Eficiência de Modelos Determinísticos de Tráfego na Representação de Fontes de Vídeo MPEG *

Marcelo Dias de Amorim
amorim@gta.ufrj.br

Otto Carlos M. B. Duarte
otto@gta.ufrj.br

Grupo de Teleinformática e Automação – GTA
Universidade Federal do Rio de Janeiro
COPPE/EE - Programa de Engenharia Elétrica
C. P. 68504 - CEP 21945-970 - Rio de Janeiro - RJ - Brasil

Resumo

A maioria das aplicações multimídias previstas para utilizarem os serviços providos pelos sistemas de comunicação é exigente com relação aos parâmetros de qualidade de serviço (QoS) contratados. Várias medidas devem ser tomadas para que estes requisitos sejam satisfeitos, dentre elas a correta modelagem do tráfego. Caracterizar um tráfego baseando-se em modelos probabilísticos pode muitas vezes acarretar erros indesejados, não garantindo alguns parâmetros de qualidade de serviço. Este artigo descreve os principais modelos determinísticos de tráfego, propõe algoritmos extratores dos parâmetros dos modelos, obtém resultados para diversas seqüências de vídeo MPEG e analisa a eficiência de cada modelo no que se refere à acurácia de representação. Os resultados obtidos mostram que os modelos D-BIND e $(\vec{\sigma}, \vec{\rho})$ são os mais eficientes, apresentando Perda por Aproximação do Modelo inferior a 5,5% para as 21 amostras de vídeo analisadas.

Abstract

Many of the multimedia applications supposed to take advantage of the services provided by the communication systems are stringent in terms of the quality of service (QoS) parameters contracted. Several measures must be performed to satisfy these requirements, including the correct traffic modelling. The characterization of a traffic based on probabilistic models may generate undesirable errors, not guaranteeing some quality of service parameters. This paper describes the principal deterministic traffic models, proposes algorithms to extract parameters from the traffics, obtains results for several MPEG video streams and analyses the efficiency of each model in terms of modelling acuracy. The results show that the D-BIND and $(\vec{\sigma}, \vec{\rho})$ models are the most efficient, with losses under 5,5% for the analysed videos.

*Este trabalho foi realizado com recursos da UFRJ, FUJB, PROTEM-CC, CNPq, FAPERJ, CAPES e COFECUB.

1 Introdução

Muitas das novas aplicações previstas para circularem nas redes de comunicações multimídias, ao contrário de outras já existentes, introduzem rígidas restrições quanto às garantias de qualidade de serviço (QoS) outrora não prioritárias, tais como vazão, atraso máximo e variação de atraso (*jitter*), além da taxa de perda de pacotes. Aplicações envolvendo transferência de áudio e vídeo são exemplos típicos, exigindo valores bem determinados para os parâmetros de QoS, principalmente no aspecto temporal.

Para que garantias determinísticas sejam providas a uma conexão, a rede deve ser capaz de controlar os recursos alocados. Esta tarefa é realizada principalmente pelo controle de admissão de conexões e pelos mecanismos de policiamento de tráfego, responsáveis, respectivamente, pela determinação das conexões que devem ser estabelecidas (aceitas) e pelo controle dos parâmetros do usuário (UPC - *User Parameters Control*). Em termos de ocupação do canal a equação $\sum_{j=1}^{n} \frac{Tmax_j}{l} \leq 1$ deve ser satisfeita, onde $Tmax_j$ é a taxa de pico alcançada pelo tráfego j e l é a capacidade do canal.

As eficiências do controle de admissão e do policiamento de tráfego dependem principalmente de três componentes: o modelo de tráfego, o escalonamento de pacotes e os testes de controle de admissão. O modelo de tráfego é responsável pela parametrização das características principais do tráfego, objetivando sempre fazê-la da forma mais acurada possível, a fim de que os mecanismos de controle de admissão não superestimem os recursos necessários para a conexão. O escalonamento de pacotes assume as tarefas de multiplexação e demultiplexação dos pacotes das várias conexões em um nó da rede. O controle de admissão compreende testes que verificam a viabilidade do estabelecimento de uma nova conexão, dentre eles os testes de capacidade de transmissão, velocidade de processamento de CPU, espaço disponível em *buffers* e de atraso máximo sofrido pelos pacotes no caminho fonte-destino.

Os serviços garantidos podem ser oferecidos sob duas abordagens. Na primeira, garantias probabilísticas [1] de performance são fornecidas a uma conexão. A segunda abordagem ampara-se em cálculos determinísticos [2, 3, 4], em que todos os pacotes de uma conexão recebem a garantia de alcançar o destino com os parâmetros de QoS negociados respeitados.

O presente trabalho se concentra na modelagem de tráfego em taxa variável de bits. Serão analisadas várias propostas, aplicando-se testes e medições para que comparações sejam exploradas. Serão utilizados traços de vídeo MPEG como fontes de tráfegos VBR. Será visto adiante que o vídeo comprimido apresenta variações bastante significativas no que diz respeito à taxa de geração de bits, além de ser um dos tipos de tráfego com maior incidência nas redes de serviços integrados [5, 6].

A organização deste documento se dará da seguinte forma. A seção 2 trata da caracterização de tráfegos e apresenta os principais modelos determinísticos. Na seção 3 estão detalhados os algoritmos utilizados na extração de parâmetros dos modelos. A seção 4 apresenta os resultados das comparações. Por fim, alguns comentários finais e as conclusões se encontram na seção 5.

2 Caracterização Determinística de Tráfegos

A caracterização de uma fonte define o comportamento do tráfego por ela gerado, bem como alguns requisitos de QoS. Um tráfego é caracterizado quando para ele é definido um conjunto de parâmetros nos quais a rede se baseia para controle do tráfego e utilização eficiente dos recursos da rede.

Uma caracterização é dita determinística quando for capaz de representar o tráfego em todos os casos, estando ele em qualquer taxa de transmissão. Um tráfego é caracterizado deterministicamente com a definição da função $FRT(\delta t)$, chamada **função de restrição de tráfego**, que corresponde a uma fronteira invariante no tempo em torno da função $A'[t, t + \delta t]$, de forma que seja satisfeita a equação

$$A'[t, t + \delta t] \leq FRT(\delta t), \tag{1}$$

onde a função $A'[t, t + \delta t]$ denota o número de bits gerados durante o intervalo $[t, t + \delta t]$.

Em outras palavras, a função de restrição de tráfego assume que em qualquer intervalo de duração δt não serão gerados pela fonte mais que $FRT(\delta t)$ bits. Essa generalização introduz desperdício de banda-passante, mas simplifica muito o modelo.

A função de restrição de tráfego mais precisa para a modelagem de um determinado tráfego é a função exata $Ex(t)$ que exprime valores de taxa de geração de bits pela fonte para quaisquer valores de intervalo de tempo. Contudo, representar tráfegos VBR da forma $Ex(t)$ ainda assim seria altamente dispendioso. Porém, a função $Ex(\delta t)$ se mostra útil como base para se determinar a acurácia de outros modelos determinísticos de tráfego. O objetivo principal na caracterização determinística de tráfegos é desenvolver modelos que ponderem as características de simplicidade e acurácia. Os modelos determinísticos de tráfego analisados neste trabalho são apresentados a seguir.

2.1 Modelo Fluido

Esta abordagem, introduzida por Cruz [10, 11], define uma dupla (σ, ρ) em que durante um intervalo de tempo de duração t não são transmitidos mais que $\sigma + \rho t$ bits, onde σ é chamado fator de rajada e ρ fator de vazão. A função de restrição de tráfego correspondente é dada por

$$FRT_{(\sigma,\rho)}(t) = \sigma + \rho t. \tag{2}$$

Por ter a função de restrição de tráfego linearmente proporcional ao intervalo de tempo, a menos do fator de rajada, este modelo é por vezes chamado *leaky-bucket* (balde furado), em analogia ao mecanismo de policiamento de de tráfego de mesmo nome.

Este modelo é uma extensão muito simples do modelo de alocação pelo pico, a menos do fator σ. Este fator fica responsável pela modelagem de "instantes de rajada", permitindo que ρ seja inferior ao fator α do modelo de alocação pelo pico, cuja função de restrição de tráfego correspondente é dada por $FRT_{pico}(t) = \alpha t$.

A figura 1(a) ilustra um gráfico com a curva exata de chegada de pacotes (dada por $Ex(t)$) e a função $FRT_{(\sigma,\rho)}(t)$.

2.2 Modelo Fluido em Duas Dimensões

O modelo fluido em duas dimensões [8] é uma extensão do modelo (σ, ρ) apresentado na seção anterior, onde, no lugar de se definir uma dupla, são definidos dois vetores $(\vec{\sigma}, \vec{\rho})$. Para um intervalo de duração t não podem ser transmitidos mais que $min_i\{\sigma_i + \rho_i t\}$ bits. Desta forma, o modelo é capaz de distinguir, mais acuradamente, "níveis de rajada" inerentes ao tráfego, se comparado ao modelo (σ, ρ). A determinação dos parâmetros é feita da seguinte forma. Para um intervalo de tempo δt dado, um par (σ_k, ρ_k) e um novo intervalo $\hat{\delta t}$ são escolhidos tal que

$$Ex(\delta t) = \sigma_k + \rho_k \delta t, Ex(t) \leq \sigma_k + \rho_k \delta t|_{\forall 0 \leq t \leq \delta t} e Ex(\hat{\delta t}) = \sigma_k + \rho_k \hat{\delta t}. \quad (3)$$

Este procedimento é repetido sucessivamente até que $\hat{\delta t} = 0$.

A função de restrição de tráfego correspondente está plotada na figura 1(b) e é dada pela equação

$$FRT_{(\vec{\sigma},\vec{\rho})}(t) = min_i\{\sigma_i + \rho_i t\}. \quad (4)$$

É interessante observar a característica de concavidade da curva.

2.3 Modelo Discreto

O modelo *Discreto* [12], ao contrário dos anteriores, 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. Dispondo-se destes parâmetros e mais a velocidade l do canal, pode-se extrair alguns indicadores importantes, tais como:

- a taxa de pico: $\frac{S_{max}}{X_{min} l}$;
- a razão $\frac{taxa_{max}}{taxa_{media}}$: $\frac{X_{ave}}{X_{min}}$;
- o máximo comprimento de rajada: $\frac{X_{min} I}{X_{ave}}$.

A função de restrição de tráfego para o modelo *Discreto*, plotada na figura 1(c), pode ser expressa por

$$FRT_{discreto}(t) = \lfloor \frac{t}{I} \rfloor \frac{I.S_{max}}{X_{ave}} + min\{\lceil (\frac{t}{I} - \lfloor \frac{t}{I} \rfloor) \frac{I}{X_{min}} \rceil, \frac{I}{X_{ave}}\} S_{max}. \quad (5)$$

Pode-se observar que a curva resultante não é necessariamente côncava, como no modelo $(\vec{\sigma}, \vec{\rho})$, mas sua taxa de crescimento é sempre constante, o que pode levar a alguma imprecisão nos resultados, a medida que o intervalo de tempo cresce.

2.4 Modelo D-BIND

O modelo *D-BIND* (*Deterministic Bounding Interval Dependent*) [13] é definido da seguinte forma. Uma fonte j é descrita por uma curva $R_j(I)$ que representa a taxa limite da transmissão em qualquer intervalo de tempo de duração I. São definidos N pares da forma $(R_k, I_k)|_{k=1,2,...,N}$ de maneira que a função de restrição de tráfego é dada por uma função linear por partes, expressa por

$$FRT_{D-BIND}(t) = \frac{R_k I_k - R_{k-1} I_{k-1}}{I_k - I_{k-1}}(t - I_k) + R_k I_k, \quad I_{k-1} \leq t \leq I_k. \qquad (6)$$

O modelo fluido em duas dimensões difere do modelo *D-BIND* em relação à curva de restrição de tráfego pelo fato deste último resultar em uma função linear por partes não necessariamente côncava, o que possibilita uma modelagem mais acurada do tráfego alvo.

A figura 1(d) ilustra um exemplo de curva dada pela função de restrição de tráfego baseada no modelo *D-BIND*. Ao contrário do modelo *Discreto*, o modelo *D-BIND* não tem a taxa de crescimento da curva constante, o que leva a um resultado mais acurado.

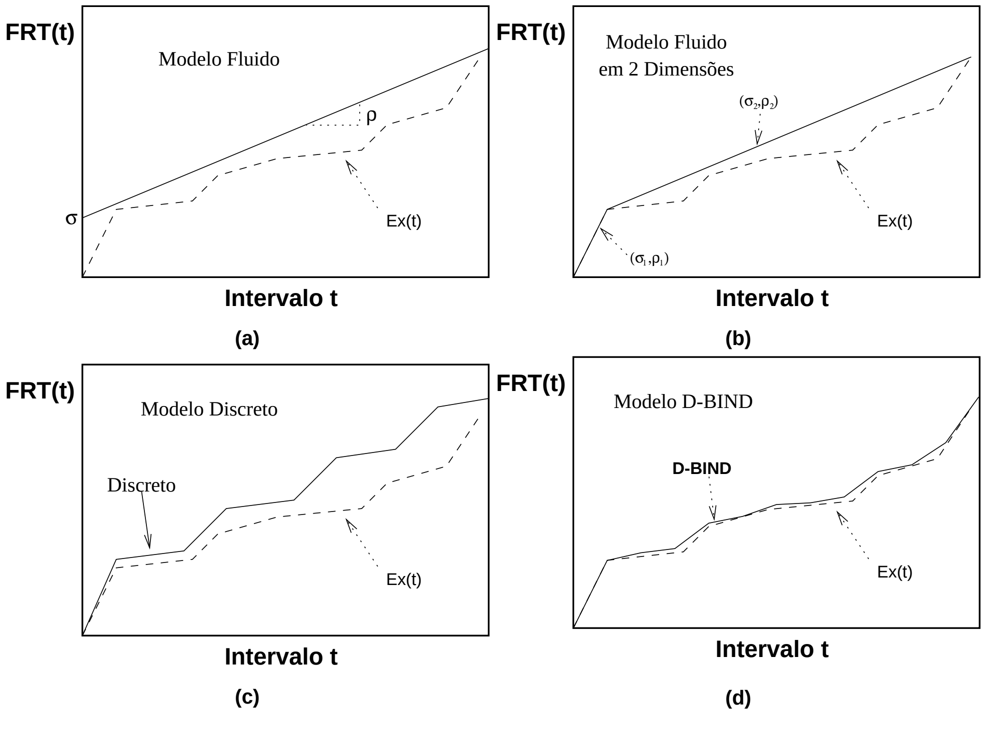

Figura 1: Função de Restrição de Tráfego para os modelos (a) Fluido, (b) Fluido em Duas Dimensões, (c) Discreto e (d) D-BIND.

3 Extrator de Parâmetros de Tráfegos

Tendo-se os traços de vídeo disponíveis, foram desenvolvidos e implementados extratores de parâmetros de tráfego para cada um dos modelo estudados. A cada modelo de tráfego corresponde um algoritmo particular. O extrator recebe como entrada os traços de vídeo e a função exata $Ex(t)$ e retorna os parâmetros do tráfego em um arquivo de saída.

Para o modelo *Discreto*, além do traço do vídeo (TR), é passado também como argumento da função o intervalo I da quádrupla $(X_{min}, X_{ave}, I, S_{max})$. O valor de S_{max} escolhido é 48 octetos, que corresponde ao campo de informações de uma célula ATM.

O algoritmo do modelo fluido em duas dimensões também recebe como entrada um segundo argumento, o tempo Υ. esta variável corresponde ao maior valor do intervalo de tempo utilizado para cálculo da função de restrição de tráfego. Assim, $FRT_{(\vec{\sigma},\vec{\rho})}$(t) é computada somente em $\forall t|0 \leq t \leq \Upsilon$.

O segundo argumento de entrada para o algoritmo do modelo *D-BIND* é o máximo valor que a diferença $I_n - I_{n-1}|_{\forall n}$ pode assumir.

Abaixo são apresentados pseudo-códigos para os extratores dos quatro modelos de tráfego trabalhados. O algoritmo para o modelo $(\vec{\sigma}, \vec{\rho})$ foi obtido de Knightly et al [7].

```
Procedure (σ,ρ) (TR)
  Ex=Calcula_Exata(TR)
  ρ = (Ex(t+δt) − Ex(t)) / δt
  σ = Ex(t + δt) − ρ(t + δt))
{δt eh maximo e }
{∀u, σ + ρu ≥ Ex(u)}
End
```

```
Procedure Discreto (TR,I)
  Ex=Calcula_Exata(TR)
  X_min = min { ΔT S_max / (Ex(t+ΔT) − Ex(t)) })
  X_ave = min { I S_max / (Ex(t+I) − Ex(t)) }
End
```

```
Procedure (σ⃗,ρ⃗) (TR, Υ)
  Ex=Calcula_Exata(TR)
  n=0
  τ = Υ
  While τ > 0 Do
   n=n+1
   σ_n = max { 1/(τ−t) (τEx(t) − tEx(τ)) }
   ρ_n = (Ex(τ) − σ_n) / τ
   τ = min{t|σ_n + ρ_n t) = Ex(t)}
  End
End
```

```
Procedure D-BIND (TR, I)
  Ex=Calcula_Exata(TR)
  n = 0
  τ = 0
  While !Fim Do
   n=n+1
   t = { τ ≤ t ≤ τ + I| (Ex(t) − Ex(τ))/(t−τ) |max }
   R_n = { Ex(t)/t }
   I_n = t
   τ = t
  End
End
```

4 Análise dos Resultados

Para analisar a acurácia dos modelos são usadas 21 amostras (tabela 1) de vídeo MPEG [14], uma vez que este tipo de tráfego é amplamente utilizado quando se deseja estudar os serviços do tipo VBR.

Um codificador MPEG gera três tipos de quadro: quadros I, que utilizam compressão intra-quadros, e quadros P e B, que utilizam compressão inter-quadros. A

Tabela 1: Taxa média e taxa de pico das amostras de vídeo.

Vídeo	*Taxa* Média (Mbps)	*Taxa* de Pico (Mbps)	*Vídeo*	*Taxa* Média (Mbps)	*Taxa* de Pico (Mbps)
1. asterix	0.49	3.24	12. race	0.68	4.45
2. atp	0.48	4.20	13. sbowl	0.52	3.10
3. bond	0.53	5.38	14. simpsons	0.41	5.29
4. dino	0.29	2.63	15. soccer1	0.60	4.12
5. lambs	0.16	2.95	16. soccer2	0.55	4.19
6. mbean	0.39	5.04	17. star	0.20	2.75
7. movie2	0.31	3.80	18. talk1	0.32	2.35
8. mtv1	0.54	5.04	19. talk2	0.39	2.92
9. mtv2	0.44	5.53	20. terminator	0.24	1.75
10. news1	0.36	4.23	21. video	0.02	1.02
11. news2	0.34	4.18			

diferença entre os quadros P e B consiste no fato do quadro P (*predicted frame*) ser codificado com base em um quadro passado, enquanto o quadro do tipo B (*bidirectional frame*) ser codificado com base tanto em um quadro passado quanto em um quadro de referência futuro. A característica em rajada de um vídeo MPEG vem da diferença entre os tamanhos dos quadros, causada pela alternância entre intra-quadros (maiores) e inter-quadros (menores), como ilustra a figura 2.

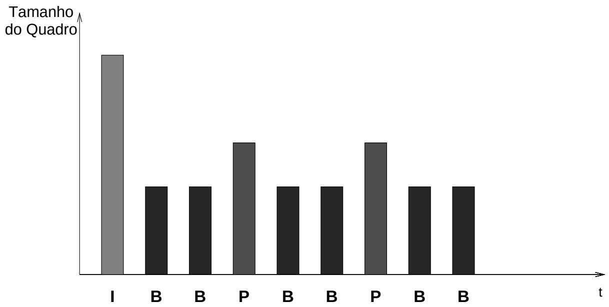

Figura 2: GOP (*Group of Pictures*) de um vídeo no padrão MPEG.

As amostras possuem as seguintes características em comum:

- GOP (*Group of Pictures*): IBBPBBPBBPBB;
- Codificação: 384x288 pels, 12 bits para informação de cor;
- Número de quadros: 40.000 (aprox. 30 min);
- Taxa de amostragem: 22 quadros por segundo.

A figura 3 ilustra traços de alguns dos vídeos selecionados. É interessante observar que mesmo sendo capturados sob as mesmas condições o resultado se mostra bastante diversificado. Devido à esta diversidade nos tráfegos, uma classificação em dois níveis foi feita: pertencem à classe I aqueles tráfegos que mantêm certa regularidade em suas características; à classe II são alocados os tráfegos que apresentam irregularidade ao longo do tempo (figura 4).

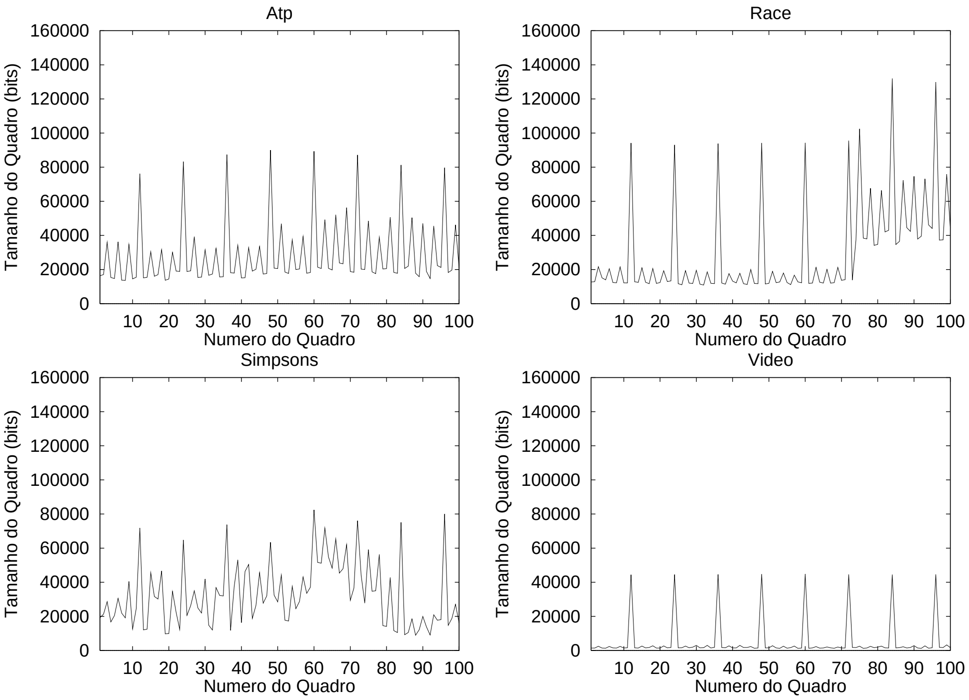

Figura 3: Exemplos de traços de vídeos MPEG.

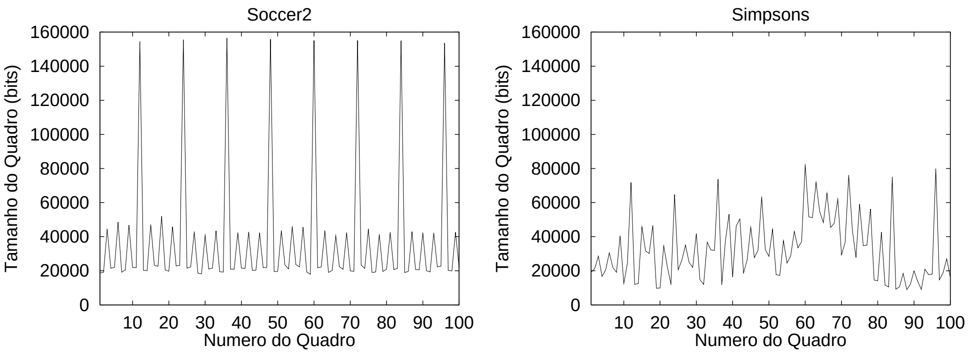

Figura 4: Tráfegos das classes I e II.

Os resultados da modelagem das amostras de vídeo estão ilustrados na figura 5. A acurácia dos modelos será obtida através do conceito de **Perda por Aproximação do Modelo** (PAM), que indica a porcentagem de perda de precisão do modelo em comparação à função extata Ex. A PAM é calculada a partir da diferença das áreas sob as curvas FRT do modelo e Ex. A tabela 2 mostra cada um dos traços de vídeo e os respectivos valores de PAM para os quatro modelos de tráfego. Para o modelo *Discreto* foram realizados testes com três valores diferentes para o intervalo I.

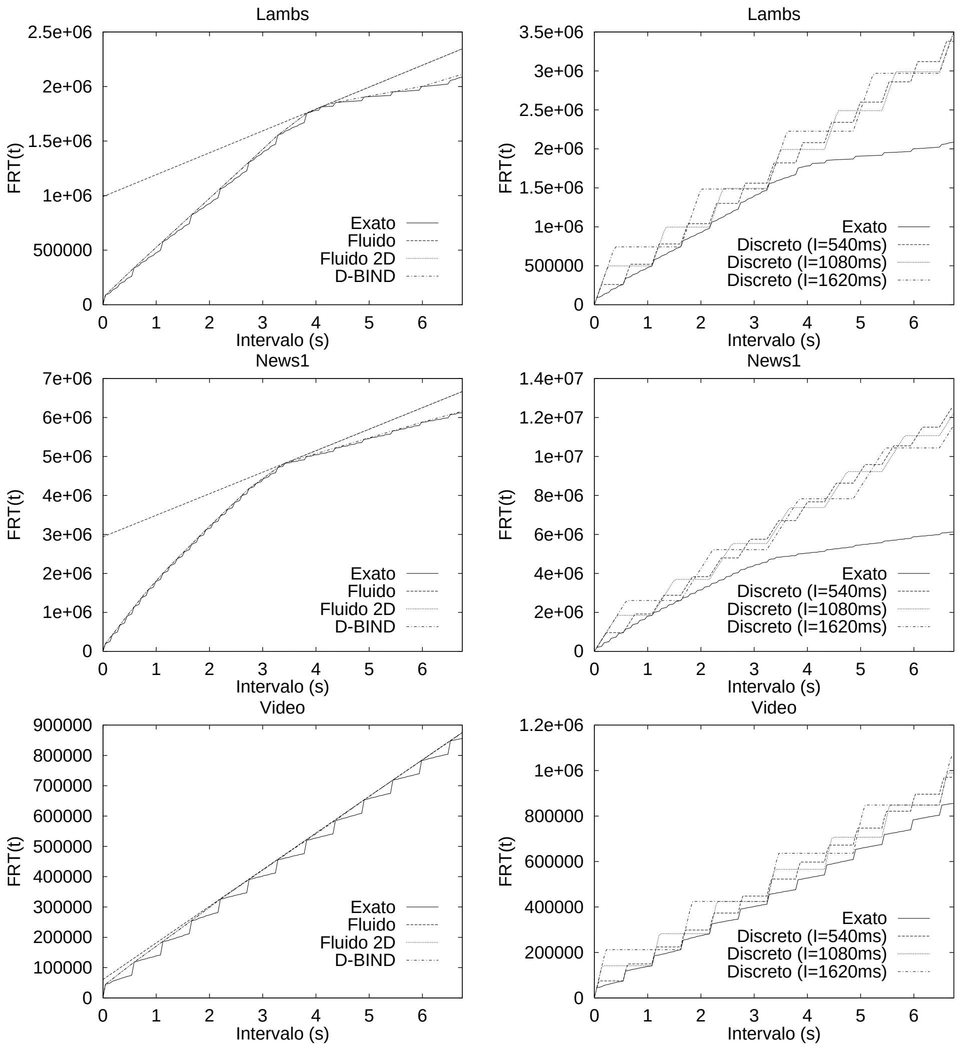

Figura 5: Exemplos de modelagem de alguns traços de vídeo.

A figura 6 ilustra graficamente os resultados contidos na tabela 2. No eixo horizontal estão os índices dos vídeos de acordo com a tabela 2.

Pode-se observar que os algoritmos (σ, ρ) e *Discreto* possuem em comum a característica da taxa de crescimento da função de restrição de tráfego ser sempre constante. Isto leva a uma modelagem de baixa qualidade para os vídeos da classe II. Como pode ser observado na figura 6, os tráfegos da classe I alcançam valores de PAM menores. Para o modelo *Discreto*, reduzir o valor de I contribuiria para aumentar a acurácia do modelo para intervalos pequenos de tempo, mas o tornaria cada vez mais disperso da função $Ex(t)$ com o crescimento do intervalo.

A taxa de crescimento variável das curvas de restrição de tráfego dos modelos $(\vec{\sigma}, \vec{\rho})$ e *D-BIND* é o ponto fundamental para a obtenção de valores de PAM menores que aqueles alcançados pelos modelos (σ, ρ) e *Discreto*. A figura 6 mostra que índices de PAM bastante reduzidos podem ser obtidos com os modelos $(\vec{\sigma}, \vec{\rho})$ e *D-BIND*. A vantagem do modelo $(\vec{\sigma}, \vec{\rho})$ sobre o modelo *D-BIND* recai sobre a simplicidade de extração dos parâmetros e policiamento do tráfego, que pode ser feito com uma cadeia em série de baldes-furados. Esta vantagem se torna ainda mais significativa no modelo (σ, ρ), sendo recomendado na caracterização de tráfegos pertencentes à classe I.

Tabela 2: Perda por Aproximação do Modelo para cada um dos modelos.

	Perda por Aproximação do Modelo (%)					
Vídeo	(σ, ρ)	$(\vec{\sigma}, \vec{\rho})$	Discreto I=540ms	Discreto I=1080ms	Discreto I=1620ms	D-BIND
1. asterix	25.02	5.50	51.41	56.56	57.23	1.81
2. atp	9.31	1.02	17.76	18.07	21.54	1.02
3. bond	44.03	2.17	31.75	26.24	29.89	1.48
4. dino	15.68	2.50	49.27	45.39	32.10	2.05
5. lambs	30.56	3.43	20.31	23.47	31.62	2.24
6. mbean	17.70	1.26	33.40	34.26	37.88	1.00
7. movie2	9.26	3.73	80.75	63.84	64.20	1.13
8. mtv1	13.43	1.44	75.44	67.49	61.44	1.44
9. mtv2	9.21	1.78	30.14	36.27	35.45	1.32
10. news1	23.35	2.44	42.85	45.38	45.19	1.07
11. news2	7.45	2.57	33.67	38.29	40.58	2.48
12. race	48.96	0.65	24.36	22.04	23.48	0.60
13. sbowl	4.51	1.04	19.51	22.55	25.30	0.96
14. simpsons	7.91	1.03	55.76	44.29	36.62	0.95
15. soccer1	4.62	2.91	28.30	28.98	31.88	1.11
16. soccer2	2.97	2.34	31.62	27.19	28.70	1.97
17. star	18.41	2.08	22.81	26.40	31.02	2.06
18. talk1	14.93	2.99	17.53	22.73	27.33	1.16
19. talk2	3.09	2.31	25.29	23.20	24.57	2.06
20. terminator	9.26	2.59	41.86	35.42	38.88	1.17
21. video	6.80	5.42	13.49	16.08	26.02	5.18

5 Comentários Finais

Este artigo apresentou comparações entre quatro modelos determinísticos de tráfego em vinte e um traços de vídeo no padrão MPEG com as mais diversas características.

Foram desenvolvidos algoritmos extratores de parâmetros de tráfego para cada um dos modelos explorados e analisou-se a eficiência de cada modelo no que se refere à acurácia de representação. Com o conceito de Perda por Aproximação do Modelo, os modelo $(\vec{\sigma}, \vec{\rho})$ e D-BIND se mostraram mais eficientes que os modelos

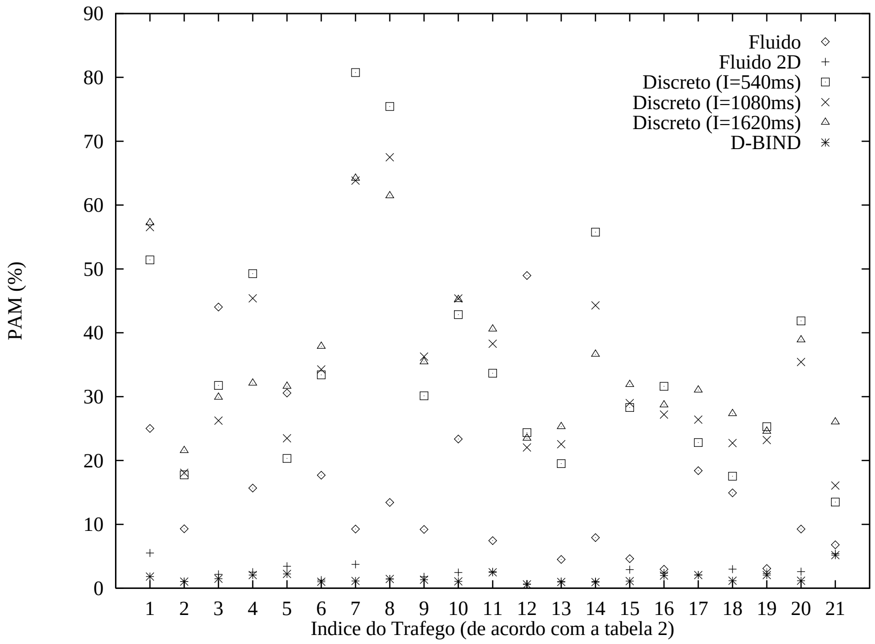

Figura 6: Perda por Aproximação dos diferentes modelos para as seqüências de vídeos MPEG definidas.

(σ, ρ) e *Discreto*. Este trabalho permitiu classificar os modelos quanto à capacidade de cada um em caracterizar fontes de vídeo VBR, de forma que, ponderando-se complexidade e acurácia, se alcance resultados satisfatórios.

Os resultados mostram que os modelos *D-BIND* e $(\vec{\sigma}, \vec{\rho})$ atingem índices de acurácia maiores que os modelos *Discreto* e (σ, ρ). Isso se deve ao fato destes modelos terem os parâmetros calculados sobre uma variedade de intervalos de tempo. Entretanto, o poder computacional exigido para os cálculos necessários na extração dos parâmetros é maior. Em todos eles, a carga principal de processamento fica por conta do cálculo da função $Ex(t)$ como base para se determinar os parâmetros do tráfego. Um novo modelo em desenvolvimento no GTA/UFRJ procura eliminar esta etapa em muitos casos, reduzindo sensivelmente o tempo de computação.

Referências

[1] E. W. Knightly, "H-BIND: A new approach to providing statistical performance guarantees to VBR traffic", in *IEEE INFOCOM'96*, San Francisco, CA, março 1996.

[2] E. W. Knightly, R. F. Mines e H. Zhang, "Deterministic characterization and network utilizations for several distributed real-time applications", in *IEEE WORDS'94*, Dana Point, CA, outubro 1994.

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

[4] J. Liebeherr, D. E. Wrege e D. Ferrari, "Exact admission control for networks with a bounded delay service", *IEEE/ACM Transactions on Networking*, pp. 885–901, dezembro 1996.

[5] P. Pancha e M. E. Zarki, "A look at the MPEG video coding standard for variable bit rate video transmission", *IEEE INFOCOM'92*, maio 1992.

[6] D. L. Gall, "MPEG: A video compression standard for multimedia applications", *Communications of the ACM*, pp. 305–313, abril 1991.

[7] E. W. Knightly, D. E. Wrege, J. Liebeherrand e H. Zhang, "Fundamental limits and tradeoffs of providing deterministic guarantees to VBR video traffic", in *ACM Sigmetrics*, Ottawa, Canada, maio 1995.

[8] 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*, pp. 352–362, junho 1996.

[9] M. F. Abdalla, "Análise de mecanismos de controle de admissão de conexão para redes ATM", Tese de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, PEE/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, setembro 1996.

[10] R. L. Cruz, "A calculus for network delay, part I: Network elements in isolation", *IEEE Transactions on Information Theory*, pp. 114–121, janeiro 1991.

[11] R. L. Cruz, "A calculus for network delay, part II: Network analysis", *IEEE Transactions on Information Theory*, pp. 121–141, janeiro 1991.

[12] D. Ferrari e D. Verma, "A scheme for real-time channel stablishment in wide-area networks", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, pp. 368–379, abril 1990.

[13] E. Knightly e H. Zhang, "Traffic characterization and switch utilization using a deterministic bounding interval dependent traffic model", in *IEEE INFOCOM'95*, Boston, MA, abril 1995.

[14] O. Rose, "Statistical properties of MPEG video traffic and their impact on traffic modelling in ATM systems", *Institute of Computer Science, Univ. of Wurzburg, Germany, Tech. Rep. 101*, fevereiro 1995.