

CONTROLE DE QOS EM REDES IP ATRAVÉS DE OTIMIZAÇÃO MULTI OBJETIVO

Menotti Machado e Miguel F. de Castro

Instituto Nacional de Telecomunicações/RST
9 Rue Charles Fourier 91011 - EVRY Cedex - França
{*Menotti.Machado, Miguel.Castro@int-evry.fr*}

ABSTRACT

This work proposes a model for end-to-end Quality of Service (QoS) evaluation in IP networks. This model is based on three performance metrics. Six techniques for resource allocation to end-to-end QoS control were tested and compared. This formulation allows Class of Service (CoS) Integration and/or Differentiation. The technique based on multiobjective optimization presented an important adaptive characteristic to traffic behavior. The simulations were made for a multiplexer placed on the edge of the network, with three classes of random package traffic.

1. INTRODUÇÃO

O crescimento e a popularização da Internet tornaram real a possibilidade do oferecimento de novos serviços, especialmente os do tipo multimídia. Numa primeira observação, constatou-se que a sua política de envio de pacotes baseada no *melhor esforço* “Best-Effort”, mostrava-se inapta às características estatísticas daquele tipo de tráfego. Com o propósito de habilitar a Internet para oferecer estes serviços, diversos conceitos estão sendo incorporados às suas estratégias de controle de tráfego. Dentro do escopo deste trabalho cita-se: Qualidade de Serviço (QoS) fim-a-fim, Integração e Diferenciação de Serviços (IntServ [1] e DiffServ [2]) e Reserva de Recursos.

Neste trabalho, propõe-se um modelo para definição de QoS fim-a-fim em redes do tipo Internet, baseado em três métricas de QoS. Seis estratégias para o controle de QoS fim-a-fim através de alocação de recursos são testadas. Com base no modelo proposto e nos resultados obtidos, sugere-se o uso das técnicas baseadas em otimização multiobjetivo como solução para o problema. Essas técnicas permitem realizar uma alocação de recursos justa. Assim, obtém-se uma estratégia alternativa aos métodos clássicos baseados em teoria das filas e que permite a diferenciação das classes de serviço. Os experimentos foram realizados sobre um componente situado na borda da rede, um multiplexador. Utilizou-se o Protocolo de Reserva de Recursos

(RSVP) [3] e [4] para obter informações periódicas sobre o estado dos demais componentes da rede.

A seqüência deste artigo está organizada da seguinte forma: a Seção 2 apresenta uma breve descrição de alguns conceitos relacionados com QoS; na Seção 3, caracteriza-se a rede, seus componentes e o tráfego; a Seção 4 formula o problema de controle de QoS fim-a-fim e apresenta-se uma estratégia alternativa para sua resolução; na Seção 5, resume-se outras técnicas utilizadas para a resolução do problema formulado; a Seção 6 referencia o algoritmo de otimização utilizado; na Seção 7, apresenta-se os cenários utilizados na simulação, os resultados obtidos, e as devidas análises; e a Seção 8 conclui o artigo e sugere novas perspectivas para o trabalho.

2. CONCEITOS BÁSICOS PARA CONTROLE DE QOS FIM-A-FIM

2.1. Qualidade de Serviço (QoS) Fim-a-Fim

O controle de Qualidade de Serviço na Internet vem sendo abordado como um problema fundamental a ser solucionado para permitir o suporte de tráfego do tipo multimídia. A definição de QoS fim-a-fim em redes de computadores envolve tanto os aspectos subjetivos percebidos pelo usuário final quanto os aspectos objetivos relacionados às características da rede e do tráfego. Neste trabalho, admite-se que a QoS é medida através de valores ou índices que são significativos para o *usuário final*, e de valores que representam o desempenho da rede. Deste modo, cada classe de serviço apresenta um fator de ponderação para sua função de QoS, o qual representa sua importância para o usuário. A função de QoS é obtida através de métricas de desempenho da rede. As *métricas de QoS* mais utilizadas são: a banda passante média, o atraso médio, a variação máxima do atraso médio, a perda média de pacotes, ou uma combinação destas, todas calculadas fim-a-fim [5]. Utilizou-se como métrica de QoS uma combinação dos valores médios do atraso e da perda de pacotes e da

variância máxima do atraso médio.

$$QoS(t) = f(E\{P(t)\}, E\{D(t)\}, E\{VD(t)\}), \quad (1)$$

onde $E\{\cdot\}$ representa a esperança matemática.

2.2. Caracterização de Classes de Serviços

As estratégias de controle de QoS testadas são aplicáveis aos dois modelos de CoS propostos para o tráfego IP. No modelo de *Classes de Serviços Integrados (IntServ)*, o controle do tráfego é realizado ao nível de microfluxos (fluxos individuais). Utiliza-se o protocolo RSVP para descrever as características estatísticas dos microfluxos, assim como para realizar a reserva dos recursos necessários para manter a QoS contratada durante toda a duração da conexão. As classes estão definidas em [6] e [7]. O segundo modelo, *Classes de Serviços Diferenciados (DiffServ)*, organiza as classes ao nível de agregados de tráfegos. Estes agregados são formados em função das prioridades de envio dos pacotes dos diversos microfluxos, as quais definem os seus “Per-Hop Behaviors” (PHB’s). Suas classes estão definidas em [8] e [9]. Estes dois modelos são contemplados no método proposto, pois trabalha-se com a definição de QoS ao nível de classes de serviço.

2.3. Protocolo de Reserva de Recursos - RSVP

O protocolo RSVP é um mecanismo de sinalização para redes IP (“Internet Protocol”). Ele transporta as informações necessárias à realização da reserva de recursos ao longo do caminho fim-a-fim e ao policiamento e controle de tráfego. Estas informações estão contidas nos objetos FlowSpec, AdSpec e TSpec das mensagens PATH e RESV [3]. Neste trabalho utilizou-se uma adaptação deste protocolo para auxiliar no controle da qualidade de serviço.

3. CARACTERIZAÇÃO DA REDE

3.1. O Modelo de Rede

Considera-se um modelo de rede IP onde o controle de QoS fim-a-fim é efetuado pelos componentes situados na borda (ponto de acesso). Estes componentes são representados por multiplexadores. Para efeito de simulação das estratégias de controle, considera-se apenas as conexões ativas (conexões já admitidas). Os componentes do núcleo da rede são responsáveis apenas pelo roteamento e pela reclassificação dos pacotes, quando necessário (caso DiffServ). Esta organização é justificada pela elevada quantidade de fluxos existentes no interior da rede, o que leva a uma grande complexidade de controle (caso IntServ).

3.2. As Fontes de Tráfego

Admite-se que N fontes (classes) de tráfegos geram pacotes IP em intervalos de tempo que seguem uma distribuição de probabilidade de Pareto de parâmetro α_i . Os tamanhos dos pacotes são independentes dos instantes de suas gerações e seguem uma distribuição de probabilidade binomial, com parâmetros M_i e s_i . Cada classe i apresenta uma taxa média de chegada r_i , expressa em bits por segundo.

3.3. O Multiplexador

O multiplexador possui um “buffer” limitado, organizado sob a forma de filas individuais, uma para cada classe (Figura 1). Considera-se que as filas são do tipo FIFO (“First-In First-Out”) e que são servidas de acordo a uma lei de probabilidade geral. De acordo com esta lei, cada fila é servida durante um determinado intervalo de tempo T_i no qual ela recebe toda a banda passante do canal de saída. Limitados a este intervalo de tempo, os pacotes da classe i entram em serviço imediatamente após o término do serviço do pacote precedente. Admite-se que os pacotes são fragmentados quando o “buffer” não admitir um pacote inteiro ou quando o intervalo T_i terminar enquanto um pacote ainda estiver em serviço. Para efeito da minimização das perdas de pacote, considera-se que a capacidade máxima b_i de cada fila é também calculada para cada intervalo de tempo T_i . Por efeito de simplicidade, o mecanismo de segmentação não está referenciado na Figura 1.

3.4. O Controlador de QoS

O mecanismo de tomada de decisão representa a inteligência do multiplexador, e é o componente responsável pelo cálculo dos valores da banda passante e/ou do espaço no “buffer” destinados a cada uma

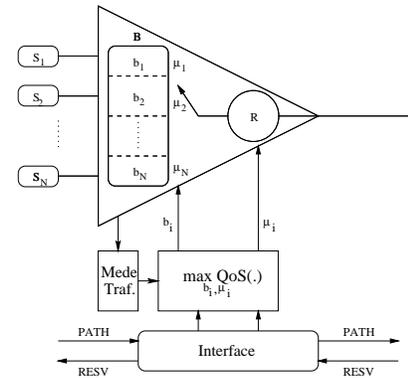


Figura 1: O Multiplexador.

das filas. Estes valores são calculados em função da QoS contratada para cada classe de serviço, do estado atual da rede, das características estatísticas dos tráfegos e dos valores limitantes dos recursos da rede. Este dispositivo apresenta uma interface desenvolvida para receber as medidas estatísticas do multiplexador e as informações de QoS externas ao nó considerado, multiplexador e controlador (Figura 1). Estas informações são transportadas através de uma adaptação realizada sobre o protocolo RSVP. Neste caso, tanto as mensagens PATH quanto as RESV transportam até o multiplexador as informações sobre o estado atual de cada componente dos caminhos dos fluxos de informação. Para a simulação dos instantes de chegada e partida dos pacotes no multiplexador, considera-se o modelo “Arrival First” (AF) [10]. Para tomar as decisões de alocação de recursos, o controlador considera a seguinte seqüência de eventos: a chegada dos pacotes, a realização das medidas estatísticas, a recepção das informações externas, o cálculo e a alocação dos recursos. Esta decisão é mantida até que uma nova alteração seja necessária. Nas simulações realizadas, utilizou-se um intervalo periódico T para a alteração da alocação de recursos.

4. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

4.1. Objetivos

O objetivo principal desta estratégia é controlar a QoS da rede de forma a mantê-la nos melhores valores possíveis, além de respeitar todos os contratos de tráfego estabelecidos (denominados aqui de *contratos de QoS*). Para tanto, deve-se manter a QoS fim-a-fim em cada classe nos seus melhores valores possíveis. Assim, maximiza-se simultaneamente os valores médios de QoS de cada classe i , $\max E\{qos_i\}$ (utiliza-se valores normalizados). Para permitir a diferenciação das classes de QoS, estabelece-se fatores ponderadores λ_i 's, denominados aqui de *índices de qualidade de serviço*. Estes índices representam a importância relativa de cada classe de serviço do ponto de vista do usuário final. Simbolizam também a justiça desejada no processo de alocação de recursos do ponto de vista de QoS fim-a-fim. Considera-se que estes termos são conhecidos *a priori* e representados por valores fixos (diferenciação estática) [11] e [12].

Considera-se que a QoS fim-a-fim da classe i , qos_i , é calculada como uma combinação linear dos valores médios dos seus N parâmetros de tráfego, Ψ_{ij} , normalizados. Assim, $qos_i = f(E\{\Psi_{ij}\})$. Admite-se que fatores ponderadores ω_{ij} expressam a importância do parâmetro j para cada classe i . Estabelece-se que, para cada classe, os valores de cada parâmetro de QoS dos demais componentes que compõem o caminho fim-a-fim são calculados de forma aditiva, no caso do atraso

médio e de sua variância; e de forma multiplicativa no caso no caso da probabilidade de perda média de pacotes [13]. Nas simulações realizadas, considerou-se que os parâmetros de QoS apresentam as mesmas importâncias em todas as classes $w_{ij} = 1, \forall i, j$ e que os seus valores recebidos dos demais componentes apresentam um valor máximo. Estas suposições simplificam a simulação e permitem uma melhor análise sobre as vantagens do método utilizado com relação às características de tráfego das classes.

4.2. A Formulação

Modela-se este problema de rede como um problema de alocação de recursos, onde múltiplos critérios estocásticos devem ser avaliados simultaneamente sob um determinado conjunto de restrições [14], [12], [11]. Este problema é apresentado da seguinte forma:

$$\begin{aligned} \max_{x \in \mathcal{X}} QoS &= E\{\langle \lambda_i, qos_i(x) \rangle\} \\ \text{s.a. } E\{qos_i(x) - qos_{i_{min}}(x)\} &\geq 0 \quad \forall i = 1, \dots, N \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{onde, } qos_i &= E\{\langle w_{ij}, \Psi_{ij}(x) \rangle\} \\ E\{\Psi_{ij}(x) - \Psi_{ij_{max}}(x)\} &\leq 0, \quad \forall i = 1, \dots, N \end{aligned}$$

Considera-se que as funções, QoS , qos_i e Ψ_{ij} , $\forall i, j$, são convexas sobre \mathcal{X} convexo. E $qos_{i_{min}}$ é o valor mínimo aceito para a QoS de cada classe. \mathcal{X} representa o espaço dos recursos x , a serem alocados no multiplexador. Na estratégia proposta, os recursos alocados são representados pelas bandas passantes relativas μ_i (com relação aos tempos de serviços T_i) e pelas frações do espaço do “buffer”, b_i , destinadas a cada fila. Observa-se que esta formulação permite que diversos procedimentos de justiça e de compartilhamento de recursos sejam a ela associados.

5. ALOCAÇÃO DE RECURSOS

5.1. Estratégias de Multiplexação [15]:

Prioridade Estrita (E): Nesta estratégia, as classes mais prioritárias são servidas primeiramente, e no caso de perda de pacote, a seqüência de descarte segue em ordem da classe menos prioritária à mais prioritária. A ordem de prioridades é atribuída, *a priori*, em função do(s) parâmetro(s) escolhido(s) como métrica(s). Nos experimentos realizados, adotou-se as taxas médias de chegada de pacotes contratadas pelas classes como níveis de prioridades.

Filas com Recursos Garantidos (G): Nesta técnica, as filas têm suas frações de recursos, μ_i e b_i , previamente definidas. Em geral, utiliza-se fatores de pon-

deração sobre os recursos totais.

$$\sum_{i=1}^N \mu_i \leq R, \quad \mu_i \leq \alpha_i R, \forall i = 1, \dots, N, \quad \sum_{i=1}^N \alpha_i = 1$$

Filas Justas Ponderadas (P): Neste método, os recursos são alocados em função de uma ponderação realizada sobre a métrica de QoS escolhida. Cada fila recebe dinamicamente uma fração dos recursos disponíveis, em função dos fatores de ponderação. Estes são ajustados em função das características dinâmicas do tráfego.

Filas Justas Ponderadas Multiobjetivos (MO): Esta técnica representa uma variante do caso anterior, onde incorporou-se os aspectos da teoria de otimização multiobjetivo à alocação de recursos. Comparou-se as técnicas clássicas descritas anteriormente com três variantes do modelo multiobjetivo aqui formulado. Na primeira, considerou-se as capacidades máximas das filas fixas e aplicou-se a estratégia multiobjetivo sobre os valores de banda passante. Na segunda, calculou-se as capacidades máximas das filas de forma ponderada e dinâmica e novamente aplica-se a estratégia multiobjetivo sobre os valores de banda passante. Na terceira, aplicou-se a estratégia multiobjetivo para encontrar os valores de banda passante e de capacidade máxima das filas.

Compartilhamento Completo (C): À exceção da estratégia de multiplexação com recursos garantidos, todas as demais utilizam o compartilhamento completo dos recursos. Neste tipo de compartilhamento, qualquer uma das i classes pode utilizar os recursos, R e B , na sua totalidade.

$$\sum_{i=1}^N \mu_i \leq R \quad 0 \leq \mu_i \leq R, \quad \forall i = 1, \dots, N$$

6. ALGORITMOS DE OTIMIZAÇÃO

Como os índices de diferenciação de QoS são fixos, o Problema 2 se enquadra na categoria de Problemas de Otimização Multiobjetivo com Articulação de Preferências *a Priori* [16]. Assim, ele pode ser resolvido por métodos de Otimização Não Linear Restrita. Na simulação, utilizou-se o algoritmo do Gradiente Reduzido Generalizado [17], por suas fortes propriedades de convergência e robustez.

7. SIMULAÇÃO

7.1. Descrição dos Cenários

Para comparar as estratégias de multiplexação, implementou-se um simulador de rede como descrito em [18]. Utilizou-se três fontes de tráfegos representando as classes de serviços que geram pacotes com as

Parâmetros do Multiplexador		
R (Mbps)	B (Mbits)	T (s)
30	9	1

Tabela 2: Parâmetros do Multiplexador.

Parâmetros	Classes de Conexões		
	1	2	3
M (Mbits)	50	20	10
s	0.1-0.9	0.2	0.2
α	1.5	1.5	1.5
r (Mbps)	5-45	4	2
D_{max} (s)	0.3	0.3	0.3
VD_{max} (s)	0.1	0.1	0.1
P_{max}	0.1	0.1	0.1
D_{tot} (s)	0.01	0.01	0.01
VD_{tot} (s)	0.01	0.01	0.01
P_{tot}	0.01	0.01	0.01
μ_i (Mbits)	$R/3$	$R/3$	$R/3$
b_i (Mbits)	$B/3$	$B/3$	$B/3$
λ_i (Mbps)	1-2-3	1-2-3	1-2-3

Tabela 3: Descrição do Tráfego.

características descritas na Seção 3.2. As características físicas do multiplexador estão descritos na Tabela 2. As características dos tráfegos são apresentados na Tabela 3, segundo a simbologia da Tabela 9. As análises comparativas foram realizadas em função dos valores de QoS da rede, das classes e dos índices de diferenciação de QoS. A variável alterada para a realização das análises foi o crescimento da taxa média da classe 1. As análises foram realizadas comparando-se a QoS da rede e a variância de QoS média entre as classes para as diversas estratégias de alocação de recursos. Utilizou-se um tempo de simulação de 100 segundos, com 10 repetições para cada experimento.

Recursos Computacionais Utilizados: O simulador foi implementado utilizando o Software MATLAB para “MS-Windows” e as simulações foram realizadas sobre microcomputadores PC’s.

7.2. Resultados

Os resultados são apresentados nas Figuras 5, 6, 7 e 8, considerando-se as estratégias simbolizadas na Tabela 4.

Siglas	Estratégias de Alocação
<i>RBG</i>	R_i e B_i Garantidos;
<i>RBP</i>	R_i e B_i Ponderados;
<i>REBG</i>	R_i Prioridade Estrita e B_i Garantidos;
<i>RMOBG</i>	R_i Multiobjetivo e B_i Garantidos;
<i>RMOBP</i>	R_i Multiobjetivo e B_i Ponderados;
<i>RBMO</i>	R_i e B_i Multiobjetivos;

Tabela 4: Siglas das Estratégias.

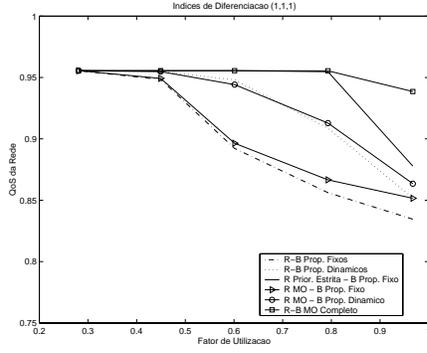


Figura 5: QoS da Rede - Diferenciação $\lambda_i = 1, i = 1, 2, 3$.

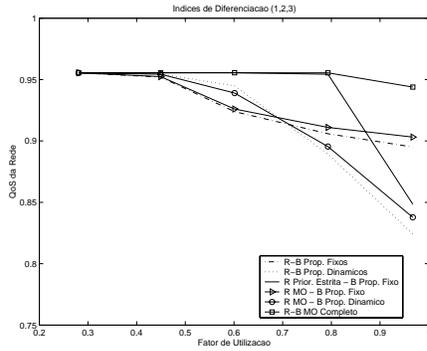


Figura 6: QoS da Rede - Diferenciação $\lambda_i = 1, 2, 3$.

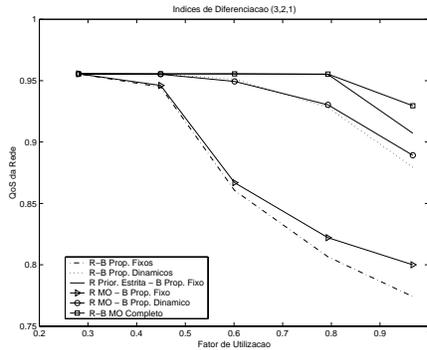


Figura 7: QoS da Rede - Diferenciação $\lambda_i = 3, 2, 1$.

7.3. Análise dos Resultados

De acordo com as Figuras 5, 6 e 7, observa-se que, com o aumento da intensidade do tráfego, a QoS da rede tende a diminuir em virtude da maior utilização dos recursos. As estratégias *RBG* e *RMOBG* fornecem os piores valores de QoS para a rede quando não existe diferenciação entre as classes ($\lambda_i = 1, \forall i = 1, 2, 3$) ou quando a classe de tráfego mais intenso apresenta o maior fator de ponderação. Isto é justificado pelo fato de que a classe 1 (tráfego mais intenso) apresenta grandes valores de atraso e perda, pois os recursos foram fixados em 1/3 dos totais (*R* e/ou *B*), para to-

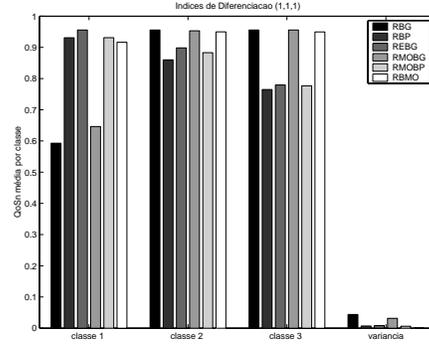


Figura 8: QoS Média para Cada Classe de Serviço.

das as classes. Através da Figura 6, observa-se que estas estratégias forneceram melhores valores de QoS do que nas diferenciações anteriores. Isto se deve aos maiores índices de diferenciação serem atribuídos às classes de tráfegos menos intensos (2 e 3), as quais apresentam uma maior abundância de recursos. Quanto à estratégia *RBP* e *RMOBP*, observa-se um resultado semelhante, já que o parâmetro escolhido como fator ponderador dinâmico, a taxa de chegada média das classes, é maior para a primeira. Observa-se ainda que os métodos *RMOBG* e *RMOBP* fornecem valores de QoS ligeiramente superiores aos métodos *RBG* e *RBP*, respectivamente. A estratégia de alocação de recursos *REBG* fornece excelentes valores de QoS de rede em relação às descritas anteriormente, considerando-se a sua simplicidade. Isto se deve à sua habilidade em utilizar todos os recursos disponíveis para priorizar as classes de tráfego mais intenso. Por outro lado, como se pode observar na Figura 6, tem-se uma queda bastante acentuada à medida que o fator de utilização aumenta. Isto se deve ao fato de que a classe de maior índice de diferenciação tem maior probabilidade de apresentar perdas, atrasos e variações de atraso (classe 3). A estratégia *RBMO*, por sua vez, fornece os melhores valores de QoS em todas as condições de diferenciação simuladas. Isto se deve à sua facilidade em adaptar a alocação de recursos às condições estatísticas do tráfego e aos índices de diferenciação impostos. Este fato é mais evidente quando o fator de utilização é mais elevado.

A Figura 8 reforça a análise realizada, mostrando que a estratégia *RBMO* é a melhor e também a mais justa do ponto de vista de garantia de qualidade de serviço relativa entre as classes. Observa-se que esta estratégia fornece a menor variância de QoS entre as classes. Logo, ela é sugerida como uma alternativa viável para tratar este tipo de problema.

8. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

Neste trabalho, apresentou-se uma estratégia alternativa para a alocação de recursos em redes IP baseada

em otimização multiobjetivo. Considerou-se QoS como o critério básico para a diferenciação na alocação de recursos entre as classes de serviços. Os testes foram realizados considerando três classes de serviços e na análise dos resultados comparou-se seis estratégias de alocação de recursos. Os resultados obtidos deixam claro que a modelo proposto conjuntamente com a estratégia sugerida apresenta grandes vantagens do ponto de vista de adaptação às características estocásticas do tráfego, e de justiça na garantia de QoS entre as classes.

Objetiva-se adicionar a este modelo uma fase de policiamento de tráfego, considerando-se a técnica “leaky bucket”. Está em fase de desenvolvimento uma adaptação deste método para o problema de Controle de Admissão a Conexões (CAC). Assim, será possível tirar proveito da justiça na alocação de recursos no momento de decidir quais conexões admitir e quais rejeitar.

	Simbologia
M	Tamanho do maior pacote da classe;
s	Frequência do maior pacote da classe;
α	Parâmetro da distrib. de Pareto;
r	Taxa média da classe;
	Valores máximos admitidos
D_{max}	Atraso fim-a-fim;
VD_{max}	Variância do atraso fim-a-fim;
P_{max}	Probabilidade de perda;
	Valores máximos acumulados
D_{tot}	Atraso (demais componentes);
VD_{tot}	Variância do atraso (demais componentes);
P_{tot}	Probabilidade de perda (demais componentes).
μ_i	Taxa de serviço da classe i ;
b_i	Capacidade máxima da fila da classe i ;
λ_i	Índice de diferenciação da classe i .
R	Débito máximo do multiplexador;
B	Capacidade máxima do multiplexador;
T	Período de execução do algoritmo de decisão.

Tabela 9: Simbologia Adotada.

Reconhecimentos

Menotti Machado é financiado pelo convênio CNPq/SFERE. Miguel F. de Castro é financiado pela Fundação CAPES.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] R. Braden, D. Clack, and S. Shenker. Integrated Service in the Internet Architecture: An Overview. *RFC 1633*, Jul 1994. IETF.

[2] S. Black, D. Carlson, E. Davis, Z. Wang, and W. Weiss. An Architecture for Differentiated Service. *RFC 2475*, Dec 1998. IETF.

[3] R. Braden, L. Zhang, S. Berson, S. Herzog, and S. Jamin. Resource ReServation Protocol(RSVP)

- Version 1 : An Overview. *RFC 2205*, Sep 1997. IETF.

[4] J. Wroclawski. The Use of RSVP with IETF Integrated Services. *RFC 2210*, Sep 1997. IETF.

[5] V. Paxson, G. Almes, J. Mahdavi, and M. Mathis. Framework for IP Performance Metrics. *RFC 2330*, May 1998. IETF.

[6] J. Wroclawski. Specification of the Controlled-Load Network Element Service. *RFC 2211*, Sep 1997.

[7] S. Shenker, C. Partridge, and R. Guerin. Specification of Guaranteed Quality of Service. *RFC 2212*, Sep 1997. IETF.

[8] T. Finland J. Heinanen, F. Baker, W. Weiss, and J. Wroclawski. An Assured Forwarding PHB Group. *RFC 2597*, Jun 1999. IETF.

[9] V. Jacobson, K. Nichols, and K. Poduri. An Expedited Forwarding PHB. *RFC 2598*, Jun 1999. IETF.

[10] G. Hebuterne and A. Dupuis. Microscopic Models of ATM Multiplexing. *Sixth IFIP Workshop on Performance Modelling and Evaluation of ATM Networks*, Jul 1998. Ilkley, West Yorkshire, U.K.

[11] R. Rajkumar, C. Lee, J. Lehoczy, and D. Siewiorek. A Resource Allocation Model for QoS Management. *Proceedings of the IEEE Real-Time Systems Symposium*, Dec. 1997.

[12] C. Lee, J. Lehoczy, R. Rajkumar, and D. Siewiorek. On Quality of Service Optimization with Discrete QoS Options. *Fifth IEEE Real-Time Technology and Applications Symposium*, Jun 1999. Vancouver, Canada.

[13] Y.A. Korilis, A.A. Lazar, and A. Orda. Achieving Network Optimal Using Stackelberg Routing Strategies. *IEEE/ACM Transaction on Networking*, 5(1):161–172, Feb. 1997.

[14] P. Ferreira and M. Machado. Solving Multi-Objective Problems in the Objective Space. *Journal of Optimization Theory and Applications*, 89(3), Jun 1996.

[15] T. Yang and J. Yei. Optimal Solution for a Dynamic Bandwidth Allocation Scheme in High-Speed Networks. *Telecommunication Systems*, 5:389–412, 1996.

[16] P. V. Ferreira. *Programação Matemática Multiobjetivo: Desenvolvimento de um Método Iterativo Baseado em Projeção*. FEC/UNICAMP, 1986. Tese de Doutorado.

[17] L. Lasdon. *Optimization Theory for Large Systems*. The Macmillan Company, New York NY, 1970.

[18] A. M. Law and W. D. Kelton. *Simulation Modeling and Analysis*. McGraw-Hill, Singapore, second edition, 1991.