos consecutivos. Assim, um fluxo será admitido se, no instante de sua chegada, $F_{corrente} < F_m$ e, considerando t_i o instante de chegada do fluxo e t_{i-1} o instante de admissão do último fluxo, este novo fluxo só será admitido se $t_i - t_{i-1} \geq \phi$. Por fim, a estratégia *Ocupação da Fila* faz com que um novo fluxo seja admitido apenas se, no instante de sua chegada, a ocupação da fila seja $B_{corrente} \leq B_{max}$. Quando esta condição não é satisfeita, o sistema entra em uma região de não admissibilidade e só retorna ao estado de admissão quando $B_{corrente} \leq B_{min}$.

A título de ilustração, a Figura 1 apresenta de forma resumida o algoritmo de otimização das variáveis ρ e ω da primeira estratégia. Aqui, $f(x)$ representa a execução de uma simulação computacional para a obtenção do valor dado pela expressão (4.2). Em cada simulação, considera-se o requisito de desempenho (*Percentil, Atraso*) a nível do micro-fluxo aplicado a um cenário de simulação conforme descrito a seguir. Assim, quando o algoritmo converge, os valores ótimos de ρ e ω são obtidos³.

4.2. Cenário de simulação

Considere o problema de implementar garantias de *QoS* a n micro-fluxos estabelecidas de acordo com a expressão (4.1). Na Figura 2, esse conjunto de fluxos é representado pelos pares (S_i, D_i) , para $0 \leq i < n$. S_i representa uma fonte de tráfego destinado a D_i .

²Considerar um número máximo de fluxos admitidos está relacionado com o método PBAC, pois, de fato, não há medições a serem realizadas. No entanto, ela foi incluída nesta avaliação para efeito de comparação com as demais estratégias.

³Vários trabalhos discutem as propriedades de convergência deste método em cenários específicos. Por exemplo, Lagarias et al. apresenta um estudo que objetiva analisar essas propriedades em problemas de otimização com um número pequeno de variáveis. Para maiores informações, consulte [Lagarias et al. 1998].

```

1.1 inicializar os vértices do poliedro:  $v_0 = (\rho_0, \omega_0), v_1 = (\rho_1, \omega_1), v_2 = (\rho_2, \omega_2)$ ;
1.2 inicializar o vetor para o critério convergência  $\varepsilon$ ;
1.3 calcular os valores da função custo da expressão (4.2) para cada um dos vértices  $v_i$ 
    através de simulações computacionais;
1.4 repeat
1.5   calcular o centróide  $v_c$ ;
1.6   determinar o melhor e o pior  $v_l, v_h$ ;
1.7   calcular o nó de reflexão  $v_{reflexão}$ ;
1.8   if  $f(v_l) > f(v_{reflexão})$  then
1.9     calcular o nó de expansão  $v_{expansão}$ ;
1.10    if  $f(v_{expansão}) < f(v_{reflexão})$  then
1.11      | Obter o novo vértice  $v_n \leftarrow v_{expansão}$ ;
1.12    else
1.13      | Obter o novo vértice  $v_n \leftarrow v_{reflexão}$ ;
1.14    end
1.15  else
1.16    determinar  $f_{max} \leftarrow \sup(f(v_i)) \forall v_i \neq v_h$ ;
1.17    if  $f(v_l) \leq f(v_{reflexão}) < f_{max}$  then
1.18      | Obter o novo vértice  $v_n \leftarrow v_{reflexão}$ ;
1.19    else
1.20      if  $f(v_{reflexão}) \geq f_{max}$  then
1.21        if  $f(v_h) \leq f(v_{reflexão})$  then
1.22          | calcular o nó de contração 1  $v_{contração}$ ;
1.23        else
1.24          | calcular o nó de contração 2  $v_{contração}$ ;
1.25        end
1.26      | Obter o novo vértice  $v_n \leftarrow v_{contração}$ ;
1.27    end
1.28  end
1.29 end
1.30 if  $f(v_n) > f(v_h)$  then
1.31   reconstruir um novo poliedro a partir do melhor vértice;
1.32 else
1.33   reconstruir um novo poliedro trocando o pior vértice  $v_h$  pelo novo  $v_n$ ;
1.34 end
1.35 until Distâncias entre os vértices  $v_i \leq \varepsilon$ ;
1.36 aceitar o vetor  $v_l$  como solução do problema de otimização;

```

Figura 1. Algoritmo: Método do Poliedro Flexível usado na Otimização das variáveis ρ e ω

Cada nó da rede é composto por uma fila de tamanho Q . Neste contexto, definindo t_{pacote} como o tempo de transmissão de um pacote no link de capacidade L , para os requisitos de desempenho definidos anteriormente (*Percentil, Atraso*), as filas são dimensionadas segundo a seguinte expressão:

$$Q = \frac{Atraso - t_{pacote}}{L} \quad (4.3)$$

este tamanho de fila é fixado porque, obviamente, elas não devem reter pacotes por um tempo maior ao definido no requisito de atraso. Também, como a metodologia desenvolvida neste trabalho investiga os níveis ótimos de provisionamento para um dado conjunto de micro-fluxos, pacotes que estariam sujeitos a atrasos superiores ao definido pelo requisito de desempenho (ou seja, que tiveram seu requisito violado) devem ser descartados, caso contrário, os níveis obtidos no processo de convergência do método otimização seriam certamente influenciados.

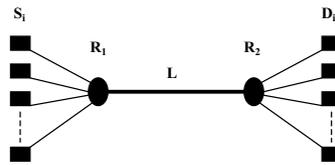


Figura 2. Cenário de Simulação

5. Apresentação dos resultados

Esta seção apresenta os resultados das simulações e sua análise a partir da metodologia de avaliação proposta na seção anterior. Para isto, serão considerados diversos cenários de implementação de *QoS* a nível do micro-fluxo, supondo o provisionamento de um agregado de fluxos de aplicações *VoIP*.

5.1. Modelagem do Tráfego e Considerações da Simulação

Aplicações *VoIP* são geralmente modeladas com fluxos de taxas constantes. Dependendo do *codec*, o tráfego gerado pode variar muito. Por exemplo, o G.711 [ITU-T 1988] requer maior largura de banda que outros, entretanto, oferece um serviço de maior qualidade [ITU-T 2003]. A supressão de silêncio vem sendo utilizada de modo importante por essas aplicações visando diminuir a necessidade de banda requerida. Neste caso, o tráfego *VoIP* é modelado como fontes *ON – OFF* as quais são caracterizadas como fontes markovianas de dois estados. Neste trabalho, foi utilizada uma estratégia similar à mostrada em [Boutremans et al. 2002], onde os intervalos *ON – OFF* são ambos distribuídos exponencialmente. Referindo-se à Figura 2, para a modelagem de cada micro-fluxo foram utilizadas as médias de 400 *ms* para o período *ON* e 600 *ms* para o período *OFF*. Também, foi adotado um pacote de tamanho 200 *bytes* já incluindo a carga útil e os cabeçalhos dos protocolos. Durante o período *ON*, o tempo de chegada entre pacotes é 20 *ms*, indicando que a taxa de pico de uma fonte é 80 *kbps* enquanto sua taxa média é 32 *kbps*.

Novamente, referindo-se à Figura 2, uma das principais questões na metodologia proposta neste trabalho é a investigação do impacto de dois eventos importantes nas estratégias de controle de admissão: O processo de nascimento e morte de fluxos e a intensidade do processo de chegada no qual o controle de admissão vai operar. No primeiro, deseja-se capturar o efeito da aleatoriedade da duração dos fluxos, enquanto no segundo, pretende-se observar a variação dos valores obtidos nos parâmetros otimizados de acordo com a intensidade do tráfego. Neste sentido, baseado no estudo apresentado em [Cisco 2001], este trabalho define dois parâmetros: a duração média de um micro-fluxo *AFD*, a qual estabelece um valor médio em segundos para a duração de um micro-fluxo, e o tempo entre fluxos *TBF*, o qual estabelece um valor médio em segundos do tempo de chegada entre micro-fluxos. Ambos *AFD* e *TBF* são distribuídos exponencialmente de acordo com a dada média que define a intensidade de tráfego considerada. O valor adotado para a média do parâmetro *AFD* em todas as simulações foi a metade do tempo de simulação. O tempo de simulação considerado foi de 500 *s*. Inicialmente, as simulações foram implementadas utilizando o NS-2 [ns 2]. Em função da escalabilidade necessária, optou-se, posteriormente, pelo desenvolvimento de um simulador em C, o qual foi implementado utilizando uma biblioteca de simulação orientada a eventos discretos baseada no paradigma atores/mensagens [Agha 1985] [Maziero 1995]. Neste caso, os nós da rede e

os micro-fluxos são implementados como atores através de *threads*, enquanto os pacotes são implementados como mensagens trocadas por esses atores^{4 5}. Conforme pode ser observado no Algoritmo da Figura 1, após o processo de inicialização do poliedro, uma série de simulações é executada em uma dada iteração do método de otimização. Para dar maior confiabilidade aos resultados, cada simulação individualmente é repetida duas vezes, sendo tomado a média dos valores da função custo obtidos em cada uma para efeitos de comparação no algoritmo. Em cada cenário de otimização ocorrem, em média, cerca de 120 simulações para que seja caracterizado a convergência do algoritmo. Desta forma, este grande número de iterações aliado ao caráter estocástico imposto às fontes de tráfego fornecem um maior grau de confiança para a utilização futura dos parâmetros otimizados em cenários reais de operação de mecanismos de controle de admissão.

5.2. Resultados

Nos cenários de simulação desenvolvidos, o controle de admissão foi implementado no nó R_1 , conforme Figura 2. A Tabela 3 sumariza os resultados obtidos na aplicação do mesmo cenário de otimização para as quatro estratégias de controle de admissão avaliadas. O tempo das simulações nas diversas otimizações foi de 500s. Assim, o parâmetro AFD é definido como 250s. A intensidade do processo de entrada submetido ao controle de admissão é medido por uma taxa chegada de fluxos por minuto, representado nesta tabela pelo parâmetro A . Neste caso, o termo TBF definido anteriormente é feito $TBF = \frac{60}{A}$, definindo a média exponencial em segundos que regula o processo estocástico de chegada de fluxos. O termo A/V indica o número de fluxos aceitos e o número de fluxos violados, respectivamente. U_m representa a taxa de utilização média do link ao longo do tempo de simulação. É importante frisar que os valores das variáveis de otimização apresentados são os valores ótimos resultantes do processo final de convergência do método de otimização.

Tabela 3. Parâmetros otimizados das estratégias de controle de admissão

Estratégias de Controle de admissão	A (f/m)	Percentil 97, Atraso 50ms, L= 2Mbps			
		ρ	ω	A/V	U_m
Utilização da Rede, Janela de Medição	30	0,866	132,81	154/6	0,773
	100	0,750	495,87	160/0	0,822
	170	0,687	526,91	159/1	0,802
Utilização da Rede, Filtro da Média Móvel	30	ρ_m 0,787	α 0,281	A/V 147/1	U_m 0,695
	100	0,627	0,544	151/3	0,802
	170	0,534	0,383	158/0	0,806
N. Fluxos Máximo, Janela de Admissão	30	F_m 51,18	Φ 35,63	A/V 159/0	U_m 0,742
	100	54,30	60,55	180/2	0,865
	170	53,08	34,20	173/6	0,866
Ocupação da Fila	30	B_{max} 4,84	B_{min} 0	A/V 151/58	U_m 0,801
	100	7,00	0	173/153	0,853
	170	4,02	0	192/182	0,872

Tomando a primeira estratégia de controle admissão para o cenário de 30 f/m,

⁴Futuramente, o código e a documentação da API desenvolvida estarão disponíveis para download a partir de <http://www.ppgia.pucpr.br/maziero/simulacao>.

⁵Para garantir a confiabilidade dos valores obtidos através do Simulador desenvolvido, os mesmos foram rigorosamente comparados por amostragem em diversos cenários de simulação idênticos ao NS-2, onde os resultados observados foram similares.

observa-se que os valores ótimos otimizados foram $\rho = 0.866$ e $\omega = 132.81$. Isto indica que, dado um controle de admissão que deve ser usado para implementar um requisito de desempenho a nível do micro-fluxo (*Percentil97, 50ms*) em um link de 2Mbps , um novo fluxo pode ser admitido sempre que a carga corrente do sistema medida em intervalos de 132.81ms for inferior ou igual 0.866 . Neste caso, segundo o critério objetivo dado pela função custo utilizada, tem-se a maximização do número de fluxos bem atendidos, onde, como pode ser observado, 154 fluxos foram admitidos, dos quais apenas 6 tiveram seus requisitos de desempenho violados ⁶.

Analisando os resultados mostrados na Tabela 3, nota-se que efetuar um controle de admissão tomando como base o estado instantâneo de ocupação das filas pode ser inviável. Note a quantidade de fluxos violados. Nas demais estratégias, os resultados observados foram similares, com uma ligeira vantagem para a estratégia do número de fluxos ativos. Porém, nem sempre é possível estabelecer tal estratégia, em função de requerer o conhecimento a priori do número de fluxos máximo a ser admitido. No caso das outras duas, pelo fato de fazerem medições constantes, o sistema de controle de admissão tende a se ajustar ao novo cenário de carga. Assim, é sugestivo a adoção da estratégia de controle de admissão (ρ, ω) , pelo fato de que a estratégia baseada na média móvel exponencial usualmente requer atualizações em pequenas janelas de tempo, o que acarreta um maior esforço do controle de admissão. Nesta direção, o comportamento desta estratégia de controle de admissão em função do aumento dos níveis de provisionamento e para um requisito de desempenho diferente é apresentado na Tabela 4.

Tabela 4. Parâmetros otimizados da estratégia (ρ, ω) considerando a variação da capacidade dos links e o requisito de desempenho

LB Mbps	A (f/m)	Percentil 97, Atraso 50ms				Percentil 97, Atraso 5ms			
		ρ	ω	A/V	U_m	P	ω	A/V	U_m
2	30	0,866	132,81	154/6	0,77	0,737	470,63	132/7	0,67
	100	0,750	495,87	160/0	0,82	0,622	448,36	137/3	0,70
	170	0,687	526,91	159/1	0,80	0,531	105,46	134/1	0,69
4	60	0,843	96,52	296/8	0,74	0,835	117,84	289/6	0,73
	200	0,778	754,51	335/2	0,81	0,730	411,88	316/3	0,79
	340	0,757	336,85	340/1	0,84	0,725	677,67	336/8	0,79
8	120	0,927	154,50	635/2	0,81	0,925	295,50	621/8	0,78
	400	0,840	109,73	690/0	0,88	0,800	30,23	689/9	0,86
	680	0,809	32,46	712/1	0,89	0,779	48,88	666/0	0,86
16	240	0,898	175,60	1421/7	0,86	0,873	172,25	1329/2	0,79
	800	0,877	126,36	1369/0	0,89	0,861	167,92	1361/6	0,86
	1360	0,867	96,09	1442/5	0,92	0,844	126,44	1374/1	0,88

Como pode ser observado, para um aumento do link L praticamente ocorre também um aumento proporcional no número de fluxos admitidos enquanto mantém-se estável o número de fluxos violados. Também, há uma similaridade entre a taxa de utilização média do sistema. Finalmente, para o requisito de atraso (*Percentil97, 5ms*)

⁶A escolha do critério de otimização é subjetiva e deve atender a casos específicos, de acordo com a política a ser aplicada. Por exemplo, muitas vezes pode ser interessante maximizar o número de clientes atendidos mesmo que isso represente um certo nível de violação de alguns deles. Por outro lado, quando o objetivo principal é garantir um número mínimo (ou nulo) de violações, a função objetivo poderia ser modificada com a introdução de uma penalização para violação. Por exemplo, a função objetivo definida em (4.2) poderia ser alterada para $f_c(X) = 1 - \frac{F_a - 10 \cdot F_v}{F_a + F_n}$. Neste caso, a penalização faz com que cada fluxo violado seja equivalente a 10 fluxos aceitos a menos, aumentando, assim, a probabilidade do processo de otimização descartar tal solução.

os resultados também foram satisfatórios, onde fica nítida a admissão de um número menor de fluxos face à imposição de um nível mais restritivo de desempenho.

6. Conclusões e Trabalhos Futuros

Esse artigo apresentou uma estratégia para avaliação de métodos de controle de admissão para fluxos individuais de aplicações sensíveis ao atraso. Apesar de grande parte da literatura tratar esse tema impondo um limite para a taxa média de ocupação dos enlaces, esse artigo mostrou que é possível estabelecer estratégias alternativas com melhores resultados. O principal diferencial para construção de uma estratégia de controle de admissão para fluxos individuais reside na utilização de janelas móveis para medir o estado da rede. Esse conceito foi aplicado a cenários com tráfego homogêneo formado por fluxos *VoIP*, codificados de forma idêntica. O sistema de controle de admissão foi ajustado de forma ótima, utilizando um algoritmo de programação não linear. Os resultados mostraram que, enquanto o conceito janelas móveis é fundamental, existe um grande intervalo de valores de janela para os quais os resultados são semelhantes.

Trabalhos futuros irão reproduzir a mesma abordagem para cenários outros tipos de tráfego, como vídeo sobre IP e tráfegos auto-similares. Espera-se avaliar até que ponto os valores ótimos de janela e taxa de ocupação são dependentes do tipo de tráfego analisado. Outros estudos incluem também a aplicação da estratégia para avaliar cenários complexos, com enlaces compartilhados por vários tipos de tráfego distribuídos em caminhos MPLS sobrepostos.

Referências

- Agha, G. (1985). *Actors: A model of concurrent computation in distributed systems. Doctoral Dissertation - MIT Press.*
- Bertsekas, P. D. (1999). *Nonlinear Programming.* Athena Scientific, second edition.
- Blake, S., Black, D., Carlson, M., Davies, E., Wang, Z., and Weiss, W. (1998). RFC 2475: An architecture for differentiated service. *IETF.*
- Bouras, C. and Stamos, K. (2004). An adaptive admission control algorithm for bandwidth brokers. *Third IEEE International Symposium on Network Computing and Applications (NCA).*
- Boutremans, C., Iannaccone, G., and Diot, C. (2002). Impact of link failures on VoIP performance. *Proceedings of NOSSDAV Workshop (ACM Press).*
- Boyd, S. and Vandenberghe, L. (2004). *Convex optimization.* Cambridge University Press.
- Braden, R., Clark, D., and Shenker, S. (1994). Integrated services in the internet architecture: an overview. *IETF RFC 1633.*
- Breslau, L., Jamin, S., and Shenker, S. (1999). Measurement-based admission control: What is the research agenda? *IEEE IWQoS.*
- Cisco (2001). Traffic analysis for Voice over IP. *Cisco Document Server.*

- Elek, V., Karlsson, G., and Ronngren, R. (2000). Admission control based on end-to-end measurements. *IEEE INFOCOM*.
- Filsfil, C. and Evans, J. (2005). Deploying diffserv in backbone networks for tight SLA control. *IEEE Internet Computing Magazine*.
- Goldberg, A. V. and Tarjan, R. E. (1988). A new approach to the maximum-flow problem. *J. ACM*, 35(4):921–940.
- Grundel, D. A., Krokhmal, P., Oliveira, C. A., and Pardalos, P. M. (2005). On the average case behavior of the multidimensional assignment problem. *Pacific Journal of Optimization*, 1(1):39–57.
- ITU-T (1988). Recommendation G.711: Pulse code modulation of voice frequencies. *ITU-T*.
- ITU-T (2003). Recommendation P.800.1: Mean opinion score (mos) terminology. *ITU-T*.
- Jacobson, V., Nichols, K., and Poduri, K. (1999). RFC 2597: An expedited forwarding phb. *IETF*.
- Jiang, Y. and Yao, Q. (2003). Impact of FIFO aggregation on delay performance of a differentiated services network. *The International Conference on Information Networking, ICOIN*.
- Kelly, F., Key, P., and Zachary, S. (2000). Distributed admission control. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 18:2617–2628.
- Lagarias, J. C., Reeds, J. A., Wright, M. H., and Wright, P. E. (1998). Convergence properties of the Nelder-Mead Simplex method in low dimensions. *SIAM J. Optim.*, 9(1):112–147.
- Liao, R. and Campbell, A. (2001). Dynamic core provisioning for quantitative differentiated service. *IEEE IWQoS*.
- Maziero, C. (1995). Um núcleo de sistema distribuído para a simulação a eventos discretos. *Anais do 13o. Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores*, 1:411–430.
- Mitchell, J. (1998). *Geometric shortest paths and network optimization*. Elsevier Science.
- Nelder, J. A. and Mead, R. (1965). *A Simplex Method for Function Minimization*, volume 7. Computer J.
- ns 2. The NS-2 simulator. Available at: <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>.
- Rhee, W., Lee, J., Yu, J., and Kim, S. (2004). Scalable quasi-dynamic-provisioning-based admission control mechanism in differentiated service networks. *ETRI Journal*, 26(1):22–37.
- Siripongwutikorn, P. and Banerjee, S. (2002). Per-flow delay performance in traffic aggregates. *Proceedings of IEEE Globecom*.
- Xu, Y. and Guerin, R. (2005). Individual QoS versus aggregate QoS: A loss performance study. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 13:370–383.
- Zhang, Z., Zhenhai, D., and Hou, Y. (2001). On scalable design of bandwidth brokers. *EICE Transactions on Communications*, e84-b(8).