Um Modelo Estendido para Caracterização Determinística de Tráfegos de Vídeo MPEG

Marcelo Dias de Amorim[1,2] e Otto Carlos Muniz Bandeira Duarte[2]

[1]Laboratoire PRiSM – Equipe Réseaux
Université de Versailles Saint-Quentin en Yvelines
45, avenue des Etats-Unis – 78035 – Versailles – France

[2]Universidade Federal do Rio de Janeiro
COPPE/EE - Programa de Engenharia Elétrica
P.O. Box 68504 CEP 21945-970 - Rio de Janeiro - RJ - Brasil

Resumo— O transporte eficiente de vídeo comprimido com rígidos requisitos de QoS exige acurácia do modelo de tráfego. Neste artigo, o modelo XGOP-B (*eXtended GOP-Based model*) é proposto para a caracterização determinística de tráfegos de vídeo no padrão MPEG. A caracterização é fundamentada em análises de dois níveis na codificação MPEG: uma que explora a característica de que a geração de intra-quadros resulta em surtos de informação em instantes definidos de tempo e outra sobre o comportamento do grupo de quadros (GOP), onde é observada a propriedade de variação da taxa média de geração de bits para diferentes valores de intervalo de tempo. O modelo XGOP-B provê uma variável especial chamada fator de qualidade do modelo, que controla sua acurácia e complexidade, e resulta em parâmetros únicos para cada fonte de vídeo. A análise de diversos traços de vídeo MPEG mostra que o modelo proposto, quando comparado a outros modelos determinísticos de tráfego, apresenta alta acurácia de parametrização e baixa complexidade.

Abstract— The efficient transport of compressed video with strict QoS bounds requires an accurate deterministic traffic model. In this paper, we propose the XGOP-B (*eXtended GOP-Based*) model for characterizing MPEG compressed video traffics based on a two-level analysis of such sources: a frame-level analysis that considers the short-term bursts due to the generation of intra-picture frames, and a GOP-level analysis that considers the variations of the average video rate on different time intervals. The proposed model provides a special parameter, called quality-of-model parameter, that adjusts the accuracy and complexity of the model, and leads to only one set of parameters for each video stream. Simulation results show that the proposed model has low complexity and improves the modeling accuracy when compared to other deterministic traffic models .

Palavras Chave— Modelagem determinística de tráfegos, vídeo MPEG, acurácia de parametrização.

I. Introdução

A maioria das novas aplicações em redes de computadores, como por exemplo a distribuição de vídeo comprimido, introduz múltiplas e rígidas restrições quanto às garantias de qualidade de serviço (QoS - *Quality of Service*) que devem ser suportadas pela rede [1, 2, 3]. Os serviços que provêem garantias podem ser divididos em duas classes principais [4]: serviços determinísticos e serviços estatísticos. Em um serviço do tipo determinístico, todos os pacotes de uma comunicação recebem a garantia de alcançar o destino sem serem perdidos e dentro do atraso máximo estabelecido [2, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 10], enquanto no serviço estatístico as garantias não são absolutas uma vez que sempre existe uma probabilidade de serem violadas [11, 12, 13, 14]. Assim, aplicações mais exigentes com relação a QoS requerem um serviço do tipo determinístico.

Um certo número de modelos determinísticos de tráfego foram propostos na literatura. O modelo fluido [15] define uma dupla (σ, ρ) tal que durante um intervalo de tempo de duração δt não são transmitidos pela fonte mais que $\sigma + \rho\delta t$ bits. O modelo fluido em duas dimensões [3] é uma extensão ao modelo (σ, ρ), onde, no lugar de se definir uma dupla, são definidos dois vetores $(\vec{\sigma}, \vec{\rho}) = \{(\sigma_1, \rho_1), (\sigma_2, \rho_2), \ldots, (\sigma_n, \rho_n)\}$. Em um intervalo de duração δt não são gerados pela fonte mais que $\min\{\sigma_i + \rho_i \delta t\}$ bits, para $i = 1, 2, \ldots, n$. O modelo discreto [4] utiliza quatro parâmetros para a caracterização do tráfego (x_{min}, x_{ave}, I, s_{max}), sendo x_{min} o intervalo mínimo entre as chegadas de dois pacotes consecutivos, x_{ave} o máximo intervalo médio entre as chegadas de pacotes em um intervalo de duração I e s_{max} o tamanho máximo de um pacote. O modelo D-BIND [16] caracteriza uma fonte com a função $R(I)$ que representa a taxa máxima de transmissão para qualquer intervalo de tempo de duração I. A função $R(I)$ é linear por partes e formada por de m pares da forma (R_k, I_k), k=1,2,...,m.

Este artigo propõe um novo modelo determinístico,denominado XGOP-B (*eXtended GOP-Based model*), que explora características específicas de tráfegos de vídeo MPEG. Os resultados obtidos de análises sobre diversos traços reais de vídeos provenientes de fontes diversas mostram que o mo-

Este trabalho foi desenvolvido com suporte da UFRJ, FUJB, PROTEM-CC, CNPq, CAPES e COFECUB.

delo proposto apresenta alta acurácia de parametrização com baixa complexidade. Além disso, o nível de acurácia e, conseqüentemente, a complexidade do modelo, podem ser ajustados através de uma variável especial controlada pelo usuário, que não precisa ter conhecimento do comportamento exato do tráfego, mas apenas da relação acurácia/complexidade que é fornecida automaticamente pelo módulo extrator de parâmetros de tráfego. Assim, para cada tráfego fornecido como entrada apenas um único conjunto de parâmetros é obtido como saída.

Este artigo está organizado da seguinte forma. Na seção II são apresentados os principais conceitos sobre caracterização determinística de tráfegos. Em seguida, a seção III detalha a análise em dois níveis do padrão MPEG e propõe o modelo XGOP-B. Diversas medidas e comparações são apresentadas na seção IV seguidas das conclusões na seção V.

II. Caracterização Determinística de Tráfegos

A caracterização determinística de tráfegos representa a taxa de transmissão de uma fonte por uma função $\mathcal{F}(\cdot)$ denominada função de restrição de tráfego [15], onde durante qualquer intervalo de tempo de duração δt não são gerados mais do que $\mathcal{F}(\delta t)$ bits. Assim, sendo $\mathcal{G}[t, t+\delta t]$ o número real de bits gerados no intervalo $[t, t+\delta t]$,

$$\mathcal{G}[t, t+\delta t] \leq \mathcal{F}(\delta t), \qquad t > 0. \tag{1}$$

A única restrição sobre a função $\mathcal{F}(\cdot)$ exige que ela seja um contorno superior ao processo de geração de bits pela fonte. Desta forma, existe um número infinito de possíveis funções para um mesmo tráfego. Para uma determinada fonte gerando bits de acordo com um processo $\mathcal{G}$, a função de restrição de tráfego mais precisa para qualquer intervalo de tempo de duração δt é por definição a função

$$\zeta(\delta t) = \sup \mathcal{G}[t, t+\delta t], \qquad t \geq 0, \tag{2}$$

denominada contorno empírico [3] ou processo de contorno mínimo [6].

Entretanto, a representação de fontes VBR através do contorno empírico é inconcebível pela grande quantidade de parâmetros necessários. Na prática, calcula-se a função de restrição $\mathcal{F}(\cdot)$ de forma que esta seja uma aproximação superior do contorno empírico. A função $\mathcal{F}(\cdot)$ deve contudo respeitar dois princípios básicos. Ela deve ser simples de forma a não introduzir complexidade no sistema e o mais semelhante possível do contorno empírico. Assim, considera-se o termo "acurácia do modelo" o quão a função de restrição de tráfego se aproxima do contorno empírico, ou seja, o objetivo de uma caracterização acurada é minimizar a expressão $\zeta(\delta t) - \mathcal{F}(\delta t)$, para todo t.

A tabela I mostra as respectivas funções de restrição de tráfego para os modelos propostos na literatura e apresentados na seção anterior.

III. O Modelo XGOP-B

Os vídeos comprimidos no padrão MPEG têm os quadros do tipo I (intra-quadros) normalmente muito maiores que os quadros P e B (inter-quadros), como mostra o exemplo da figura 1(a). Como conseqüência desta propriedade, a função de restrição de tráfego apresenta surtos de informação nos intervalos de tempo proporcionais ao período de um grupo de quadros (*Group of Pictures* - GOP[1]) como ilustra o exemplo da figura 1(b). O contorno empírico para um vídeo MPEG é o resultado de uma parcela correspondente à taxa média de geração de bits dada pelos quadros P e B, mais os surtos devidos aos quadros I em instantes definidos de tempo.

As taxas de compressão alcançadas pelo codificador MPEG variam de forma significativa ao longo do tempo devido principalmente às mudanças de cenas[2], o que resulta em uma seqüência de quadros irregular no que se refere à métrica tamanho dos quadros. O reflexo observado por esta propriedade sobre a função de restrição de tráfego é a ocorrência de variações acentuadas na taxa média de crescimento da curva chamadas pontos de quebra (ξ), como mostra a figura 2.

Os pontos de quebra não podem ser capturados por determinados modelos propostos na literatura, como por exemplo os modelos (σ, ρ) e discreto. Uma das propriedades comuns a estes modelos é a constância na taxa média de crescimento da curva de restrição de tráfego. Com a ocorrência de um ponto de quebra negativo (que causa redução na taxa média de crescimento da curva), a função de restrição de tráfego provida por estes modelos diverge do contorno empírico, o que reduz a acurácia da caracterização.

Da mesma forma, a característica de concavidade intrínseca ao modelo $(\vec{\sigma}, \vec{\rho})$ distancia a função

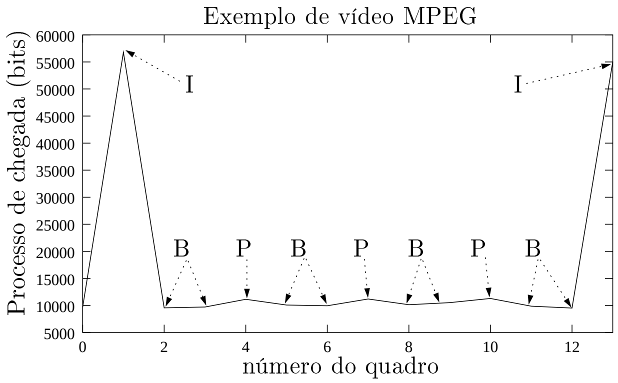
[1] O GOP representa um padrão cíclico de geração de quadros, como por exemplo a seqüência IBBPBBPBB.

[2] Consideramos neste artigo o termo "cena" como um certo número de GOPs consecutivos.

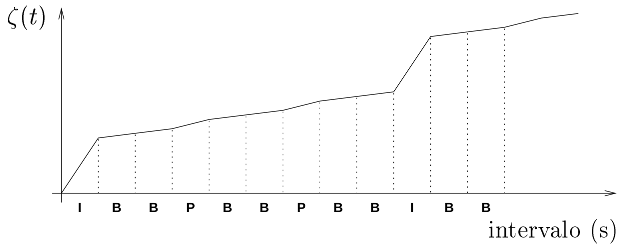
TABELA I

Funções de restrição de tráfego

Modelo	**Funções de restrição de tráfego**
(σ, ρ)	$\mathcal{F}(\delta t) = \sigma + \rho\delta t$
$(\vec{\sigma}, \vec{\rho})$	$\mathcal{F}(\delta t) = min_i\{\sigma_i + \rho_i \delta t\}$
discreto	$\mathcal{F}(\delta t) = \lfloor\frac{\delta t}{I}\rfloor\frac{I s_{max}}{x_{ave}} + min\{\lceil(\frac{\delta t}{I} - \lfloor\frac{\delta t}{I}\rfloor)\frac{I}{x_{min}}\rceil, \frac{I}{x_{ave}}\}s_{max}$
D-BIND	$\mathcal{F}(\delta t) = \frac{R_k I_k - R_{k-1} I_{k-1}}{I_k - I_{k-1}}(\delta t - I_k) + R_k I_k, \quad I_{k-1} \leq \delta t \leq I_k$



(a) Exemplo de vídeo MPEG.



(b) Contorno empírico para um vídeo MPEG.

Figura 1. Comportamento das fontes de vídeo MPEG.

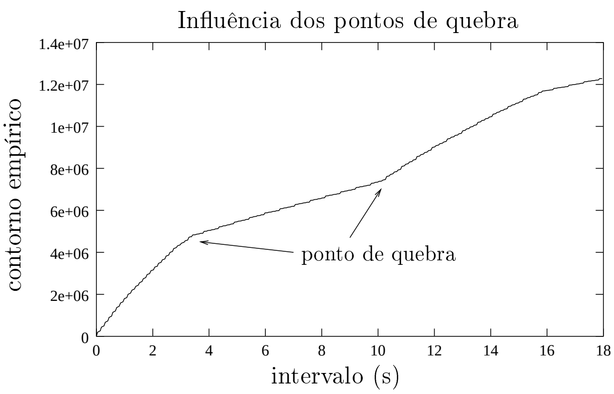
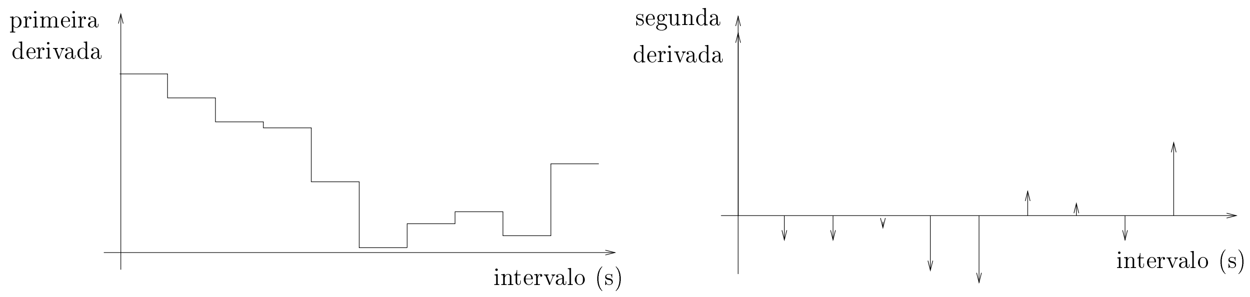


Figura 2. Efeito dos pontos de quebra sobre o contorno empírico.

de restrição de tráfego do contorno empírico em regiões próximas aos pontos de quebra positivos (que causam aumento na taxa média de crescimento da curva). Para o modelo D-BIND, os pontos de quebra podem exigir mais pares (R_k, I_k), o que aumenta o número de variáveis a serem manipuladas e conseqüentemente a complexidade do modelo.

A solução proposta neste artigo é dividida em duas etapas principais e uma etapa secundária de ajuste da complexidade do sistema. A primeira consiste na determinação de uma função correspondente às sucessivas inclinações do contorno empírico. Esta função armazena a taxa de geração de bits pela fonte por unidade de tempo. As inclinações são particularmente calculadas com intervalos proporcionais ao tamanho do GOP, resultando na função chamada primeira derivada, como mostra o exemplo da figura 3(a). A etapa seguinte consiste em se obter, a partir da curva de primeira derivada, uma função discreta correspondente somente às variações da primeira derivada. Esta nova função é denominada segunda derivada (figura 3(b)).

Os impulsos plotados no gráfico 3(b) assinalam os instantes onde as variações de inclinação ocorrem. Contudo, resta ainda estabelecer, dentre estes pontos, quais devem ser assumidos como pontos de quebra. A escolha é determinada pelo nível de qualidade do modelo desejado pelo usuário. Se mais pontos forem escolhidos, o modelo será mais acurado pois serão determinados mais parâmetros de tráfego. Por outro lado, se forem selecionados menos pontos, o modelo será mais simples em termos do número de parâmetros, mas em contrapartida apresentará menor acurácia de parametrização. A técnica adotada para solucionar este problema consiste em se oferecer para o módulo extrator dos parâmetros de tráfego uma variável β denominada fator de qualidade do modelo. Com



(a) (b)

Figura 3. Exemplo de funções de (a) Primeira e (b) Segunda Derivadas.

esta variável, os pontos de quebra são selecionados de acordo com as proposições seguintes:

Proposição 1: Dada uma inclinação inicial, é identificado um ponto de quebra se esta inclinação variar negativamente ou positivamente de um fator β, com $\beta > 0$.

Proposição 2: É identificado um ponto de quebra se o somatório de uma seqüência ininterrupta de segundas derivadas variar negativamente ou positivamente de um fator β, com $\beta > 0$, em relação ao valor da primeira inclinação desta seqüência.

Para a modelagem da taxa média de crescimento da curva bem como dos surtos no inícil de cada grupo de quadros, o modelo XGOP-B utiliza um par (η, ν) como parâmetros de tráfego. O fator η, chamado *fator de impulsos*, modela os surtos, sendo adicionado à função de restrição de tráfego em intervalos múltiplos do tamanho do GOP. O fator ν, denominado *fator médio*, parametriza o crescimento médio da curva, determinado pela presença dos quadros P e B.

A modelagem dos pontos de quebra implementada pelo modelo XGOP-B consiste na adequação da inclinação média da função de restrição de tráfego a um novo valor induzido pela existência dos pontos de quebra. Para tal, a função de restrição de tráfego é subdividida em faixas de valores de intervalo de tempo limitadas pelos pontos de quebra, como ilustra o exemplo da figura 4.

Para cada faixa entre dois pontos de quebra ξ_i e ξ_{i+1} é determinada uma dupla (η_i, ν_i) e um θ_i correspondente ao *offset* da curva de restrição de tráfego na zona i, como ilustra o exemplo da figura 5.

Os parâmetros de tráfego para o modelo XGOP-B são então os vetores $(\vec{\theta}, \vec{\eta}, \vec{\nu}, \vec{\xi})$ e a correspondente função de restrição de tráfego é dada pela

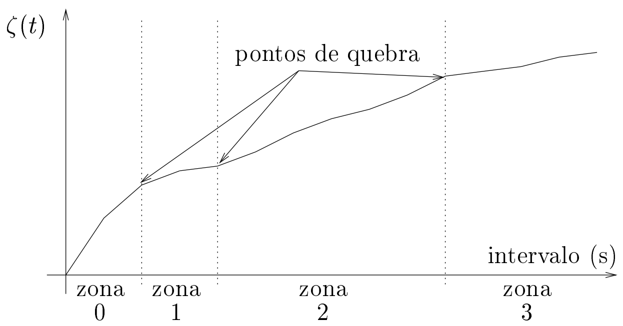


Figura 4. Classificação em faixas do contorno empírico.

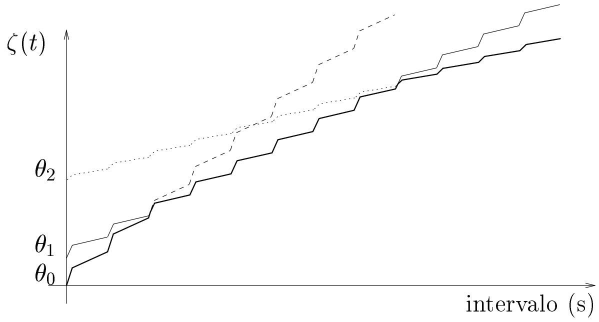


Figura 5. Parâmetro θ.

equação

$$\mathcal{F}_X(\delta t) = \theta_k + \left\lceil \frac{\delta t + T}{TD} \right\rceil \eta_k + \nu_k \delta t, \quad \xi_{k-1} \leq \delta t < \xi_k, \tag{3}$$

onde T é o inverso da taxa de geração de quadros por segundo e D é a distância[3] entre dois quadros I.

IV. Análise dos Resultados

Esta seção apresenta os resultados obtidos a partir da comparação realizada entre o modelo

[3] A distância D equivale ao número de quadros em um GOP.

XGOP-B e os demais modelos determinísticos citados. Para realização das medidas são utilizadas nove amostras de vídeo codificadas no padrão MPEG-1 [17] obtidas de filmes, eventos esportivos e shows apresentados na TV. As amostras possuem as seguintes características:

- padrão do GOP: IBBPBBPBBPBB (distância $D = 12$);
- número de quadros: 40.000 (aproximadamente 30 minutos);
- taxa de amostragem: 22 quadros/s.

A medida de comparação dos modelos utiliza o conceito de Perda por Aproximação do Modelo (PAM) [18], que indica a percentagem de perda de precisão do modelo em comparação ao contorno empírico $\zeta(\cdot)$. A Perda por Aproximação de um Modelo é igual a área compreendida entre a curva de restrição de tráfego do modelo ($S_{\mathcal{F}}$), e o contorno empírico do tráfego (S_{ζ}),

$$PAM = \left(\frac{S_{\mathcal{F}}}{S_{\zeta}} - 1 \right) \times 100\%. \tag{4}$$

Quanto menor o valor da PAM, mais acurada é a caracterização. No caso ideal em que a PAM $=$ 0 %, as duas curvas se encontram e, conseqüentemente, obtém-se o máximo em acurácia.

A tabela II mostra os índices de PAM para as amostras de vídeo analisadas. Para o modelo discreto, os cálculos foram realizados com $I = 540$ ms, que equivale ao período de um GOP. Para o modelo XGOP-B, fixou-se o valor do fator de qualidade do modelo em $\beta = 0.01$.

O ajuste de β determina o nível de acurácia do modelo. Quanto menor o seu valor, mais pontos de quebra são identificados e, conseqüentemente, mais parâmetros de tráfego são obtidos, resultando em maior acurácia de parametrização. A figura 6 ilustra os efeitos do ajuste de β sobre o número de pontos de quebra e sobre o nível de acurácia do modelo. Para $0.1 \leq \beta \leq 0.3$, por exemplo, o valor da PAM praticamente não se altera. Em contrapartida, para a mesma faixa de valores de β, o número de pontos de quebra varia em até quatro vezes. Como o número de pontos de quebra reflete diretamente na complexidade do modelo, a adequada escolha de β pode resultar em grande economia de número de parâmetros.

Os pontos de quebra são resultado das mudanças de cenas onde a taxa de compressão atingida pelo codificador ultrapassa o limite dado por β. Para valores de β elevados, apenas variações significativas da taxa de compressão correspondem a pontos de quebra; assim, vídeos que mantêm comportamento estável durante as cenas podem modelados com alta acurácia mesmo utilizando-se grandes valores de β. A figura 7(a) ilustra um traço de vídeo com estas características. Podemos identificar nesta seqüência três cenas distintas. A primeira até o quadro de número 84, a segunda até o quadro 240 e a terceira a partir do quadro 241. Em cada um destes trechos o vídeo mantém-se bem comportado de forma que os pontos de quebra são facilmente identificados nas fronteiras entre as cenas.

Entretanto, quando a diferença entre cenas consecutivas não é explícita, há necessidade de se ter β pequeno para se capturar as variações de vazão e conseqüentemente obter-se alta acurácia. Apenas desta forma pequenas alterações na taxa de compressão do codificador podem ser relacionadas a pontos de quebra. Este comportamento está ilustrado na figura 7(b). Neste exemplo, a própria identificação das cenas não é simples. Ao se reduzir o valor de β, o vídeo é segmentado em intervalos cada vez menores de maneira que cada intervalo seja classificado como uma cena independente. E como quanto maior o número de cenas maior o número de pontos de quebra, vídeos do tipo apresentado na figura 7(b) só podem ser modelados com alta acurácia se um elevado número de parâmetros for usado.

V. Conclusões

Este artigo propôs o modelo XGOP-B para caracterização determinística de tráfegos de vídeo MPEG. O modelo XGOP-B é baseado em uma análise em dois níveis sobre o comportamento das fontes de tráfego de vídeo MPEG.

Os resultados obtidos a partir da análise sobre diversas amostras de vídeo mostram que o modelo XGOP-B, por incorporar em sua definição características intrínsecas ao padrão MPEG, resulta em maiores índices de acurácia de parametrização quando comparado a outros modelos propostos na literatura. Os resultados mostram que os modelos (σ, ρ), discreto e GOP-B são prejudicados pelo fato de terem a taxa média de crescimento da curva constante, ou seja, por não considerarem que as fontes analisadas apresentam diferentes níveis de rajada para diferentes comprimentos de intervalo de tempo. A característica de adaptação dos pontos de quebra intrínseca ao modelo XGOP-B permite alta acurácia com baixa complexidade. Além disso, a determinação dos parâmetros de tráfego é única, ou seja, para cada vídeo é obtido apenas

TABELA II
Perda por Aproximação do Modelo para cada um dos modelos

	Perda por Aproximação do Modelo (%)				
Vídeo	(σ, ρ)	$(\vec{\sigma}, \vec{\rho})$	discreto	D-BIND	XGOP-B
1. bond	44.02	2.16	31.75	1.48	0.41
2. lambs	30.56	3.42	20.31	2.23	1.63
3. mtv1	13.42	1.43	75.44	1.43	1.30
4. mtv2	9.20	1.77	30.14	1.32	1.48
5. news	7.44	2.56	33.67	2.47	1.58
6. soccer	7.21	2.20	39.58	1.53	1.22
7. star	18.19	1.89	22.59	1.88	1.50
8. talk	3.09	2.31	25.28	2.05	1.68
9. video	6.79	5.42	13.49	5.18	1.93

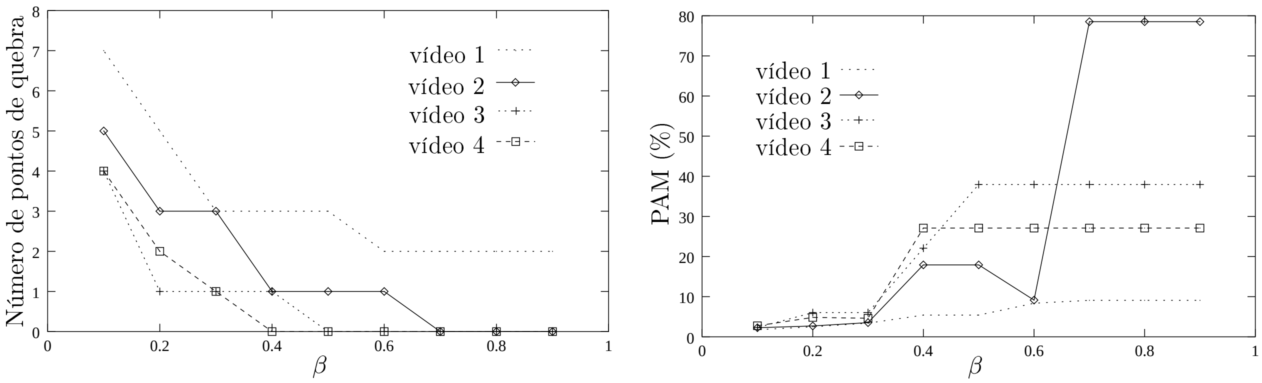


Figura 6. Relações 'β × número de pontos de quebra' e 'β × PAM'.

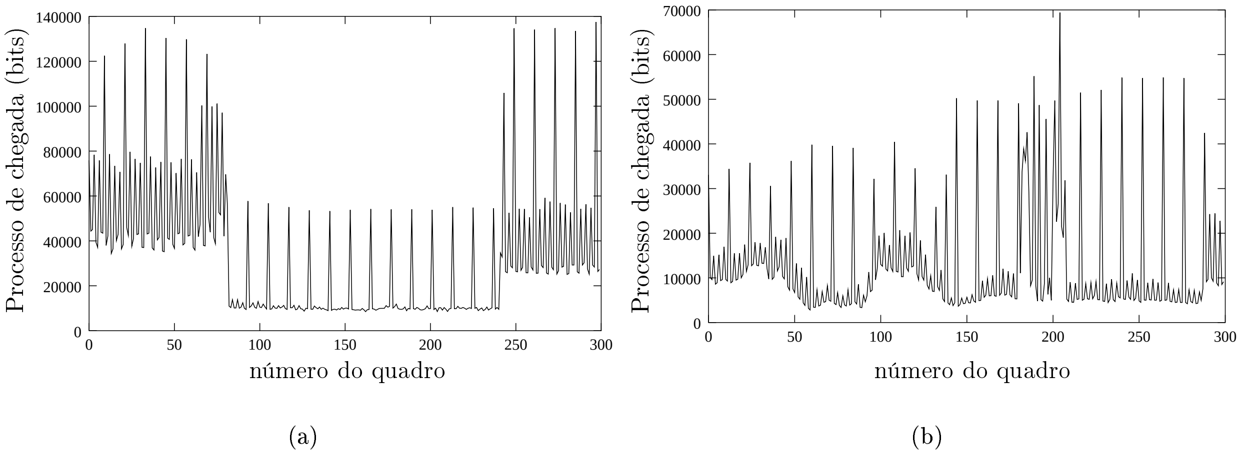


Figura 7. Estabilidade das amostras de vídeo.

um conjunto de parâmetros. No caso do modelo (σ, ρ), existe uma infinidade de possíveis soluções, o que requer que o usuário especifique qual curva deve ser utilizada para a modelagem do tráfego. Para o modelo discreto, o parâmetro I também deve ser especificado *a priori*.

Os modelos $(\vec{\sigma}, \vec{\rho})$, D-BIND e XGOP-B, ao contrário dos demais, permitem que a taxa média de crescimento da curva de restrição de tráfego possa ser ajustada para diferentes valores de intervalo de tempo. Entretanto, o modelo XGOP-B é o único que permite a extração automática dos parâmetros de tráfego. Além disso, a relação complexidade/acurácia é controlada por uma variável especial que permite identificar quando parâmetros de tráfego desnecessários estão sendo usados.

Referências

[1] V. Parthasarathy, J. W. Modestino e K. S. Vastola, "Reliable transmission of high-quality video over ATM networks," *IEEE Transactions on Imaging Processing*, vol. 8, no. 3, pp. 361–374, março de 1999.

[2] M. D. de Amorim e O. C. M. B. Duarte, "A novel deterministic traffic model based on a two-level analysis of MPEG video sources," in *IEEE Global Telecommunications Conference – Globecom'98*, (Sydney, Australia), pp. 244–249, novembro de 1998.

[3] D. E. Wrege, E. W. Knightly, H. Zhang e J. Liebeherr, "Deterministic delay bounds for VBR video in packet-switching networks: Fundamental limits and practical tradeoffs," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 4, no. 3, pp. 352–362, junho de 1996.

[4] D. Ferrari e D. Verma, "A scheme for real-time channel establishment in wide-area networks," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 8, no. 3, pp. 368–379, abril de 1990.

[5] S.-K. Kweon e K. G. Shin, "Providing deterministic delay guarantees in ATM networks," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 6, no. 6, pp. 838–850, dezembro de 1998.

[6] C. Chang, "Stability, queue length, and delay of deterministic and stocastic queueing networks," *IEEE/ACM Transactions on Automatic Control*, vol. 39, no. 5, pp. 913–931, maio de 1994.

[7] V. Firoiu, J. Kurose e D. Towsley, "Efficient admission control of piecewise linear traffic envelopes at EDF schedulers," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 6, no. 5, pp. 558–570, outubro de 1998.

[8] H. Zhang e D. Ferrari, "Improving utilization for deterministic service in multimedia communication," in *1994 International Conference on Multimedia Computing and Systems*, (Boston, MA), pp. 295–304, maio de 1994.

[9] I. Chlamtac, A. Faragó, H. Zhang e A. Fumagalli., "A deterministic approach to the end-to-end analysis of packet flows in connection-oriented networks," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 6, no. 4, pp. 422–431, agosto de 1998.

[10] J. Liebeherr, D. E. Wrege e D. Ferrari, "Exact admission control for networks with a bounded delay service," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 4, no. 6, pp. 885–901, dezembro de 1996.

[11] M. Krunz e A. Makowski, "Modeling video traffic using M/G/infinity input processes: A compromise between markovian and LRD models," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 16, no. 5, pp. 733–748, junho de 1998.

[12] E. Knightly, "H-BIND: A new approach to providing statistical performance guarantees to VBR traffic," in *IEEE Infocom*, (San Francisco, CA), março de 1996.

[13] I. Nikolaidis e R. Onvural, "A bibliography on performance issues in ATM networks," *Computer Communications Review*, vol. 22, no. 5, pp. 8–23, outubro de 1992.

[14] D. Heyman e T. Lakshman, "What are the implications of long-range dependence for VBR video traffic engineering," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 4, no. 3, pp. 301–317, junho de 1996.

[15] R. L. Cruz, "A calculus for network delay, part I: Network elements in isolation," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 37, no. 1, pp. 114–121, janeiro de 1991.

[16] E. W. Knightly e H. Zhang, "D-BIND: An accurate traffic model for providing QoS guarantees to VBR traffic," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 5, no. 2, pp. 219–231, abril de 1997.

[17] O. Rose, "Statistical properties of MPEG video traffic and their impact on traffic modelling in ATM systems," in *20th Annual Conference on Local Computer Networks*, (Minneapolis, MN), pp. 397–406, outubro de 1995.

[18] M. D. de Amorim e O. C. M. B. Duarte, "Um novo modelo determinístico para tráfegos de vídeo MPEG baseado em grupo de quadros," in *XV Simpósio Brasileiro de Telecomunicações - SBT'97*, (Recife - PE), pp. 543–547, setembro de 1997.