VÍDEO MPEG SOBRE SERVIÇOS DIFERENCIADOS

Artur Ziviani[1,2], José F. de Rezende[2], Otto Carlos M. B. Duarte[2] e Serge Fdida[1]

[1] LIP6 – Université Pierre et Marie Curie
4, place Jussieu
75252 - Paris Cedex 05 - France

[2] Grupo de Teleinformática e Automação – GTA
Universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPE/EE
Caixa Postal 68504 - 21945-970 - Rio de Janeiro - RJ - Brasil

Resumo— **A larga adoção do formato MPEG torna-o um meio atraente de distribuição de áudio e vídeo pela Internet. No entanto, a qualidade percebida por um usuário de uma transmissão de vídeo pode ser fortemente degradada por descartes indiscriminados de pacotes sob o modelo de melhor esforço. A arquitetura de Diferenciação de Serviços (DS) propõe-se a superar as limitações de provisão de Qualidade de Serviço (*Quality of Service* - QoS) do modelo de melhor esforço adotado pela Internet atual. Este artigo avalia o quanto um mecanismo DS pode melhorar a qualidade de entrega de fluxos de vídeo MPEG. Adota-se um mecanismo de diferenciação de descarte para evitar um efeito de propagação de erros de um pacote descartado na estrutura hierárquica de sistemas MPEG. Os resultados mostram que o mecanismo de diferenciação de descarte melhora a qualidade de entrega dos fluxos MPEG enquanto evita o desperdício de recursos da rede, mesmo em condições de alta carga.**

Abstract— The widely adoption of the MPEG format turns it into an attractive way for the distribution of audio and video over the Internet. Nevertheless, the quality perceived by an user of a video transmission may be strongly degradated by undiscriminated discards of packets under the best-effort model. The Differentiated Services (DS) architecture proposes to overcome the limitations for Quality of Service (QoS) provisioning of today's best-effort Internet. This paper evaluates how much a DS mechanism can improve the delivery quality of MPEG video streams. We use a drop differentiation mechanism to avoid an error propagation effect of a dropped packet in the hierarchical structure of MPEG systems. Results show that the drop differentiation mechanism improves the delivery quality of MPEG video streams while avoiding the waste of network resources, even under heavy load conditions.

1 INTRODUÇÃO

O modelo de melhor esforço da Internet atual torna-se inadequado frente à diversidade de requisitos de Qualidade de Serviço (*Quality of Service* - QoS) das novas aplicações multimídia [1]. Diversas destas novas aplicações multimídia são baseadas na entrega de conteúdo de mídias contínuas [2]. No caso de uma transmissão de vídeo sobre uma rede de pacotes, como a Internet, ambos os processos de codificação e de transmissão afetam a QoS [3]. Os fluxos de vídeo são tipicamente comprimidos antes de serem enviados pela rede. A eficiência da compressão, contudo, depende da dinâmica do vídeo assim como da técnica de compressão utilizada. Para um vídeo com qualidade constante, o codificador de vídeo produz uma seqüência de quadros comprimidos de tamanhos variados. Assim, a saída do codificador constitui um fluxo VBR (*Variable Bit Rate*). A transmissão de fluxos de vídeo codificados em VBR, enquanto garantindo um determinado nível de QoS, mostra-se um problema desafiador [4, 5].

Artur Ziviani é bolsista da CAPES.
Este trabalho foi realizado com recursos da FUJB, CNPq e CAPES/COFECUB.

Atualmente, diferentes abordagens para o problema de prover um suporte com QoS para a transmissão de fluxos de aplicações com diferentes requisitos de QoS encontram-se em desenvolvimento. Pode-se citar as aplicações adaptativas [6, 7], o roteamento baseado em QoS [8, 9] e a arquitetura de Diferenciação de Serviços (DS) [10]. A proposta DS provê serviços discriminados de forma escalável, pois não há a necessidade nem de um estado por fluxo nem de sinalização a cada salto. O tratamento oferecido por um nó compatível com a proposta DS é aplicado a uma agregação de fluxos relacionados e não a fluxos individuais.

Embora artigos recentes [11, 12, 13] analisem diferentes aspectos de serviços diferenciados, a transmissão de tráfego de vídeo sobre uma rede DS permanece pouco explorada. Esta afirmação torna-se especialmente verdadeira para a transmissão de fluxos de vídeo baseados na codificação MPEG-4, que tem sido destacada como um futuro padrão para aplicações de vídeo interativo em redes [14]. Em [15] é sugerido o uso de filtros em alguns nós no interior da rede para descartar seletivamente quadros de fluxos MPEG. O fluxo de vídeo MPEG, contudo, precisa ser parcialmente decodificado a cada nó de filtragem. Tal abordagem introduz atrasos que podem tornar inviável uma aplicação interativa e também pode apresentar problemas de escalabilidade. Um mecanismo de encaminhamento de pacotes de vídeo baseado no conteúdo dos pacotes e em uma classificação de prioridade relativa que é mapeada em um mecanismo de diferenciação de taxas de perda é proposto em [16]. No entanto, a classificação de prioridade relativa deve ser calculada para cada pacote, o que também pode suscitar problemas para aplicações interativas.

Este artigo avalia como uma rede DS pode suportar o encaminhamento de fluxos de vídeo comprimidos sob a codificação MPEG-4, provendo uma diferenciação de descarte de pacotes visando melhorar a qualidade de entrega destes fluxos de vídeo. Neste contexto, a abordagem para o tratamento das condições dinâmicas da rede localiza-se no interior da própria rede, como sugerido em [17]. Em uma situação de congestionamento, a rede pode descartar um pacote de um fluxo de vídeo. A falta de informação ocasionada pelo descarte de um pacote pode propagar-se por um certo número de quadros devido à estrutura hierárquica dos sistemas MPEG que geram pacotes de importância desigual. Portanto, para a melhoria da qualidade de entrega do fluxo de vídeo, o objetivo torna-se proteger de descartes indiscriminados os pacotes que contenham informações mais relevantes, evitando-se assim os efeitos de propagação de erro na seqüência de vídeo. Usando este esquema, pretende-se melhorar a transferência de informação mais relevante dada a banda passante disponível em comparação com o atual modelo de melhor esforço da Internet. Através de simulações mostra-se que tal esquema pode melhorar a qualidade de entrega de fluxos de vídeo MPEG-4 enquanto reduz o desperdício de recursos de rede no transporte de dados que tornam-se inúteis ao decodificador.

O restante do artigo está organizado como descrito a seguir. A seção 2 fornece algumas características de fluxos de vídeo MPEG. Na seção 3, descreve-se como um mecanismo de diferenciação de descarte de pacotes pode ser aplicado em fluxos de vídeo MPEG. A seção 4 apresenta as métricas de avaliação adotadas e os resultados de simulação obtidos. Algumas considerações finais são discutidas na seção 5.

2 FLUXOS DE VÍDEO MPEG

O formato MPEG codifica um vídeo como uma seqüência de quadros [18]. Usualmente, um vídeo possui um alto grau de redundância temporal, isto é, a informação em quadros sucessivos é altamente correlacionada. Os codificadores MPEG padrão geram três tipos de quadros comprimidos (I, P ou B). Na terminologia MPEG-4, cada quadro é equivalente a um VOP (*Video Object Plane*) [19]. Um quadro I é intracodificado, não possuindo nenhuma dependência de qualquer outro quadro. Duas técnicas de predição de movimento são utilizadas: a predição em avanço (*forward prediction*), onde usa-se um quadro prévio como referência para a decodificação do quadro atual, e a predição bidirecional, onde tanto quadros passados e futuros são usados como referência. Essa última técnica proporciona uma melhor compressão. A codificação de quadros P usa a predição em avanço e a codificação de quadros B usa a predição bidirecional. Como conseqüência, os quadros I normalmente são os maiores em tamanho, seguidos pelos quadros P e, finalmente, pelos quadros B. Como a taxa de transmissão de quadros é constante e os quadros possuem tamanhos variados, a taxa de saída de um codificador MPEG forma uma seqüência VBR.

A seqüência de vídeo pode ser decomposta em unidades menores que são codificadas em conjunto. Tais unidades são chamadas GOPs (*Group of Pictures*). Cada GOP contém um conjunto de quadros que estão em um ordem de exibição contínua. Normalmente, os GOPs são criados de forma a serem independentemente decodificáveis para facilitar um acesso aleatório. Tais GOPs são chamados de GOPs fechados, pois estes possuem todos os parâmetros relevantes de decodificação para que possam ser decodificados independentemente das demais unidades. Se um GOP precisa de outros GOPs para ser decodificado, ele é chamado de GOP aberto.

O padrão do GOP especifica o número e a ordem temporal de quadros P e B entre dois quadros I consecutivos. Tal padrão de GOP pode ser caracterizado por dois parâmetros: a distância de quadros I-a-I (N) e a distância de quadros I-a-P (M). Neste artigo, é utilizado um arquivo de traço MPEG-4 fornecido por [19], onde todos os elementos presentes em cada cena inteira são considerados como um único objeto de vídeo. O traço utilizado compõe-se de unidades de GOP abertas com $N = 12$ e $M = 3$. Essa estrutura e a dependência de decodificação de cada quadro no GOP são ilustradas na figura 1.

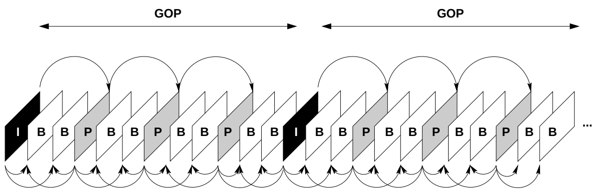


Fig. 1. Estrutura do GOP do arquivo de traço MPEG-4.

A estrutura hierárquica da codificação MPEG, permitindo uma possível propagação de erros através dos quadros, impõe uma grande dificuldade em enviar fluxos de vídeo MPEG por redes suscetíveis a perdas. Baixas taxas de perda de pacotes podem traduzir-se em taxas de perda de quadros bem mais altas. Por exemplo, uma taxa de perda de pacotes de 3% pode traduzir-se em uma taxa de erro de quadro de 30% [20]. Caso um quadro I ou P não seja considerado decodificável, todos os quadros dos quais eles dependam também não são considerados decodificáveis. Logo, um quadro I ou P incorreto propaga erros a todos os quadros dependentes e os corrompem também. No pior caso, um GOP inteiro pode ser considerado não decodificável devido a um quadro I incorreto, pois todos os outros quadros do GOP dependem direta ou indiretamente do quadro I. Assim, os efeitos de um quadro I não decodificável em um GOP com $N = 12$ persistirão por 12 quadros, ou quase 500 ms em uma taxa de quadros típica de 25 quadros por segundo, o que pode ser bastante perturbador para o usuário final.

3 DIFERENCIAÇÃO DE SERVIÇOS PARA VÍDEOS MPEG

Visando melhorar a transferência de informação mais relevante, associam-se diferentes níveis de precedência de descarte aos pacotes que carregam informação de quadros diferentes. Sob este esquema, uma precedência crescente de descarte é associada a pacotes de quadros I, P ou B, respectivamente. Assim, os pacotes transportando fragmentos de um quadro B estão mais suscetíveis a serem descartados em um roteador congestionado do que os pacotes de quadros P. Enquanto isto, os pacotes de quadros P possuem uma maior precedência de descarte quando comparados com os pacotes de quadros I.

Um mecanismo RED [21, 22] de múltiplos níveis fornece a discriminação de descarte necessária. Neste artigo, adota-se um mecanismo RED de três níveis, aqui chamado de REDN3. Os pacotes que contém dados de cada tipo de quadro são associados a um nível diferente no mecanismo REDN3. Os três níveis são rotulados de vermelho, amarelo ou verde em uma ordem decrescente de prioridade de descarte. Assim, um pacote de um quadro I é marcado como verde, um pacote de um quadro P como amarelo e, finalmente, um pacote de um quadro B como vermelho. O conjunto de parâmetros do REDN3 inclui um limite mínimo, um limite máximo e uma probabilidade de descarte máxima (min, max, $Pmax$) para cada nível (vermelho, amarelo ou verde). Ajustando os diferentes conjuntos de parâmetros pode-se fornecer diferentes taxas de descarte de pacote para cada nível como ilustrado na figura 2. A curva para o rótulo verde fornece uma menor probabilidade de descarte do que a curva rotulada como amarela, que por sua vez fornece uma menor probabilidade do que a curva rotulada como vermelha.

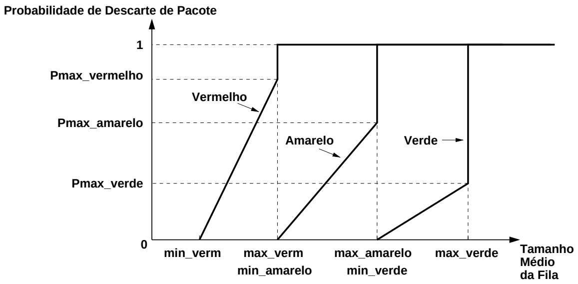


Fig. 2. Parâmetros de um mecanismo REDN3.

4 RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

O modelo de simulação adotado foi implementado em uma versão modificada do simulador ns-2 [23]. A avaliação de desempenho é executada através de simulações no cenário de rede apresentado na figura 3. Uma fonte de vídeo gera pacotes baseada em um arquivo de traço MPEG-4 disponível publicamente [24]. Os quadros são codificados em unidades de GOP aberto com $N = 12$ e $M = 3$. Os detalhes da geração dos arquivos de traço são descritos em [19]. Neste artigo, foi usada a seqüência do filme Starwars-IV, codificada com alta qualidade e no formato MPEG-4, com taxa média de 0,28 Mbps e taxa de pico de 1,9 Mbps. Cada quadro é fragmentado em pacotes de 200 octetos. Os pacotes de vídeo são transmitidos do nó V0 ao nó V1. Um certo número de fontes TCP distribui-se uniformemente entre os nós T0, T1 e T2, e envia pacotes aos nós D0, D1 e D2, respectivamente. As fontes TCP usam a implementação TCP-Reno. O tráfego de concorrência TCP é gerado por aplicações FTP, que permanecem ativas durante toda a simulação utilizando pacotes de 1500 octetos.

Os roteadores R0, R1 e R2 usam ou o clássico Drop Tail ou o mecanismo RED de três níveis para gerenciamento ativo de filas. Os parâmetros dos limites mínimo e máximo do mecanismo REDN3 para os três diferentes níveis são configurados como percentagens do tamanho total da fila ($qlen$), que permanece equivalente a 50 pacotes. Os parâmetros REDN3 adotados nas simulações são ($0.2 * qlen$, $0.4 * qlen$, 0.1)[1], ($0.4 * qlen$, $0.6 * qlen$, 0.05) e ($0.6 * qlen$, $0.8 * qlen$, 0.025) para pacotes vermelhos, amarelos e verdes, respectivamente. Esse conjunto de parâmetros divide a fila em faixas iguais e discrimina pacotes vermelhos, progressivamente evitando o descarte de pacotes amarelos e verdes. Os pacotes dos fluxos TCP são considerados como pacotes vermelhos.

[1] $(min, max, Pmax)$

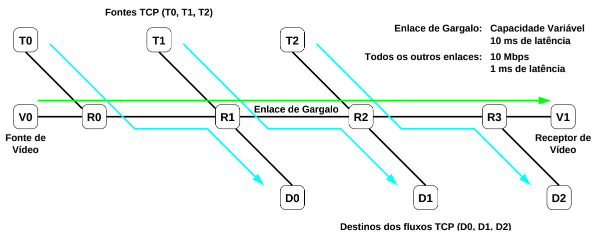


Fig. 3. Cenário de rede.

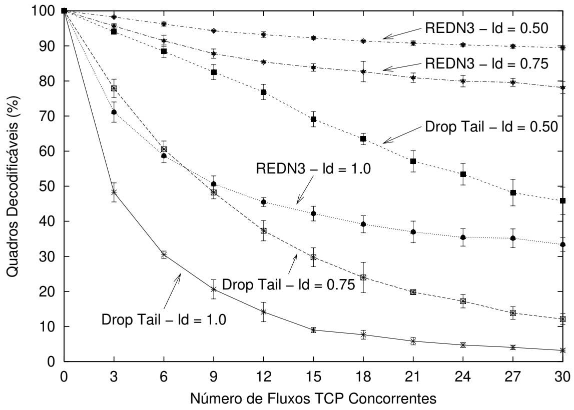
4.1 Métricas de Avaliação

O critério adotado para considerar um quadro decodificável é definido como a seguir. No mínimo uma fração fixa ld (limite de decodificação) dos dados de cada quadro precisa ser recebida para que o quadro seja considerado decodificável. Além disto, considera-se um quadro decodificável se e somente se todos os quadros dos quais ele dependa sejam também considerados decodificáveis. Portanto, quando $ld = 1.0$, o decodificador torna-se completamente intolerante a perdas, isto é, um único pacote perdido é suficiente para que um quadro inteiro seja considerado não decodificável. Da mesma maneira, para $ld = 0.75$, até 25% dos dados de um quadro podem estar ausentes devido às perdas na rede que ainda assim o quadro é considerado decodificável. Este critério permite a consideração de um certo número de características de mascaramento de erros presentes no formato MPEG-4 [14, 25]. Tais características permitem que um sistema tolere perdas na rede até um determinado nível e ainda reproduza fluxos de vídeo com a melhor qualidade possível.

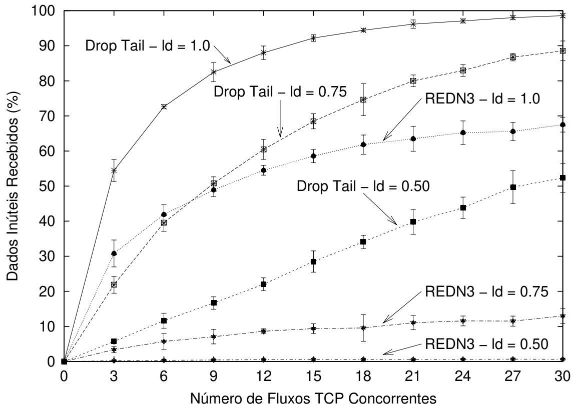
O esquema REDN3 é comparado com o Drop Tail clássico encontrado na Internet atual. Para avaliar a transmissão de um fluxo de vídeo MPEG-4 sobre o cenário de rede adotado, consideram-se as seguintes métricas: as frações de quadros decodificáveis e de dados inúteis recebidos. A fração de quadros decodificáveis representa o número de quadros decodificáveis sobre o número total de quadros enviados pela fonte de vídeo. A fração de dados inúteis recebidos indica a quantidade de dados recebidos que são inúteis ao decodificador em relação ao total de dados recebidos. O decodificador pode ter dados inúteis de quadros parcialmente recebidos ou de quadros que não podem ser decodificados pois estes dependem de outros quadros considerados não decodificáveis. Mede-se o *goodput* dos fluxos TCP para verificar como estes são afetados pelo gerenciamento de filas Drop Tail ou REDN3 nos roteadores intermediários. Todos os resultados são apresentados com intervalos de confiança de 99%.

4.2 Número de Fontes Concorrentes

O primeiro conjunto de experimentos avalia a transmissão de um fluxo de vídeo MPEG-4 através do cenário de rede enquanto um número variável de conexões TCP atua como tráfego concorrente. A capacidade do enlace de gargalo mantém-se fixa em 1,024 Mbps. As fontes TCP são distribuídas uniformemente entre os nós T0, T1 e T2. Logo, um terço delas compete com o fluxo de vídeo por banda passante no enlace de gargalo. A qualidade de entrega do fluxo de vídeo é comparada quando usando o mecanismo REDN3 e o Drop Tail para diferentes valores de limite de decodificação (ld).



(a) Quadros decodificáveis



(b) Dados inúteis recebidos

Fig. 4. Variando o número de fluxos TCP concorrentes.

Conforme o número de conexões TCP aumenta, a percentagem de quadros decodificáveis é seriamente degradada quando o Drop Tail é utilizado, como mostrado na figura 4(a). Mesmo com $ld = 0.50$, onde o receptor tolera a perda de até 50% da informação de cada quadro, existe uma degradação significativa na qualidade do vídeo entregue. Este comportamento deve-se aos descartes de pacotes causados pelo Drop Tail serem indiscriminados. As perdas de pacotes referentes a um quadro P ou I podem tornar outros quadros não decodificáveis, degradando fortemente a qualidade percebida. Enquanto isto, o mecanismo REDN3 atua de forma mais eficiente e fornece uma degradação mais suave na qualidade de entrega do vídeo quando enfrentando condições de alta carga, especialmente se o sistema tolera algumas perdas ($ld = 0.75$ ou $ld = 0.50$). A figura 4(b) mostra que um grande volume de recursos de rede podem ser desperdiçados pelo uso do Drop Tail. Como o mecanismo REDN3 melhora a percentagem de quadros decodificáveis, ele diminui o desperdício de recursos de rede ao privilegiar as informações mais relevantes que evitarão a inutilização de dados no decodificador. Esse efeito enfatiza-se fortemente quando tolera-se uma determinada quantidade de perdas.

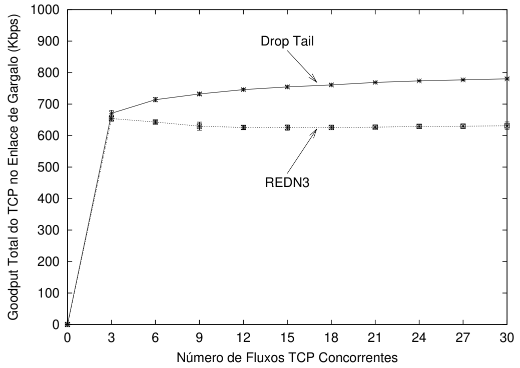
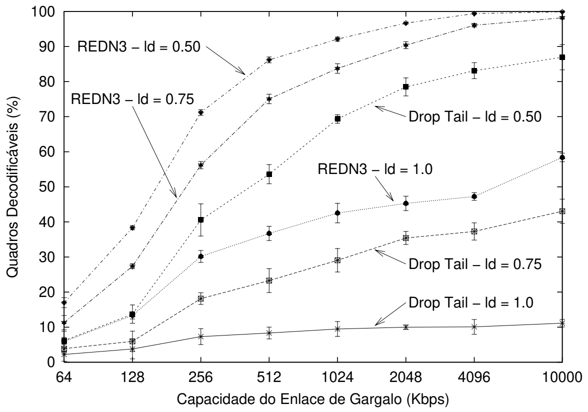


Fig. 5. *Goodput* total dos fluxos TCP no enlace de gargalo.

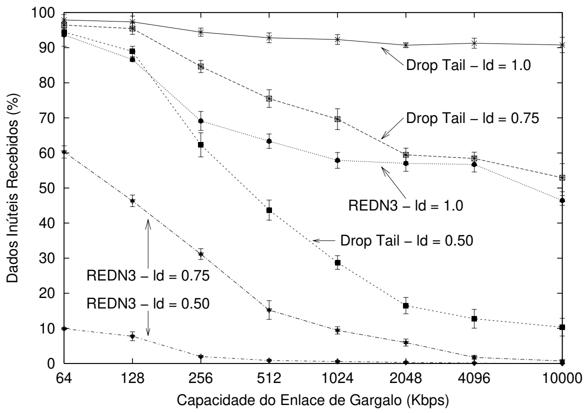
O fornecimento de uma taxa de perdas menor para pacotes que transportem informação de quadros P ou I evita o desperdício de recursos de rede e melhora a percentagem de quadros decodificáveis. Alcança-se este resultado pela penalização das conexões TCP que compartilham enlaces com o fluxo de vídeo. Tal efeito é mostrado na figura 5, que apresenta o *goodput* total das conexões TCP no enlace de gargalo. Usando REDN3, o *goodput* total do TCP é menor do que sob o Drop Tail. Assim, impondo uma pequena penalidade no *goodput* das conexões TCP pode-se obter um ganho significativo na entrega de informação relevante do fluxo de vídeo.

4.3 Capacidade do Enlace de Gargalo

O segundo conjunto de experimentos avalia o desempenho do REDN3 e do Drop Tail com diferentes capacidades de gargalo. Existem 15 conexões TCP concorrentes, 5 em cada nó fonte do TCP. Em uma situação de banda passante escassa, a qualidade de entrega do fluxo de vídeo é significativamente afetada, mesmo para baixos valores de ld como mostrado na figura 6(a). Conforme mais banda passante torna-se disponível, o mecanismo REDN3 aproveita melhor o crescente volume de recursos. Quando a banda passante disponível no enlace de gargalo aproxima-se de 10 Mbps (onde não há efetivamente gargalo algum), o REDN3 fornece mais de 95% de quadros decodificáveis para $ld = 0.75$. Deve-se ressaltar que sob as mesmas condições, o Drop Tail fornece aproximadamente apenas 45%. Os descartes indiscriminados do Drop Tail impõem uma grande degradação na qualidade de entrega do fluxo de vídeo.



(a) Quadros decodificáveis



(b) Dados inúteis recebidos

Fig. 6. Variando a capacidade do enlace de gargalo.

Para enlaces de baixa capacidade, há um grande desperdício de recursos de rede quando usando o Drop Tail, pois os poucos pacotes que conseguem alcançar o receptor não são suficientes para decodificar muitos quadros, mesmo com $ld = 0.50$ como mostrado na figura 6(b). Conforme mais banda passante torna-se disponível, a tolerância a perdas melhora o desempenho do Drop Tail. No entanto, o REDN3 evita o desperdício de recursos de rede por proteger os pacotes que transportam informação mais relevante. Sob o REDN3, os descartes de pacotes ocorrem principalmente com pacotes de quadros B, que são tipicamente menores. Isto justifica porque, com uma baixa capacidade no enlace de gargalo, o REDN3 apresenta uma baixa percentagem de quadros decodificáveis, mas também uma baixa percentagem de dados inúteis recebidos para $ld = 0.50$. Um grande número de quadros B são considerados não decodificáveis, o que diminui a percentagem de quadros decodificáveis. Contudo, a quantidade de dados inúteis recebidos que compõe quadros B não decodificáveis é pequena quando comparada com o total de dados recebidos, pois os quadros B são normalmente menores em tamanho.

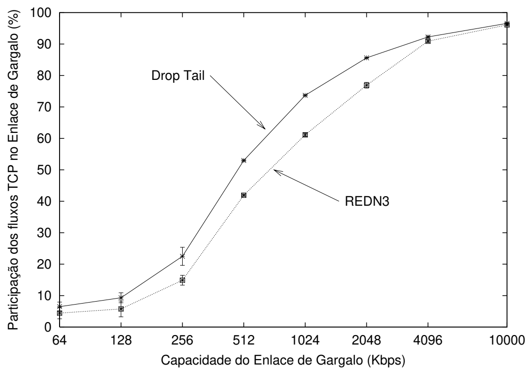


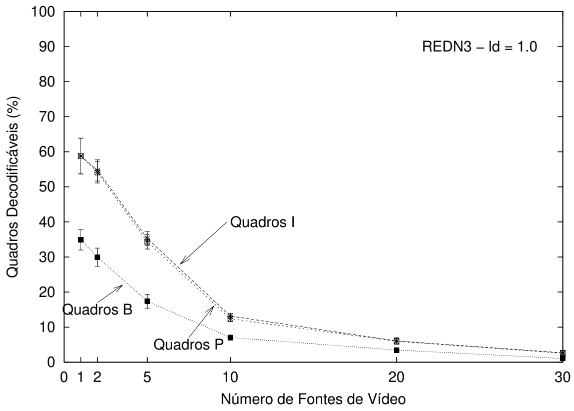
Fig. 7. Participação dos fluxos TCP no enlace de gargalo.

O preço do melhor desempenho do esquema REDN3 é pago pelas conexões TCP que recebem um acesso restrito à banda passante disponível. A figura 7 apresenta a participação na banda passante obtida pelas conexões TCP no enlace de gargalo. A proteção oferecida aos pacotes de quadros I e P impõe mais perdas às conexões TCP e, como conseqüência, elas reduzem suas taxas de transmissão. Logo, as conexões TCP obtém uma participação menor na banda passante disponível no enlace de gargalo quando usando o mecanismo REDN3.

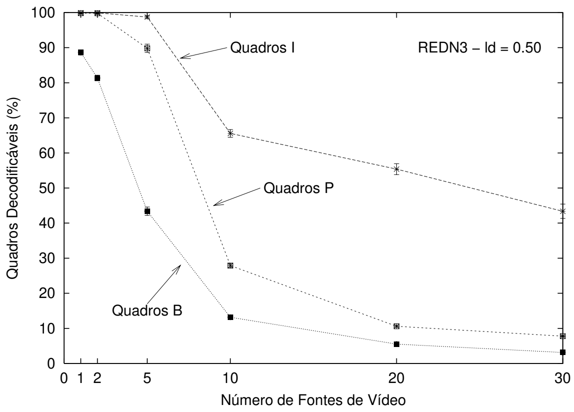
4.4 Múltiplas Fontes de Vídeo

No próximo conjunto de experimentos, observa-se a qualidade de entrega de um fluxo de vídeo de referência enquanto um número de outros fluxos de vídeo também utiliza o mecanismo REDN3. Em outras palavras, há pacotes marcados como amarelos ou verdes compartilhando os mesmos enlaces no cenário de rede que não pertencem ao fluxo de vídeo que está sendo avaliado. A capacidade do enlace de gargalo é mantida em 1,024 Mbps e existem 15 conexões TCP concorrentes. O número de fontes de vídeo varia de 1 a 30. Todas as fontes de vídeo usam o mesmo arquivo de traço Starwars-IV com tempos de início aleatórios para evitar transmissões sincronizadas. A figura 8 mostra a percentagem de quadros decodificáveis para os diferentes tipos de quadros, considerando dois níveis de tolerância a perdas, representados por $ld = 1.0$ e $ld = 0.50$.

Como os pacotes de quadros B competem diretamente contra os fluxos TCP concorrentes e possuem a maior precedência de descarte, os quadros B apresentam o pior desempenho, como esperado. A figura 8(a) mostra, que para um sistema intolerante a perdas ($ld = 1.0$), os quadros P e I apresentam um desempenho similar, pois o descarte de um único pacote torna um quadro inteiro não decodificável. Sob um sistema que tolera um certo número de perdas de pacotes ($ld = 0.50$), os diferentes tipos de quadros obtém desempenhos significativamente diferentes. Este resultado deve-se à proteção progressiva contra descartes encontrada pelos pacotes dos quadros B, P e I fornecida pelo mecanismo REDN3.



(a) $ld = 1.0$



(b) $ld = 0.50$

Fig. 8. Variando o número de fontes de vídeo.

5 CONCLUSÃO

Neste artigo foi avaliado o desempenho de um mecanismo de diferenciação de descarte que evita a propagação de erros através da estrutura hierárquica do formato de codificação MPEG. A melhora na qualidade de entrega foi obtida pela imposição ao tráfego TCP de uma maior taxa de perdas e, como conseqüência, de um menor *goodput*. Os resultados de simulação mostraram que o esquema sob estudo provê um simples, mas bastante eficiente, método para melhorar a qualidade de entrega de fluxos de vídeo MPEG-4 enquanto reduzindo o desperdício de recursos de rede, mesmo sob condições de alta carga. Por exemplo, a partir da figura 4(a), em um sistema que tolera algumas perdas ($ld = 0.75$) e sob condições de alta carga, verificou-se que o mecanismo de diferenciação de descarte estudado forneceu uma percentagem de quadros decodificáveis que manteve-se em torno de 80%. A mesma métrica sob o mecanismo de Drop Tail degradou continuamente até aproximadamente 10% dentro da mesma faixa de condições de carga simuladas.

6 REFERÊNCIAS

[1] L. Mathy, C. Edwards e D. Hutchison, "The Internet: A global telecommunications solution?", *IEEE Network*, vol. 14, no. 4, pp. 46–57, julho 2000.

[2] D. A. Turner e K. W. Ross, "Continuous media e-mail on the Internet: Infrastructure inadequacies and a sender-side solution", *IEEE Network*, vol. 14, no. 4, pp. 30–37, julho 2000.

[3] O. Verscheure, X. Garcia, G. Karlsson e J.-P. Hubaux, "User-oriented QoS in packet video delivery", *IEEE Network*, vol. 12, no. 6, pp. 12–21, novembro 1998.

[4] G. Karlsson, "Asynchronous transfer of video", *IEEE Communications Magazine*, vol. 24, no. 8, pp. 118–126, agosto 1996.

[5] M. Krunz, "Bandwidth allocation strategies for transporting variable-bit-rate video traffic", *IEEE Communications Magazine*, vol. 37, no. 1, pp. 40–46, janeiro 1999.

[6] C. Diot, C. Huitema e T. Turletti, "Multimedia applications should be adaptive", in *HPCS'95*, agosto 1995.

[7] M. D. de Amorim, O. C. M. B. Duarte e G. Pujolle, "Multicriteria arguments for improving the fairness of layered multicast applications", in *Proceedings of Broadband Communications, High Performance Networking, and Performance of Communication Networks - Networking'2000*, maio 2000.

[8] E. Crawley, R. Nair, B. Rajagopalan e H. Sandick, "A framework for QoS-based routing in the Internet", *Internet RFC 2386*, agosto 1998.

[9] L. H. M. K. Costa, S. Fdida e O. C. M. B. Duarte, "A scalable algorithm for link-state QoS-based routing with three metrics", in *Proceedings of the IEEE International Conference on Communications - ICC'2001*, junho 2001.

[10] S. Blake, D. L. Black, M. Carlson, E. Davies, Z. Wang e W. Weiss, "An architecture for differentiated services", *Internet RFC 2475*, dezembro 1998.

[11] A. Ziviani, J. F. de Rezende e O. C. M. B. Duarte, "Towards a differentiated services support for voice traffic", in *Proceedings of the IEEE GLOBECOM'99*, vol. 1, pp. 59–63, dezembro 1999.

[12] C. Dovrolis e P. Ramanathan, "Proportional differentiated services, part II: Loss rate differentiation and packet dropping", in *Proceedings of IWQoS'2000*, junho 2000.

[13] N. Semret, R. R.-F. Liao, A. T. Campbell e A. A. Lazar, "Peering and provisioning of differentiated Internet services", in *Proceedings of IEEE INFOCOM'2000*, março 2000.

[14] R. Koenen, "MPEG-4: Multimedia for our time", *IEEE Spectrum*, vol. 36, no. 2, pp. 26–33, fevereiro 1999.

[15] M. Hemy, U. Hengartner, P. Steenkiste e T. Gross, "MPEG systems streams in best-effort networks", in *Proceedings of the 9th Packet Video Workshop - PV'1999*, abril 1999.

[16] J. Shin, J.-W. Kim e C.-C. J. Kuo, "Content-based packet video forwarding mechanism in differentiated services networks", in *Proceedings of the 10th Packet Video Workshop - PV'2000*, maio 2000.

[17] S. Bhattacharjee, K. L. Calvert e E. W. Zegura, "Network support for multicast video distribution", Tech. Rep. GIT-CC-98/16, Georgia Institute of Technology, 1998.

[18] M. Krunz e S. K. Tripathi, "On the characterization of VBR MPEG streams", in *Proceedings of the ACM SIGMETRICS'97*, maio 1997.

[19] F. H. P. Fitzek e M. Reisslein, "MPEG-4 and H.263 video traces for network performance evaluation", Tech. Rep. TKN-00-06, Technical University Berlin, outubro 2000.

[20] J. M. Boyce e R. D. Gaglianello, "Packet loss effects on MPEG video sent over the public Internet", in *Proceedings of the ACM Multimedia 98*, setembro 1998.

[21] S. Floyd e V. Jacobson, "Random early detection gateways for congestion avoidance", *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 1, no. 4, pp. 397–413, agosto 1993.

[22] D. D. Clark e W. Fang, "Explicit allocation of best effort packet delivery service", *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 6, no. 4, pp. 362–373, agosto 1998.

[23] K. Fall e K. Varadhan, "NS – notes and documentation", tech. rep., The VINT Project, janeiro 1999.

[24] F. H. P. Fitzek e M. Reisslein, "MPEG-4 and H.263 video traces for network performance evaluation". `www-tkn.ee.tu-berlin.de/research/trace/trace.html`.

[25] Y. Wang e Q.-F. Zhu, "Error control and concealment for video communication: a review", *Proceedings of the IEEE*, vol. 86, no. 5, pp. 974–997, maio 1998.