

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Uma Abordagem para o Transporte de Vídeo Digital Baseada em Técnicas Proativas de QoS.

Tese submetida à Universidade Federal de Santa Catarina
como requisito parcial à obtenção do grau de

Doutor em Engenharia Elétrica

por

Carlos Alberto Brandão Barbosa Leite

Florianópolis, 04 de Abril de 2005

Uma Abordagem para o Transporte de Vídeo Digital Baseado em Técnicas Proativas de QoS.

Carlos Alberto Brandão Barbosa Leite

Esta tese foi julgada adequada para a obtenção do título de **Doutor em Engenharia** na especialidade **Engenharia Elétrica**, área de concentração em **Automação em Sistemas**, e aprovada em sua forma final pelo curso de Pós-Graduação.

Florianópolis, 04 de Abril de 2005.

Prof. Dr. Jean Marie Farines, orientador

Prof. Dr. Alexandre Trofino Neto
coordenador do curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
da Universidade Federal de Santa Catarina.

Banca Examinadora

Prof. Dr. Jean Marie Farines, orientador

Prof. Dr. José Ferreira de Rezende

Prof. Dr. William Ferreira Giozza

Prof. Dr. Roberto Willrich

Prof. Dr. Joni da Silva Fraga

*Dedico este trabalho aos meus pais, que sempre me apoiaram
incondicionalmente...*

Agradecimentos

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Jean Marie Farines, pela paciência, compreensão e persistência dispensadas à realização deste trabalho.

Também agradeço a todos os amigos que fiz em Florianópolis, principalmente aqueles do LCMI, e também aqueles de São Luís, principalmente os do DEE, pelos constantes incentivos que recebi para poder finalizar este trabalho.

Finalmente, gostaria também de agradecer a minha família que sempre me incentivou a superar mais esta fase da minha vida.

Resumo

O transporte de vídeo digital cujo fluxo apresenta unidades de informação com tipos e importâncias distintas para a decodificação, sofre uma degradação de qualidade quando transportado por redes puramente melhor esforço. Neste trabalho temos avaliado um esquema de proteção de pacotes baseado na importância semântica relacionada ao tipo de quadro que o mesmo transporta, utilizando a arquitetura das redes a serviços diferenciados. Temos também combinado este esquema de proteção com um outro esquema para recuperação de erros baseado na redundância de informação, e mostramos que, em certas situações, eles podem trabalhar de forma sinérgica de forma minimizar a perda de pacotes de vídeo e maximizar a quantidade informações que chegam ao sistema final para a decodificação.

Para verificar a eficácia da nossa abordagem, temos proposto uma métrica intermediária relacionada aos GOPs (Group Of Packets) de vídeo que atua no nível de transporte, de forma a quantificar a qualidade.

Em suma, nós mostramos que combinando técnicas proativas de QoS, encontradas nas redes a serviços diferenciados, junto a esquemas de redundância de informação, conseguimos entregar fluxos de vídeo com uma melhora substancial na qualidade dos dados transportados, e avaliamos a qualidade desses dados através de uma métrica baseada na estrutura dos GOPs.

Abstract

The transport of digital video for which the flow is represented by units of information with different types and importances for the decoding, presents a quality degradation when transported by best effort networks. In this work we have been evaluating a packets protection framework based on the semantic importance related to the video frame type, using the differentiated services architecture. We have also combined this protection framework with another scheme for error recovery based on the redundancy of information, and we have shown that, in certain situations, they can work in a synergetic way to minimize the video packets losses and to maximize the amount information that arrives to the final system. To verify the effectiveness of our approach, we have been proposing a intermediate metric related to video GOPs that acts at the transport level to quantify the video quality. In resume, we showed that combining QoS proactive techniques, found in differentiated services networks, working together with information redundancy schemes, we have sent video flows with a substantial improvement in the quality of the transported data, and we have evaluated the quality of those data through a metric based on the structure of GOPs.

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Contexto do Trabalho	1
1.2	Motivação	1
1.3	Objetivo	3
1.4	Organização do Texto	4
2	A Transmissão de Vídeo	6
2.1	Introdução	6
2.2	A Codificação de Vídeo	7
2.3	Os Padrões para Codificação de Vídeo	8
2.3.1	Os Padrões do ITU-T	8
2.3.2	Os Padrões da ISO/IEC	9
2.4	Considerações sobre a Estrutura e a Forma de Empacotamento do Fluxo de Vídeo	12
2.5	A Transmissão de um Fluxo de Vídeo	15
2.6	Conclusões	16
3	Métricas para Avaliação da Qualidade de Vídeo	17
3.1	Introdução	17
3.2	Métricas para a Qualidade de Vídeo	18
3.2.1	Os Testes Subjetivos para Avaliação de Vídeo	18
3.2.2	Métricas Objetivas para Qualidade de Vídeo	21
3.3	Outros Tipos de Métricas	23
3.4	Uma Métrica Proposta Baseada na Estrutura do GOP	24
3.5	Conclusões	26
4	As Redes com Qualidade de Serviço	28
4.1	Introdução	28
4.2	As Principais Propostas para Qualidade de Serviço sobre Redes IP	29

4.2.1	Os Serviços Integrados	29
4.2.2	Os Serviços Diferenciados	31
4.2.3	Serviços Integrados <i>versus</i> Serviços Diferenciados: Prós e Contras	36
4.2.4	Interoperação entre Serviços Integrados e Serviços Diferenciados	38
4.3	Outras Propostas para Qualidade de Serviço sobre Redes IP	38
4.4	Recentes <i>Frameworks</i> Propostos para Qualidade de Serviço sobre Redes IP Escaláveis na Internet	40
4.5	Conclusões	41
5	Mecanismos de Correção de Erros Baseados na Redundância de In- formação	43
5.1	Introdução	43
5.2	Esquemas de Correção de Erros	44
5.2.1	<i>Forward Error Correction</i> - FEC	45
5.2.2	<i>Priority Encoding Transmission</i> - PET	46
5.3	O Emprego de Esquemas de Correção de Erros ao Transporte de Vídeo	48
5.4	Conclusões	49
6	Mecanismos de Proteção de Pacotes de Vídeo	51
6.1	Introdução	51
6.2	O Mecanismo de Proteção de Pacotes de Vídeo Baseados nas Redes de Serviços Diferenciados	52
6.3	A Avaliação da Proposta	55
6.3.1	O Ambiente de Simulação	55
6.3.2	A Influência do Mecanismos de Proteção na Quantidade de Perdas	57
6.3.3	A Influência do Número de Precedências de Descartes	60
6.3.4	A Influência da Taxa de Bits no Mecanismo de Proteção	63
6.4	Conclusões	68
7	Combinando Técnicas Proativas de QoS Para a Transmissão De Vídeo Digital	70
7.1	Introdução	70
7.2	O Esquema de Redundância de Dados	71
7.3	Resultados no Emprego de Redundância de Informação	72
7.3.1	Redundância de Informação Empregando FEC	73
7.3.2	Redundância de Informação Empregando PET	76
7.3.3	A influência do Mapeamento dos Pacotes dos Quadros de Vídeo nos Níveis de Precedência de Descarte	77

7.4	Conclusões	85
8	Conclusões e Trabalhos Futuros	87
8.1	Trabalhos Futuros	88
8.1.1	Relacionadas a Proteção de Pacotes e Redundância de Informação	89
8.1.2	Relacionados a Métrica de Avaliação de GOPs	90
A	Anexo I - Parâmetros Utilizados na Simulação	92
A.1	Ajuste um do RED	92
A.2	Ajuste dois do RED	93
A.3	Ajuste três do RED	93

Lista de Figuras

2.1	Estrutura hierárquica de um fluxo de vídeo: (a) estrutura do quadro; (b) relação de dependência entre quadros em um GOP.	13
3.1	MOS - <i>Mean Option Scores</i>	19
3.2	<i>Double Stimulus Continuous Quality Scale</i> (DSCQS).	20
3.3	<i>Double Stimulus Impairment Scale</i> (DSIS).	21
3.4	Relação de perdas diretas e indiretas num GOP.	25
4.1	Componentes do modelo dos Serviços Integrados	31
4.2	Campo TOS.	32
4.3	Campo DS.	32
4.4	Classe AF definida na RFC 2597.	35
4.5	Esquemas cooperativos entre <i>IntServ</i> e <i>DiffServ</i>	38
5.1	Um exemplo de “códigos de apagamento”, ou <i>erasure codes</i>	45
5.2	Um exemplo de organização dos pacotes para codificação em FEC.	46
5.3	Um exemplo de organização dos pacotes para codificação em PET.	48
6.1	Mecanismo RED implementando múltiplos níveis (Floyd and Jacobson, 1993)	54
6.2	Topologia de rede adotada na simulação.	56
6.3	Filas virtuais associadas a níveis de precedência de descarte de uma classe AF _{xy} , com três níveis de precedência de descarte ($y = 3$).	57
6.4	Primeiro cenário de simulação: tráfego de fundo junto com pacotes do tipo B na mesma fila virtual.	57
6.5	Relação entre porcentagem de perda de pacotes e porcentagem de perda de quadros não decodificados variando o tráfego de fundo FTP sobre TCP para vídeo de baixa qualidade.	58

6.6	Relação entre porcentagem de perda de pacotes e porcentagem de perda de quadros não decodificados variando o tráfego de fundo FTP sobre TCP para vídeo de alta qualidade.	59
6.7	Relação entre porcentagem de perda de pacotes e porcentagem de perda de quadros não decodificados variando o número de fluxos de vídeo concorrentes para video de baixa qualidade.	60
6.8	Relação entre porcentagem de perda de pacotes e porcentagem de perda de quadros não decodificados variando o número de fluxos de vídeo concorrentes para video de alta qualidade.	60
6.9	Mapeamento referente à primeira configuração utilizando duas filas virtuais, sem e com mecanismo de proteção: (a) Mapeamento tipo 1 e (b) Mapeamento tipo 2	62
6.10	Mapeamento referente à segunda configuração utilizando três filas virtuais, sem e com mecanismo de proteção: (a) Mapeamento tipo 1 e (b) Mapeamento tipo 3	65
6.11	Mapeamento referente a terceira configuração, utilizando quatro filas virtuais. Sem mecanismo de proteção e com mecanismo de proteção. . .	66
6.12	A influência da taxa de bits, referente a segunda configuração, utilizando três filas virtuais para o mapeamento do tipo 3. Para taxa de bits referentes a 50 e 150% da taxa de bits original.	67
7.1	Esquema FEC.	71
7.2	Comparação entre um codificador não tolerante a perdas e tolerante a perdas até um limiar de decodificação de 0,50.	74
7.3	Valores para 25, 50, 75 e 100% de sobre-carga injetada na rede utilizando FEC	75
7.4	Comparação entre um codificador não tolerante a perdas e tolerante a perdas até um limiar de decodificação de 0,50.	76
7.5	Valores para 25, 50, 75 e 100% de sobre-carga injetada na rede utilizando PET.	78
7.6	Mapeamento Tipo 1: Comparação entre a-) um codificador não tolerante a perdas e b-) tolerante a perdas até um limiar de decodificação de 0,50 utilizando FEC.	79
7.7	Mapeamento tipo 2: Comparação entre a-) um codificador não tolerante a perdas e b-) tolerante a perdas até um limiar de decodificação de 0,50 utilizando FEC.	80

7.8	Mapeamento Tipo 3: Comparação entre a-) um codificador não tolerante a perdas e b-) tolerante a perdas até um limiar de decodificação de 0.50 utilizando FEC.	81
7.9	Mapeamento Tipo 1: Comparação entre a-) um codificador não tolerante a perdas e b-) tolerante a perdas até um limiar de decodificação de 0,50 utilizando PET.	82
7.10	Mapeamento Tipo 2: Comparação entre a-) um codificador não tolerante a perdas e b-) tolerante a perdas até um limiar de decodificação de 0,50 utilizando PET.	83
7.11	Mapeamento tipo 3: Comparação entre a-) um codificador não tolerante a perdas e b-) tolerante a perdas até um limiar de decodificação de 0,50 utilizando FEC.	84
7.12	As figuras representam respectivamente os casos onde a-) nenhuma redundância é aplicada, b-) redundância de 100% aplicando PET apenas nos pacotes de quadros Bs e c-) redundância de 100% aplicando PET nos pacotes de quadros Ps e Bs.	85

Lista de Tabelas

6.1	Primeira configuração: mapeamento de pacotes de quadros de vídeo em níveis de precedência de descarte utilizando duas filas de prioridade. . .	53
6.2	Segunda configuração: mapeamento de pacotes de quadros de vídeo em níveis de precedência de descarte utilizando três filas de prioridade. . .	53
6.3	Terceira configuração: mapeamento de pacotes de quadros de vídeo em níveis de precedência de descarte utilizando quatro filas de prioridade. .	54
7.1	Valores para o limiar de decodificação ld suportado pelo decodificador de vídeo e suas respectivas sobre-cargas SC suportadas.	73

Capítulo 1

Introdução

1.1 Contexto do Trabalho

Tem-se visto nos últimos tempos que a Internet tem caminhado no sentido de se tornar uma rede de serviços integrados onde há a convergência de várias aplicações, principalmente aquelas empregadas nos sistemas multimídia. O vídeo digital faz parte dessa classe de aplicações e tem gerado um grande desafio a comunidade de pesquisadores no sentido do desenvolvimento de técnicas que propiciem maneiras mais otimizadas para o transporte desse tipo de mídia.

Neste trabalho tratamos dos problemas encontrados para transportar vídeo digital sobre redes de pacotes. Procuramos identificar os fatores que normalmente são responsáveis pela degradação da qualidade do vídeo que chega para a decodificação. Tentamos mostrar que empregando algumas técnicas proativas de QoS (*Quality of Service*), que quando combinadas, podem propiciar uma melhor qualidade nas informações transmitidas e que se apresentam para a decodificação.

O contexto desse trabalho engloba o transporte de vídeo digital, as redes com serviços diferenciados, os esquemas de redundância de informação e as métricas de qualidade de vídeo.

1.2 Motivação

A Internet, ou de forma mais abrangente, as redes IP, tem sido a arquitetura de rede adotada em grande parte dos casos que envolva o transporte de vídeo. Entretanto, o modelo dessa arquitetura não lida satisfatoriamente com as informações geradas pelos atuais codificadores de vídeo baseados nos padrões estabelecidos por organismos de padronização como o ITU-T e a ISO/IEC. Os codificadores desses organismos, tais

como as famílias MPEG-X e H.26X, geram conteúdos de informação com tipos e importâncias distintas para a decodificação, conseguindo dessa forma atingir altas taxas de compressão no vídeo codificado. Em situações onde ocorram altas taxas de utilização da rede ou mesmo sobre-carga, os fluxos de vídeo sofrem um descarte indiscriminado de pacotes sem, entretanto, levar em consideração a importância das unidades de informação transportadas. Isso faz com que a informação que chega ao destino sofra um nível de degradação não aceitável ou mesmo impossibilitando a decodificação da mesma, ocasionada por perdas indiretas nos casos onde exista uma dependência vinculada as informações mais importantes.

De uma forma geral, as várias técnicas disponíveis para ajudar no transporte de vídeo, atuam em alguma das causas responsáveis pela degradação do mesmo. Podemos agrupar estas técnicas naquelas baseadas:

- na adaptação da taxa de bits (Cheung et al., 1996), (Busse et al., 1996), (Koliver et al., 2000),
- na adaptação de camadas de vídeo (McCanne and Jacobson, 1996),
- na reserva de recursos ou de priorização de informação (Braden et al., 1994), (Blake et al., 1998), (Schmidt and Leão, 2000),
- no controle de erro (Wenger et al., 1998), (Reyes et al., 1999), (Zhang et al., 2000), (Côté et al., 1999), (Liu et al., 1997),
- na redundância de informação (Alanesse, 1994), (Leicher, 1994), (Storn, 1995) (Wolfinger, 1997a), (Wolfinger, 1997b),
- no controle ativo da rede (Hemy et al., 1999), (Da S. Gonçalves et al., 2000),

por fim, na combinação sinérgica de duas ou mais delas.

Todas essas técnicas e suas combinações ajudam em diversos pontos com a finalidade de obter uma melhora na qualidade do vídeo que chega ao usuário final. Entretanto, a forma de como avaliar esse aspecto qualitativo é bastante abrangente e tem um forte caráter subjetivo.

Se por um lado tem-se como a métrica mais natural para avaliar a qualidade de um vídeo, a própria percepção subjetiva do ponto de vista do usuário, podemos encontrar nas diversas etapas (que vão do esquema de codificação, passando pelo empacotamento, esquema de transmissão e a decodificação) que envolvem a transmissão de vídeo digital, métricas intermediárias. Estas métricas também dizem respeito à correlação de aspectos subjetivos de qualidade, relacionados geralmente a qualidade da informação

que chegou à aquela determinada etapa. Por exemplo, as métricas como PSNR (*Peak Signal-to-Noise Ratio*) e MSE (*Mean Square Ratio*) avaliam a qualidade do vídeo apenas baseadas na relação de pixels da imagem.

As métricas intermediárias, ligadas a parâmetros da codificação e/ou da rede, quantificam e permitem comparar alguns aspectos relativos à qualidade da informação que está sendo gerada e/ou transportada. Isso é importante, pois ao melhorar a qualidade da informação transportada, subtende-se que a qualidade de percepção visual, no lado do usuário final, também melhora. Esse aspecto, entretanto, ainda necessita de maiores pesquisas uma vez que não é tão simples obter um mapeamento direto e efetivo para uma percepção visual baseada em critérios humanos.

1.3 Objetivo

Objetivamos neste trabalho atuar na transmissão de vídeo digital de forma a melhorar a qualidade da informação transmitida. Para isso, nós nos centramos nos seguintes aspectos:

1. Minimizar as perdas indiscriminadas de pacotes de vídeo atuando na
 - proteção dos conteúdos de um fluxo de vídeo baseadas na suas importâncias relativas para a decodificação, de forma a minimizar as perdas de qualidade e;
 - adicionar, de forma combinada, um certo nível de redundância de informação relativa ao fluxo de vídeo, de forma a permitir que um máximo de informação possa chegar ao destino com um mínimo de perdas.
2. Quantificar e qualificar os eventuais ganhos, esboçando uma métrica intermediária, ligada a estrutura dos GOPs de vídeo, de forma a poder comparar o nível de qualidade das informações que chegam para a decodificação.

Nesse sentido, empregaremos um esquema de transporte baseado nas redes com serviços diferenciados assegurados, de forma a poder-se proteger os pacotes de vídeo de acordo com o aspecto semântico relacionado ao tipo de quadro que o mesmo transporta. Adicionalmente empregaremos um esquema de correção de erros baseado na transmissão redundante de informação de forma a colaborar com o esquema de proteção de pacotes de vídeo.

Essa abordagem pode ser vista como a combinação de duas técnicas proativas, que podem operar de forma sinérgica em certas situações, tentando minimizar a

quantidade de perdas dos conteúdos mais importantes e maximizar a quantidade de informações aptas a serem decodificadas.

As principais contribuições almeçadas nessa abordagem para melhorar a qualidade no transporte de vídeo são:

a-) Propor um esquema na forma de um mecanismo de proteção para pacotes de vídeo baseado numa combinação de dispositivos encontrados nas redes que suportam qualidade de serviço (em particular as redes a serviços diferenciados) e em alguns aspectos de engenharia de tráfego. Dessa forma, procuramos investigar:

- a influência de um mecanismo de proteção de pacotes de vídeo na quantidade de perdas,
- a influência do nível de precedências e tipos de mapeamentos de pacotes de vídeo nessas precedências, e
- a influência da taxa de bits do fluxo de vídeo no mecanismo de proteção;

b-) Combinar o mecanismo de proteção proposto com um esquema de correção de erros baseado na redundância de informação, visando a recuperação de erros e investigar a sua influência no ganho de qualidade alcançado, ao se aplicar redundância de forma equável e não equável com relação a informação semântica que os pacotes transportam.

c-) Esboçar uma métrica de avaliação da qualidade de vídeo baseada nos aspectos relacionados a estrutura do GOP.

1.4 Organização do Texto

A organização de texto é como segue. No capítulo 2, nós apresentaremos a estrutura do vídeo digital e os padrões de alguns codificadores mais utilizados atualmente e que servem como modelos para a codificação de vídeo. No capítulo 3 apresentaremos as métricas utilizadas para avaliação da qualidade de vídeo e incluindo uma métrica subjetiva intermediária baseada na estrutura dos GOPs e que nos permitirá comparar os ganhos efetivos no esquema proposto. No capítulo 4 apresentaremos as redes com qualidade de serviço e dentre elas, as redes com serviços diferenciados, sua arquitetura, seus mecanismos internos e os principais tipos de serviços padronizados. No capítulo 5 nós apresentaremos os principais esquemas de correção de erros baseados na redundância de informação. No capítulo 6 nós apresentaremos um esquema de proteção de pacotes

de vídeo baseado na arquitetura das redes com serviços diferenciados, visando minimizar a quantidade de perda de pacotes, levando em conta a informação semântica ligada ao tipo de quadro de vídeo. No capítulo 7 nós apresentaremos uma abordagem sinérgica, baseada na combinação das técnicas proativas vistas nos capítulos 5 e 6, visando minimizar a quantidade de perdas de pacotes e maximizar a quantidade de informação que chega ao sistema final, e apresentaremos alguns resultados de simulação que corroborem a expectativa de ganho dessa combinação. Finalizando, no capítulo 8 nós concluiremos nosso trabalho e comentaremos acerca de trabalhos futuros.

Capítulo 2

A Transmissão de Vídeo

2.1 Introdução

Com o advento de invenções nos últimos dois séculos tais como a fotografia e posteriormente o cinema, surgiram novos paradigmas relacionados ao entretenimento e ao registro visual da história. O cinema, aqui visto no contexto vídeo apenas, foi o precursor do registro de informações visuais, possibilitando o armazenamento da mesma em algum meio de memória de massa (inicialmente películas fotográficas dispostas de forma contínua - ou o mais conhecido “filme”). Posteriormente, com o surgimento da televisão, passou-se a gerar conteúdos ao vivo e em tempo real, transmitindo-os por rádio-difusão a inúmeros usuários espalhados geograficamente pelo mundo. O passo seguinte, codificar os antigos filmes em película para serem transmitidos por rádio-difusão, ocasionou o maciço crescimento da indústria de entretenimento e por conseguinte um aumento substancial na demanda por canais de comunicação.

A complexidade do fenômeno da demanda por meios de transmissão, cada vez com maiores requisitos por largura de banda, fez nascer a necessidade por técnicas de compressão que pudessem reduzir o volume de dados transportados com um uso mais racional dos recursos de transmissão disponíveis. O passo seguinte deu-se pelo emprego de canais digitais assim como das técnicas de compressão, agora baseadas em algoritmos de compressão digitais. Isso propiciou economias consideráveis, principalmente relacionados aos canais de comunicação e a quantidade de memória de massa necessária ao armazenamento dos conteúdos.

O surgimento das redes de computadores, especialmente a Internet, fez com que houvesse uma tendência, cada vez mais forte, de juntar o conjunto de aplicações que normalmente se utilizam da infra-estrutura das redes a comutação de circuitos com as aplicações que se utilizam das redes a comutação de pacotes. Essa tendência, na forma

de “serviços integrados”, fomentou, entre outras coisas, o desenvolvimento de padrões de compressão de vídeo que pudessem vir a ser utilizados sobre essa infra-estrutura de comunicação e serviços.

2.2 A Codificação de Vídeo

As informações visuais em geral, e as de vídeo em particular, requerem grandes quantidades de largura de banda e espaço de armazenamento. Por exemplo, vídeo descomprimido na qualidade de televisão, gera taxas que têm tipicamente centenas de Mb/s. Evidentemente, os métodos efetivos de compressão são vitais para facilitar o manuseio de tais taxas. Compressão é a remoção das informações redundantes da informação em si. Os algoritmos de compressão sem perdas, os quais asseguram uma reconstrução perfeita da informação inicial, podem ser usados para imagens e vídeo. No entanto, os resultados são distanciados do ótimo, porque esses algoritmos apenas levam em conta o fluxo linear de bits. Quando se comprime vídeo, dois tipos de redundância podem ser exploradas:

- a-) **Redundância Espacial-Temporal**, onde, tipicamente, o valor dos bits são correlacionados com seus vizinhos, com o mesmo quadro e entre quadros.
- b-) **Redundância Psicovisual**, onde pela particularidade do sistema visual humano não ser igualmente sensível a todos os padrões, os algoritmos de compressão podem descartar aquelas informações que não são visíveis ao observador. Isto é referido como compressão com perdas.

No vídeo analógico, esses dois tipos de redundâncias são exploradas através de técnicas de codificação de cor baseada na visão e técnicas de entrelaçamento. O vídeo digital oferece métodos adicionais de compressão, e é receptivo a métodos de compressão especializados. Eles podem ser classificados basicamente em: métodos baseados em modelos (como a compressão fractal) e métodos baseados na forma de onda (como a compressão baseada em *wavelet*). Muitos dos codificadores atuais e os padrões que os especificam pertencem a última categoria, e abrangem os seguintes estágios:

- a-) **Transformação** - A fim de facilitar a exploração de redundância psicovisuais, as cenas são transformadas para um domínio onde pode-se separar as diversas sensibilidades do sistema visual humano numa faixa de diferentes frequências. Isso pode ser feito através da transformada discreta do cosseno (DCT - *Discrete Cosine Transform*) ou por transformação utilizando *Wavelet*.

- b-) Quantização** - Após a transformação, a precisão numérica dos coeficientes é reduzida de forma a decrementar o número de bits do fluxo de bits. O grau de quantização aplicado a cada coeficiente é normalmente determinado pelo resultado da distorção visível ao observador humano. Coeficientes de alta frequência podem ser quantizados de forma mais grosseira que os coeficientes de baixa frequência. A quantização é o estágio responsável pelas perdas de informação.
- c-) Codificação** - Após a informação ter sido quantizada num conjunto finito de valores, ela pode ser codificada sem perdas, explorando a redundância entre os coeficientes quantizados no fluxo de bits. A entropia da codificação, levando em consideração que certos símbolos ocorrem muito mais frequentemente que outros, é levada em consideração nesse processo. Dois dos mais populares esquemas de entropia são os baseados na codificação de Huffman e a codificação aritmética (Sayood, 2000).

O aspecto chave da compressão de vídeo digital é explorar as similaridades entre sucessivos quadros numa determinada seqüência, no lugar de codificar cada cena em separado. Enquanto essa redundância temporal está tratando da transformação espacial-temporal, uma abordagem híbrida, espacial e de transformada, é adotada por razões relacionadas à eficiência de implementação. Um simples método de compressão temporal é a diferença entre quadros, onde apenas as diferenças baseadas nos pixels entre sucessivos quadros são codificadas. Altos valores de compressão podem ser alcançados usando a estimação do movimento. É uma técnica para descrição de quadros baseadas no conteúdo dos quadros mais próximos por meio dos vetores de movimento. Dessa maneira, pela compensação dos movimentos dos objetos na cena, a diferença entre quadros pode ser mais reduzida ainda.

2.3 Os Padrões para Codificação de Vídeo

Alguns organismos internacionais como o ITU-T ¹ e a ISO/IEC ² tem padronizado vários codificadores de vídeo. Os principais padrões são discutidos a seguir.

2.3.1 Os Padrões do ITU-T

O ITU (*International Telecommunications Union*) publicou em 1990 o primeiro padrão de codificação de vídeo denominado H.261 (ITU-T/H.261, 1990). Ele foi ini-

¹<http://www.itu.int/ITU-T/>

²<http://www.iso.org>

cialmente projetado para operar com taxas de bits múltiplas de 64Kbits/s (também chamado $p \times 64\text{Kbits/s}$, onde p varia entre 1 e 30). Inicialmente o padrão foi projetado para a operação sobre linhas digitais ISDN (*Integrated Services Digital Network*). O algoritmo de compressão é um híbrido de predição inter-quadro, codificação de transformada e compensação de movimento. As taxas do fluxo de bits do algoritmo foram projetadas de tal forma que se situem entre 40 Kbits/s e 2 Mbits/s. A predição inter-quadro remove a redundância temporal, a codificação de transformada remove a redundância espacial e os vetores de movimento são utilizados para auxiliar o codificador na compensação do movimento.

Da limitação desse codificador para operar sobre redes telefônicas a comutação de circuitos (PSTN - *Public Switched Telephone Network*), assim como sobre as redes sem fio (*wireless*), e devido aos requisitos de compressão e do nível de robustez necessário para operar sobre canais com maiores taxas de erros, foi estabelecido o padrão internacional ITU-T H.263, na sua Versão 1, intitulado de “*Video Coding for Low Bit Rate Communications*” (ITU-T/H.263, 1996).

Ainda que tenha sua estrutura baseada no H.261, o H.263 provê uma melhor qualidade de cena a baixas taxas de bits, apenas com uma pequena complexidade adicional. Ele também inclui quatro modos opcionais ajudando a melhorar o desempenho da compressão. O H.263 tem sido adotado em vários padrões de terminais para videofone como o ITU-T H.324 (PSTN), H.320 (ISDN) e o H.310 (B-ISDN).

Já o H.263 Versão 2, também conhecido como H.263+, foi oficialmente aprovado como um padrão em janeiro de 1998 (ITU-T/H.263+, 1997). Ele é uma extensão do H.263, provendo 12 novos modos de negociação além de características adicionais. Esses modos e essas características melhoram o desempenho da compressão, permitem o uso de fluxos de bits escaláveis, melhora o desempenho sobre redes comutadas, suporta a personalização do tamanho da cena e da frequência de relógio.

Em (Cotê et al., 1998) é encontrado um excelente tutorial acerca do padrão ITU-T H.263+ (ou H.263 Versão 2).

2.3.2 Os Padrões da ISO/IEC

Em 1988, o *Moving Picture Experts Group*, ou simplesmente MPEG, foi fundado abaixo da ISO/SC2 com objetivo de padronizar um algoritmo para codificação de vídeo visando o armazenamento digital da mídia codificada e suportando taxas de bits de até 1,5 Mbits/s, sob a denominação oficial de ISO/IEC/JTC1/SC29/WG11. O primeiro esboço do padrão, também chamado em inglês de DIS (*Draft International Standard*), liberado pelo comitê foi o ISO 11172 (referente ao MPEG-1) em 1991 e

finalmente lançado como padrão em Novembro de 1992. A intenção desse padrão é ser genérico, isto é, apenas a sintaxe de codificação é definida e, dessa maneira, mantendo um padrão de decodificação padronizado. O padrão define um esquema de codificação híbrido baseado em DCT/DPCM com predição e compensação de movimento. Também provê acesso aleatório ao conteúdo armazenado (Chiariglione, 1996)(J.L.Mitchell et al., 1997)(Gall, 1992).

Em novembro de 1994 foi aprovado o MPEG-2 (Chiariglione, 2000) com um padrão para televisão digital. O esquema de codificação de vídeo para o MPEG-2 (ISO/IEC/MPEG-2/13818-2, 2000) é, da mesma forma como para o MPEG-1, um padrão genérico. Ele é um refinamento do MPEG-1, com considerações especiais dadas a fontes interlaçadas. Dessa maneira, muitas funcionalidades, entre as quais, escalabilidade, foram introduzidas.

O conceito do MPEG-2 é similar ao MPEG-1, mais inclui extensões para cobrir uma vasta faixa de aplicações. A primeira aplicação alvo durante o processo de definição do MPEG-2 foi a transmissão de TV digital, com o vídeo codificado a taxas entre 4 e 9 Mbits/s. Entretanto, o MPEG-2 tem encontrado uso em aplicações que exijam altas taxas de bits e altas taxas de amostras (como HDTV). A mais significativa melhora em relação ao MPEG-1 foi a adição de sintaxe para uma eficiente codificação de vídeo interlaçado. Várias outras melhoras sutis foram incluídas com uma notável melhora na eficiência da decodificação. Outras características adicionais para o MPEG-2 foram as extensões escaláveis que permitiram a divisão do sinal contínuo de vídeo em dois ou mais fluxos de bits representando o vídeo em diferentes resoluções, qualidade de imagem ou taxas de quadros.

O MPEG-4 (Koenen, 2002) é mais um padrão desenvolvido pelo MPEG assim como seus antecessores, o MPEG-1 e MPEG-2. Estes padrões fazem uso de vídeo interativo em CD-ROM, DVD e possivelmente televisão digital. O MPEG-4 é o resultado de outro esforço internacional envolvendo milhares de pesquisadores e engenheiros de todo o mundo. Este padrão, formalmente designado pela ISO/IEC como “ISO/IEC 14496”, foi finalizado em outubro de 1998 e tornou-se um padrão internacional nos primeiros meses de 1999. A aplicabilidade do MPEG-4 tem sido comprovada com sucesso em três campos:

- Televisão digital,
- Aplicações gráficas interativas (conteúdo sintético),
- Multimídia interativa (WWW, distribuição do acesso ao conteúdo).

O padrão provê um conjunto de tecnologias para satisfazer as necessidades de autores, provedores de serviços e usuários finais.

Para os autores, o padrão habilita a produção de conteúdo que apresenta grande reusabilidade, tem uma maior flexibilidade do que é possível alcançar hoje em dia com as tecnologias individuais tais como a televisão digital, os gráficos animados, as páginas WWW e suas extensões. Também é possível um melhor gerenciamento e proteção de conteúdos baseado em direitos autorais.

Para os provedores de serviço, oferece informações transparentes, que podem ser interpretadas e transladadas em mensagens nativas de sinalização apropriadas a cada tipo de rede, como a ajuda de padrões. O MPEG-4 inclui considerações relativas a qualidade de serviço (QoS), provendo um descritor genérico para QoS aplicado a diferentes tipos de mídia. A translação exata do conjunto de parâmetros de QoS de cada mídia para parâmetros da rede é fora do escopo do padrão e está a cargo dos próprios provedores de serviço. A sinalização dos descritores de QoS de uma mídia codificada em MPEG-4 habilita o transporte otimizado fim-a-fim sobre redes heterogêneas.

Para os usuários, o padrão traz altos níveis de interação com o conteúdo dentro dos limites estabelecidos pelo autor. Também traz a multimídia para as novas redes, incluindo aquelas que operam sobre baixas taxas de bits (por exemplo, PSTN) e redes móveis (por exemplo, *wireless*).

O padrão MPEG-4 alcança esses objetivos, provendo uma maneira padronizada para: representar unidades de conteúdo de áudio, visuais ou audiovisuais, também chamados “objetos de mídia”. Esses objetos de mídia podem ser de origem natural ou sintética, o que significa que eles podem ser gravados com uma câmera ou microfone, ou gerados por computador. Eles descrevem a composição desses objetos para criar objetos compostos de mídia que formam cenas audiovisuais. Eles também descrevem a multiplexação e sincronização das informações associadas com os objetos de mídia, tal que eles podem ser transportados sobre canais de dados provendo um apropriado nível de QoS de acordo com a natureza específica desses objetos. Também podem interagir com cenas audiovisuais geradas no sistema final.

O padrão MPEG-4 para codificação de vídeo permite uma codificação híbrida baseada na codificação natural de imagens e vídeo junto com cenas sintéticas geradas por computador. Isso permite, por exemplo, a presença virtual de participantes de uma videoconferência. Com esta finalidade, o padrão visual engloba ferramentas e algorit-

mos suportando a codificação natural baseada em pixels, e ainda as ferramentas para suportar a compressão de parâmetros gráficos geométricos 2-D e 3-D de forma sintética.

Os seguintes formatos são suportados:

- a-) **Taxas de bits** - tipicamente entre 5 kbits/s e mais de 1 Gbits/s;
- b-) **Formatos** - vídeo progressivo bem como interlaçado;
- c-) **Resolução** - tipicamente de sub-QCIF até resoluções de “Studio” (de 4000×4000 pixels).

O padrão MPEG-4 contempla um série de funcionalidades (Koenen, 2002) (além dos formatos suportados) relacionadas a:

- eficiência de compressão,
- funcionalidades baseadas no conteúdo,
- escalabilidade de textura, imagens e vídeo,
- formas e codificação de canais alfa,
- robustez em ambientes suscetíveis a erros,
- animação de rosto e corpo,
- codificação de redes 2-D com estrutura implícita,
- codificação de redes polinomiais 3-D.

2.4 Considerações sobre a Estrutura e a Forma de Empacotamento do Fluxo de Vídeo

Um fluxo de vídeo consiste de uma seqüência de quadros, onde cada quadro é formado por uma matriz de pixels que descrevem uma cena. Os modernos codificadores de vídeo utilizam relações de temporalidade e espacialidade para gerar os quadros, e estes possuem tipos e importâncias diferentes na decodificação. Nesse contexto, encontra-se a família de codificadores dos padrões ITU-T (família H.26X) e ISO/IEC (família MPEG-X). A estrutura para um fluxo de vídeo gerado por um desses codificadores é mostrada na figura 2.1. No fluxo de vídeo são gerados quadros do tipo I, P e B. Os quadros do tipo I são codificados como uma única imagem descrevendo a cena.

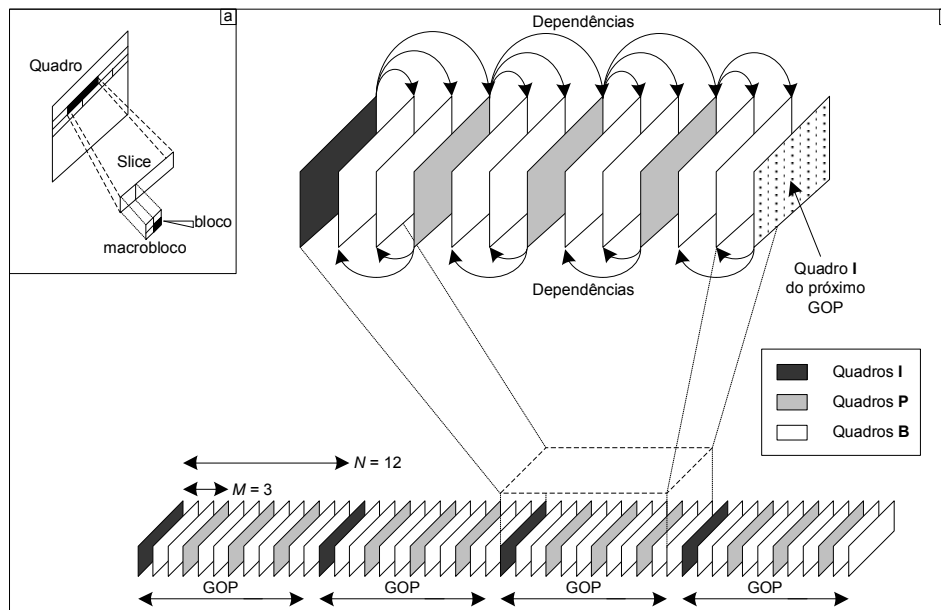


Figura 2.1: Estrutura hierárquica de um fluxo de vídeo: (a) estrutura do quadro; (b) relação de dependência entre quadros em um GOP.

Os quadros tipo P são preditos a partir do quadro de referência anterior, que pode ser um quadro I ou um quadro P. Os quadros Bs são preditos baseados nos quadros de referência anterior e posterior, que podem ser quadros Ps ou Is. O agrupamento de quadros Is, Ps, e Bs, intercalados até a geração do próximo quadro I, define um GOP (*Group Of Packets*) de vídeo. Assim a estrutura de um GOP (vide figura 2.1b) é caracterizada pela distância N entre dois quadros I consecutivos, e pela distância M entre um quadro I e o primeiro quadro P, na seqüência.

Um quadro de vídeo é constituído de uma série de pedaços (chamados *slices* no padrão MPEG- X ou *GOB - Group Of Blocks* no padrão H.26 X), mostrados na figura 2.1a, os quais são transportados no *payload* do protocolo de transporte. A forma como se transporta esses pedaços de quadros é denominada empacotamento. Geralmente a técnica de empacotamento busca maximizar ou minimizar alguma métrica relacionada às perdas, pois pedaços de tipos de pacotes diferentes (I, P ou B) transportam informações com diferentes importâncias na decodificação. A corrupção ou perda de pedaços do tipo I inviabiliza a decodificação do restante dos pedaços de outros tipos dentro de um determinado GOP. Por outro lado, a grande maioria das formas de empacotamento visa a recuperação de erros devido a perdas de pacotes. No empacotamento em si, o primeiro objetivo seria produzir pacotes de vídeo tão grandes quanto fosse possível a fim de aumentar a relação entre o cabeçalho da informação e o *payload*. Entretanto, não é desejável transmitir mais de um quadro em um pacote devido ao aumento do retardo que isso ocasionaria. Um outro fato que deve ser considerado é o

tamanho mínimo da MTU (*Maximum Transfer Unit*) no caminho fim-a-fim. Pacotes com tamanho maior que a menor MTU do caminho implica em fragmentação e remontagem dos mesmos, gerando uma sobrecarga adicional no processo de empacotamento. Um objetivo próximo do ideal seria ter um mínimo ou mesmo a total ausência de fragmentação de pacotes (salvo nos casos onde não há alguma técnica de correção de erros baseada na redundância de dados atuando no processo de transmissão).

Tomando como uma estimativa aceitável que uma respeitável quantidade das redes onde os sistemas finais emissores e receptores estão conectados são do tipo *ethernet*, é razoável se pensar em utilizar pacotes com um tamanho em torno de 1500 bytes. Por exemplo, escolhendo-se um tamanho de pacotes de 1450 bytes, ou 11600 bits por pacote, é factível presumir que muitos formatos de quadros caibam nesse tamanho. Assim, no caso de um vídeo gerado a 10 quadros/seg, a taxa de bits gerada é de 116000 bits/seg e, utilizando o tamanho máximo do *payload* do pacote, isso seria suficiente para acomodar um tamanho de quadro QCIF (176×144 pixels). Tamanhos maiores de quadros como CIF (352×288 pixels) são possíveis de se utilizar, porém aceitando alguma degradação. Esses números sugerem como regra para minimizar a sobrecarga do empacotamento que um quadro por pacote seria uma boa escolha. Entretanto, aplicando-se esta regra, uma simples perda de pacote implica na perda de um quadro inteiro. Diversos documentos, grande parte deles na forma de padrões, estabelecem formas de empacotamento tendo por base o RTP (*Real Time Protocol*) (Schulzrinne et al., 1996). Na prática utiliza-se o RTP para encapsular o fluxo de vídeo antes de colocá-lo sobre o IP. Essas características de empacotamento sobre o RTP estão atreladas a características dos codificadores de vídeo (Turletti and Huitema, 1996), (Zhu, 1997), (Hoffman et al., 1998), (Kikuchi et al., 2000).

Do ponto de vista da recuperação de erros, seria desejável dividir o quadro codificado em um grande número de pacotes, de forma a manter a área espacialmente afetada tão pequena quanto possível, no caso de ocorrerem perdas. Por exemplo, Wenger et al. (Wenger et al., 1998) propõem um esquema de empacotamento que usa dois pacotes por quadro, dispondo GOBs pares e ímpares de forma intercalada em um e outro pacote, visando um acordo otimizado entre a recuperação de erros e a redução da sobrecarga causada pelo empacotamento.

Outros eventuais esquemas de empacotamento, tais como, transportar pedaços de tipos de quadros diferentes num mesmo pacote, são bastante suscetíveis a perdas, aumentando dessa forma a degradação do vídeo decodificado ou mesmo não permitindo a decodificação.

2.5 A Transmissão de um Fluxo de Vídeo

Vimos nas seções anteriores que as peculiaridades de um fluxo de vídeo, principalmente aquelas relacionadas à natureza semântica daqueles pacotes que transportam um tipo específico de quadro, faz com que seja de crucial importância a escolha do tipo de rede e do esquema de transporte que suporte esses requisitos.

Os melhores resultados na transmissão de vídeo são os obtidos com redes dedicadas especificamente a este propósito. A opção por redes a comutação de circuitos é uma solução que permite as garantias absolutas com respeito aos recursos que estão disponíveis na rede aos fluxos de vídeo. Entretanto, esta é uma solução mais cara e vai em sentido contrário a tendência mundial que é cada vez mais utilizar redes a comutação de pacotes, numa concepção que visa, uma dia, termos uma rede de serviços integrados, onde o suporte ao transporte de vídeo é mais uma das características da rede.

Tem-se usado diversas tecnologias, utilizando-se de variados meios físicos para transmitir vídeo. Há alguns anos via-se nas rede ATM a solução final para transmitir-se vídeo de forma a atender a todos os requisitos (temporais e de desempenho) dessa classe de aplicações. Entretanto, as redes ATM não avançaram como se esperava, em parte por questões ligadas ao mercado e principalmente pelo avassalador crescimento da Internet como base da possível e futura rede de serviços integrados. O IP, ou melhor entendendo, a pilha de protocolos adotada na Internet é a base de praticamente todas as soluções de rede, para as mais variadas necessidades dos diversos tipos de aplicações. Dentre elas, as multimídias, principalmente aquelas que utilizam o vídeo como uma das mídias (videoconferências, VoD, etc).

As redes IP padecem da falta de suporte nativo a aplicações que apresentem rígidos requisitos além do modelo melhor esforço que estas redes implementam. As sérias restrições temporais que aplicações de vídeo exigem (na forma de limites para o retardo e variação deste - *jitter*), bem como seus requisitos em termos de largura de banda (principalmente em aplicações de vídeo de alta-qualidade) fazem com que haja a necessidade de alguma modificação ou adaptação do modelo inicialmente concebido para as redes baseadas no protocolo IP. Essas modificações e adaptações surgiram na forma de dotar estas redes de mecanismos que implementassem níveis de Qualidade de Serviço ou simplesmente QoS.

Do lado da geração dos fluxos de vídeo propriamente ditos, há o desenvolvimento de padrões de compressão baseados em diversos tipos de técnicas, permitindo atingir variados níveis de qualidade e de compressão. Atendendo desde aplicações que exijam interatividade em baixa qualidade (videoconferências de baixo custo) a sistemas de

vídeo sob demanda com qualidade de DVD.

O emprego desses padrões de compressão e a posterior transmissão do fluxo de vídeo sobre redes baseadas no protocolo IP, gera uma série de necessidades de adaptação das mesmas.

Do ponto de vista da engenharia de tráfego há a necessidade de alguns procedimentos, tais como:

- separar os fluxos das aplicações de vídeo dos demais fluxos de outras aplicações,
- garantir limiares mínimos para o retardo fim-a-fim e ter um adequado dimensionamento de espaço de memória (*buffer space*) nos sistemas finais (e possivelmente também nos dispositivos de rede) de forma a absorver as possíveis variações do retardo (*jitter*),
- provisionar a(s) fila(a) por onde se encaminhará os fluxos de vídeo de forma a atender aos requisitos de largura de banda,
- em caso de se utilizar codificadores que gerem fluxos de bits com a geração de quadros com tipos e importâncias distintas, deve-se utilizar mecanismos que entendam essa importância semântica e preservem as informações mais importantes de acordo com as suas prioridades relativas.

2.6 Conclusões

Neste capítulo nós vimos os principais pontos ligados ao vídeo digital, partindo de uma breve explanação sobre os conceitos básicos acerca das técnicas de geração de vídeo e das técnicas de compressão baseadas na redundância da informação. Vimos a característica dos codificadores de vídeo atuais e suas formas de padronização, principalmente aqueles especificados por organismos como o ITU-T e ISO/IEC.

Uma discussão sobre a estrutura dos fluxos de vídeo e principalmente a sua forma hierárquica na forma de GOPs nos permitem verificar que o transporte de vídeo está intimamente relacionado na forma como desempenhamos o empacotamento na rede. O caráter semântico encontrado na estrutura dos GOPs influencia drasticamente no nível de perdas que podem surgir no transporte do vídeo.

A problemática ligada à proteção de pacotes de vídeo, considerando a sua importância semântica, é diversificada e encontra-se diversas disposições na forma de esquemas, técnicas, métodos e estudos de como conduzir o transporte de vídeo sobre redes a pacotes tendo como objetivo a minimização das perdas e maximização na qualidade obtida.

Capítulo 3

Métricas para Avaliação da Qualidade de Vídeo

3.1 Introdução

As diversas técnicas utilizadas na transmissão de vídeo digital sobre redes de pacotes, sempre visando fazer com que a informação chegue ao sistema final mantendo-se fidedigna ao conteúdo original, atuam minimizando a quantidade de perdas de informação na rede, ou maximizando a quantidade de informação que chega para a decodificação. Essa quantificação sobre a quantidade de perdas ou maximização de informação disponível para a decodificação são quase que invariavelmente, traduzidas em aspectos relativos à transmissão, tais como: perda de pacotes, perda de quadros, retardo, *jitter*, etc. Do ponto de vista da qualidade do vídeo em si, a comparação é quase sempre feita no sistema final, relacionando subjetivamente ou objetivamente a qualidade perceptual do que foi transmitido e do que foi recebido. Diversas são as técnicas e métodos de se avaliar a qualidade de vídeo de uma forma geral e principalmente de vídeo digital. Neste capítulo nós veremos as principais técnicas de avaliação baseadas em características subjetivas de qualidade, bem como aquelas de caráter objetivo, baseadas em métodos matemáticos.

Veremos também que, assim como há a possibilidade de avaliar vídeo do ponto de vista de qualidade visual ou de percepção de distorção matemática, há necessidade de quantificar através de métricas intermediárias ligadas ao processo de transmissão.

Nesse contexto, apresentamos uma proposta de métrica intermediária que atua no nível de avaliar a estrutura dos GOPs de vídeo que são transmitidos, possibilitando comparar a qualidade dessas informações utilizadas na decodificação do fluxo de vídeo.

3.2 Métricas para a Qualidade de Vídeo

Na medida que vídeo se torna uma parte fundamental das aplicações avançadas de rede, é importante poder medir a sua qualidade em vários estágios que vão do desenvolvimento de novos codificadores de vídeo até a monitoração da qualidade nos sistemas de transmissão. Para fazer uma estimativa e comparar o desempenho de todos os componentes e dispositivos envolvidos, há alguns métodos de avaliação e quantificação da qualidade de vídeo. Basicamente encontra-se duas classes de métodos disponíveis para tal intuito. Os testes subjetivos nos quais o observador humano é inquirido sobre uma avaliação ou uma pontuação do conteúdo visto. E os testes objetivos que são modelos computacionais que medem a qualidade comparando as seqüências de imagens original e distorcida. Estes testes podem produzir uma índice mais preciso, porém exigem uma aparato organizacional mais caro e complexo. Por outro lado, as métricas de qualidade objetiva são baseadas em métodos matemáticos, desde modelos simples com o PSNR a outros mais sofisticados que exploram os modelos de percepção visual humana que produzem resultados mais confiáveis. Ambos os métodos são considerados bastante úteis na medição da qualidade das aplicações de vídeo.

3.2.1 Os Testes Subjetivos para Avaliação de Vídeo

Os testes de qualidade subjetiva ajudam a capturar a percepção e o entendimento da qualidade do ponto de vista do usuário. A qualidade de percepção do usuário não se processa de forma unidimensional e depende de muitos fatores. A percepção do usuário é baseada no conteúdo específico que ele assiste. Depende ou não se o material de vídeo é interessante a ele. Tem também sido identificado que o que determina a qualidade também depende do propósito da interação e do nível de engajamento do usuário. A extensão no qual o nível de percepção que a qualidade está degradada depende da tarefa que o usuário está executando. Além disso, para muitas aplicações, a qualidade do som de fundo tem importância direta. O grau de avaliação de qualidade subjetiva de uma mesma seqüência de vídeo atinge normalmente uma pontuação maior quando acompanhado de uma boa qualidade de som, diminuindo a habilidade do usuário em detectar possíveis falhas no vídeo (Pearson, 1998).

Para algumas aplicações tais como conferência multimídia (audio e videoconferência), os usuários normalmente privilegiam uma melhor qualidade para o audio em relação a do vídeo. A qualidade percebida também depende de outros fatores tais como a distância de observação, o tamanho e a resolução da imagem, e as condições de iluminação.

Há uma distinção entre imagens medidas por modelos computacionais ou procedimentos matemáticos e a qualidade observada (fidelidade da imagem). A impressão é que imagens com um contraste alto ou um pouco mais coloridas chamam mais a atenção dos observadores humanos, muito embora de acordo com interpretações estritamente matemáticas de distorção, elas se apresentem mais distorcidas que as originais (De Ridder et al., 1995)(Fedorovskaya et al., 1997).

Os Procedimentos para a Avaliação da Qualidade Subjetiva

A avaliação da qualidade subjetiva de vídeo é a maneira mais confiável de quantificar o nível de percepção de qualidade do ponto de vista do usuário. Também é o método mais eficiente de testar o desempenho de codificadores de vídeo, modelos baseados na visão humana e métricas de avaliação de qualidade objetivas. Este procedimento, denominado MOS (*Mean Option Scores*), envolve testes subjetivos formais onde os usuários são inquiridos a ranquear a qualidade usando uma escala de cinco pontos, classificando a qualidade de ruim a excelente (vide figura 3.1).

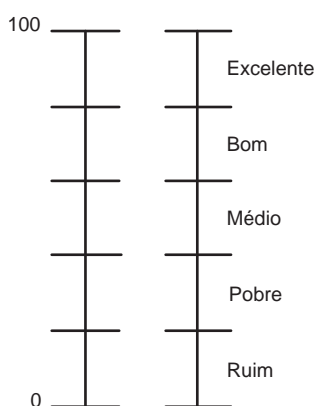


Figura 3.1: MOS - *Mean Option Scores*.

A recomendação do ITUT-R,BT.500-10 (ITU, 2000) formaliza este procedimento, sugerindo várias condições experimentais tais como a distância de visualização, as condições de visualização (características da tela, iluminação da sala, etc), seleção dos observadores e materiais de testes, bem como métodos de análise e de avaliação. Três procedimentos de testes são os mais comumente utilizados:

1-) *Double Stimulus Continuous Quality Scale (DSCQS)* A seqüência apresentada para um experimento DSCQS é ilustrada na figura 3.2a. Aos observadores são mostrados múltiplos pares de seqüências consistindo de a-) uma seqüência de teste e b-) uma de referência, preferencialmente de curta duração, em torno

de 10 segundos. A seqüência de teste e de referência são apresentadas duas vezes de forma alternada de tal forma que a ordem é escolhida de forma aleatória em cada experimento. Os observadores não são informados qual é a seqüência de referência e qual é a de teste. Eles devem ranquear cada uma das duas separadamente numa escala de qualidade contínua variando de “ruim” para “excelente”, tal qual mostrado na figura 3.2b. A análise é baseada nas diferenças na pontuação de cada par, que é calculada num equivalente numérico na faixa entre zero e 100. Essa diferenciação remove muita subjetividade no que diz respeito à experiência e ao conteúdo da cena.

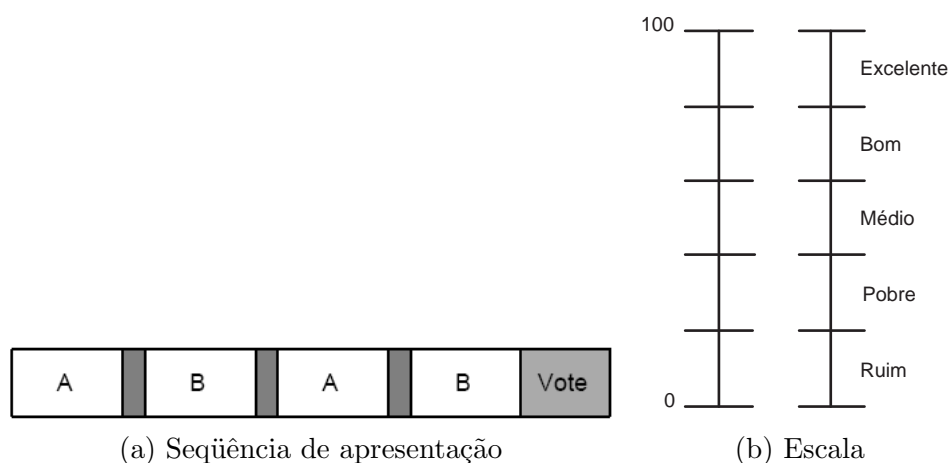


Figura 3.2: *Double Stimulus Continuous Quality Scale* (DSCQS).

2-) *Double Stimulus Impairment Scale* (DSIS) A seqüência de apresentação para um experimento DSIS é ilustrada na figura 3.3a. Oposto ao método DSCQS, a referência é sempre mostrada antes da seqüência de teste e nenhuma é repetida. Os observadores ranqueiam a quantidade de falhas na seqüência de teste numa escala discreta de cinco níveis variando de “muito ruim” a “imperceptível” tal qual mostrado na figura 3.3b.

3-) *Single Stimulus Continuous Quality Evaluation* (SSCQE) No lugar de separar seqüências curtas em pares, os observadores assistem a um programa de tipicamente 20 a 30 minutos de duração que tem sido processado pelo sistema sob teste. A referência não é mostrada. Utilizando um dispositivo armazenador de valores de qualidade, os observadores ranqueiam continuamente a qualidade instantânea percebida na escala DSCQS, indo de “ruim” a “excelente”.

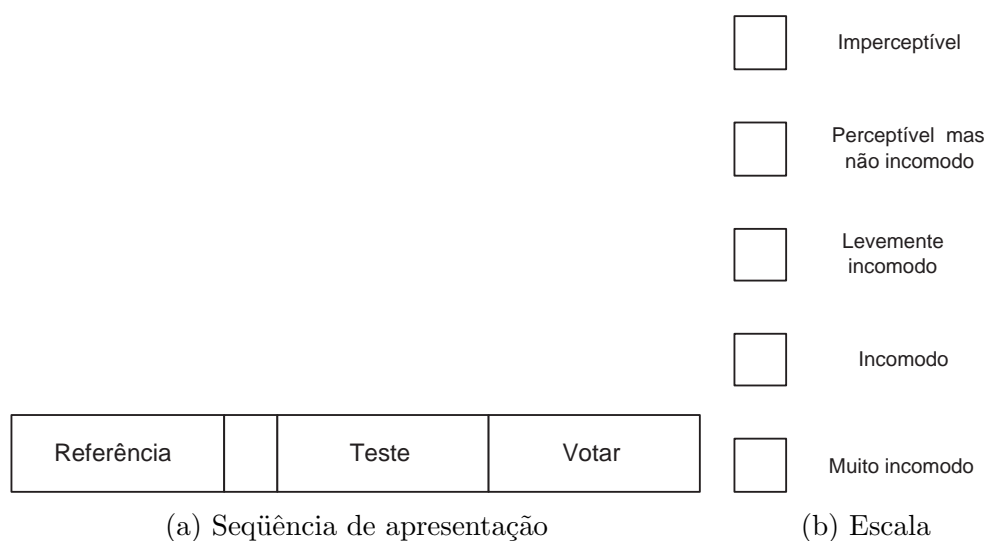


Figura 3.3: *Double Stimulus Impairment Scale* (DSIS).

3.2.2 Métricas Objetivas para Qualidade de Vídeo

Os procedimentos subjetivos para medição da qualidade de vídeo constituem o mais fiel método para conseguir discernimento no desempenho da transmissão em sistemas de vídeo. A estrutura cara e complicada dos testes subjetivos torna este método não muito atrativo como um procedimento de avaliação automático. O envolvimento de atores humanos neste processo, torna esta abordagem não utilizável quando os sistemas de monitoração necessitam ser embutidos nos sistemas de processamento. As métricas de qualidade que são capazes de produzir objetivamente um ranqueamento se apresentam uma alternativa bastante atrativa. Dessa forma, as métricas objetivas de qualidade tem sido um assunto de pesquisa por vários anos. Os primeiros modelos foram projetados para trabalhar na transmissão de vídeo analógico. Entretanto, o advento de manipulação e transmissão digital de vídeo fazem com que o material de vídeo seja afetado de várias maneiras diferentes, levando a diferentes tipos de falhas. Faz-se necessário desenvolver métricas de qualidade que considerem o impacto da codificação e transmissão em um sistema digital. A mais simples maneira de medir a qualidade é calcular a distorção no nível de pixel. A relação sinal-ruído de pico - PSNR (*Peak Signal-to-Noise Ratio*) - mede o erro médio quadrático - MSE (*Mean Square Error*) - entre as seqüências de referências e de teste, e tem sido extensivamente utilizado pela comunidade ligada ao processamento de imagem. Embora seja uma métrica clara para calcular qualidade, ela não pode descrever distorções percebidas por um sistema complexo e multi-dimensional como o sistema visual humano. Ela falha em dar uma boa predição em muito casos. Pesquisas recentes em processamento de imagem tem objetivado o desenvolvimento que utilize os modelos do sistema visual humano, en-

quanto outros exploram essas propriedades dos mecanismos de compressão e avaliam o efeito que os artefatos de codificação tem na qualidade percebida. Em suma, podemos estabelecer a seguinte ordenação para as métricas objetivas de vídeo:

1-) Métricas baseadas em pixels A média do erro quadrático (MSE) e a relação sinal-ruído de pico (PSNR) são as mais populares métricas de diferença em processamento de imagem e vídeo. A MSE é a média das diferenças quadradas entre os valores de níveis de cinza dos pixels em duas imagens ou seqüências I e \bar{I} :

$$MSE = \frac{1}{TXY} \sum_t \sum_x \sum_y [\bar{I}(t, x, y) - I(t, x, y)]^2 \quad (3.1)$$

para imagens de tamanho $X \times Y$ e T quadros na seqüência. A diferença média por pixel é dada pela raiz do erro médio quadrático $RMSE = \sqrt{MSE}$.

O PSNR em decibéis é definido como:

$$PSNR = 10 \log \frac{m^2}{MSE} \quad (3.2)$$

onde m é o valor máximo que um pixel pode ter. MSE e PSNR são bem definidos apenas para informação de luminância.

Tecnicamente, MSE mede a diferença entre imagens, enquanto PSNR mede a fidelidade da imagem, isto é, o quanto uma imagem é próxima de uma imagem de referência, que é normalmente a imagem original não corrompida. A popularidade dessas duas métricas está enraizada no fato que minimizar o MSE é equivalente a maximizar a estimação de probabilidade para a medição independente de erros segundo uma distribuição normal. Um outro fato é que a computação do MSE e PSNR é muito fácil e rápida. Devido à natureza de serem baseadas na comparação pixel a pixel de imagens, essas métricas tem uma relação de aproximação limitada com respeito a distorção ou a qualidade percebida por sistemas visuais humanos. Em certas situações, a qualidade subjetiva da imagem pode ser melhorada adicionando ruído e dessa forma reduzindo o PSNR. Outras métricas baseadas em pixels são discutidas em (Eskicioglu and Fisher, 1995).

2-) Modelos de canais simples Os primeiros modelos de visão humana adotaram uma abordagem de canal simples. O modelo de canais simples considera o sistema visual humano com um simples filtro espacial, cujas características são definidas pela função de sensibilidade ao contraste. A saída de tal sistema é uma versão

filtrada da entrada de um estímulo, e sua detectabilidade depende de um certo limiar (Winkler, 2000).

3-) Modelos de canais duplos O modelo de canais duplos assume que cada banda de frequências espaciais é tratada por um canal independente. A detecção ocorre independentemente em qualquer canal quando o sinal naquela banda atinge um determinado limiar (Winkler, 2000).

3.3 Outros Tipos de Métricas

Vimos nas secções anteriores que as métricas para avaliação da qualidade de vídeo são baseadas em características subjetivas da visão ou de aspectos matemáticos relacionados aos pixels da imagem. Entretanto, há várias características possíveis de se quantificar, relacionadas ao meio de transmissão. A pura e simples perda de pacotes tem uma certa correlação com a qualidade visual da informação, porém fortemente relacionada aos aspectos de codificação tais como a estrutura de semântica do fluxo de bits do vídeo. Entre esses aspectos encontramos a estrutura hierárquica dos modernos codificadores que se utilizam de técnicas de predição temporais e espaciais para atingirem altas taxas de compressão. Assim há a necessidade de investigar a influência dessa estrutura de quadros empregada nos codificadores atuais, de modo a quantificar a sua influência na qualidade da informação transmitida.

Nesse sentido, Wolfinger (Wolfinger, 1997a)(Wolfinger, 1997b) tem adotado o termo ε_f como métrica de qualidade da informação transportada num GOP de vídeo, que se refere a probabilidade de perda de qualquer quadro numa seqüência de vídeo a ser mostrada, incluindo as perdas diretas e indiretas, onde as perdas diretas são perdas na rede e as perdas indiretas são perdas na apresentação do vídeo no lado do receptor, onde o quadro F a ser apresentado não tem sido diretamente perdido, mas sim um quadro do qual F depende.

Ziviani et al (Ziviani, Wolfinger, Rezende, Duarte and Fdida, 2002b)(Ziviani, Wolfinger, Rezende, Duarte and Fdida, 2002a) tem adotado uma métrica decorrente da métrica de Wolfinger, definida como Q (*picture quality*) que relaciona o número esperado de quadros corretamente decodificáveis em um GOP (N_{dec}) sobre o tamanho do GOP (N). Assim,

$$Q = \frac{N_{dec}}{N}, 0 \leq Q \leq 1 \quad (3.3)$$

onde,

$$N_{dec} = (1-\xi_I) + (1-\xi_I) \sum_{j=1}^{N_P} (1-\xi_P)^j + (M-1)(1-\xi_I)(1-\xi_B) [(1-\xi_I)(1-\xi_P)^{N_P} + \sum_{j=1}^{N_P} (1-\xi_P)^j] \quad (3.4)$$

e, ξ_I , ξ_P e ξ_B são as probabilidades para um quadro ser diretamente perdido, mas não indiretamente perdido; α_I , α_P e α_B as probabilidades de perda de pacotes contendo informação de cada tipo de quadros.

Em (Zhang and Xu, 1999) é proposto e definido um critério baseado nos macroblocos de um vídeo, chamada *Macroblock Impairment Rate* ou MBIR. O MBIR é definido como a probabilidade que um macrobloco esteja defeituoso.

Na próxima secção, apresentamos uma métrica intermediária que se baseia na estrutura dos GOPs de vídeo e permite predizer acerca do nível de qualidade dessas estruturas quando elas se apresentam para a decodificação.

3.4 Uma Métrica Proposta Baseada na Estrutura do GOP

A utilização da taxa de perdas de pacotes como sendo a métrica adotada para avaliar a qualidade do vídeo apresentado não se mostra satisfatória, pois não basta saber quantos pacotes, associados aos tipos de quadros, foram perdidos. É preciso avaliar quais quadros pertencentes a um determinado GOP foram recebidos no destino, e se estes serão utilizados no momento da apresentação, de acordo com as regras de dependência dos quadros. Por exemplo, se um GOP constituído pelos quadros *IBBPBBPBBPBB* é transmitido e os quadros recebidos no destino foram *IB-PBB-BBPBB*, então, no momento da apresentação, os quadros apresentados serão *IB-P-----* onde “-” representa a falta de um quadro na apresentação (vide figura 3.4). Neste exemplo um quadro B e um quadro P foram perdidos, consistindo em perdas diretas, e estas perdas acarretaram o descarte de seis quadros B e mais um quadro P, consideradas perdas indiretas apesar de terem sido recebidos com sucesso.

Tendo por objetivo avaliar a qualidade do vídeo no momento em que um GOP chega para a decodificação, definimos uma métrica baseada no que foi chamado de *Fator de Qualidade de Vídeo* (q). A idéia está no cálculo do fator q para cada GOP do vídeo, baseando-se na média representada pela equação 3.5:

$$q = \frac{a_I * x_I + a_P * x_P + a_B * x_B}{a_I * N_{TI} + a_P * N_{TP} + a_B * N_{TB}}, 0 \leq q \leq 1 \quad (3.5)$$

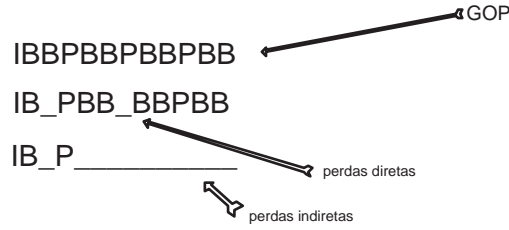


Figura 3.4: Relação de perdas diretas e indiretas num GOP.

onde,

- j : representa o tipo de quadro (se I, P ou B);
- x_j : representa o número de quadros do tipo j que são recebidos e mostrados;
- N_{Tj} : representa o número total de quadros do tipo j presentes em um GOP;
- a_j : representa o coeficiente relativo (quadros do tipo j no GOP);

e,

$$a_j = \frac{N_{Ij}}{N_{II} * N_{TI} + N_{IP} * N_{TP} + N_{IB} * N_{TB}} \quad (3.6)$$

N_{Ij} : representa as perdas diretas e indiretas (os quadros j).

Os limites para o valor de q se encontram sob duas situações:

1. a primeira é quando todos os quadros de um GOP são perdidos ($x_I = x_B = x_P = 0$), de forma direta ou indireta, implicando em $q = 0$;
2. e a segunda quando todos os quadros são recebidos ($x_I = N_{TI}$, $x_B = N_{TB}$ e $x_P = N_{TP}$), resultando em $q = 1$.

Outra questão relevante que é levada em consideração são as perdas indiretas, ou seja, as variáveis x_I , x_B e x_P consideram como quadros recebidos somente aqueles que serão utilizados no momento da decodificação. Por exemplo, se o quadro I de um GOP for perdido, então teremos $x_I = x_B = x_P = 0$, independente do número de quadros B e P transmitidos com sucesso (perdas indiretas).

Tomemos como exemplo o cálculo de q para um GOP onde $N = 12$ e $M = 3$. Teríamos os seguintes valores: $N_{TI} = 1$, $N_{TB} = 8$, $N_{TP} = 3$, $N_{II} = 14$ (ou seja, todos os quadros do GOP mais os dois últimos quadros Bs do GOP anterior), $N_{IB} = 8$ (ou seja, todos os quadros Bs) e $N_{IP} = 11$ (ou seja, todos os quadros Bs e Ps). Assim, para o GOP do exemplo anterior, o valor de q seria igual a 0,297, pois $x_I = 1$, $x_B = 1$ e $x_P = 1$.

De fato q possui uma associação relativa com a qualidade do vídeo apresentado, principalmente com referência aos quadros Bs. Em outras palavras, a perda de um quadro B (de um determinado GOP) implicará, a priori, em qualidades diferentes dependendo da posição dele no GOP e levando em conta a sua importância associada à resolução temporal¹. Talvez, uma alternativa para tentar aproximar o valor de q à qualidade real seria associar um peso para cada quadro B do GOP (por exemplo, o número de bits do quadro). Porém dependeria da forma como o estimador de movimento do codificador encontra os vetores de movimento diante de uma mudança de cena, o que poderia implicar em conclusões contraditórias quanto aos quadros B. Por outro lado, a métrica possui o seu valor no sentido da avaliação propriamente dita das informações do fluxo de vídeo que são transportadas, ou seja, ela não avalia diretamente a qualidade do ponto de vista do usuário final.

3.5 Conclusões

Vimos que a avaliação de vídeo, através de métricas de qualidade, podem ser agrupadas naquelas de caráter subjetivo e aquelas objetivas (Winkler, 2000). Elas avaliam o vídeo do ponto de vista de percepção visual, seja do ponto de vista do conceito de visão humana como na forma de comparação de distorções por meio de métodos matemáticos.

Há nesse contexto o aspecto relacionado com a transmissão do vídeo, que lida com a qualidade das informações que são trafegadas pela rede de comunicação, que devido às imperfeições das arquiteturas, modelos de serviços, taxa de utilização, etc, ocasionam perdas de conteúdos que mais tarde se traduzem em perdas de percepção visual para o usuário final.

Apresentamos um métrica intermediária ligada ao processo de transmissão que nos permite avaliar os mecanismos que utilizamos neste trabalho, atuando sozinhos ou numa combinação sinérgica.

A contribuição maior vem relacionada à abrangência da métrica proposta em expressar com um pouco mais de clareza as relações de qualidade entre as diversas combinações de quadros que formam um GOP. Se nós compararmos a nossa métrica com outras similares encontradas na literatura, encontramos apenas uma similaridade com aquela de (Ziviani, Wolfinger, Rezende, Duarte and Fdida, 2002b). Embora ambas as métricas estejam baseadas nos quadros decodificáveis, há uma diferença significativa

¹A fórmula apresentada anteriormente considera estes quadros como possuindo o mesmo valor associado à qualidade.

entre ambas. Tomemos por exemplo a seguinte situação, se nós tivermos duas diferentes seqüências de GOPs, a primeira formada por GOP1: $[IBBP - -PB - P - -]$, GOP2: $[- - - - - - - - - - - -]$, GOP3: $[IBBP - -PB - P - -]$ e a segunda por GOP1: $[IBBP - -P - -P - -]$, GOP2: $[IBBP - -P - -P - -]$, GOP3: $[I - -P - - - - - - - -]$ e se avaliarmos de acordo com a nossa métrica proposta e comparássemos com aquela encontrada em (Ziviani, Wolfinger, Rezende, Duarte and Fdida, 2002b), suporíamos, a priori, que encontraríamos valores similares, pois as seqüências apresentam o mesmo número de quadros decodificáveis. Entretanto verificamos valores de qualidade distintos, principalmente se houver muitas mudanças de cena.

A métrica também pode ser utilizada com variável de comparação e controle em outras abordagens reativas que discutiremos no capítulo 8.

Capítulo 4

As Redes com Qualidade de Serviço

4.1 Introdução

As redes de pacotes baseadas no IP - *Internet Protocol* foram concebidas originariamente baseadas num modelo de tráfego do tipo melhor esforço. Isto é, um suporte de comunicação baseado no IP, que não provê nativamente nenhum tipo de qualidade de serviço às aplicações que utilizam esse protocolo ¹.

Entretanto, o IP tornou-se de fato, o protocolo global de interconexão de redes, principalmente devido à popularização da Internet, aliado ao fato de que, a grande maioria das aplicações de rede são escritas para operar sobre esse protocolo.

Os esforços que se tem feito no sentido de dotar o IP de alguma forma de QoS - *Quality of Service* - é decorrente, principalmente, da “globalização” da Internet. Diversos tipos de serviços que surgem e continuam surgindo, exigem cada vez mais e mais da rede de comunicação, no que tange aos requisitos de largura de banda, latência, segurança, etc. Os dois primeiros, são alguns dos principais fatores críticos nas novas aplicações que envolvem a transmissão de mídias contínuas, como vídeo digital em tempo real.

Devido à grande aceitação, de fato, do IP como protocolo no nível de rede, e que é utilizado pela ampla maioria das aplicações em rede, a comunidade industrial e acadêmica tem trabalhado em proposições diversas para modificar e adicionar funcionalidades de QoS ao mesmo.

Nos últimos anos, o trabalho mais expoente com esse intuito tem sido realizado pelos principais organismos de padronização da área de redes, principalmente os ligados

¹Muito embora exista o campo TOS - *Type Of Service*, específico do cabeçalho do IPv4, que determina a prioridade de encaminhamento do pacotes. Este campo, como será visto na sessão 4.2.2, é empregado em abordagens baseadas nos Serviços Diferenciados.

a Internet. Particularmente, o IETF - *Internet Engineering Task Force*, tem sido o organismo mais ativo nessa área, que envolve a Qualidade de Serviço sobre as redes IP.

No decorrer deste capítulo, abordaremos as propostas para IP QoS do IETF, e dentre elas, os serviços diferenciados uma vez que eles e seus mecanismos intrínsecos fazem parte do esquema de proteção de pacotes de vídeo a ser discutido no capítulo 6.

4.2 As Principais Propostas para Qualidade de Serviço sobre Redes IP

O IETF é uma grande comunidade internacional aberta formada por projetistas, operadores, vendedores e pesquisadores, interessados na evolução da arquitetura Internet e nos aspectos relacionados à operação da mesma.

Essa organização é formada por diversos grupos de trabalho atuando em várias áreas. Dentre elas, na Área de Transporte, alguns Sub-Grupos trabalham ou trabalharam, entre outros aspectos, com “qualidade de serviço sobre redes IP” - IP QoS. Alguns dos sub-grupos foram os seguintes:

- *Differentiated Services* (diffserv)
- *Integrated Services* (intserv)
- *Integrated Services over Specific Link Layers* (issll)
- *Resource Reservation Setup Protocol* (rsvp)

Os dois primeiros tratam especificamente de algumas abordagens que possibilitam o estabelecimento de “certos níveis de QoS” sobre um suporte IP, baseadas na reserva de recursos. Essas abordagens propõem dois modelos de serviços visando implementar IP QoS: o modelo dos Serviços Integrados e o modelo dos Serviços Diferenciados. O grupo **rsvp**, trabalha no protocolo de sinalização de QoS, que interopera tanto nas abordagens baseadas em “diffserv” como em “intserv”.

O grupo “issll”, como o próprio nome diz, trabalha em aspectos de QoS abaixo da camada 2 do modelo ISO/OSI.

4.2.1 Os Serviços Integrados

O modelo de Serviços Integrados foi proposto no início dos anos 90, por um grupo de pesquisadores, cujos trabalhos na época, estavam relacionados de alguma forma com IP QoS. Este modelo foi formalizado em um documento do IETF (Braden et al.,

1994), na forma de uma RFC. Ele define um novo modelo de serviço para a Internet, adicionando ao tradicional serviço *best effort*: um **serviço para tráfego em tempo real** e um **serviço para compartilhamento controlado de conexão** (*controlled link sharing*).

O serviço para tráfego em tempo real foi denominado “Serviços Garantidos” (*Guaranteed Services*) e é definido como aquele que garante ² limites no retardo e largura de banda em aplicações fim-a-fim. Esse serviço é definido na RFC 2212 (Shenker and Wroclawski, 1997).

O serviço para compartilhamento controlado de conexão foi denominado “Serviços de Carga Controlada” (*Controlled-Load Services*) e é definido como aquele que prevê um fluxo de dados com uma qualidade de serviço aproximadamente igual a de uma rede não congestionada. No entanto, ele usa uma certa capacidade de controle (controle de admissão) de forma a assegurar que o serviço recebido, tenha a mesma qualidade, mesmo que os elementos de rede estejam sobrecarregados. Esse serviço é definido na RFC 2211 (Wroclawski, 1997).

No contexto do modelo *IntServ*, um fluxo define uma fila de pacotes com o mesmo endereço da fonte e destino, bem como os números das portas.

Para garantir certa qualidade no serviço de rede oferecido a esse fluxo, um protocolo sinaliza aos elementos de interconexão e sistemas finais, informação referente à descrição do fluxo e sobre a disponibilidade de recursos. Então, um Controle de Admissão reserva alguma quantidade de recursos da rede. O Controle de Admissão implementa duas funcionalidades: a-) a caracterização ou quantificação dos recursos disponíveis na rede, requisitados pela aplicação e, b-) a comunicação dessas informações à rede. Esse protocolo de sinalização é o RSVP (*Resource ReserVation Protocol*).

O modelo de Serviços Integrados é implementado a partir de quatro componentes: o “protocolo de sinalização” (RSVP), o “controle de admissão”, o “classificador” e o “escalador de pacotes”. A Figura 4.1 mostra as diversas relações entre os componentes do modelo dos Serviços Integrados.

O RSVP -*Resource ReserVation Protocol*

O protocolo RSVP é usado pelos sistemas finais (*hosts*) para requisitar qualidades específicas de serviços da rede. Ele também é usado por roteadores para encaminhar requisições de QoS ao longo de todos os nós no caminho fim-a-fim dos fluxos e, estabelecer e manter o estado de forma a prover os serviços requisitados.

²Matematicamente provável.

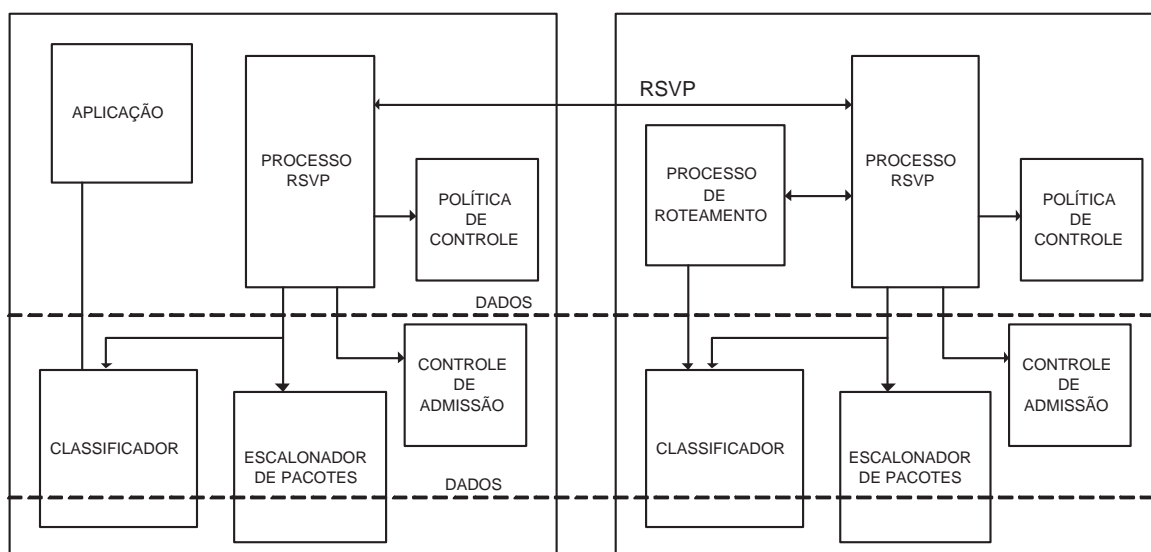


Figura 4.1: Componentes do modelo dos Serviços Integrados

As requisições do RSVP devem geralmente resultar em recursos sendo reservados em cada nó ao longo do caminho de dados de forma unidirecional. Dessa maneira, o RSVP trata um emissor distintamente de um receptor, embora o mesmo processo da aplicação possa atuar tanto no emissor quanto no receptor, ao mesmo tempo (ver Figura 4.1). O RSVP opera no topo do IPv4 ou IPv6, ocupando o lugar do protocolo de transporte na pilha de protocolos. No entanto, o RSVP não transporta qualquer informação da aplicação. Também, o RSVP não é um protocolo de roteamento, e é projetado para operar com os atuais e futuros protocolos de roteamento *unicast* e *multicast*. Um processo RSVP consulta uma base local de roteamento para obter as rotas. No caso do *multicast*, por exemplo, um *host* envia uma mensagem IGMP para ingressar num determinado grupo, e então envia mensagens RSVP para reservar recursos.

4.2.2 Os Serviços Diferenciados

Os Serviços Diferenciados (*DiffServ*) surgiram como uma das abordagens para implementar QoS nas redes IP. A estratégia consiste em utilizar o campo TOS (*Type Of Service*) (vide figura 4.2) no cabeçalho do IPv4, onde as aplicações poderiam marcar num campo de 3 bits, as suas necessidades por “baixo retardo”, “alta vazão de dados” ou “baixa taxa de perdas”. No entanto, com o campo TOS original, definido em (Postel, 1981), as combinações são limitadas. Nos Serviços Diferenciados, o campo TOS é renomeado para DS (*Differentiated Services*) (vide figura 4.3) e foi definido um conjunto de tratamentos para o encaminhamento dos pacotes, denominados PHBs (*Per-Hop Behaviour*). Com essa forma de marcação, várias classes de serviço podem ser criadas. Os

Serviços Diferenciados podem ser encarados como um esquema de prioridade relativa.

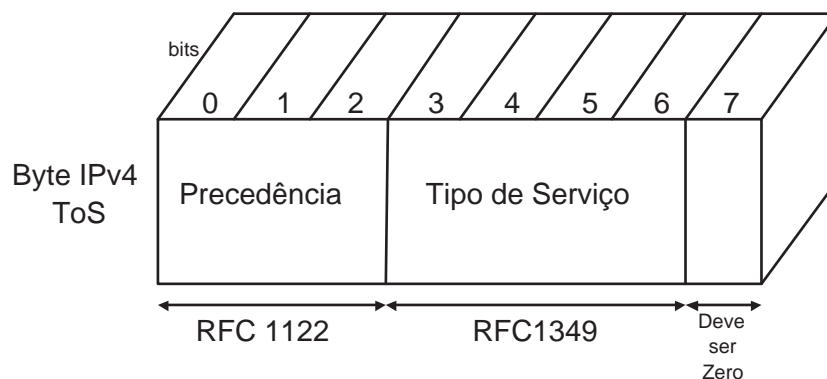


Figura 4.2: Campo TOS.

De uma forma geral, para se receber Serviços Diferenciados de algum ISP (*Internet Service Provider*), deve-se ter um SLA (*Service Level Agreement*) com o ISP. Um SLA basicamente especifica as classes de serviço suportadas e a quantidade de tráfego permitido em cada classe. Um SLA pode ser estático ou dinâmico, sendo que um SLA estático é negociado com base em períodos, numa base temporal (como por exemplo: semanalmente, mensalmente, etc). Já para SLA dinâmicos, deve-se usar um protocolo de sinalização (por exemplo utilizando o protocolo RSVP (Zhang et al., 1993)(Braden et al., 1994)) para requisitar os serviços sob demanda.

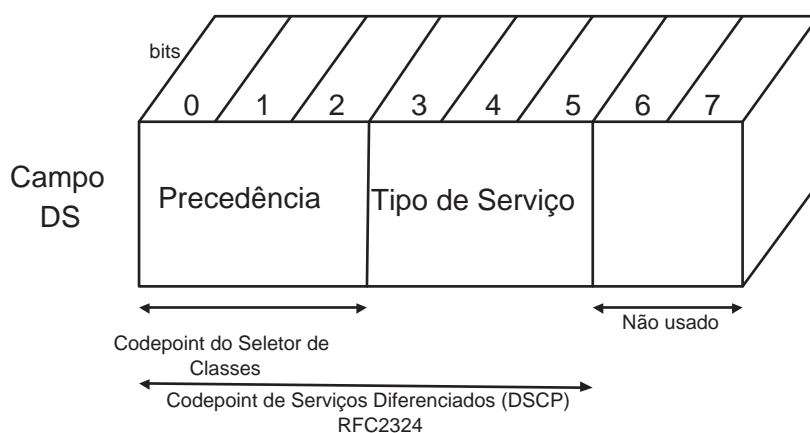


Figura 4.3: Campo DS.

A marcação do campo DS, para indicar determinado tipo de serviço, pode ser feita pelo sistema final onde a aplicação está sendo executada, ou pelo roteador de borda do domínio *DiffServ*, baseado numa classificação MF (*Multi-Field*)³.

³Processo de classificação dos pacotes baseados no conteúdo de múltiplos campos tais como endereço fonte, endereço destino, *byte* TOS, *protocol* ID, número da porta fonte e número da porta destino.

No ingresso da rede de um domínio *DiffServ*, os pacotes são classificados, policiados e possivelmente amoldados. A classificação, o policiamento e as regras de suavização usadas nos roteadores de ingresso são derivadas dos SLAs, assim como a quantidade de espaço de “baferização” (*buffering space*).

Dessa forma, usando esses mecanismos de classificação, policiamento, suavização e escalonamento, é possível oferecer vários tipos e classes de serviços diferenciados.

Os Principais Serviços Diferenciados Padronizados pelo IETF

Ao longo dos últimos anos, o IETF tem padronizado alguns tipos de serviços diferenciados. Muitos são encontrados em equipamento de interconexão de redes comerciais (produtos de prateleira). Alguns desses serviços são:

Serviço *Premium* - para aplicações que requerem serviços com baixo retardo e baixa variação do retardo (*jitter*). Esse serviço tem uma política de encaminhamento dos pacotes do tipo, “encaminhe-me primeiro”, cujo PHB é do tipo Encaminhamento Expresso (*Expedited Forwarding*) (Davie et al., 2002);

Serviço *Assured* - para aplicações que requerem serviços melhor do que o serviço melhor esforço. Nesse tipo de serviço, a política de encaminhamento dos pacotes do tipo, “descarte-me por último”, cujo PHB é do tipo Encaminhamento Assegurado (*Assured Forwarding*) (Heinanen et al., 1999);

Serviço *Olympic* - que aloca QoS as aplicações baseado em três classes de serviço, com a qualidade decrescente. São os serviços: “ouro”, “prata” e “bronze” (Sander and Fidler, n.d.).

Os dois primeiros serviços, o Encaminhamento Expresso ou “Serviço Premium” e Encaminhamento Assegurado ou “Serviço Assegurado” têm sido os mais implementados em produtos comerciais de interconexão de rede e iniciativas ligadas ao desenvolvimento de software livre.

Encaminhamento Expresso

A RFC 3246 (Davie et al., 2002) descreve com relação ao Serviço Expresso que “a intenção do PHB EF é fornecer uma base para serviços com baixas perdas, baixo retardo e baixo valor para o *jitter*”.

As causas dominantes de retardo nas redes de pacotes são os retardos fixos de propagação em canais WAN e os retardos de filas em comutadores e roteadores. Uma vez que os retardos de propagação são inerentes da topologia adotada, retardo e variação do

retardo (*jitter*) são minimizados quando os retardos nas filas são minimizados também. A intenção do PHB EF é prover um comportamento no qual os pacotes usualmente encontrem as filas baixas ou vazias. Além disso, se as filas se mantêm baixas, as perdas de pacotes também se mantêm mínimas.

Para assegurar que as filas encontradas pelos pacotes EF estejam baixas, é necessário se assegurar que a taxa de serviço dos pacotes EF de uma dada interface de saída exceda a taxa de chegada na interface sobre intervalos longos e curtos, independentemente da carga dos outros tráfegos (os tráfegos não EF).

Um exemplo de encaminhamento expresso, que implementa o serviço Premium é a proposta para QoS da Internet⁴. A iniciativa articulada pelo QBone⁵ visa implementar alguns tipos de serviços diferenciados sobre o *backbone* da Internet2, entre eles a Arquitetura QBone (Teitelbaum, 1999).

Encaminhamento Assegurado

A argumentação encontrada na RFC 2597 (Heinane et al., 1999) para serviços deste tipo é que “há uma demanda na Internet em prover o encaminhamento assegurado de pacotes IP. Em uma aplicação típica, uma companhia usa a Internet para conectar os seus sítios geograficamente distribuídos e quer uma garantia que os pacotes IP dentro da sua Intranet sejam encaminhados com uma alta probabilidade enquanto que o tráfego agregado de cada sítio não deve exceder a taxa de informação acordada no perfil de tráfego. É desejável que um sítio possa exceder o seu perfil de tráfego previamente acordado, porém com a percepção que o tráfego excedente não será entregue com uma alta probabilidade tal qual o tráfego que se enquadra dentro do perfil. Também é importante que a rede não reordene os pacotes que pertencem ao mesmo microfluxo, não interessando se eles estão dentro ou fora do perfil.”

Um grupo de PHBs com serviços assegurados determina o encaminhamento de pacotes IP em N classes do tipo AF. Dentro de cada classe, a um pacote IP é designado um de M níveis de precedência de descarte. Um pacote IP que pertence a uma determinada classe AF i e tem uma precedência de descarte j é marcado com o *codepoint* assegurado $AFij$, onde $1 \leq i \leq N$ e $1 \leq j \leq M$.

Atualmente, quatro classes ($N = 4$) com três níveis de precedência de descarte em cada classe ($M = 3$) são definidas para o uso geral. Mais classes AF ou níveis de descarte podem ser definidos localmente de acordo com as necessidades do usuário (vide figura 4.4).

⁴<http://www.internet2.edu>

⁵<http://qbone.internet2.edu/>

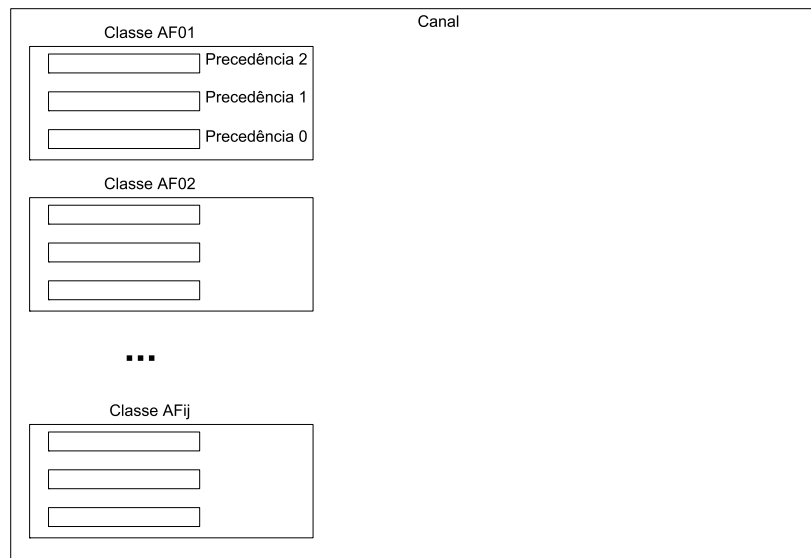


Figura 4.4: Classe AF definida na RFC 2597.

A RFC 2597 recomenda os seguintes procedimentos e ações para:

Condicionamento de Tráfego Um domínio DS deve controlar na borda a quantidade de tráfego AF que entra e sai nas várias precedências de descarte. Tais ações de condicionamento de tráfego podem incluir a suavização, descarte, incremento e decremento da precedência e redistribuição do pacote a outra classe AF. Entretanto, as ações de condicionamento de tráfego não devem causar a reordenação dos microfluxos.

Enfileiramento e Comportamento de Descarte Uma implementação AF deve tentar minimizar o congestionamento de longa duração dentro de cada classe, todavia permitindo o congestionamento de curta duração resultante de rajadas. Isso exige um algoritmo de gerenciamento ativo de filas, como por exemplo o RED *Random Early Drop* proposto por Floyd et al. (Floyd and Jacobson, 1993). A recomendação é que uma implementação AF deve responder a congestionamento de longa duração em cada classe, descartando pacotes, e lidando com congestionamento de curta duração, enfileirando pacotes. Essa política implica na presença de função de suavização ou de filtragem que monitora os níveis de congestionamento instantâneos e computa o nível de suavização. O algoritmo de descarte utiliza esse nível de congestionamento suavizado para determinar quando o pacote deve ser descartado. Já o algoritmo de descarte deve ser insensível às características de tráfego de curta duração dos micro-fluxos que utilizam um classe AF. Isto é, fluxos com diferentes taxas de rajadas de curta duração, mas

com idênticas taxas de alta duração devem ser descartados com essencialmente a mesma probabilidade. A forma de alcançar este objetivo é utilizar aleatoriedade na função de descarte.

O algoritmo de descarte deve tratar todos os pacotes dentro de uma única classe assim como seus respectivos níveis de precedência de forma idêntica. Isto implica que para qualquer nível suavizado de congestionamento, a taxa de descarte dos pacotes de um micro-fluxo em particular dentro de um único nível de precedência, deve ser proporcional àquela porcentagem do fluxo do total de tráfego passando por aquele nível de precedência.

A realimentação com a indicação do congestionamento para os nós finais, assim como o nível de pacotes descartados em cada precedência de descarte, deve ser gradual e não abrupta, de forma a permitir ao sistema alcançar um ponto de operação estável.

4.2.3 Serviços Integrados *versus* Serviços Diferenciados: Prós e Contras

Essas duas arquitetura, propostas pelo IETF, são hábeis em prover IP QoS. Ao nível de definição de serviço, *IntServ* provê serviços garantidos fim-a-fim (Shenker and Wroclawski, 1997) ou serviço de carga controlada (Wroclawski, 1997) numa base por fluxo (seja individual ou agregado). Já *DiffServ* provê um limitado nível de diferenciação de serviços entre um pequeno número de classes. A nível de implementação, soluções correntes baseadas em *IntServ* requerem que cada roteador processe mensagens de sinalização “por fluxo” e mantenha o estado da QoS junto com o encaminhamento das informações no caminho de controle, e desempenhe uma classificação, um escalonamento e uma gerência de *buffer* no caminho da informação.

Desempenhando uma gerência “por fluxo” dentro da rede, afeta a escalabilidade e robustez da mesma. Isto porque a complexidade dessas operações “por fluxo”, normalmente cresce em função do número de fluxos; e mais tarde, devido a dificuldade de manter a consistência da dinâmica e replicação dos estados, num ambiente de rede distribuído.

Algumas soluções tem sido apontadas no sentido de diminuir o número de fluxos, agregando-os em micro-fluxos (Baker, 1999), onde é proposta uma maneira para, dinamicamente, criar a reserva agregada, a classificação do tráfego para o qual a reserva agregada se aplica e determinar quanta largura de banda é necessária para atender os requisitos. Conceitualmente, essa proposta de usar uma simples reserva RSVP para

agregar outras reservas RSVP, é similar ao uso de um VP (*Virtual Path*) ATM. No entanto essa solução resolve parcialmente o problema. É possível imaginar um cenário onde o número de macro-fluxos (um agregado de fluxos) cresce numa proporção que torna os nós de borda sobrecarregados.

Stoica et al (Stoica and Zhang, 1999) propõem técnicas que não requerem a gerência por fluxo no roteadores do núcleo da rede, mas que permitem a implementação de serviços garantidos com níveis de flexibilidade, utilização e segurança similar aqueles que são desempenhados por mecanismos que atuam por fluxo.

DiffServ, por outro lado, transmite a carga de processamento dos fluxos apenas aos roteadores de borda (roteadores que se encontram nas bordas do domínio ⁶, interfaceando com os usuários dos serviços.), ficando os roteadores do núcleo apenas com a tradicional função de roteamento e encaminhamento dos pacotes, a partir de filas especiais, baseado num pequeno número de PHBs. Dessa forma, levando a complexidade para as bordas da rede, mantendo o núcleo simples, *DiffServ* é uma solução mais escalável que *IntServ*. No entanto, *DiffServ* ainda precisa solucionar o problema do controle de admissão no caminho de controle. Uma proposta é usar a figura de um *Bandwidth Broker* (BB) centralizado (Nichols et al., 1997), que mantém a topologia bem como o estado de todos os nós na rede. Assim, o controle de admissão pode ser implementado pelo *broker*, eliminando a necessidade da manutenção das reservas de estados distribuídas. Entretanto, essa abordagem centralizada é mais adequada para ambientes onde a duração dos fluxos é longa, e eventos de estabelecimento e encerramento de fluxos são raras. Para suportar um controle fino e dinâmico dos fluxos, é necessário uma arquitetura de *broker* distribuída, onde a base de dados seja replicada ou particionada.

Um outro limitante quanto à flexibilidade de *DiffServ* em alocar QoS às aplicações, é o número limitado de classes de serviço, tendo o usuário do serviço de escolher (de acordo com preço e/ou desempenho), a classe que melhor lhe convier. Dovrolis et al (Dovrolis et al., 1999) propõem um esquema de serviços diferenciados proporcionais, cujo modelo ajuda o operador de rede na “sintonia fina” para ajustar o espaçamento de qualidade entre classes, independente da carga da classe.

⁶Diferente dos roteadores de borda, que são aqueles que interconectam domínios DiffServ

4.2.4 Interoperação entre Serviços Integrados e Serviços Diferenciados

Apesar de serem abordagens distintas quanto a manutenção do estado dos fluxos, *IntServ* e *DiffServ* podem coexistir e cooperar em certos cenários (Metz, 1999).

A Figura 4.5 ilustra duas diferentes maneiras onde a sinalização com o RSVP poderia ser implementada para, essencialmente, 1-) colocar fluxos de aplicações num apropriado fluxo agregado *DiffServ*, assegurando que as aplicações recebam suas QoS solicitadas. As duas regiões com computadores e roteadores suportando RSVP são conectadas por um domínio de transito com *DiffServ*. Em ambos os casos, o emissor e o receptor trocam mensagens RSVP PATH e RSVP RESV, e o processamento normal ocorre por todos os roteadores que suportam RSVP. Os roteadores que suportam *DiffServ* ignoram as mensagens, uma vez que não entendem RSVP.

Já no segundo caso, 2-) o roteador de ingresso (ER1) pode usar informações contidas na mensagem RSVP e dinamicamente instalar uma classificação MF para o fluxo RSVP. Quando os pacotes de informação chegam aos roteadores *DiffServ* de ingresso, oriundos do emissor, o bit DSCP (*DiffServ codepoints*) é marcado, recebendo então os pacotes do fluxo o serviço apropriado, cruzando o domínio *DiffServ* de transito.

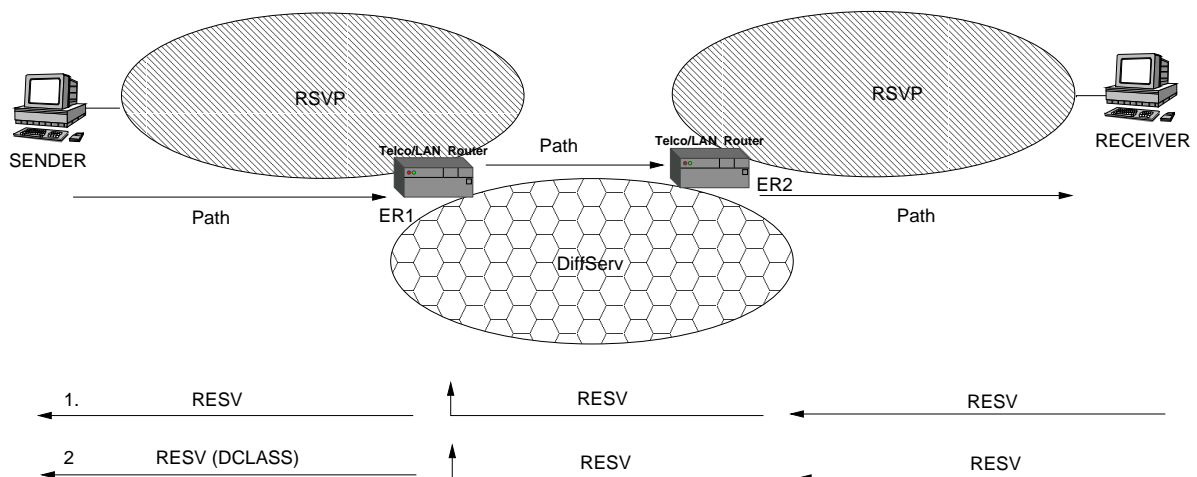


Figura 4.5: Esquemas cooperativos entre *IntServ* e *DiffServ*

4.3 Outras Propostas para Qualidade de Serviço sobre Redes IP

IntServ e *DiffServ* são a base para IP QoS. Entretanto, outras abordagens propostas, atacam os aspectos ligados a “Engenharia de Tráfego” e ao “roteamento com QoS”.

Essas abordagens levam em consideração que o congestionamento das redes pode ser causado pelo “escassez dos recursos” da rede ou por um “desbalanceamento” na distribuição do tráfego. No caso de escassez de recursos, todos os roteadores e *links* estão sobrecarregados e a única solução é prover mais recursos para a rede, atualizando a própria infraestrutura física da mesma. No segundo caso, o problema é causado porque algumas partes da rede estão sobrecarregadas, enquanto outras estão trabalhando com folga de provisionamento. Essas distribuições desbalanceadas de tráfego, podem ser causadas pelos protocolos de roteamento dinâmicos como o RIP, OSPF e IS-IS. Isso porque eles selecionam sempre o menor caminho para o encaminhamento dos pacotes.

Melhoras propostas para os protocolos de roteamento, como a extensão do OSPF, ECMP (*Equal-Coast Multi-Path*) (Moy, 1998) e do IS-IS (Villamizaar and Li, 1998), vêm resolver parcialmente o problema da distribuição da carga entre vários caminhos. No entanto isso é aplicável apenas a grandes redes, com várias possibilidades de rotas. Em redes onde exista apenas uma rota entre dois pontos, o problema deve persistir.

O “Roteamento QoS” (Crawley et al., 1998) é um importante aliado no sentido de habilitar QoS na Internet. As soluções correntes de roteamento, como os protocolos dinâmicos de roteamento, escolhem as rotas baseadas na métrica “distância” (caminho mais curto). Aplicações com restrições temporais, exigem outras métricas adicionais na computação do caminho no sentido de atender os requisitos da QoS.

O “Roteamento Baseado em Restrições” (*Constraint Based Routing*) é utilizado para computar rotas sujeitas a várias restrições. Enquanto está determinando um rota, o “Roteamento Baseado em Restrições” considera não somente a topologia da rede, mas também os requisitos do fluxo, a disponibilidade de recursos dos *links*, e possivelmente outras políticas especificadas pelos administradores de rede. Assim, o “Roteamento Baseado em Restrições” pode encontrar rotas mais longas e menos carregadas, do que utilizando os tradicionais protocolos de roteamento dinâmico. Também, as rotas podem ser computadas “sob demanda” ou podem ser pré-computadas para cada classe de tráfego. Computações “sob demanda” são disparadas de acordo com a QoS requisitada de um fluxo. Neste caso, um roteador deve recalcular sua tabela de roteamento mais freqüentemente do que usando um método clássico de roteamento pela métrica “distância”.

Dessa forma, o “Roteamento Baseado em Restrições” tem como principais objetivos: (a) a seleção de rotas que podem ir ao encontro a certos requisitos de QoS, e, conseqüentemente, (b) incrementar a utilização da rede. Essa abordagem é a principal ferramenta de automatização da “Engenharia de Tráfego”.

Uma contribuição mais recente pode ser encontrada, em (Costa and Duarte, 1999), que propõe um algoritmo escalonável que considera a largura de banda, retardo de

transmissão e probabilidade de perda em cada *link*, na computação da rota.

Um cenário comum no caminho de habilitar QoS na Internet (e nas redes IP de uma maneira geral), é o fato que, independente da maneira utilizada para isso (seja uma abordagem *stateful*⁷ ou *stateless*⁸), as questões ligadas ao roteamento continuam. Ainda se faz necessário a computação da rota e constante atualização das tabelas nos roteadores do núcleo.

Para minimizar esse *overhead* adicional no caminho da QoS, pode-se utilizar um esquema com MPLS (*Multi-Protocol Label Switching*) (Rosen et al., 1999) (Callon, 1999) para acelerar o encaminhamento dos pacotes através do núcleo da rede. MPLS é um esquema de encaminhamento de pacotes que trabalha entre as camadas 2 (camada de enlace) e 3 (camada de rede) do modelo OSI. Ele consiste num cabeçalho contendo um rótulo de 20 bits, um campo de COS (*Class-of-Service*) de 3 bits, um rótulo indicador de pilha de 1 bit e um campo TTL de 8 bits. O cabeçalho MPLS é encapsulado entre as camadas 2 e 3 do modelo OSI. Um roteador que suporte MPLS (denominado LSR - *Label Switched Router*) verifica apenas o rótulo MPLS no encaminhamento dos pacotes. MPLS utiliza um protocolo⁹ para estabelecer um LSP (*Label Switched Path*), que funciona similar a um circuito virtual unidirecional (do emissor ao receptor) numa rede ATM (ATM VC). O estabelecimento de um LSP entre dois pontos se dá utilizando o mecanismo de roteamento nó-a-nó até o destino, ou o emissor pode estabelecer um rota explícita (ER - *Explicit Route*) para o LSP, determinando por quais nós passar desde a fonte até o destino.

Dentro de um domínio MPLS, o encaminhamento de pacotes, a classificação e o serviço de QoS são determinados pelos rótulos e os campos COS. O esquema MPLS pode ser ainda utilizado como túneis. Um pacote entra num determinado ponto do túnel, e o caminho é automaticamente determinado. Assim, o pacote emerge do outro lado do túnel, sem precisar enumerar cada nó intermediário no caminho fonte-destino.

4.4 Recentes *Frameworks* Propostos para Qualidade de Serviço sobre Redes IP Escaláveis na Internet

Esquemas propostos na literatura (Baugartnet et al., 1998), assim como os utilizados pela indústria, sempre usam soluções com *IntServ* e/ou *DiffServ*. Adicionalmente,

⁷Aquelas onde o estado dos fluxos são mantidos em cada nó no caminho fim-a-fim.

⁸Aquelas onde o estado do fluxo não é mantido em cada nó no caminho fim-a-fim.

⁹Que pode ser um LDP (*Label Distribution Protocol*) genérico ou um extensão do RSVP.

eles envolvem questões ligadas a Engenharia de Tráfego, principalmente quanto ao roteamento QoS e esquemas de encaminhamento de pacotes, como o MPLS por exemplo.

Nesse contexto, Xiao (Xiao and Ni, 1999) propõe uma arquitetura para habilitar QoS na Internet, envolvendo *IntServ*, *DiffServ* e Engenharia de Tráfego. No “grande quadro” delineado pela sua arquitetura, *Constraint Based Routing* opera junto a *DiffServ* de forma a selecionar a rota ótima para os fluxos, de maneira que seus requisitos de QoS sejam mais facilmente encontrados. Já num esquema envolvendo RSVP, a rota levando uma mensagem RSVP PATH seria determinada de acordo com os requisitos de reserva solicitados pela aplicação (levando em consideração as condições de carga da rede). *Constraint Based Routing* e MPLS são esquemas independentes. No entanto, quando operando juntos, eles se tornam mutuamente cooperativos. MPLS torna possível ao *Constraint Based Routing*, melhor computar as rotas para estabelecer LSPs, através das estatísticas colhidas por LSP, contendo informações precisas sobre a quantidade de tráfego entre cada par de ingresso-egresso. *Constraint Based Routing* e MPLS, dessa forma, são poderosas ferramentas para a Engenharia de Tráfego.

Meempat et al em (Meempat and Kan, 1998), definem um *framework* para engenharia de QoS envolvendo a “Internet da Próxima Geração “ (NGI - *Next-Generation-Internet*). Sua abordagem é baseada numa adaptação de algumas noções básicas do mundo da telefonia. Em particular, eles identificam algumas classes genéricas de tráfego, geradas por várias aplicações, e os requisitos funcionais dos módulos para prover suporte a QoS. Essa abordagem proposta é bem alinhada com o modelo de *DiffServ* e as metodologias apresentadas independem da arquitetura da camada física abaixo do IP.

4.5 Conclusões

Temos visto que a qualidade de serviço sobre as redes IP possui boas alternativas de implementação. Para o transporte de vídeo digital, a tendência é utilizar as soluções baseadas nos protocolos da Internet, quer seja utilizando a própria Internet (em aplicações de videoconferência, distribuição de vídeo, etc) ou em soluções particulares na forma de Intranets (Vídeo sob Demanda, distribuição de vídeo, videoconferência, etc).

Há nesse contexto a necessidade de garantir os requisitos que essa classe de aplicações exige, na forma de mecanismos de Qualidade de Serviço. As várias soluções, utilizadas de forma única ou combinadas, promovem ganhos substanciais no desempenho dessas aplicações. Há, entretanto, o custo a ser pago pelo uso de alguma(s) solução(ões) específica(s). Seja na forma de complexidade de gerenciamento de fluxos, escalabilidade, questões ligadas a engenharia de tráfego e mesmo o custo financeiro.

Nesse interim, os serviços diferenciados têm se apresentado como um solução atrativa sob muitos pontos de vista. Os serviços diferenciados tem sido bastante visados e encontrados em inúmeras implementações de cunho comercial, educacional ou ainda de natureza baseada em software livre. Particularmente os serviços diferenciados que implementam o Encaminhamento Assegurado se mostram bastante interessantes para lidar com pacotes de vídeo. Sua arquitetura e mecanismos internos constituem uma excelente escolha para a implementação de esquemas de proteção de pacotes baseado em aspectos semânticos. Essa constatação se mostra particularmente relacionada ao esquema de proteção que estamos propondo no capítulo 6.

Capítulo 5

Mecanismos de Correção de Erros Baseados na Redundância de Informação

5.1 Introdução

As redes IP, baseadas no modelo de tráfego do tipo melhor esforço, não lidam satisfatoriamente com aplicações que tenham necessidades ligadas a restrições temporais, tais quais as aplicações multimídia como áudio e vídeo. A consequência mais imediata desse aspecto é a perda de informações nos fluxos multimídia, em situações de sobrecarga ou mesmo de um alto índice de utilização da rede.

As informações perdidas, traduzidas aqui pela perda de pacotes, implicam diretamente em problemas ligados a inteligibilidade dos conteúdos que chegam ao usuário final, seja através de áudio intercalado, com interrupções, ou de um vídeo degradado, com baixa taxa de quadros, congelamento da imagem, ruído de mosquito, etc. Essas informações perdidas, invariavelmente, não são possíveis de serem recuperadas utilizando apenas o modelo de serviços da rede, salvo em casos onde se utilize a retransmissão da informação. Entretanto, com essa última estratégia, implicações ligadas às restrições temporais que os fluxos necessitam podem surgir.

A retransmissão de informação e outras formas de recuperação de erros visam a maximização das informações que chegam ao destino final na rede, ou seja, ao sistema final ao qual está conectado o usuário final que lida com a aplicação multimídia, que em nosso contexto é uma aplicação de vídeo. No decorrer deste capítulo, apresentaremos algumas técnicas utilizadas com este propósito.

5.2 Esquemas de Correção de Erros

Em princípio, a transmissão de informação entre dois ou mais pontos utilizando-se uma rede de comunicação, gera uma certa quantidade de dados redundantes. Essa redundância pode ser explorada de forma a se eliminar informação não necessária ou replicada em diversas aplicações de dados. A transmissão de textos, imagens e até vídeo, tem usado desse artifício de forma reduzir a quantidade de informações a serem transportadas. Por outro lado, no caso específico do vídeo, a eliminação da redundância de dados se dá através de relações de temporalidade e de espacialidade. Isso permite atingir altas taxas de compressão. Entretanto, o fluxo de bits gerado é composto de pedaços de informações de diferentes importâncias. A corrupção ou perda de alguns desse pedaços pode inviabilizar a decodificação do vídeo no sistema final receptor.

Basicamente há duas principais formas de recuperação de erros que podem ser utilizadas para minimizar os efeitos da perda de informações de um fluxo de bits de vídeo. A primeira utilizando-se de retransmissão, conhecida como Solicitação de Repetição de Requisição (*Automatic Repeat Request* - ARQ). A segunda é a Correção Antecipada do Erro (*Forward Error Correction* - FEC). A ARQ é encontrada em muitos protocolos de redes tais como o HDLC e o TCP/IP. No caso específico do TCP/IP, um sinal de “reconhecimento” (*acknowledge*) é enviado de volta ao emissor indicando que determinado pacote chegou ao destino. FEC por outro lado, lança uso da replicação da mesma informação de forma a aumentar a probabilidade que a mesma chegue ao destino final. Essa replicação corresponde a uma determinada porcentagem de vezes da informação original. Do ponto de vista da transmissão de vídeo digital, há prós e contras quando empregando estas técnicas. ARQ é uma técnica reativa que recupera os possíveis erros na transmissão utilizando informações de retroação, indicando se determinados trechos da informação chegaram ou não ao sistema final. O lado negativo dessa abordagem é que, em se tratando de aplicações em tempo-real, com sérias restrições temporais ligadas à inteligibilidade do conteúdo, como é o caso do vídeo, ela apresenta uma implicação grave com relação ao retardo fim-a-fim e a quantidade de espaço em memória de apresentação (*buffer space*). FEC, por outro lado, replica a informação e transmite a informação original, numa certa proporção, de forma a necessitar maior quantidade de largura de banda da rede. Esta proporção, no caso do vídeo digital, pode estar relacionada aos tipos de quadros de vídeos e terem seus níveis de redundância diferentes conforme o tipo de quadro. Nesse caso particular, o esquema FEC é chamado PET (*Priority Encoding Transmission*).

Além dessas duas formas de correção de erros, há um esquema onde se utiliza uma abordagem proativa baseada na proteção não igual para as perdas de pacotes. Em

(Zhang and Xu, 1999) é encontrado um exemplo desta técnica onde é empregado a UPLP - (*Unequal Packet Loss Protection*) aplicada a vídeo em camadas.

Em (Liu et al., 1997) é encontrado um estudo que cobre os principais esquemas e técnicas para a correção de erros em redes de comunicação, de uma maneira geral.

5.2.1 *Forward Error Correction - FEC*

O esquema FEC é baseado nos chamados “códigos de apagamento”, ou *erasure codes* (Shoorman and Associates, 2002). Assumindo que uma mensagem M consiste de b palavras de comprimento w cada uma, conseqüentemente a mensagem de comprimento m soma $m = w \times b$. A mensagem M é redundantemente codificada em $E(m)$ códigos com comprimento $e = n \times w$, onde $n \geq b$. E é chamado de um “código de apagamento”, ou *erasure codes*, se a mensagem original de b palavras pode ser reconstruída de qual b palavras da mensagem codificada $E(m)$, junto com os índices das b palavras da codificação. Na figura 5.1 é mostrado uma mensagem M e o código correspondente E . As b palavras podem ser recuperadas de qualquer subconjunto de b palavras do total codificado.

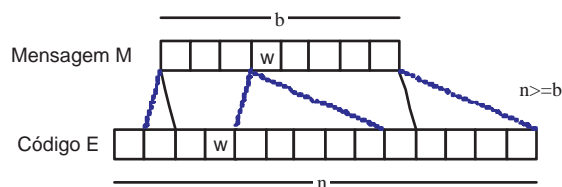


Figura 5.1: Um exemplo de “códigos de apagamento”, ou *erasure codes*.

FEC pode ser usado para corrigir erros de bits e para reconstruir as eventuais perdas nos símbolos da fonte de informação. Em se tratando da transmissão de vídeo sobre redes a pacotes, o emprego de FEC se restringe a recuperação de erros de pacotes. Uma vez que os pacotes IP apresentam um tamanho relativamente grande (tipicamente várias centenas de bytes) se comparado com os símbolos utilizados na codificação com FEC, uma perda de pacote corresponde a uma grande rajada de códigos de apagamento. Embora robustos, os esquemas empregando FEC tem sido desenvolvidos de forma a poder manipular um considerável tamanho de rajada, porém aplicar a codificação com FEC diretamente ao pacote IP implica em um rendimento insatisfatório uma vez que se houver a perda de um símbolo naquele pacote, todos os outros símbolos daquele pacote serão perdidos. Uma possível solução seria alocar espaço de memória (*buffer*

space) a um certo número de pacotes antes da transmissão e aplicar os “códigos de apagamento” ortogonalmente em relação aos pacotes, como mostrado na figura 5.2

Para aplicações interativas em tempo-real como teleconferência, alocar espaço de memória do lado do transmissor é geralmente problemático, uma vez que introduz retardos. Entretanto, para aplicações de vídeo, um quadro de vídeo, tipicamente, necessita ser fragmentado em um certo número de pacotes pois o seu tamanho é geralmente maior que a MTU - *Maximum Transmission Unit* - da rede. Quanto maior a qualidade do vídeo, mais pacotes por quadro são necessários. É possível encontrar aplicações de vídeo que requeiram de cinco a trinta pacotes, dependendo da resolução do vídeo, do esquema de codificação e da eficiência da codificação. Assim, sem a necessidade de uma quantidade adicional de espaço de memória, é possível aplicar a codificação com FEC sobre os pacotes correspondentes a um quadro de vídeo. Para aplicações como as de áudio em tempo-real, este método não funciona satisfatoriamente, uma vez que o tamanho da amostra do áudio codificado sobre o intervalo de empacotamento é muito pequeno, e dessa forma, não pode ser eficientemente fragmentado em tantos pacotes como seria necessário.

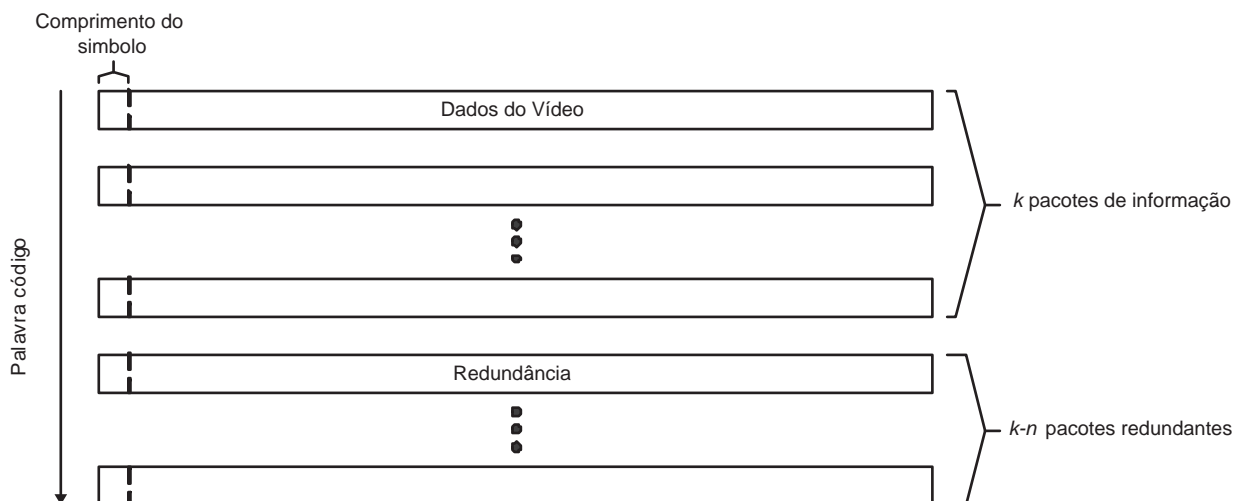


Figura 5.2: Um exemplo de organização dos pacotes para codificação em FEC.

5.2.2 *Priority Encoding Transmission* - PET

Uma das principais técnicas que implementam FEC é a PET (*Priority Encoding Transmission*) (Alanesse, 1994). Ela consiste em utilizar a redundância de dados aplicando prioridade a segmentos da mensagem. Baseado nas prioridades, o emissor usa o

sistema para codificar os segmentos em pequenos pacotes para a transmissão. O sistema assegura de devolver os fragmentos na ordem de suas prioridades. A prioridade do segmento determina o número mínimo de pacotes suficientes para recobrir o segmento. Em (Alanesse, 1994), é definido uma métrica para o conjunto de prioridades, chamado de “taxa”, que dita quanta informação acerca da mensagem deve estar contida em cada bit da codificação.

Usando técnicas avançadas de codificação, PET melhora a qualidade da transmissão sobre redes de pacotes que apresentam imprevisibilidade na quantidade de perdas. Essa técnica codifica e fatia a informação a partir de uma mensagem distribuída em muitos pacotes de tamanho reduzido. Ela codifica a informação utilizando um único esquema FEC em múltiplos níveis, e desta forma torna possível uma boa qualidade na transmissão de vídeo sobre redes de pacotes suscetíveis a perdas usando, por exemplo, algum codificador de vídeo padronizado.

Os fundamentos de PET podem ser explicados com a ajuda da figura 5.3. Nela pode ser visto um exemplo onde toma-se um GOP, o qual constitui a mensagem original a ser codificada, onde o mesmo é codificado em n pacotes de um determinado tamanho, tal que o tamanho total de todos os n pacotes codificados soma N bytes. O mapeamento de um GOP dentro dos n pacotes é feito de tal maneira que a informação de cada quadro esteja contida em cada pacote. Como uma consequência, a informação é dispersa entre os n pacotes, o que melhora a robustez dos mesmos na presença de erros em rajadas. A idéia da informação ser dispersa entre os pacotes tem uma longa tradição e tem sido utilizada extensivamente. A segunda idéia de PET é fornecer propriedades de correção de erros numa base multi-níveis. Ou seja, as informações mais importantes, os quadros I de um vídeo, são codificadas com uma maior redundância do que os quadros Is e Bs. Uma atraente propriedade de PET é o fato que nenhuma decodificação é necessária no lado do receptor se a informação que chega está em perfeitas condições. Esta característica permite um rápido processamento no caso de ambientes imunes a erros.

No caso de erros, a quantidade de redundância sendo atribuída aos diferentes tipos de quadros decide se os quadros de um tipo específico podem ser recuperados ou não. Se uma quantidade de pacotes sem erros chega, todos os quadros pertencentes a certo tipo de quadro podem ser recuperados. Se este limiar não for alcançado, nenhum quadro é possível ser recuperado na decodificação. A aplicabilidade de PET na codificação de vídeo, com redundância não equável, pode ser realizada de várias formas. Pode-se partir para uma codificação no nível do GOP ou simplesmente codificar com prioridades os quadros de vídeo segundo o seu tipo.

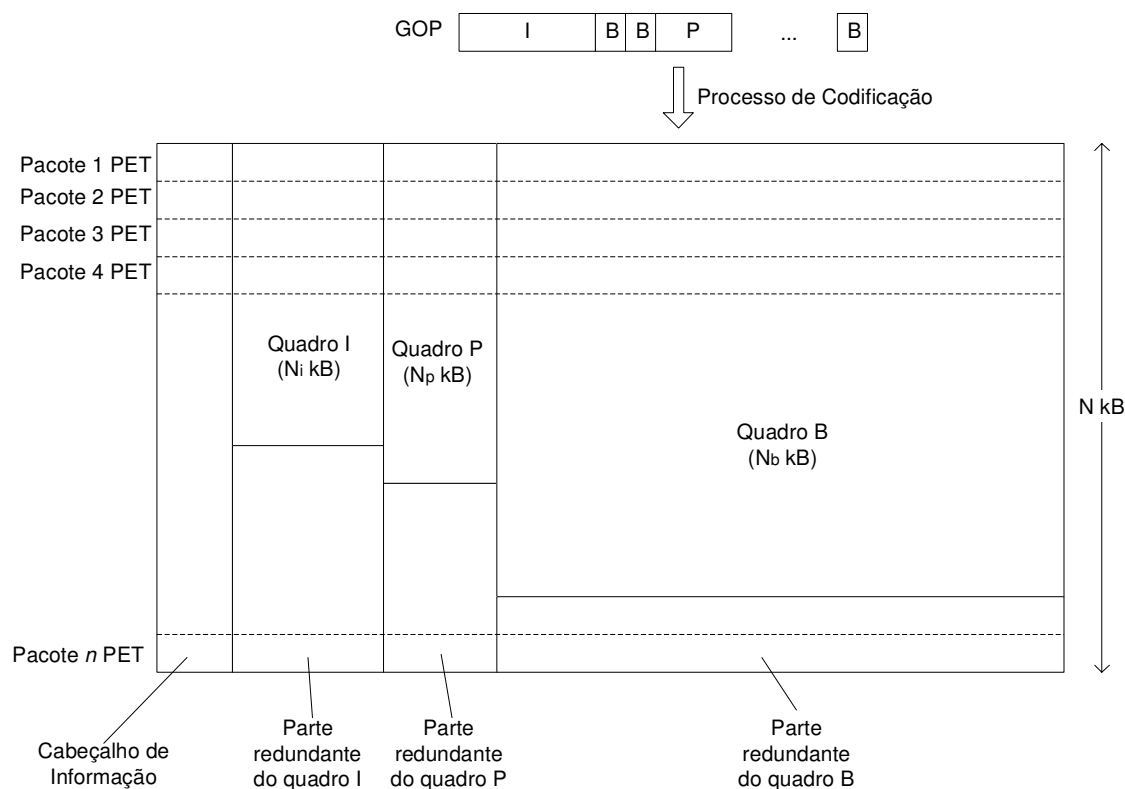


Figura 5.3: Um exemplo de organização dos pacotes para codificação em PET.

5.3 O Emprego de Esquemas de Correção de Erros ao Transporte de Vídeo

Em diversos trabalhos nós encontramos o emprego de esquemas de correção de erros para o transporte de mídias contínuas como o vídeo digital.

Em (Wolfinger, 1997a) e (Wolfinger, 1997b) é aplicado um esquema de tolerância a falhas em aplicações distribuídas para suportar comunicação com altos de níveis de qualidade de serviço utilizando FEC. O estudo se aplica a aplicações distribuídas de vídeo sobre sistemas de comunicação sujeito a perdas. É desenvolvido um modelo analítico refletindo a transmissão de fluxos de vídeo codificados em MPEG com abordagens empregando ou não FEC, com ou sem PET. Esses modelos permitem determinar a quantidade ótima de redundância a ser usada por FEC quando a comunicação se dá via conexões a uma taxa de bits constantes. Em (Storn, 1995) encontra-se um estudo do emprego de PET aplicado à modelagem e otimização do nível de redundância para seqüências de vídeo codificadas em MPEG-1. São delineados e sugeridos os pré-requisitos para a solução deste problema de otimização. Em (Leicher, 1994) é utilizado

um esquema de PET aplicado à codificação hierárquica de seqüências de vídeo codificadas em MPEG. Ele focaliza mais os aspectos relativos à recuperação do erro do que nas características computacionais. A idéia básica é de que os inter-quadros (informações relativas aos quadros I) devem ter um maior nível de redundância que os intra-quadros (informações relativas aos quadros P e B).

Em (Zhang and Xu, 1999) é aplicada uma técnica baseada em UPLP - (*Unequal Packet Loss Protection*) aplicada a vídeo em camadas. FEC é aplicado para recuperar pacotes descartados, devido a congestionamentos e transbordamento de memória (*buffer overflows*). Em (Xu and Zhang, 2000) é investigado o efeito da perda de pacotes de diferentes tipos de quadros (I, P e B) na qualidade de vídeo e propõem uma análise numérica estatística para o projeto de transmissões de vídeo MPEG-2 sobre canais ruidosos ou sujeitos a congestionamento. Em (Johanson, 2003) é apresentado um esquema de FEC baseado nos códigos de apagamento de Reed-Solomon (Shooman and Associates, 2002). Também é sugerida uma estratégia ótima de empacotamento para comunicação de vídeo resistente ao erro, e é deduzido um algoritmo eficiente implementando tal esquema de empacotamento. Em (Martins et al., 2003), (Ziviani, Wolfinger, Rezende, Duarte and Fdida, 2002a) e (Ziviani, Wolfinger, Rezende, Duarte and Fdida, 2002b) é estudado diferentes possibilidades de melhorar a qualidade de entrega de vídeo MPEG sobre redes congestionadas aplicando, entre outras coisas, a redundância de informação utilizando FEC, de forma a tolerar um certo nível de perdas.

5.4 Conclusões

Temos visto que no transporte de vídeo digital, a quantidade de erros de transmissão, seja ligados à alta taxa de perdas dos canais de comunicação e/ou à quantidade de perdas nas unidades de transporte de vídeo (pacotes ou células), faz com que seja necessário, entre outras coisas, atrelar um esquema de recuperação de erros. Normalmente empregando alguma técnica baseada em ARQ ou FEC.

FEC tem sido a solução mais empregada e estudada em vários contextos (sessão 5.3). Em parte devido às restrições temporais ligadas ao transporte e apresentação de vídeo digital. Os benefícios alcançados por FEC em esquemas para transportar vídeo digital pode ser notável em várias situações, principalmente quando o custo de recursos da rede, na forma de largura de banda, não forem considerados cruciais. A ressalva neste caso em particular se refere à transmissão de vídeo em canais de baixas taxas de bits, tais como as videoconferências domésticas de baixo custo. Por outro lado, deve ser considerado que PET, pela seus próprios fundamentos, torna-se atraente para ser aplicado com vídeo codificado com codificadores que seguem o padrão de gerar o fluxo

de bits com quadros de diferentes importâncias.

De uma forma geral, o que encontra-se na literatura não é o emprego isolado dessas técnicas de correção de erros baseadas na redundância de informação. Há a cooperação delas com outros mecanismos reativos ou não, atuando na camada três e/ou quatro da pilha Internet, de forma proativa ou reativa.

Capítulo 6

Mecanismos de Proteção de Pacotes de Vídeo

6.1 Introdução

Um esquema para o transporte de vídeo digital deve conseguir distinguir os pedaços de informações mais importantes e priorizá-los frente aos menos importantes e ao tráfego não multimídia (Tobagi et al., 2001). A estrutura dos codificadores baseados nos padrões ITU-T e ISO/IEC gera quadros de importâncias semânticas diferentes para a decodificação. As relações temporais e espaciais das técnicas de compressão fazem com que os quadros gerados do tipo I, P e B, tenham importâncias semânticas decrescentes para a decodificação de um fluxo de vídeo. Por outro lado, há a forte dependência do esquema de empacotamento adotado para transportar o vídeo. Se observarmos a questão, vemos que podemos descer ao nível de empacotar as unidades mínimas de fragmentação de um fluxo de vídeo (*slices* ou GOBs) e dessa forma centrar o esquema de transporte baseado nesse tipo de empacotamento. Alguns autores propõem uma solução nessa linha, tal como (Shin et al., 2000), que propõe a classificação baseado numa métrica que leva em conta, além do tipo de quadro relacionado, aspectos relacionados ao vetor de movimento, tamanho da informação, etc. Baseados nessas características, diversos autores sugerem que seria interessante que a rede de transporte de vídeo implemente mecanismos que levem em consideração a importância dos diferentes tipos de pacotes, nas situações onde ocorram sobrecarga na rede, e onde haja um descarte iminente de pacotes. Atuando nessa linha, nossa abordagem é centrada na proteção explícita dos pacotes que transportam quadros de vídeo baseada na importância semântica relacionada ao tipo de quadro. Assim, tendo isso como premissa, exploraremos no decorrer deste capítulo, os mecanismos ligados à engenharia de

tráfego encontrados nas redes de serviços diferenciados, de forma a obter um esquema que funcione como mecanismo de proteção de pacotes de vídeo que leve em conta a natureza semântica relacionada à importância dos mesmos. Iremos investigar qual a influência do mecanismo na minimização das perdas e a influência que algumas características de sua implementação, como os níveis de precedência e tipo de mapeamento, têm na minimização das perdas. Também investigaremos a influência que a taxa de bits gerada pelos codificadores têm no comportamento do mecanismo com relação ao nível de perdas.

6.2 O Mecanismo de Proteção de Pacotes de Vídeo Baseados nas Redes de Serviços Diferenciados

A estrutura hierárquica de um fluxo de vídeo faz com que, quando transportados por uma rede puramente melhor esforço e em situações de congestionamento, haja um descarte indiscriminado de pacotes. Esse descarte indiscriminado penaliza severamente a inteligibilidade do conteúdo recebido, uma vez que fragmentos de quadros que têm uma maior importância na decodificação, têm a mesma probabilidade de serem descartados do que aqueles de menor importância. Uma situação ideal seria diferenciar e priorizar os pacotes que transportassem os conteúdos mais importantes. Atribuir níveis de prioridade de descarte a cada pacote baseado na sua importância é uma opção razoável e relativamente simples, mas ajuda sensivelmente a manter uma melhor qualidade nos GOPs recebidos.

A arquitetura de rede com QoS que melhor atende aos requisitos acima são as redes de serviços diferenciados, como a encontrada na arquitetura apresentada por Blake et al. (Blake et al., 1998). Nelas, cada pacote tem atrelado a si um código de identificação (*code point*) que pode ser relacionado a um procedimento de descarte ou de encaminhamento. Isso permite, por exemplo, atrelar níveis de precedência de descarte ou prioridade de encaminhamento para cada pacote. Atrelar níveis de precedência de descarte a cada pacote tem sido padronizada pelo IETF e pode ser encontrado nos Serviços Assegurados (AF - *Assured Forwarding*) propostos por Heinanen et al. (Heinanen et al., 1999). Nesse caso, a diferenciação de serviços utiliza quatro classes de prioridade, tendo cada classe associada a três níveis de descarte.

Nesse contexto, redes de serviços diferenciados, como a encontrada na arquitetura apresentada por Blake et al. (Blake et al., 1998), implementando serviços como aqueles propostos por Heinanen et al. (Heinanen et al., 1999), podem configurar um cenário adequado para o transporte de vídeo digital. Como de fato, a definição dos serviços

assegurados determina que o encaminhamento de pacotes IP pode ser estendido sobre N classes AF e dentro de cada classe pode ser designado ao pacote M níveis de precedência de descarte. A proteção dos pacotes de vídeo é realizada através de um mapeamento entre o nível semântico relacionado ao tipo de pacote de vídeo e a quantidade de níveis de precedência de descarte. Dessa forma, podemos relacionar os níveis de precedência ao tipo de pacote de vídeo, ao número de camadas de vídeo ou a qualidade do fluxo de vídeo (situação onde tem-se um único vídeo com diferentes qualidades). Por exemplo, para um fluxo de vídeo em uma camada, podemos relacionar **três configurações** onde podemos aplicar diversos **tipos de mapeamento** em precedência de descarte. Essas três configurações utilizam respectivamente: duas, três e quatro filas virtuais.

Na primeira configuração, utilizando apenas duas filas virtuais (Q_{hp} e Q_{lp}) de alta prioridade e baixa prioridade, respectivamente, podemos estabelecer um esquema de mapeamento para os pacotes de vídeo conforme mostrado na tabela 6.1.

Tabela 6.1: Primeira configuração: mapeamento de pacotes de quadros de vídeo em níveis de precedência de descarte utilizando duas filas de prioridade.

Mapeamento	Fila Q_{hp}	Fila Q_{lp}
Tipo 1	Pacotes I, P e B	Pacotes melhor-esforço
Tipo 2	Pacotes I e P	Pacotes B e melhor-esforço
Tipo 3	Pacotes I	Pacotes P, B e melhor-esforço

Na segunda configuração, utilizando três filas virtuais (Q_{hp} , Q_{mp} e Q_{lp}) de alta, média e baixa prioridades, podemos estabelecer um esquema de mapeamento para os pacotes de vídeo conforme mostrado na tabela 6.2.

Tabela 6.2: Segunda configuração: mapeamento de pacotes de quadros de vídeo em níveis de precedência de descarte utilizando três filas de prioridade.

Mapeamento	Fila Q_{hp}	Fila Q_{mp}	Fila Q_{lp}
Tipo 1	Pacotes I e P	Pacotes B	Pacotes melhor-esforço
Tipo 2	Pacotes I	Pacotes P e B	Pacotes melhor-esforço
Tipo 3	Pacotes I	Pacotes P	Pacotes B e melhor-esforço

Numa terceira configuração, utilizando quatro filas virtuais (Q_j , $j = 0, 1, 2$ e 3) com prioridades decrescentes, podemos estabelecer um esquema de mapeamento para os pacotes de vídeo conforme mostrado na tabela 6.3.

O mapeamento do tipo de pacote em prioridade de descarte pode ser efetuado na própria aplicação ou em outro dispositivo na borda do domínio (um *gateway* de vídeo,

Tabela 6.3: Terceira configuração: mapeamento de pacotes de quadros de vídeo em níveis de precedência de descarte utilizando quatro filas de prioridade.

Mapeamento	Fila Q_0	Fila Q_1	Fila Q_2	Fila Q_3
Tipo 1	Pacotes I	Pacotes P	Pacotes B	Pacotes melhor-esforço

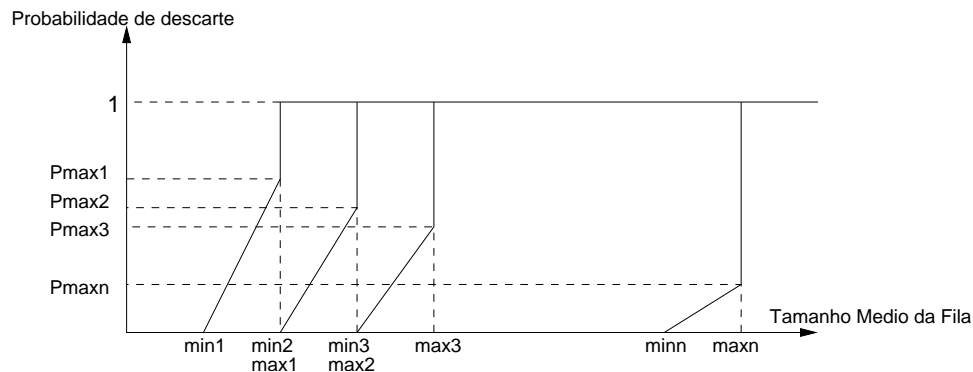


Figura 6.1: Mecanismo RED implementando múltiplos níveis (Floyd and Jacobson, 1993)

por exemplo). Heinanen et al. (Heinanen et al., 1999) sugerem que se implemente mecanismos de fila e comportamento de descarte de forma a tentar minimizar congestionamentos de longa duração no interior de cada classe. Isso requer um algoritmo de gerenciamento ativo de filas ou AQM (*Active Queue Management*). Um mecanismo RED (*Random Early Drop*), como o proposto por Floyd et al. (Floyd and Jacobson, 1993), e implementado em múltiplos níveis, atende bem a esse requisito. A utilização de múltiplos mecanismos RED (vide figura 6.1) foi proposta por Clark et al. (Clark and Fang, 1998), onde cada fila RED controla pacotes classificados com estando dentro ou fora de um determinado perfil (*in e out profile*).

Em tese, o número de classes AF, bem como o número de precedências de descarte podem ser adaptados para lidar com outras formas de codificação de vídeo, tais como o vídeo em camadas ou em múltiplos fluxos com capacidades diferentes. Entretanto, no atual estágio da definição dos serviços assegurados, o padrão estabelecido na RFC 2597 (Heinanen et al., 1999) estabelece até quatro classes AF com três níveis de precedência de descarte. Dessa forma, utilizado-se elementos de interconexão de redes que sigam o padrão do IETF, é possível apenas implementar as duas primeiras configurações de mapeamento.

Abordagens semelhantes, para a proteção dos pacotes de vídeo utilizando prioridades relativas com relação ao descarte, tem sido empregadas em diversos trabalhos tais como em (Chung and Claypool, 2002), (Magalhães and Guardieiro, 2001), (Ziviani

et al., 2001), (Ziviani, Rezende, Duarte and Fdida, 2002), (Ziviani, Wolfinger, Rezende, Duarte and Fdida, 2002b), (Ziviani, Wolfinger, Rezende, Duarte and Fdida, 2002a) e (Martins et al., 2003).

Nossa proposta consiste em um mecanismo de proteção de pacotes de vídeo, empregando uma classificação dos pacotes em níveis diferenciados de descartes, seguindo vários tipos de mapeamentos. Essa abordagem estende os pontos investigados em (Martins et al., 2003), de forma que possamos entender melhor os ganhos na qualidade no vídeo transportado quando variamos o número de precedências e o tipo de mapeamento dos pacotes nessas precedências.

6.3 A Avaliação da Proposta

Há diversas maneiras de averiguar a funcionalidade de um modelo, técnica ou arquitetura proposta. Tem-se utilizado o termo “validação” no sentido de obter-se uma descrição matemática do modelo empregando métodos formais. Entretanto, na área de redes de computadores, no que tange a avaliação de desempenho, dois métodos são mais utilizados: a-) a “verificação” da proposição através de um *testbed* real (uma rede física montada em laboratório ou alguma rede num ambiente de produção), e b-) a simulação do modelo proposto em um ambiente de computação.

Neste trabalho, nós utilizamos uma versão modificada do *ns - 2* (DARPA and NFS, 2004), um simulador de eventos discretos comumente utilizado em pesquisas relacionadas a redes de computadores, com o propósito de verificar os possíveis ganhos de qualidade que a nossa abordagem pode proporcionar para o transporte de vídeo digital, no que diz respeito à minimização das perdas relativas aos conteúdos de maior importância para a decodificação.

Nesse ambiente, nós pretendemos verificar as características de funcionalidade, bem com a eficácia do nosso modelo de um mecanismo para a proteção de pacotes de vídeo. Dessa forma, utilizando esse ambiente de simulação controlado, podemos verificar a influência dos diversos elementos utilizados para a composição do mecanismo de proteção.

Pela própria filosofia de uma verificação de um modelo baseada em simulação, diversos aspectos encontrados em uma rede real de produção (como a Internet) são desconsiderados e/ou simplificados.

6.3.1 O Ambiente de Simulação

Nós adotamos uma topologia de rede de serviços diferenciados, mostrada na figura 6.2, onde os fluxos de vídeo são enviados das fontes aos destinos, cruzando um

canal de gargalo localizado entre os roteadores de número 2 e 3. Nesse cenário específico, adotamos uma MTU fixa de 1500 bytes em todo o caminho fim-a-fim. No Apêndice A são mostrados os ajustes e parâmetros adotados na simulação relativo aos componentes da arquitetura de serviços diferenciados.

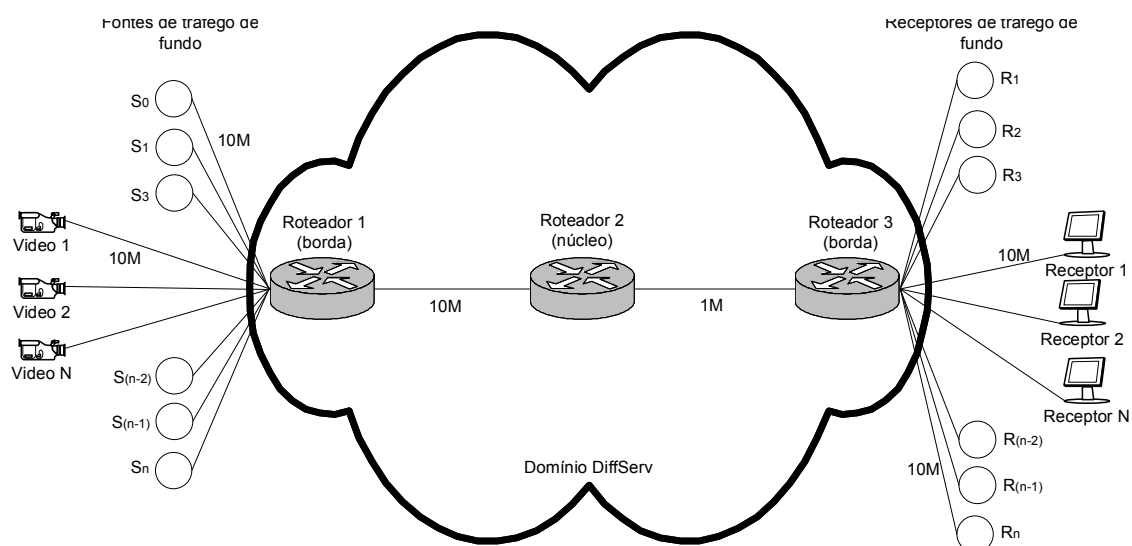


Figura 6.2: Topologia de rede adotada na simulação.

Utilizamos como dados de simulação, arquivos de traço gerados por um codificador MPEG-4, disponibilizados por Fitzek et al. em (Fitzek and Reisslein, 2004). Esses arquivos de traço consistem basicamente de arquivos no formato ASCII contendo informações referentes ao “tempo de geração”, “tipo” e “tamanho” do quadro. Na nossa simulação, utilizamos arquivos de traço de uma mesma seqüência de vídeo, codificados em baixa e alta qualidade. A codificação do vídeo de baixa qualidade fixa o fator de quantização obedecendo a tupla $\langle 10, 14, 18 \rangle$ para a geração do quadros do tipo I, P, B, respectivamente. Para o vídeo de alta qualidade o fator de quantização para os três tipos de quadros é fixado em 10. Em ambos os arquivos de traço, o GOP mede $N = 12$ e $M = 3$. O tamanho máximo dos quadros de vídeo gerados são de 4686 bytes para os vídeos de baixa qualidade e 9370 bytes para os vídeos e alta qualidade. Dessa forma, há a possibilidade de ocorrerem fragmentações nos pacotes transmitidos.

Na rede de serviços diferenciados foi utilizada uma configuração que contém apenas uma única fila real, à qual é aplicada uma determinada política através de um gerenciamento ativo de filas (AQM), implementando a proteção dos pacotes através de um mecanismo RED em três níveis, conhecido genericamente como MRED, baseado num algoritmo RIO-C (Makkar et al., 2000). Cada nível está associado a uma precedência de descarte e tem atrelado a si uma fila virtual (vide figura 6.3). Essa configuração permite também tratar os congestionamento de curta duração localizados em pontos

específicos da rede (nesse caso particular, no nó de gargalo).



Figura 6.3: Filas virtuais associadas a níveis de precedência de descarte de uma classe AFxy, com três níveis de precedência de descarte ($y = 3$).

6.3.2 A Influência do Mecanismos de Proteção na Quantidade de Perdas

A simulação utiliza dois cenários distintos. No primeiro, nós encaminhamos os quadros do tipo B juntamente com tráfego melhor esforço na fila virtual de maior probabilidade de descarte (vide figura 6.4), equivalente a segunda configuração de mapeamento vistos na sessão 6.2. No segundo, repetimos a mesma configuração do primeiro, com a diferença que injetamos vários fluxos de vídeo concorrendo entre si nas outras filas virtuais.

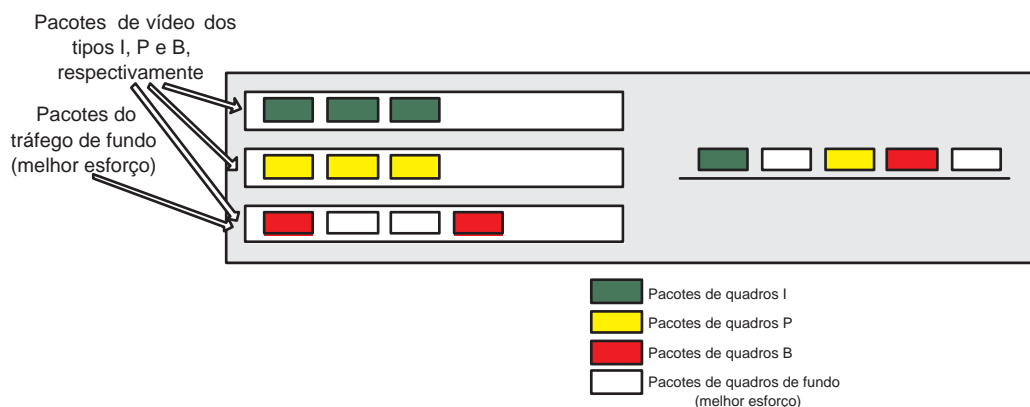


Figura 6.4: Primeiro cenário de simulação: tráfego de fundo junto com pacotes do tipo B na mesma fila virtual.

Utilizamos como tráfego melhor esforço aplicações de FTP sobre TCP. Os fluxos de vídeo foram transportados sobre UDP.

O mecanismo de proteção é implementado com a marcação dos pacotes em níveis de precedência de descarte e submetidos a filas implementando AQM via algoritmo RIO-C. Nos casos onde os pacotes são encaminhados sem nenhuma proteção, os mesmos

são submetidos a uma única fila do tipo DropTail. Os ajustes do RED são como encontrados no Anexo A.1.

Na primeira situação, as características dos arquivos de traço e da topologia utilizados proporcionaram em todas as simulações perdas diretas de pacotes sempre associadas a quadros distintos. Isso implica dizer que a relação ideal entre o percentual de pacotes perdidos e o percentual de quadros perdidos seja da ordem 1:1. Cada pacote perdido implicaria na perda de apenas um quadro. No entanto, tal relação será observada somente em situações onde não ocorrem perdas indiretas, ou seja, as perdas seriam somente de quadros do tipo B. Esse comportamento é decorrente do fato de se encaminhar os pacotes mais importantes (Is e Ps) em filas separadas do restante do tráfego melhor-esforço, que está sendo encaminhado pela mesma fila virtual por onde estão sendo encaminhados os quadros Bs. Significa dizer que ocorrem perdas diretas apenas dos quadros Bs. As figuras 6.5 e 6.6 ilustram esta relação. Nos experimentos, injetamos tráfego de fundo variando o número de fontes FTP sobre TCP de 0 até 20 concorrendo com o fluxo de vídeo. Nós comparamos o encaminhamento do fluxo de vídeo via duas políticas de filas distintas: o clássico DropTail e RIO-C. Realizamos a simulação para o vídeo com duas qualidades distintas, baixa e alta.

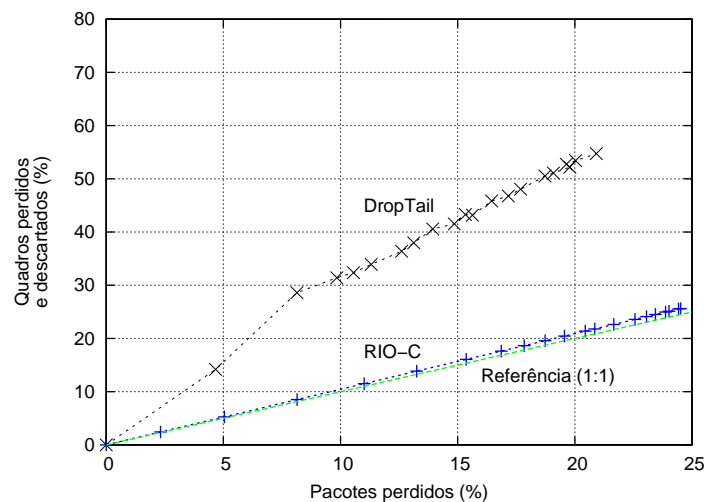


Figura 6.5: Relação entre porcentagem de perda de pacotes e porcentagem de perda de quadros não decodificados variando o tráfego de fundo FTP sobre TCP para vídeo de baixa qualidade.

Notamos que se o comportamento do fluxo que chega ao destino se aproxima da relação ideal (nós indicamos no gráfico uma reta de referência ideal relacionando porcentagem de perdas de pacotes *versus* porcentagem de perda de quadros), implica em dizer que as perdas indiretas foram mínimas (como no caso das simulações onde se utiliza como política de fila, o RIO-C). De fato, com essa configuração de prioridades e

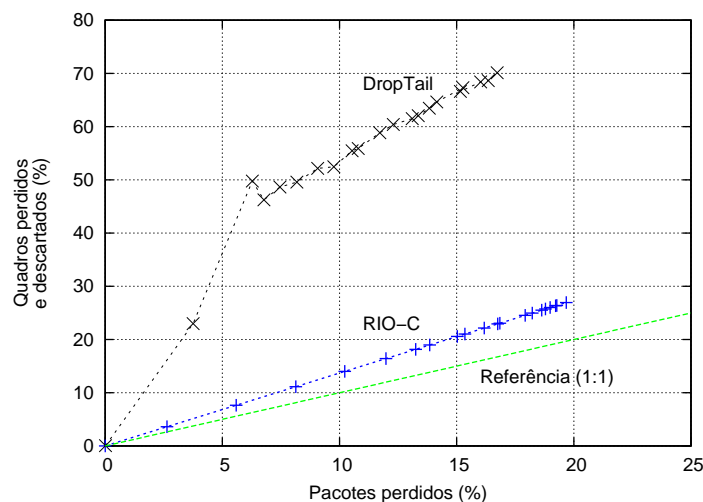


Figura 6.6: Relação entre porcentagem de perda de pacotes e porcentagem de perda de quadros não decodificados variando o tráfego de fundo FTP sobre TCP para vídeo de alta qualidade.

esse tipo de mapeamento, os pacotes referentes aos quadros Is e Ps encontram-se protegidos dos demais tráfegos, enquanto que os pacotes referentes aos quadros Bs estão disputando recursos com o restante do tráfego melhor-esforço. Isso faz com que, em situação de sobre-carga, haja apenas perdas de quadros Bs, que se traduzem em perdas diretas.

Analisando os gráficos, é possível observar que os resultados para o vídeo de alta qualidade se diferem dos demais experimentos, e isto foi decorrente da taxa de fragmentação dos pacotes ¹, o que influencia também nas perdas indiretas, já que ocorrem perdas de quadros I e P.

Da mesma forma, os resultados apresentados nas figuras 6.7 e 6.8 mostram o comportamento do esquema de proteção quando diversos fluxos de vídeos concorrentes entre si são transmitidos. No caso da política da fila RIO-C, como todos os fluxos de vídeo são tratados da mesma forma e as regras de descarte são as mesmas, as perdas para o vídeo de alta qualidade são mais significativas. Isto é uma consequência direta do mecanismo de proteção, uma vez que pacotes que transportam os quadros do mesmo tipo concorrem entre si em suas respectivas filas. No caso em particular do vídeo codificado com alta qualidade, o tamanho dos pacotes de vídeo são maiores, conseqüentemente consomem mais recursos da rede em termos de largura de banda. Dai o fato da curva representada na figura 6.8 apresentar uma maior inclinação que aquela da figura 6.7.

Do ponto de vista do descarte indiscriminado de pacotes de vídeo, é possível con-

¹Os quadros gerados para um vídeo de alta qualidade são maiores que para um vídeo de baixa qualidade e conseqüentemente têm de ser fragmentados para caber na MTU da rede

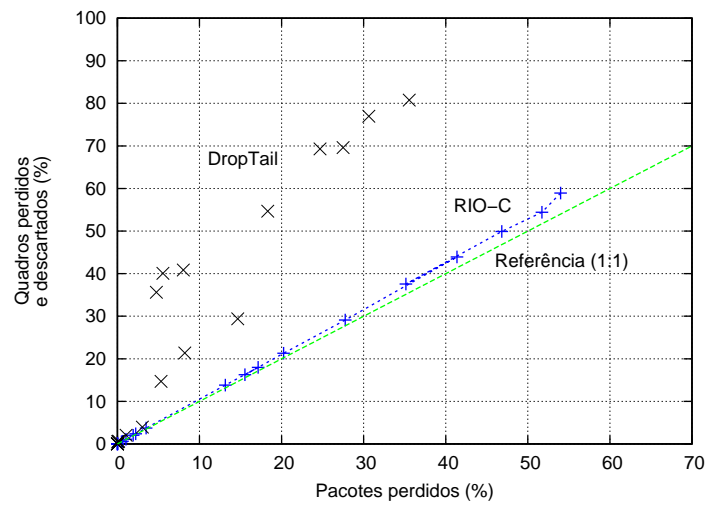


Figura 6.7: Relação entre porcentagem de perda de pacotes e porcentagem de perda de quadros não decodificados variando o número de fluxos de vídeo concorrentes para vídeo de baixa qualidade.

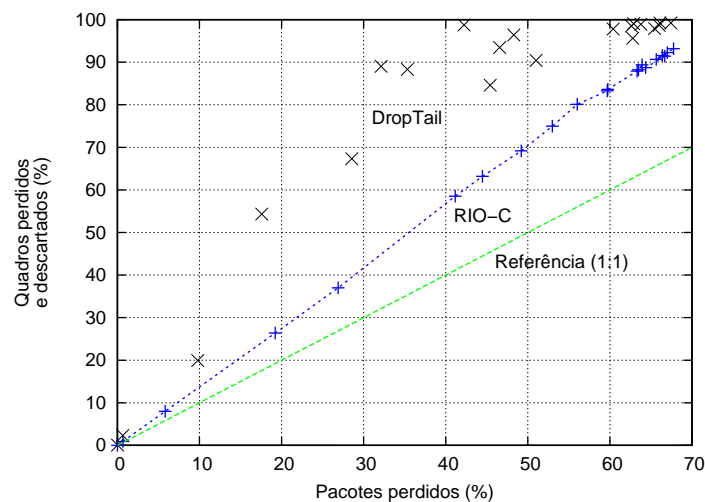


Figura 6.8: Relação entre porcentagem de perda de pacotes e porcentagem de perda de quadros não decodificados variando o número de fluxos de vídeo concorrentes para vídeo de alta qualidade.

cluír pelos resultados, que o emprego de um mecanismo de proteção de pacotes de vídeo implementado conforme o mostrado na sessão 6.2, se mostra mais eficiente se comparado a políticas do tipo melhor esforço com filas *droptail*.

6.3.3 A Influência do Número de Precedências de Descartes

O número de precedências de descarte determina os ganhos na qualidade dos GOPs que chegam aptos a serem decodificados. Comparamos o encaminhamento de pacotes

de vídeo, com e sem o esquema de proteção, avaliados a partir do **Fator de Qualidade de Vídeo** - q (métrica apresentada em 3.4). Relacionamos a influência do número de níveis de precedência para um vídeo em uma única camada, transportado por uma rede com serviços diferenciados, onde temos estabelecido as configurações apresentadas em 6.2. As configurações relacionam o número de precedências e os tipos de mapeamento que podemos utilizar para mapear o conteúdo semântico que o tipo de quadro transportado representa.

A porcentagem de GOPs recebidos é expressa qualitativamente através dos valores de q , quando o fluxo de vídeo sofre a concorrência de tráfego de fundo FTP sobre TCP (são mostrados para os valores variando com intervalo de 10 entre 0 e 50 fontes concorrentes). Nós agrupamos os GOPs por intervalos de qualidade de 0,2, além dos valores com qualidades 0 e 1, de forma que temos sete faixas de qualidade $[0, (0^+ - 0, 2), (0, 2^+ - 0, 4), (0, 4^+ - 0, 6), (0, 6^+ - 0, 8), (0, 8^+ - 1^-), 1]$. Nesse experimento utilizamos um trecho correspondente a 10% do tamanho total do arquivo de traço ² gerado a partir do filme, e vemos os resultados mostrados na figura 6.9, respectivamente para o caso onde utilizamos uma primeira configuração com duas filas virtuais (de alta e baixa prioridades) e dois tipos de mapeamentos. Nota-se a atuação do mecanismo de proteção, comparando com a mesma simulação sem nenhum mecanismo, cujos GOPs se mantém com um valor máximo de q em mais de 90% deles, utilizando o mapeamento do tipo 1. Para o mapeamento do tipo 2 vemos que há um decréscimo abrupto na qualidade dos GOPs quando o número de fontes de FTP cresce. Mas, mesmo nessas condições de mapeamento, os GOPs apresentam uma qualidade bem superior ao caso onde os mesmos são encaminhados sem nenhuma proteção. Enquanto que, para um carregamento da rede com 50 fluxos de FTP, quase a totalidade dos GOPs não apresentam a qualidade máxima no caso de serem encaminhados sem a proteção, entretanto mais de 20% deles alcançam a qualidade máxima sob a proteção.

²Foi tomada uma amostra em torno de 10% do arquivo de traço como forma de diminuir o tempo computacional, pois nessa série de experimentos temos como objetivo mostrar eficiência mais qualitativa no emprego de um mecanismo de proteção.

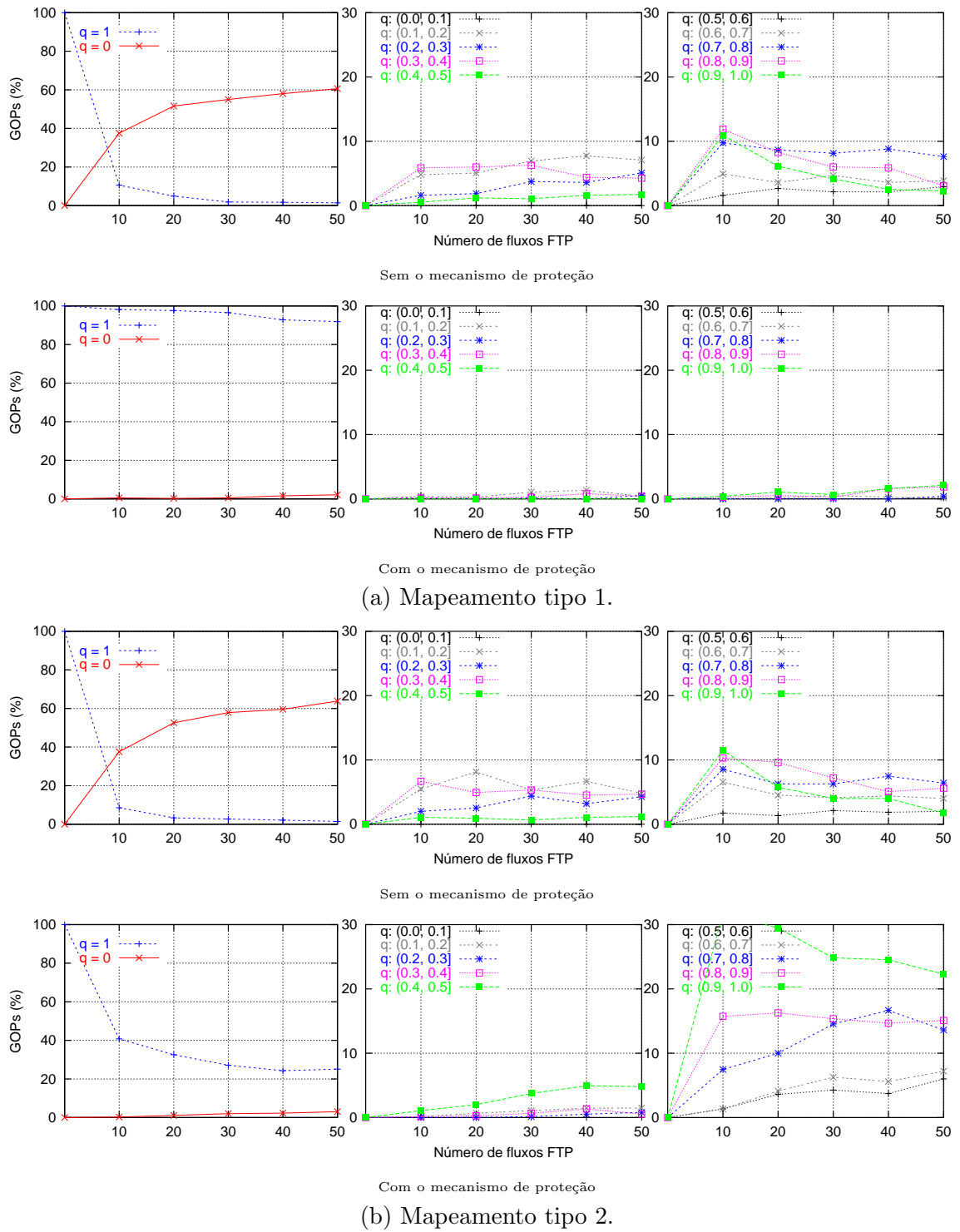


Figura 6.9: Mapeamento referente à primeira configuração utilizando duas filas virtuais, sem e com mecanismo de proteção: (a) Mapeamento tipo 1 e (b) Mapeamento tipo 2 .

Quando utilizamos uma segunda configuração com três filas virtuais, conforme mostrado na figura 6.10, vemos que no mapeamento tipo 1 (o mesmo ocorrendo para o tipo 2), onde protegemos com maior prioridade os pacotes que transportam quadros dos tipos I e P, praticamente mantemos a qualidade dos GOPs que chegam com um valor máximo. O valor de q decai um pouco, porém imperceptível visualmente nos gráficos, quando a rede é carregada com mais de 40 fluxos de FTP concorrendo com o fluxo de vídeo. Apenas no mapeamento do tipo 3, quando os pacotes que transportam os quadros do tipo B estão concorrendo diretamente na mesma fila virtual que o restante do tráfego melhor esforço, temos uma diminuição gradativa da qualidade dos GOPs. A situação limite tende a fazer com que o valor de q convirja para um determinado valor, decorrente da situação extrema onde haja a perda de todos os quadros Bs, provocando perdas diretas que influenciam na computação de q .

Uma situação ótima para transportar vídeo em uma camada é utilizando a terceira configuração, cujos resultados são mostrados na figura 6.11, onde protegemos todos os pacotes de vídeo, com prioridades decrescentes, frente ao restante do tráfego melhor esforço. Vemos que a qualidade dos GOPs recebidos para a decodificação apresentam praticamente uma qualidade máxima, mesmo quando a rede sofre um alto nível de carga.

Podemos concluir que a escolha do número de precedências (filas virtuais) influencia nos ganhos de qualidade dos GOPs. O maior ou menor número de precedências é uma escolha diretamente ligada a aspectos da Engenharia de Tráfego dentro do domínio de redes com serviços diferenciados. Obviamente, em redes multi-domínios, regidos por firmes SLAs (*Service Level Agreement*), há um certo custo de implementação dessa forma de proteção, além da própria dificuldade na coordenação geral dos vários SLS (*Service Level Specifications*) (e os TCAs (*Traffic Conditioning Agreements*)) entre os domínios no caminho fim-a-fim percorrido pelos pacotes de vídeo. Talvez o ponto mais imediato é que os pacotes encaminhados de forma protegida por tal mecanismo apresentam GOPs com qualidade superior ao caso onde os mesmos são encaminhados sem a devida proteção associada ao tipo de quadro.

6.3.4 A Influência da Taxa de Bits no Mecanismo de Proteção

O mecanismo de proteção dos pacotes de vídeo é implementado baseado na arquitetura das redes de serviços diferenciados. Basicamente um componente de marcação de pacotes atribui a prioridade aos mesmos em relação a um nível de precedência de descarte, enquanto disciplinas de fila implementando AQM baseados em RED monitoram eventuais congestionamentos de curta duração. Já os fluxos de vídeo codificados em

uma camada tem a sua qualidade associada, entre outras coisas, ao fator de quantização do codificador, o que se traduz em diferentes taxas de geração para o fluxo de bits. A natureza do AQM implantado com RED pressupõe certos ajustes nas probabilidades de cada fila virtual bem como no tamanho das mesmas. Isso faz com que a qualidade medida para vídeos com diferentes taxas de bits tenham valores distintos.

Tomando como exemplo um tipo de configuração que utiliza três filas virtuais, com um mapeamento onde os pacotes que transportam os quadros B concorrem com o tráfego de melhor esforço, enquanto os pacotes que transportam os quadros dos tipos I e P vão por filas separadas com prioridades decrescentes, vemos na figura 6.12 a influência da taxa de bits quando um vídeo gerado com diferentes taxas é transportado sem e com um mecanismo de proteção de pacotes.

Vemos que nas mesmas condições carga na rede, o vídeo protegido apresenta uma qualidade dos seus GOPs melhor que o mesmo sem nenhuma proteção, quando a taxa de bits varia entre 50 e 150%. No caso onde comparamos o vídeo encaminhado de forma protegida, vemos que há uma perda gradual na computação do valor de q quando a carga cresce. Um aumento na taxa de bits implica que, em termos simples, os quadros estão sendo gerados com tamanhos maiores e, conseqüentemente, tomam maior quantidade de memória na filas. Isso influencia na quantidade de perdas, pois no ajuste do RED é levado em consideração o tamanho médio dos pacotes de vídeo. Uma possibilidade é que, o ajuste dinâmico do RED poderia provocar algum ganho na computação do valores de q , entretanto esse comportamento fugiria ao escopo do que pretendemos no contexto deste trabalho, que seria utilizar apenas mecanismos proativos para transportar vídeo digital.

Em linhas gerais, os mesmos problemas ligados a Engenharia de Tráfego são determinantes quando se quer transportar vídeos com qualidade heterogênea. Os SLAs e SLSs (e TCAs) são mais complexos de se estabelecer. Nesses casos há um relação direta entre “transportar vídeo com qualidade” e “estabelecer acordos de operação e custos”.

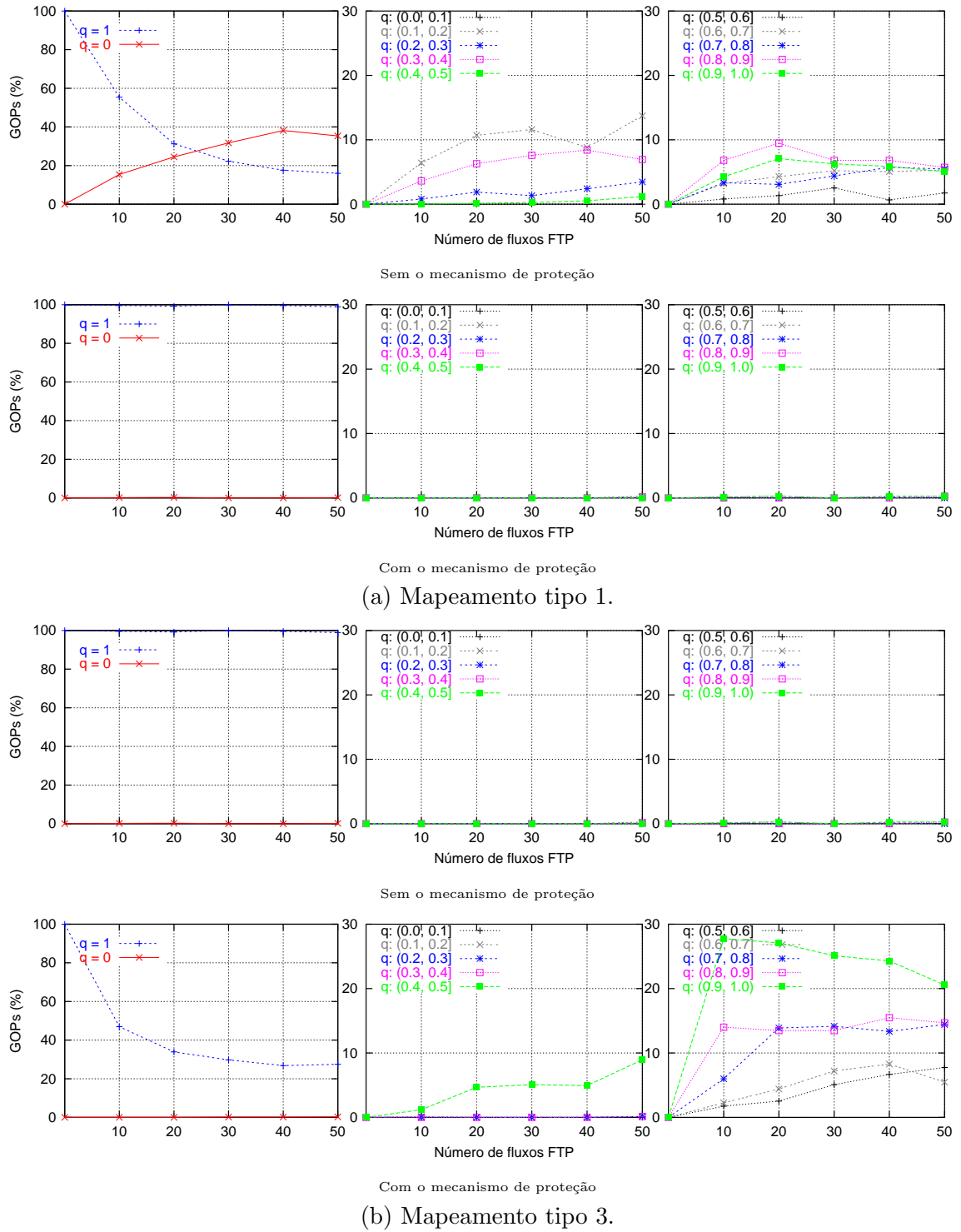


Figura 6.10: Mapeamento referente à segunda configuração utilizando três filas virtuais, sem e com mecanismo de proteção: (a) Mapeamento tipo 1 e (b) Mapeamento tipo 3 .

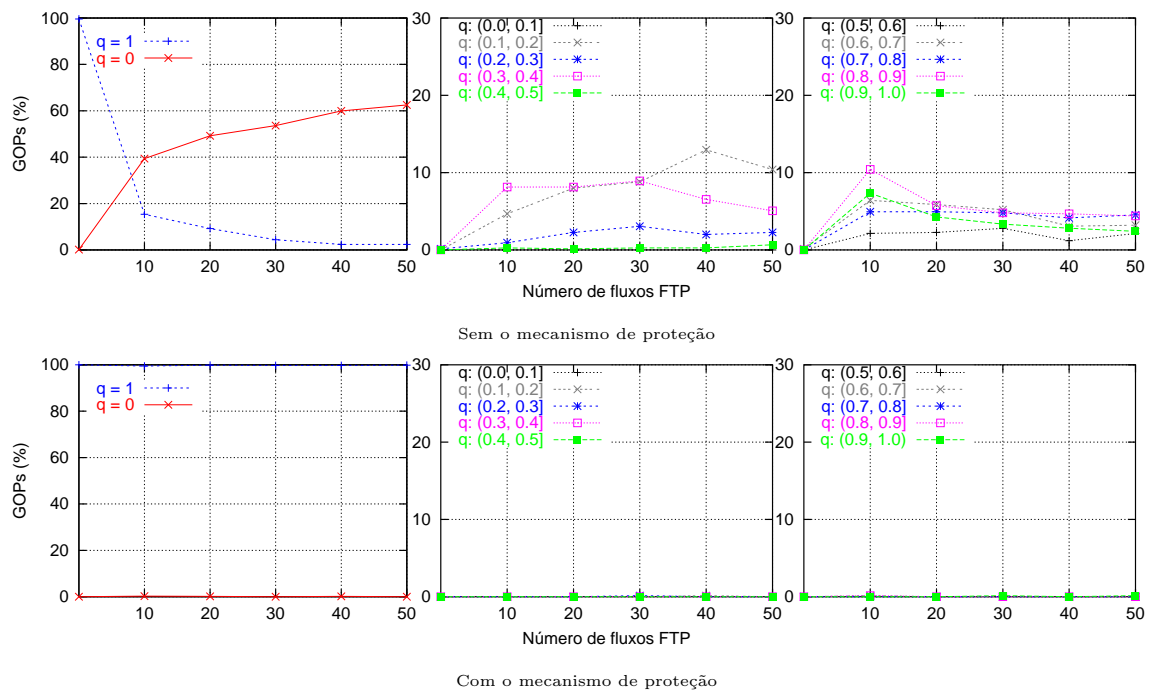


Figura 6.11: Mapeamento referente a terceira configuração, utilizando quatro filas virtuais. Sem mecanismo de proteção e com mecanismo de proteção.

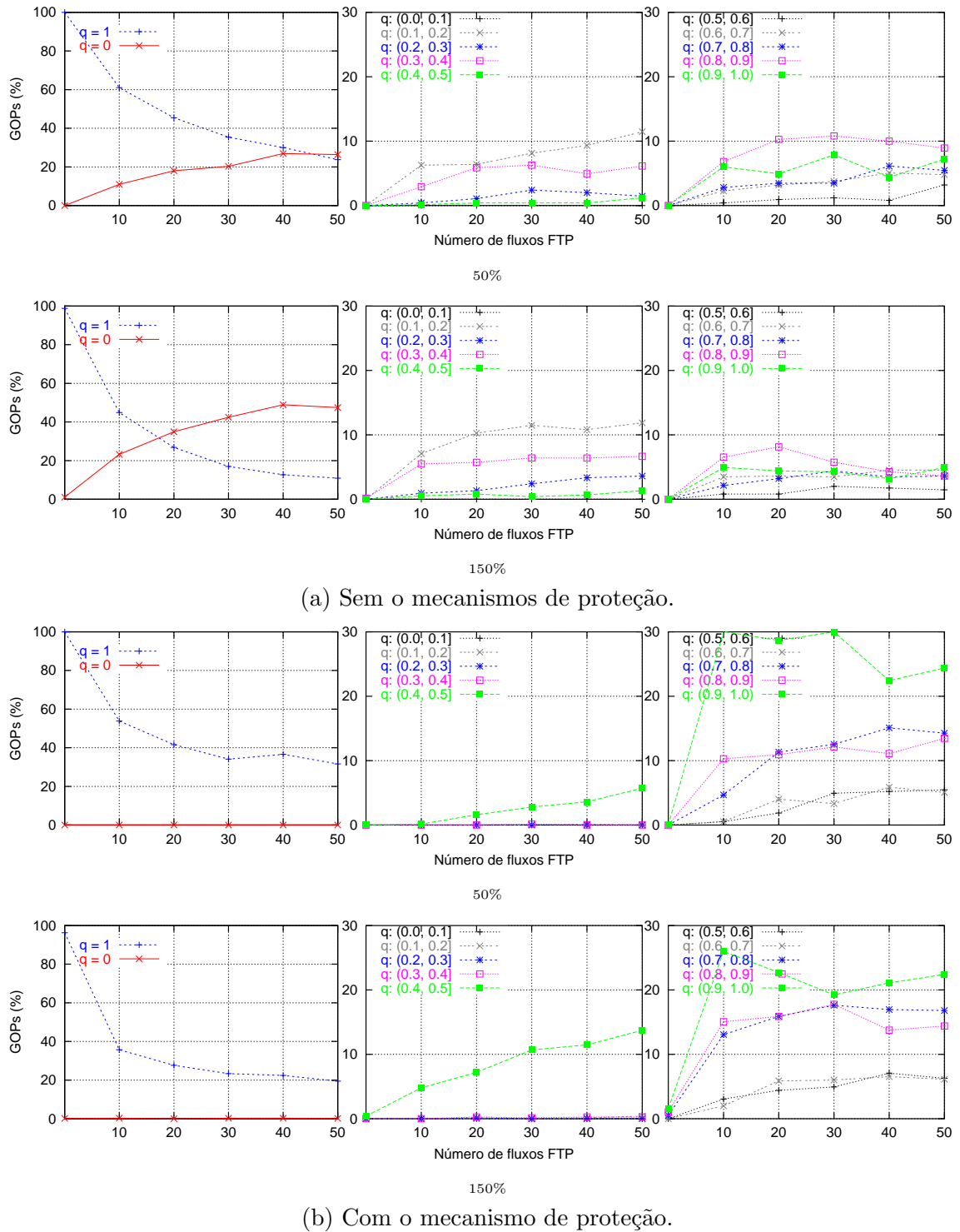


Figura 6.12: A influência da taxa de bits, referente a segunda configuração, utilizando três filas virtuais para o mapeamento do tipo 3. Para taxa de bits referentes a 50 e 150% da taxa de bits original.

6.4 Conclusões

Mostramos que os mecanismos intrínsecos da arquitetura dos serviços diferenciados (Blake et al., 1998), especificamente aqueles descritos em (Heinanen et al., 1999), funcionam efetivamente como um esquema de proteção para pacotes de vídeo que tenham sido gerados por codificadores cujo fluxo de bits é constituído de pedaços de informações de diferentes semânticas para o processo de decodificação.

Os pontos principais para a utilização desse tipo de técnica de transporte, está diretamente relacionada com aspectos ligados à Engenharia de Tráfego. Por exemplo, num ambiente de produção é necessário que se implemente os aspectos encontrados em (Tobagi et al., 2001), de forma que se estabeleça filas em separado para lidar com o tráfego de vídeo de forma que esses concorram apenas entre si, ou que se implemente uma única fila real com mecanismos de prioridade de descarte (implementados por filas virtuais) associados a aquela fila. Esses aspectos de Engenharia de Tráfego não são uma realidade distante da atual. Em redes corporativas, grandes ISPs, redes de pesquisa, etc, é bastante factível e não muito oneroso implementar tais políticas uma vez que a maioria dos equipamentos de interconexão de redes suportam esses mecanismos.

Temos encontrado ganhos significativos na qualidade das informações transportadas, relacionadas aos GOPs de vídeo, quando empregamos o mecanismo de proteção. Nossos resultados sugerem que podemos ajustar o nível de proteção de acordo com o número de filas virtuais ligadas aos níveis de descarte e ao tipo de mapeamento dos tipos de quadros nessas filas virtuais. Esses últimos aspectos são estritamente ligados a engenharia de tráfego e estão fortemente correlacionados às questões ligadas ao custo de operação de tais medidas de proteção de vídeo. De uma maneira geral, o emprego de um mecanismo de proteção desta natureza é mais efetivo na minimização das perdas, se comparado com a mesma situação sem proteção alguma.

Entretanto há uma limitação em se adotar apenas esse tipo de esquema de proteção para transportar vídeo digital. Como um mecanismo proativo, ele contempla a proteção efetiva baseada na importância ligada ao tipo de pacote, porém há outros aspectos com o que se preocupar, principalmente aqueles relacionados ao adequado provisionamento de recursos junto com as políticas de controle de admissão da rede (além daqueles relacionados aos SLAs e SLSs (e TCAs)). Em situações onde, o número de fluxos que estejam sendo transportados faz com que a rede opere com uma alta taxa de utilização ou mesmo sobre-carregada, a atuação do mecanismo é menos efetiva e útil, em situações práticas. Dificuldades como baixa taxas de quadros, congelamento da imagem, latência, etc, podem degradar a qualidade do vídeo quando este chega ao sistema final do usuário.

Ademais, como veremos no Capítulo 7, um esquema desta natureza para o transporte de vídeo digital, pode ser combinado de forma sinérgica com outros esquemas de transporte (de forma proativa ou reativa) que visem atuar em algum ponto no processo de transmissão, melhorando certas características específicas do fluxo de vídeo. Características estas que podem estar ligadas ao processo de codificação, empacotamento, recuperação de perdas, etc.

Capítulo 7

Combinando Técnicas Proativas de QoS Para a Transmissão De Vídeo Digital

7.1 Introdução

Vimos no capítulo 6 que, utilizando uma técnica de proteção para os pacotes de vídeo baseada na informação semântica associada ao tipo de quadro transportado, traz ganhos significativos em relação à minimização da quantidade de perdas (diretas e indiretas) de quadros de vídeo. Entretanto, há situações onde, mesmo que se possa proteger os pacotes que transportam os quadros mais importantes, há uma considerável perda da quantidade de informação, principalmente aquelas ligada aos quadros menos importantes. Isso é irremediável e não há muito o que possa ser feito, apenas com o mecanismo anteriormente proposto.

Nesse contexto, as técnicas de recuperação de erros baseada em esquemas de redundância de informação podem constituir um boa opção para maximizar a quantidade de informação que consegue chegar ao sistema final do usuário. Trabalhando parte, ela pode cooperar de forma sinérgica com um esquema de proteção (tal qual o proposto no capítulo anterior), com ambas atuando em aspectos diferentes da transmissão de vídeo digital. A primeira tentando minimizar a quantidade de perdas dos pacotes mais importantes para a decodificação, enquanto que a última tentando maximizar a quantidade de informação que chega ao sistema final.

Veremos no decorrer deste capítulo que essas técnicas de recuperação de erros baseada em esquemas de redundância de informação, como aquelas que fazem uso de FEC (*Forward Error Correction*) são, de fato, efetivas em certas situações.

7.2 O Esquema de Redundância de Dados

As perdas de dados são particularmente incomodas quando nos referimos a aplicações envolvendo fluxos de vídeo. Vimos no capítulo 5 que podemos utilizar técnicas de recuperação de erros baseadas em mecanismos que promovam a redundância de dados durante a codificação do fluxo de vídeo, objetivando assim, reduzir a probabilidade de perdas no nível da aplicação. No transporte de vídeo temos encontrado diversas aplicações que fazem uso de tais esquemas de redundância, sendo que os mais utilizados com este propósito são o FEC sem priorização (Frossard and Versheure, 2001), (Liu et al., 1997), (Wolfinger, 1997a), (Wolfinger, 1997b), (Martins et al., 2003), e com priorização, utilizando PET (Alanesse, 1994), (Leicher, 1994), (Storn, 1995), (Zhang and Xu, 1999), (Wolfinger, 1997a) e (Wolfinger, 1997b).

Aplicando um esquema dessa natureza a um fluxo de vídeo, fazemos com que um bloco de k pacotes de vídeo seja seguido de $n - k$ pacotes redundantes, como representado na figura 7.1, formando um bloco de pacotes FEC, de tamanho n (onde n é o número total de pacotes transmitidos: pacotes de vídeo codificado mais replicações do mesmo). Assim, se pelo menos k pacotes forem recebidos, qualquer que seja a ordem, então a informação do vídeo associada a este bloco será decodificada corretamente.

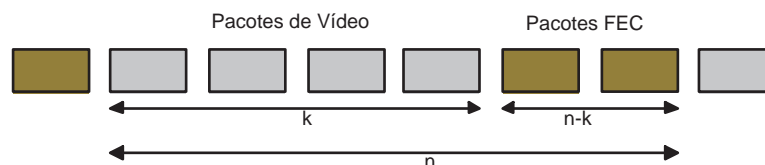


Figura 7.1: Esquema FEC.

Considerando que a implementação do decodificador de vídeo estabeleça um certo “limiar de decodificação”, chamado aqui por ld , para quantidade de pacotes que chegam referentes a um determinado quadro, de forma a indicar o nível de tolerância a perdas de informação, onde temos que $0 \leq ld \leq 1$. Caso ld seja igual a um, significa que o decodificador de vídeo não tolera perdas, e a perda de um fragmento de quadro implica na perda do quadro inteiro. Assim, considerando que T é a capacidade do canal para transmitir o fluxo de vídeo quando o decodificador não tolera perdas ($ld = 1$), nenhum esquema de FEC pode ser utilizado.

Entretanto, se o decodificador for tolerante a perdas de fragmentos de pacotes, a capacidade $T(ld)$ necessária para se transmitir um fluxo de vídeo utilizando redundância baseada em FEC é:

$$T(ld) = \frac{T}{ld} \quad (7.1)$$

Utilizando FEC nesta situação, há uma sobre-carga SC de informação a ser enviada pela rede, pois nesse caso existe uma tolerância a perdas aceita pelo decodificador, de forma que podemos expressá-la por,

$$T(ld) = T(1 + SC(ld)) \quad (7.2)$$

A partir das equações 7.1 e 7.2, temos que,

$$SC(ld) = \frac{T(ld) - T}{T} \quad (7.3)$$

Ou seja,

$$SC(ld) = \frac{1 - ld}{ld} \quad (7.4)$$

A partir da equação 7.4 podemos notar que há um compromisso entre a tolerância a perdas implementada no codificador de vídeo e o custo causado na rede. Em codificadores mais tolerantes a perdas, podemos usar valores maiores de sobrecarga, o que implica na utilização de mais recursos da rede na forma de largura de banda.

7.3 Resultados no Emprego de Redundância de Informação

Utilizamos o mesmo ambiente de simulação descrito na secção 6.3.1 e adicionamos ao esquema de proteção de pacotes, de forma combinada, alguns esquema de redundância de informação na forma de FEC e PET. Avaliamos ainda a influência do mapeamento dos quadros de vídeo em níveis de prioridade (associados a níveis de precedência de descarte de pacotes) na composição de esquemas FEC e PET.

Avaliamos a melhoria na qualidade dos GOPs a partir da métrica proposta neste trabalho, *Fator de Qualidade de Vídeo* (q), tal qual utilizamos no Capítulo 6. Verificamos a influência de vários percentuais de redundância, utilizando FEC e PET, na computação de q . Verificamos também a influência que o número de precedência de descarte tem sobre a qualidade dos GOPs, quando os mesmos são transportados com vários níveis de redundância baseadas tanto em FEC como em PET.

7.3.1 Redundância de Informação Empregando FEC

Nós utilizamos a segunda configuração (vide secção 6.2) para a quantidade de filas virtuais e utilizamos o mapeamento do Tipo 3 (tabela 6.2) para a proteção dos pacotes de quadros de vídeo (ajustamos o RED conforme o Anexo A.1), pois se trata de uma configuração mais geral, empregando três filas virtuais onde podemos mapear os pacotes relativos aos quadros de vídeo de várias maneiras. Todos os experimentos são relativos à transmissão de pacotes com o mecanismos de proteção, ao qual foram somados percentuais distintos de redundância. Nós consideramos que o decodificador de vídeo tolera níveis distintos de perdas de pacotes e ainda assim consegue decodificar o vídeo. Nesses casos, é possível utilizar-se de FEC, codificando informações redundantes até o limite suportado pelo codificador. Utilizamos para o limiar de decodificação e a respectiva sobre-carga (e limite para a porcentagem de FEC a ser injetada na rede) os valores mostrados na tabela 7.1. Isso significa que a sobre-carga é o valor máximo de redundância na qual podemos utilizar FEC/PET.

Tabela 7.1: Valores para o limiar de decodificação ld suportado pelo decodificador de vídeo e suas respectivas sobre-cargas SC suportadas.

Limiar de Decodificação ld	Sobre-Carga SC (%)
0,95	5
0,90	10
0,80	25
0,67	50
0,57	75
0,50	100

Comparamos as situações limites que estabelecemos na tabela 7.1, ou seja, as situações onde o codificador não tolera perdas e onde as perdas são toleradas até um limiar de decodificação de 0,50, o que equivale a poder codificar o vídeo com até 100% de FEC. O resultado é mostrado na figura 7.2.

Podemos observar que dobramos a quantidade de GOPs com valor máximo quando encaminhamos o vídeo codificado com redundância, indo de 20% no primeiro caso a valores em torno de 40% no segundo caso, quando a rede está sobrecarregada com um tráfego de fundo de 20 fluxos de FTP. Isso nos mostra que o emprego de FEC pode dobrar a quantidade de GOPs com valor máximo desde que estejamos dispostos a pagar o custo da sobre-carga adicionada na rede. Esse custo pode ser de diferentes proporções nos casos de utilizarmos valores distintos para a sobre-carga adicional que

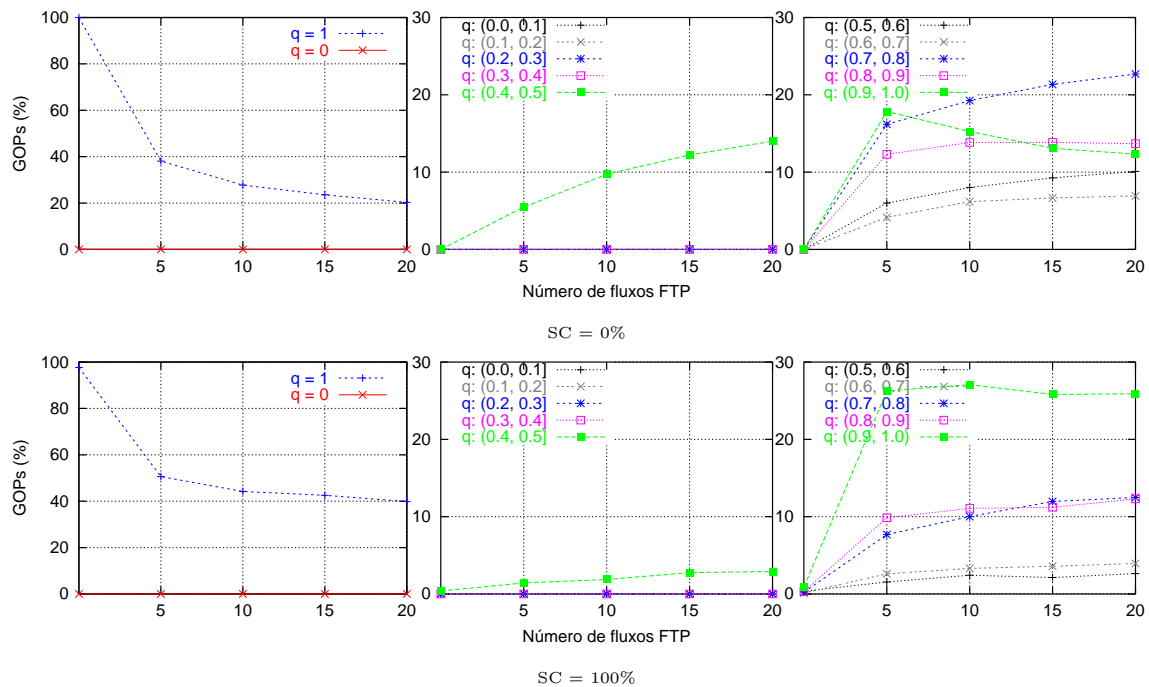
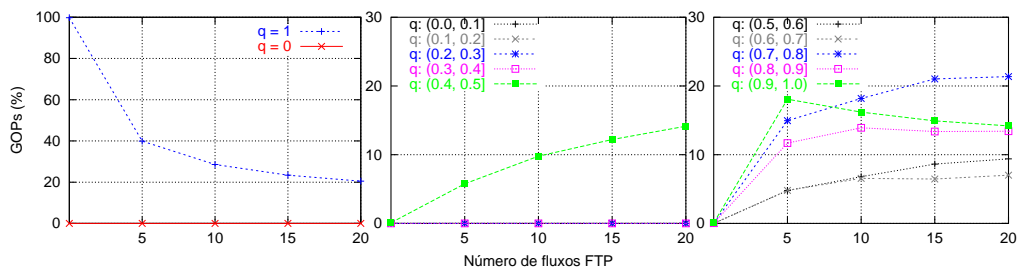


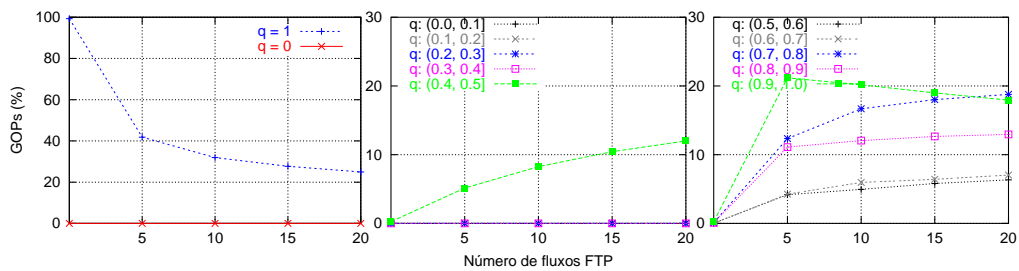
Figura 7.2: Comparação entre um codificador não tolerante a perdas e tolerante a perdas até um limiar de decodificação de 0,50.

injetamos na rede. Na figura 7.3 comparamos a sobre-carga que injetamos na rede e o ganho que isso gera na qualidade dos GOPs transportados.

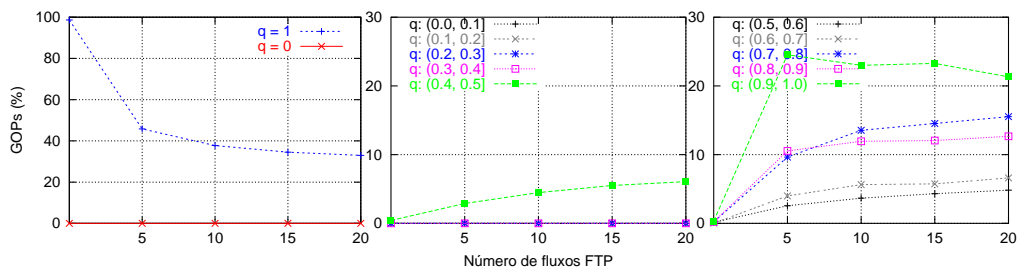
Como pode ser observado, há uma melhora crescente quando se utiliza codificadores de vídeo bastante tolerantes a perdas de quadros. Para limiares de decodificação ld abaixo de 0,67, o que corresponde a utilização de 50% de redundância nos pacotes de vídeo, há uma melhora da qualidade dos GOPs principalmente para índices elevados de sobre-carga na rede (tráfego gerado por fluxos de FTP concorrendo com os quadros Bs do vídeo na fila de mais baixa prioridade). Esse comportamento é esperado pois o “fator de qualidade de vídeo” - q (vide a equação 3.5) atinge um nível de saturação quando a maioria dos quadros Bs são perdidos (mas não os Is e Ps). Pelos resultados obtidos, levando em conta este cenário específico e os devidos ajustes nos parâmetros da rede, podemos concluir que para pequenos valores de sobre-carga não há ganho significativo na qualidade de GOPs que atingem valor máximo quando a rede está sobre-carregada. Entretanto isso não é conclusivo e depende de vários fatores, entre os quais, a escolha da técnica de codificação com redundância, o tipo de empacotamento utilizado, o ajuste nos parâmetros na rede, o perfil de tráfego dos vários tipos de aplicações que estarão utilizando a rede e alguns outros ajustes relacionados a engenharia de tráfego. De uma maneira geral o emprego de FEC combinado a um mecanismo de proteção de



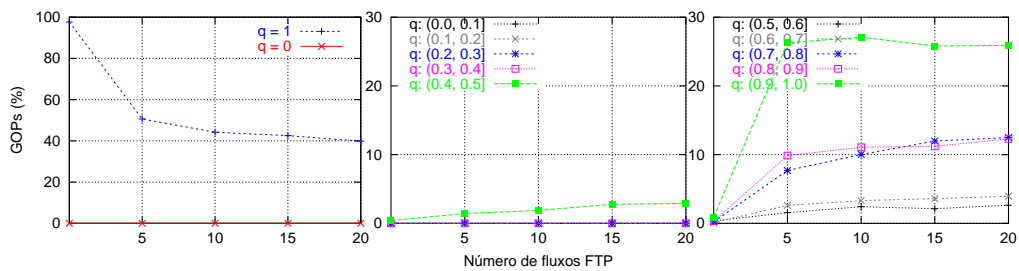
(a) 25% de sobre-carga.



(b) 50% de sobre-carga.



(c) 75% de sobre-carga.



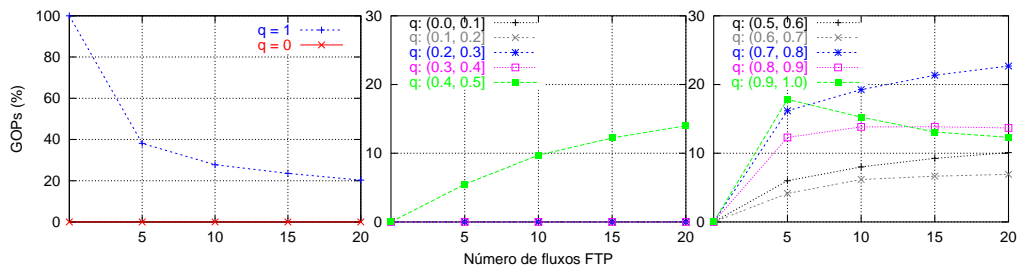
(d) 100% de sobre-carga.

Figura 7.3: Valores para 25, 50, 75 e 100% de sobre-carga injetada na rede utilizando FEC

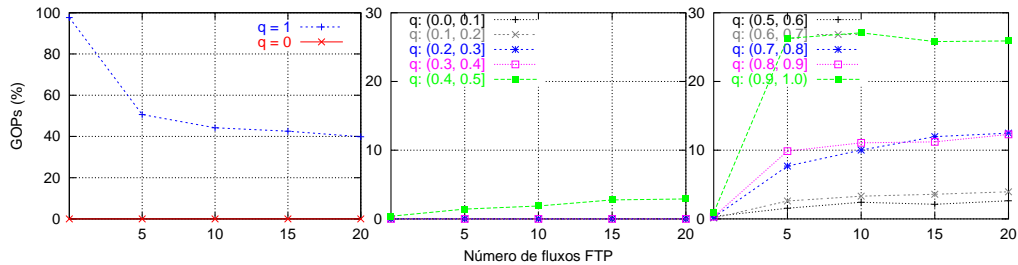
pacotes de vídeo ajuda no ganho da qualidade dos GOPs que são transportados, desde que se esteja disposto a pagar um custo $t(ld)$ em termos de largura de banda. Por exemplo, podemos dobrar a quantidade de GOPs que atingem a máxima qualidade quando passamos de 25% para 100% de redundância, conforme ilustrado na figura 7.3.

7.3.2 Redundância de Informação Empregando PET

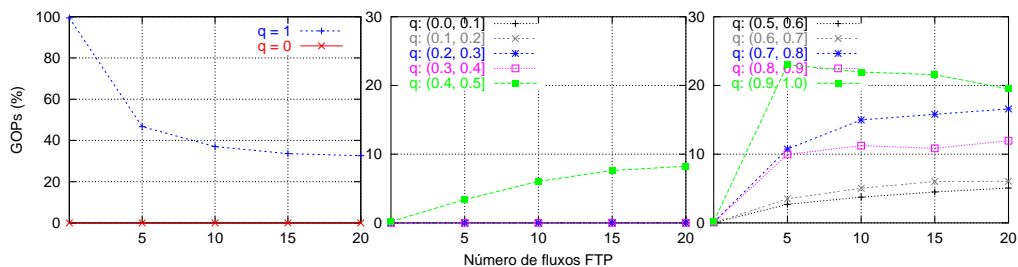
A mesma simulação do cenário anterior foi reproduzida utilizando níveis de PET apenas para os pacotes referentes aos quadros de vídeo do tipo B. Neles, e apenas neles, foram aplicadas as mesmas considerações sobre os limiares de decodificação suportados pelos codificadores de vídeo apresentados na tabela 7.1. Comparamos os casos onde o decodificador não tolera perdas, o codificador tolera perdas empregando FEC e o codificador tolera perdas empregando PET. Os resultados obtidos são mostrados na figura 7.4.



(a) Codificador não tolerante a perdas (SC = 0 %).



(b) Codificador tolerante a perdas empregando FEC (SC = 100 %).



(c) Codificador tolerante a perdas empregando PET (SC = 100 %).

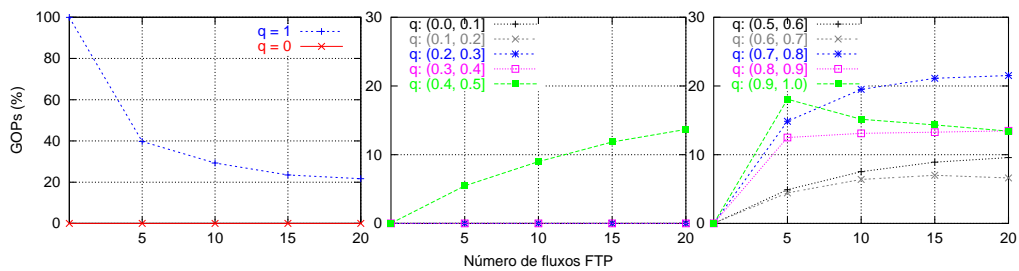
Figura 7.4: Comparação entre um codificador não tolerante a perdas e tolerante a perdas até um limiar de decodificação de 0,50.

Se compararmos os resultados obtidos pelo uso de PET com aqueles referentes ao emprego de FEC, notamos que não obtivemos praticamente nenhuma melhora. De fato, notamos que para valores elevados no nível de utilização da rede, quando aplicamos redundância apenas nos quadros Bs, registra-se um nível de qualidade ligeiramente

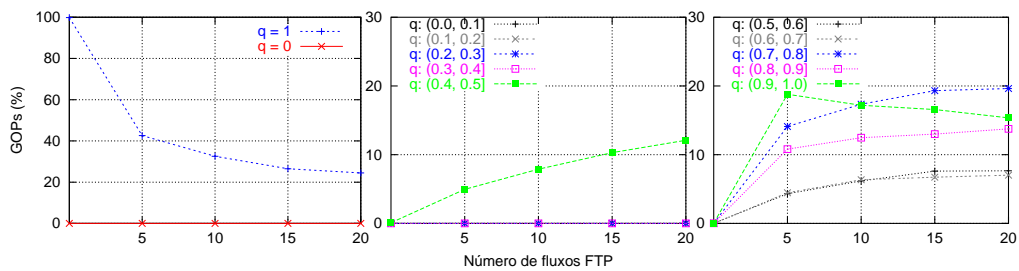
inferior. A justificativa para tal comportamento está ligada diretamente ao tipo de mapeamento empregado na proteção dos pacotes de vídeo. Mantendo esse esquema onde os quadros Bs são encaminhados pela mesma fila do tráfego melhor esforço (tráfego de fundo relacionado aos fluxos de FTP) e aplicando certo nível de redundância aos pacotes que transportam quadros do tipo B, há uma maior disponibilidade de largura de banda, pois os pacotes que transportam os quadros Is e Ps não estão sendo encaminhados com redundância. Desta forma, os recursos excedentes na rede são disputados apenas pelos quadros Bs e fluxos de FTP. Isso faz com que haja uma diminuição no nível da qualidade dos GOPs decorrentes do seguinte efeito: sem a redundância aplicada aos pacotes dos quadros Is e Ps, há uma maior probabilidade que ocorra alguma perda deles, conseqüentemente diminuindo o valor de q para aquele GOP. Entretanto, quando comparamos os valores onde o decodificador admite um certo percentual de perdas, cujos resultados são mostrados na figura 7.5, podemos concluir que, apesar dessa configuração de transporte (utilizando três filas) e esse tipo de mapeamento não induzirem a melhoras frente a mesma situação utilizando FEC, há uma melhora se compararmos com relação ao mecanismos de proteção unicamente (ou a situação onde o codificador não tolera perdas). Por outro lado, vemos que podemos ter um ganho em termos de largura de banda, uma vez que estamos codificando redundâncias apenas em um tipo de quadro (os quadros tipo B que normalmente são menores que os os do tipo I e P).

7.3.3 A influência do Mapeamento dos Pacotes dos Quadros de Vídeo nos Níveis de Precedência de Descarte

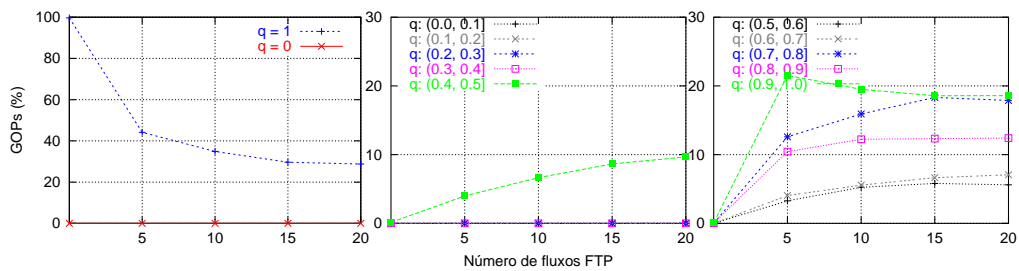
O mapeamento dos pacotes dos quadros de vídeo nos níveis de precedência de descarte influencia na escolha de um esquema de FEC e/ou PET de forma de maximizar a quantidade de informações aptas a serem decodificadas. Temos buscado avaliar essa influência, utilizando o fator de qualidade de vídeo - q como métrica de comparação. Para isto, podemos estabelecer condições de mapeamento, onde estabelecemos uma quantidade de precedências e combinamos a forma de mapear os quadros de vídeo nessas precedências (na forma de tipos de mapeamento). Assim, presupondo que desejemos transportar o vídeo de forma a proteger os pacotes do fluxo através de um mecanismo implementado com diversos níveis de precedência de descarte, estabelecemos um **mapeamento mínimo** no qual utilizamos apenas duas filas virtuais. Uma de **maior prioridade** (apresentando uma menor probabilidade de descarte) Q_h e uma de **menor prioridade** (apresentando um maior probabilidade de descarte) Q_l , conforme mostrado na tabela 6.1.



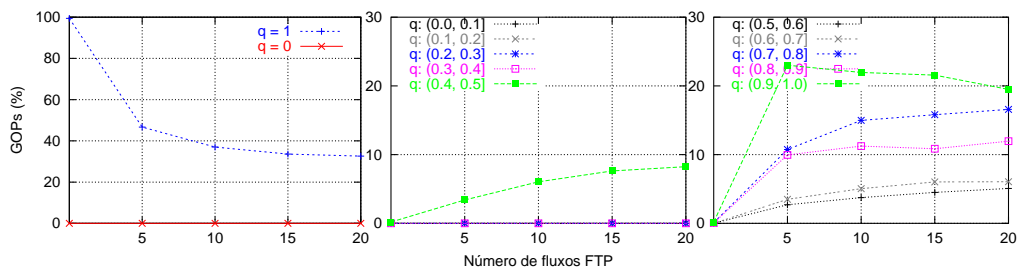
(a) 25% de sobre-carga.



(b) 50% de sobre-carga.



(c) 75% de sobre-carga.



(d) 100% de sobre-carga.

Figura 7.5: Valores para 25, 50, 75 e 100% de sobre-carga injetada na rede utilizando PET.

A seguir, aplicamos os casos anteriores de FEC e PET, considerando a influência do esquema de mapeamento dos quadros de vídeo em níveis de precedência de descarte. Nesse experimento, o RED é ajustado conforme o Anexo A.2.

Influência no emprego de FEC

Num primeiro experimento, utilizamos um mapeamento do Tipo 1 (conforme a tabela 6.1), onde todos os quadros de vídeo são encaminhados por uma fila de maior prioridade, enquanto que o tráfego melhor esforço é transportado na fila de menor prioridade. Na figura 7.6 comparamos o caso onde o codificador não tolera perdas (ou seja, os pacotes são encaminhados apenas com o esquema de proteção) e o caso onde é tolerante a perdas para um limiar de decodificação de 0,5 (admitindo uma sobre-carga de 100%).

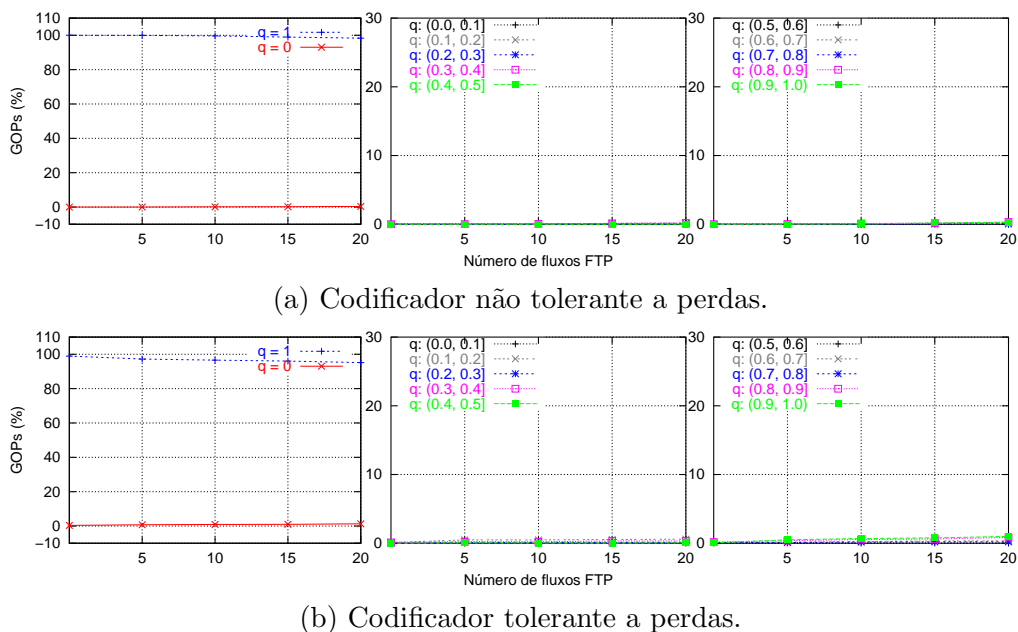
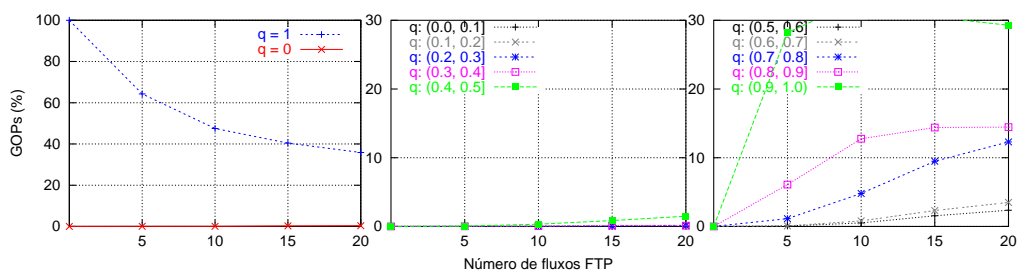


Figura 7.6: Mapeamento Tipo 1: Comparação entre a-) um codificador não tolerante a perdas e b-) tolerante a perdas até um limiar de decodificação de 0,50 utilizando FEC.

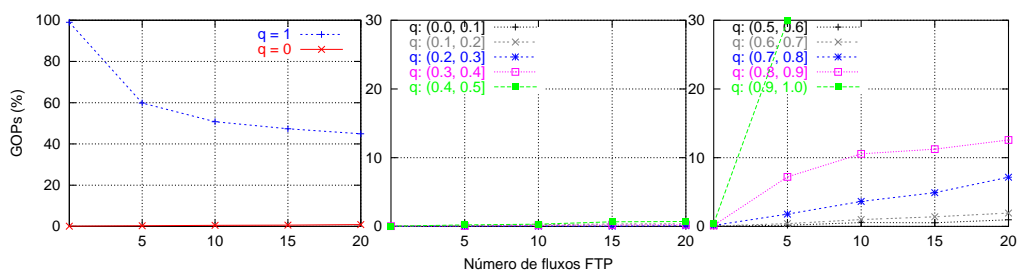
Podemos observar a partir dos resultados obtidos com esse tipo de mapeamento, que a proteção dos pacotes dos quadros de vídeo faz com que a qualidade dos GOPs se mantenha quase no máximo, para esse número de fontes de tráfego de fundo. Há, obviamente, um ligeiro decréscimo em torno de 3% nos valores de q quando são aplicados elevados valores de redundância. Isso se explica pelo fato de que, embora os pacotes de vídeo estejam protegidos do tráfego de melhor esforço, eles concorrem entre si na fila de maior prioridade. Dessa forma, existe alguma probabilidade de que os quadros com um maior peso no cálculo de q (I_s e/ou P_s) sejam perdidos. Entretanto, podemos observar nos gráficos que, quando q se mantém próximo a 1, as perdas estão ocorrendo nos quadros do tipo B. De fato, estes são menores e mais numerosos que os demais, e

assim, atingem mais rapidamente do que os outros os limiares na fila do RED.

Em um segundo experimento, aplicamos o mapeamento do Tipo 2 (vide tabela 6.1), onde os pacotes dos quadros de vídeo mais importantes, Is e os Ps, são encaminhados pela fila de maior prioridade, enquanto os pacotes dos quadros Bs são encaminhados na fila de menor prioridade, junto com o tráfego de melhor-esforço. Os resultados são apresentados na figura 7.7.



(a) Codificador não tolerante a perdas ($SC = 0\%$).



(b) Codificador tolerante a perdas ($SC = 100\%$).

Figura 7.7: Mapeamento tipo 2: Comparação entre a-) um codificador não tolerante a perdas e b-) tolerante a perdas até um limiar de decodificação de 0,50 utilizando FEC.

Podemos notar que com esse tipo de mapeamento, há uma degradação acentuada na qualidade dos GOPs se comparados ao tipo de mapeamento anterior, uma vez que os pacotes de quadros Bs estão sofrendo descarte devido a concorrência com o tráfego melhor esforço. Notamos ainda que é possível obter uma ligeira melhora na qualidade dos GOPs, aplicando um considerável nível de redundância (100% de sobre-carga). Isso beneficia diretamente os pacotes de quadros Bs, uma vez que os quadros Is e Ps, apesar de estarem com um certo percentual de redundância, não sofrem concorrência de outros tipos de tráfegos.

Em um terceiro experimento, aplicamos o mapeamento do Tipo 3 (vide tabela 6.1), onde os pacotes dos quadros de vídeo Is são encaminhados pela fila de maior prioridade, enquanto os pacotes dos quadros Ps e Bs são encaminhados na fila de menor prioridade, junto com o tráfego de melhor-esforço. Os resultados são apresentados na figura 7.8.

Vimos pelos resultados obtidos, que esse tipo de mapeamento compromete a qua-

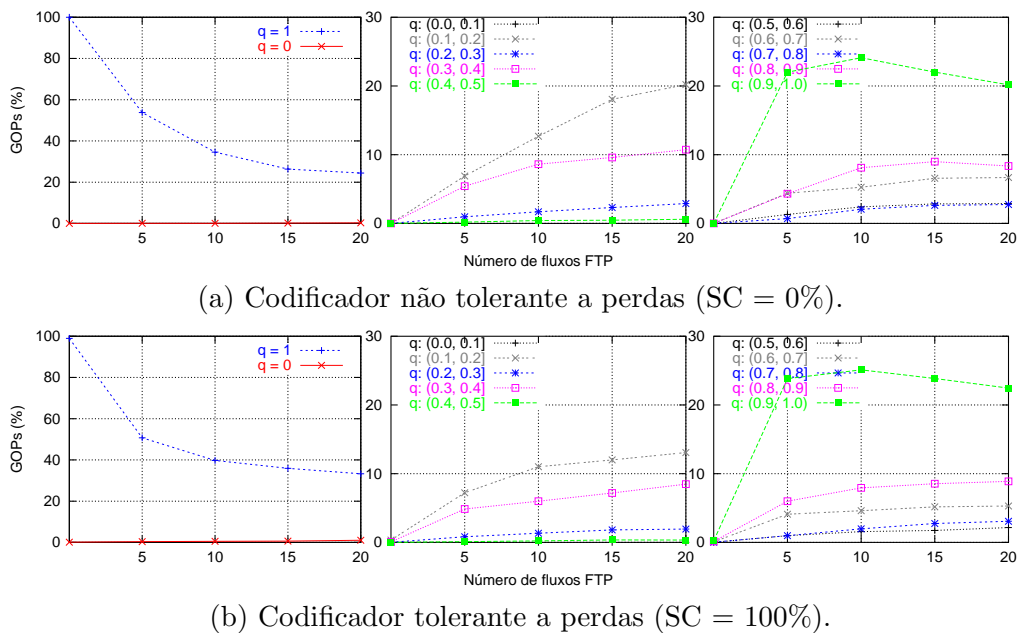


Figura 7.8: Mapeamento Tipo 3: Comparação entre a-) um codificador não tolerante a perdas e b-) tolerante a perdas até um limiar de decodificação de 0.50 utilizando FEC.

lidade dos GOPs quando a rede se encontra fortemente carregada ou sobre-carregada. Os valores de q na faixa onde há mais de 10 fluxos de FTP concorrendo com os pacotes do quadros de vídeo Ps e Bs são menores do que os tipos de mapeamentos anteriores. Entretanto, mesmo nesse cenário adverso para os pacotes dos quadros de vídeo, há uma ligeira melhora quando os mesmos são encaminhados com valores mais altos de redundância. O fato é que os pacotes de quadros de vídeo Ps e Bs são descartados indiscriminadamente tal qual os pacotes de FTP, impactando fortemente no cálculo de q . As perdas, principalmente nos pacotes de quadros Ps, influenciam a computação de q pois são responsáveis pelas perdas de forma direta e indireta. Estas últimas atingem principalmente os quadros Ps posteriores, assim como os Bs posteriores e anteriores ao quadro perdido.

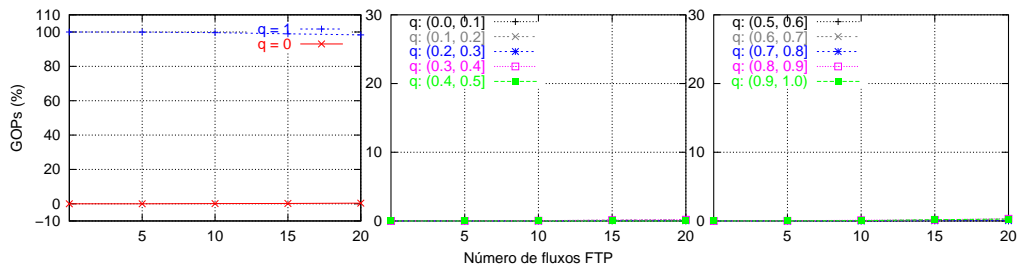
Pode-se concluir que quando se utiliza mecanismos de proteção de pacotes dos quadros de vídeo, para algum tipo específico de mapeamento em precedências de descarte, um esquema empregando uma redundância equitativa entre os pacotes dos quadros de vídeo, pode ser útil no sentido de obter-se uma melhora adicional na qualidade dos GOPs medidos por q . Desde que, é claro, estejamos dispostos a pagar por esse custo adicional em termos de largura de banda. Ademais, a escolha do tipo de mapeamento e dos níveis de precedência se caracteriza como um exercício de Engenharia de Tráfego e desta forma é bastante sensível ao perfil de tráfego das aplicações que são caracterizadas

como melhor-esforço.

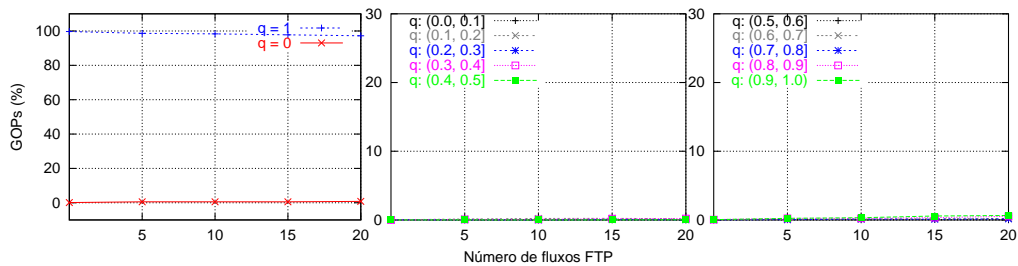
Influência no emprego de PET

Considerando a mesma estratégia utilizada em 7.3.2 para a composição da redundância empregando PET, e aplicando-a aos três tipos de mapeamentos mostrados na tabela 6.1, temos os seguintes resultados.

Em um primeiro experimento, utilizamos um mapeamento do Tipo 1 e obtivemos os resultados mostrados na figura 7.9.



(a) Codificador não tolerante a perdas (SC = 0%).



(b) Codificador tolerante a perdas (SC = 100%).

Figura 7.9: Mapeamento Tipo 1: Comparação entre a-) um codificador não tolerante a perdas e b-) tolerante a perdas até um limiar de decodificação de 0,50 utilizando PET.

A situação é semelhante ao descrito em 7.3.3 quando aplicando o mesmo tipo de mapeamento. A diferença é referente apenas no volume de dados injetado na fila de maior prioridade, onde apenas nos pacotes de quadros Bs é aplicado um percentual de redundância. Isso entretanto não ocasiona ganho significativo na computação de q para esse nível de carga da rede. De fato o que está ocorrendo é uma maior quantidade de informação contendo um maior percentual de quadros do tipo B injetados na rede, e desta forma uma maior probabilidade que um maior número deles venham a ajudar na computação de q . Entretanto, seu peso na computação de q é pequeno e não influencia com um valor significativo.

Num segundo experimento, foi utilizado um mapeamento do Tipo 2, cujos resultados são apresentados nas figura 7.10.

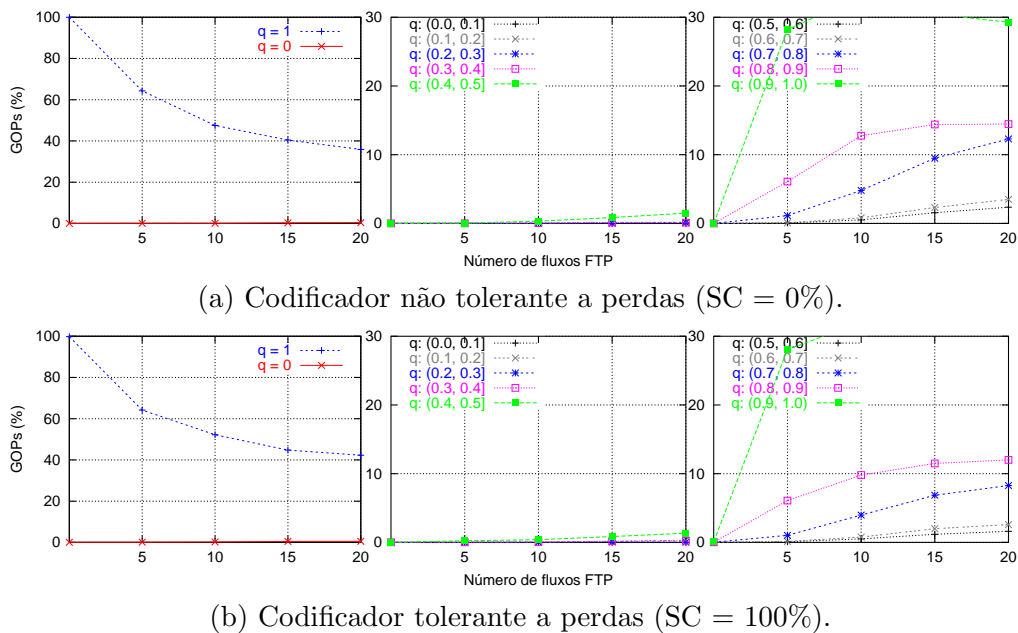


Figura 7.10: Mapeamento Tipo 2: Comparação entre a-) um codificador não tolerante a perdas e b-) tolerante a perdas até um limiar de decodificação de 0,50 utilizando PET.

Com esse tipo de mapeamento e com esse tipo de PET, espera-se que haja uma melhora na quantidade de GOPs com qualidade máxima em relação a mesma situação utilizando-se FEC, uma vez que a quantidade de recursos da rede foi reduzida pois apenas os quadros Bs são encaminhados com redundância. Como os quadros mais importantes continuam sendo transportados na fila de maior prioridade, eles são os que mais contabilizam para o valor de q . Embora o número de quadros Bs seja mais numeroso em relação a uma situação sem redundância, não há ganho significativo em relação a um esquema que se utilize apenas de FEC, para esse nível de carga da rede. Tendo como única ressalva o fato de que esse tipo de mapeamento consome menos recursos da rede (na forma de largura de banda) se comparado com o emprego de FEC nas mesmas condições.

Em um terceiro experimento, utilizou-se o mapeamento do Tipo 3, cujos resultados são mostrados na figura 7.11.

Para essa condição de simulação e para esse nível de carga da rede, não há diferença significativa em relação aos resultados encontrados aplicando FEC nas mesmas condições. Apesar de se esperar que o emprego de FEC, aplicado nos pacotes de quadros Ps, além dos Bs, poderia aumentar a probabilidade de que chegassem (em um maior número) aptos para decodificação, ajudando assim a melhorar a computação de

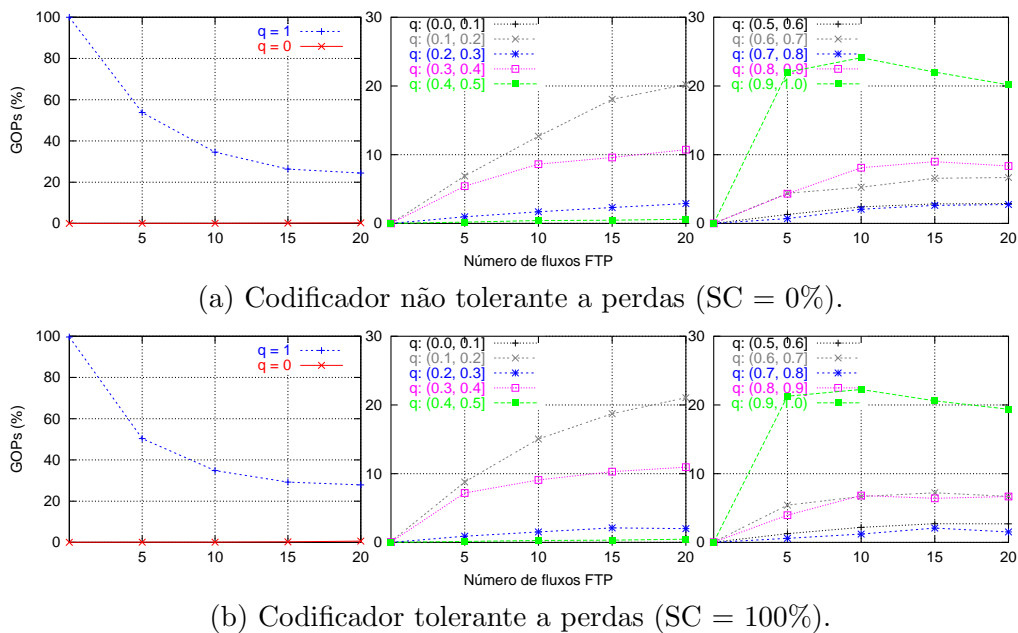


Figura 7.11: Mapeamento tipo 3: Comparação entre a-) um codificador não tolerante a perdas e b-) tolerante a perdas até um limiar de decodificação de 0,50 utilizando FEC.

q , podemos observar um comportamento não diferente do caso do PET. De fato, este tipo particular de mapeamento, Tipo 3, não propicia a adequada proteção aos pacotes de quadros Ps de forma a melhorar a qualidade dos GOPs que chegam aptos a serem decodificados.

Um possível ganho na utilização de PET nesse cenário específico, seria aplicar um percentual de redundância nos pacotes de quadros do tipo P. Por exemplo, aplicando-se 100% de redundância (o que equivale a um codificador que suporte um limiar de decodificação de 0,5) nos pacotes de quadros Ps e Bs, vemos na figura 7.12 um pequeno aumento na computação de q , mantendo a mesma taxa de carga da rede. Pelos resultados obtidos, apesar de ser possível sempre ter algum ganho na qualidade dos GOPs empregando PET, tem-se que ponderar a relação custo \times benefício na escolha do número de precedências, tipos de mapeamento e pesos para o PET. Neste último caso, haveria a possibilidade de se buscar alguma valor ótimo para os pesos relativos ao percentual de redundância para cada tipo de pacote. Entretanto isso seria uma tarefa que só poderia operar satisfatoriamente para um determinado perfil de vídeo. Ou seja, mudanças no formato do GOP, mudança da taxa de bits, número de fontes de vídeo concorrentes e outros pequenos fatores exigiriam o recálculo dos valores ótimos. Em linhas gerais concluímos que podemos melhorar mais ainda a qualidade do vídeo protegido com o mecanismo de proteção, adicionando níveis de PET.

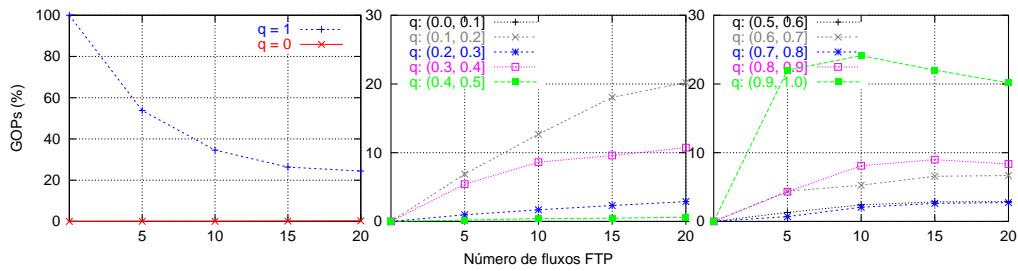
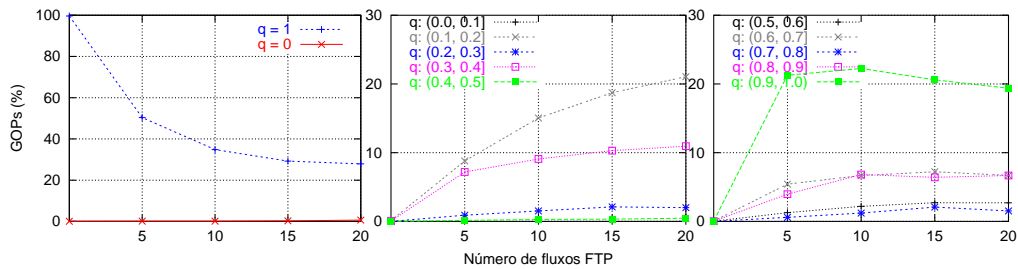
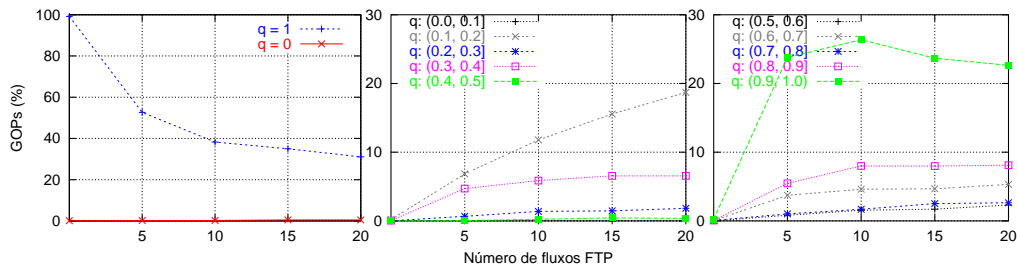
(a) Codificador não tolerante a perdas ($SC = 0\%$).(b) Codificador tolerante a perdas e redundância PET apenas nos pacotes de quadros Bs ($SC = 100\%$).(c) Codificador tolerante a perdas e redundância PET apenas nos pacotes de quadros Ps e Bs ($SC = 100\%$).

Figura 7.12: As figuras representam respectivamente os casos onde a-) nenhuma redundância é aplicada, b-) redundância de 100% aplicando PET apenas nos pacotes de quadros Bs e c-) redundância de 100% aplicando PET nos pacotes de quadros Ps e Bs.

7.4 Conclusões

Vimos neste capítulo que a combinação de mecanismos de proteção de pacotes e redundância apresentados nos Capítulos 6 e 7, e cujo desempenho foi mostrado através dos resultados apresentados e comentados no decorrer deste capítulo, é bastante efetiva para o transporte de vídeo digital sobre redes a pacotes. Ou seja, se utilizando políticas de proteção do pacotes de vídeo baseadas na sua importância na construção do GOPs, ajuda a melhorar sensivelmente a qualidade dos GOPs transmitidos, e com a aplicação da correção de erros baseada em redundância conseguimos melhorar mais ainda essa qualidade.

O emprego de redundância no transporte dos pacotes do vídeo ajuda a incrementar os valores computados para o Fator de Qualidade de Vídeo, expresso através da métrica q , implicando que GOPs mais completos possam chegar ao sistema final para serem decodificados. O emprego de redundância equitativa, utilizando FEC, ou a redundância baseada na semântica do pacote, utilizando PET, é eficaz para maximizar a quantidade de dados que chegam ao destino final, se não há maiores restrições ligadas a disponibilidade de recursos na rede (na forma de largura de banda). Entretanto há um compromisso entre o nível de redundância a ser utilizado e o ganho de qualidade dos GOPs computados por q . Se o objetivo é obter no lado do receptor a informação relativa aos GOPs com os maiores valores possíveis, há uma relação entre o percentual de redundância utilizado e o ganho que isso propiciou (ou não) nos valores de q . Existem dois limiares na utilização de redundância dentre os quais é possível aumentar a qualidade do vídeo. Um inferior onde se situa a mínima quantidade de informação redundante que se aplica na codificação do vídeo, e outro superior, onde a computação de q satura. Nesse caso não há ganho de qualidade com o aumento do percentual de redundância.

Os resultados obtidos por meio de simulação tem mostrado que, o emprego de redundância de informação baseada em FEC ou PET, pode interoperar com um esquema de proteção de pacotes de vídeo de forma sinérgica de forma a alcançar melhores resultados, quando o ganho na qualidade dos GOPs é computado baseado em q .

A única restrição de tal combinação de mecanismos é no quesito custo. A sobrecarga que é gerada por esquemas FEC ou PET se traduz em termos de custo de largura de banda. Nesse caso, faz-se necessário ponderar sobre a utilização desse mecanismo, considerando a relação custo \times benefício, principalmente para valores elevados de sobre-carga. Se aplicarmos uma metodologia não reativa, um bom começo seria estabelecer os limiares onde se possa aplicar redundâncias ao vídeo de forma ter-se ganho de qualidade. Isso implica em se conhecer, a priori, as características do(s) vídeo(s) transportado(s), tais como tamanho do GOP, taxa de bits, etc, para em seguida estabelecer os percentuais de redundância, mínimo e máximo, de forma a ter-se ganho de qualidade. Então, tem-se que verificar se este ganho de qualidade é justificável para esse tipo de aplicação e corresponde ao custo dos recursos da rede.

Capítulo 8

Conclusões e Trabalhos Futuros

Neste trabalho propusemos uma combinação sinérgica de técnicas proativas de qualidade de serviço, que possa ajudar no transporte de vídeo digital sobre redes de pacotes, de forma a obter-se uma melhor qualidade nas informações transmitidas.

Essa combinação é formada por um mecanismo de proteção de pacotes de vídeo baseado nas redes de serviços diferenciados assegurados e um esquema de correção de erros baseado na redundância de informação. Essa proteção de pacotes se estabelece na forma de mapear o tipo de quadro de vídeo contido em um pacote, em um nível de precedência de descarte, seguindo um mapeamento específico. Isso permite priorizar os pacotes que transportam os quadros de vídeo mais importantes quando a rede de transporte enfrenta um congestionamento, ou mesmo um alto nível de carga, com uma possibilidade iminente de descartes indiscriminados de pacotes. Os resultados encontrados neste trabalho, mostram que estes mecanismos permitem um ganho considerável em tal ação de proteção, visto que os GOPs de vídeo que chegam para a decodificação apresentam uma composição mais completa com relação aos quadros mais importantes. Esse ganho de qualidade é bastante significativo quando comparamos a mesma situação onde o vídeo é transportado por uma rede do tipo melhor esforço, obedecendo uma política de fila do tipo DropTail.

Os resultados apresentados neste trabalho e em (Leite and Farines, 2004) também sugerem que podemos melhorar mais ainda esta qualidade, codificando o vídeo com um esquema de redundância de informação empregando FEC ou PET. Com FEC, temos um nível de redundância distribuída uniformemente entre os tipos de quadros. Com PET podemos atribuir níveis diferenciados de redundância entre os diferentes tipos de quadros. Empregando PET temos um menor custo em termos de largura de banda que empregando FEC, aplicando os mesmos percentuais de redundância, uma vez que apenas parte da informação é replicada. No contexto do nosso trabalho, levando em

consideração as questões relativas à forma de codificar a redundância, bem como a escolha do número de precedências, e à forma de mapeamento dos pacotes nessas precedências, os resultados com FEC alcançaram um resultado ligeiramente superior aqueles com PET. Entretanto esses resultados podem não ser totalmente absolutos dependendo da escolha e ajuste dessas várias variáveis envolvidas, tais como: os ajustes nos mecanismos intrínsecos a arquitetura dos serviços diferenciados (parâmetros do RED, tipo de algoritmo RIO, etc), percentuais de redundância aplicados a cada tipo de quadro, etc.

Também propusemos uma métrica que nos permitisse quantificar e qualificar a qualidade dos GOPs de vídeo de forma que pudéssemos avaliar o desempenho do esquema que empregamos para o transporte de vídeo. Embora não esteja classificada com uma métrica baseada no “sistema visual humano” (Lambrecht, 1996), (Comes, 1995), (Western et al., 1995) nem tampouco em métricas baseadas na comparação de pixel de uma imagem com PSNR (vide subsecção 3.2.2), esta é bem útil como métrica intermediária para avaliar a qualidade da informação que é transmitida, podendo ser usada como variável de monitoramento em certos esquemas de transmissão que levem em conta a qualidade dos GOPs transmitidos. Tal métrica, entretanto, pode em trabalhos futuros ser relacionada com a qualidade segundo o ponto de vista subjetivos do usuário final.

De uma maneira geral, a contribuição maior deste trabalho é ter mostrado que, com a abordagem aqui proposta, podemos transportar vídeo digital obtendo uma maior qualidade nas informações transportadas, e seguindo esse princípio, pode trabalhar de forma sinérgica junto com outros mecanismos (reativos ou não), tentando melhorar mais ainda esta qualidade.

8.1 Trabalhos Futuros

Temos mostrado algumas possibilidades da aplicabilidade de técnicas proativas no sentido de melhorar a qualidade do transporte de vídeo. As empregadas no contexto deste trabalho, são baseadas na proteção dos pacotes de vídeo e na redundância de informação, e podem ser estendidas e combinadas levando a obter-se uma melhor qualidade no transporte de vídeo. Além disso, é possível empregar a métrica por nós proposta para quantificar esses ganhos de qualidade em outros contextos relacionados a seguir.

As perspectivas de um estudo mais aprofundado, seguindo de um certo nível de desenvolvimento das propostas, permite-nos indicar os caminhos a seguir, por onde será possível dar continuidade a este trabalho.

8.1.1 Relacionadas a Proteção de Pacotes e Redundância de Informação

Essa abordagem de transmissão de vídeo digital pode ser estendida para suportar outros tipos de codificação de vídeo, entre elas a transmissão em vários fluxos tais como:

- A codificação do fluxo de vídeo replicados - onde o mesmo vídeo é codificado com diferentes qualidades e diferentes taxas de bits (isso é obtido com diferentes parâmetros de compressão)(Cheung et al., 1996). Neste caso, a mesma estrutura com níveis de precedências e tipos de mapeamentos dos pacotes de vídeo nessas precedências poderia ser estendida separadamente para cada fluxo. Poderíamos ter várias filas reais, cada uma transportando um fluxo com uma qualidade específica, e cada fila protegendo os pacotes através do mecanismo de proteção.
- A codificação do fluxo de vídeo em diferentes camadas - onde o vídeo é codificado em várias camadas, sendo uma principal e outras de melhoria. Os receptores decodificam as camadas adicionais de acordo com sua capacidade de processamento e disponibilidade de recursos na periferia da rede a qual estão conectados. Diversos padrões de codificação suportam esse tipo de codificação como o MPEG-2 e o MPEG-4 (Koenen, 2002), (Ahmed, Mehaoua and Buridant, 2001), (Ahmed, Buridant and Mehaoua, 2001).

De uma maneira geral, os codificadores geram diversos fluxos distintos, sejam replicados ou em diferentes camadas, porém gerando-os com a mesma estrutura de GOPs. Dessa forma, o esquema pode ser utilizado da mesma maneira para cada fluxo ou camada adicional. Ahmed et al. em (Ahmed, Mehaoua and Buridant, 2001), (Ahmed, Buridant and Mehaoua, 2001) utilizam um esquema de prioridades de descarte das redes a serviços diferenciados para transportar vídeo em camadas. Pretendemos extrapolar esse esquema, adotando uma padronização para serviços diferenciados do IETF como os Serviços Assegurados (Heinanen et al., 1999) ou estendendo os mesmo, suportando um maior número de classes e precedências, de forma a encaminhar as camadas em classes de serviço distintas e em cada classe promover a proteção semântica dos pacotes baseada na sua importância para a decodificação.

As mesmas sugestões valem para o esquema de recuperação de erros baseado na redundância de informação que utilizamos neste trabalho e em (Martins et al., 2003). A ressalva neste caso é no correto provisionamento da rede de forma a suportar a replicação de informações das várias camadas.

Ademais, é possível seguir uma linha para obter melhorias no transporte de vídeo, lançando mão de alguns componentes reativos. Nesses casos, uma dessas linhas seria o estudo do acordo otimizado entre os níveis de sobre-carga promovido pelo emprego de FEC/PET e as diversas variáveis que compõe a proposta apresentada neste trabalho. Dentre os possíveis estudos, pode-se investigar:

- a-) a relação entre o nível de sobre-carga e a MTU no caminho fim-a-fim,
- b-) os ajustes nos componentes das redes a serviços diferenciados (RED, número de precedências e tipo de mapeamento dos quadros de vídeo) de acordo com o nível de tolerância suportado pelo codificador de vídeo,
- c-) e os ajustes nos percentuais de PET de forma a maximizar a computação de q para um determinado conjunto de valores dos componentes da rede a serviços diferenciados.

8.1.2 Relacionados a Métrica de Avaliação de GOPs

A métrica proposta neste trabalho nos inspira a possibilidade de emprega-la para avaliar possíveis ganhos de qualidade em esquemas de transporte de vídeo digital, do ponto de vista da qualidade das informações baseadas nos GOPs de vídeo. A métrica, por si só, pode ser a base para a comparação das propostas sugeridas no item anterior.

De fato podemos extrapolar o emprego de tal métrica para operar como variável de realimentação em sistemas baseados na adaptação do vídeo, como por exemplo:

- No caso do vídeo replicado, o receptor, detectando que há uma considerável degradação do vídeo que chega baseado na qualidade dos GOPs medidos, chavear para receber um fluxo com menor qualidade de codificação.
- No caso de vídeo em camadas, o receptor, detectando o mesmo nível de degradação do vídeo, baseado nessa métrica, ordena a poda das camadas de melhora. Nesse caso em particular, a métrica teria que ser adaptada e possivelmente estendida para suportar formas de transmissão desta natureza. Isso pressupõe, a priori, a necessidade de alguma forma de inferência nos valores das métricas medidas em cada camada, que deveriam compor um novo valor que indicaria a necessidade da poda das camadas de melhora.
- Existe ainda a possibilidade dessa métrica ser utilizada como variável em mecanismo adaptativo baseada na taxa de bits injetada na rede. Neste caso tem duas linhas a serem seguidas. A primeira consiste no controle no fator de quantização

do codificador de vídeo, diminuindo-se a qualidade do fluxo injetado na rede porém mantendo a mesmo tamanho do GOP. A segunda, pressupõe a alteração do tamanho do GOP. Entretanto, isso ocasionaria num recálculo da métrica, possivelmente alterando a sua estrutura sintática. Em outras palavras, haveria a necessidade da composição de uma família de métricas relacionadas com o tamanho do GOP utilizado.

Outros pontos que se apresentam como sendo bastante interessantes de serem desenvolvidos, se referem a um possível mapeamento da métrica proposta em outras métricas de avaliação da qualidade de vídeo. A dificuldade neste ponto é refletida pelo fato que, se tratando de uma métrica intermediária que mede a qualidade da informação do fluxo de bits, haveria a necessidade de encontrar um relação entre o nível de pixels de um quadro, como no caso do PSNR, e o nível de quadros de um GOP. Ou seja, caso seja possível mapear uma métrica baseada na comparação de pixels para uma métrica baseada na comparação de GOPs, deve-se comparar baseando-se nos pixels de todo o GOP. Entretanto essa relação não se apresenta clara o suficiente e se haveria de ter um significado plausível.

Uma outra relação poderia ser o mapeamento dessa métrica numa métrica baseada na qualidade subjetiva do ponto de vista do usuário. Neste caso a dificuldade se encontra em mapear um único GOP para um nível MOS (*Mean Opinion Score*), por exemplo. Poderia se pensar numa espécie de média dos vários valores obtidos com a métrica cujos GOPs compõe uma cena.

Apêndice A

Anexo I - Parâmetros Utilizados na Simulação

Nos nos baseamos no Network Simulator - ns2 DARPA and NFS (2004), na sua versão 2.1b8, a qual foi modificada para dar suporte ao mapeamento do tipo de quadro de vídeo a um nível de precedência de descarte, e a inclusão da figura de um condicionador de tráfego que não executa nenhuma ação (de demção ou promoção no nível de precedência) em relação aos pacotes que adentram no domínio de rede a serviços diferenciados. Essas funcionalidades não eram encontradas nativamente, na época, no suporte a serviços diferenciados.

Utilizamos como cenário de simulação uma rede a serviços diferenciados, cuja topologia é mostrada na figura 6.2. Nessa topologia, a rede a serviços diferenciados é constituída de três roteadores, sendo dois de borda e um de núcleo. As fontes de vídeo, assim como as fontes de tráfego de fundo e seus respectivos receptores, estão conectados aos roteadores de borda.

A.1 Ajuste um do RED

Os pacotes do fluxo são encaminhados por uma fila real, que implementa três filas virtuais associadas as cores (níveis de descarte) dos tipos de pacotes. Por exemplo, os pacotes podem ser encaminhados numa disciplina de fila do tipo RED3 consistindo de um mecanismo RED Floyd and Jacobson (1993) com três níveis. O comprimento total da fila é subdividido em três faixas de igual comprimento. Cada faixa é associada uma tupla (min_{th}, max_{th}, p) correspondente a uma cor. A faixa com maior probabilidade de descarte é associada ao vermelho, em seguida a faixa intermediária a cor amarela e a última e com menor probabilidade de descarte ao verde. Ou seja, em caso de

congestionamento, primeiro serão descartados os pacotes vermelhos, seguidos pelos amarelos e por último os verdes.

Os pacotes foram previamente coloridos, cujos pacotes são mapeados para o respectivo DSCP como: AF_{10} =verde, AF_{12} =amarelo e AF_{12} =vermelho. O tamanho da fila nos roteadores foi estabelecido como tendo 5 pacotes, e que serviu com valor para a variável δ_{RED} para o gerenciamento ativo de filas implementado com um RED3. Nesse caso foi criada uma única fila real e nela três filas virtuais atreladas as prioridades de descarte. Os valores para o RED3 foram estabelecidos como: $(0.2*\delta_{RED}, 0.4*\delta_{RED}, 0.1)$, $(0.4 * \delta_{RED}, 0.6 * \delta_{RED}, 0.25)$, $(0.6 * \delta_{RED}, 0.8 * \delta_{RED}, 0.025)$ para as classes AF_{12} , AF_{11} e AF_{10} respectivamente. Inicialmente não foi estabelecida nenhuma política de condicionamento de tráfego, ou seja todos os pacotes mantem a sua prioridade previamente marcada quando adentram no interior da rede a serviços diferenciados e nenhum pacote é demovido ou promovido a outra prioridade.

A simulação se dá desde o inicio até fim da seqüência de vídeo, num tempo total de aproximadamente 3600 segundos.

A.2 Ajuste dois do RED

Os valores do RED implementando RIO-C são ajustados com as variáveis $\delta_{RED} = 50$ pacotes para o tamanho da fila em pacotes, utilizando um tamanho médio de pacote de 1500 bytes, o que implica em tamanho em bytes da fila é de 5 pacotes \times 1500 bytes = 7500 bytes. Os parâmetros do RED2 foram estabelecidos como: $(0.2 \times \delta_{RED}, 0.5 \times \delta_{RED}, P_l = 0.1)$, $(0.5 \times \delta_{RED}, 0.8 \times \delta_{RED}, P_h = 0.02)$.

Isso corresponde a duas filas com prioridade distintas: alta (mais baixa probabilidade de descarte de pacotes) e baixa (mais alta probabilidade de descarte de pacotes).

A.3 Ajuste três do RED

Os valores do RED implementando RIO-C são ajustados com as variáveis $\delta_{RED} = 50$ pacotes para o tamanho da fila em pacotes, utilizando um tamanho médio de pacote de 1500 bytes, o que implica em tamanho em bytes da fila é de 50 pacotes \times 1500 bytes. Os parâmetros do RED4 foram estabelecidos como: $(0.1 \times \delta_{RED}, 0.3 \times \delta_{RED}, P_1 = 0.025)$, $(0.3 \times \delta_{RED}, 0.5 \times \delta_{RED}, P_2 = 0.05)$, $(0.5 \times \delta_{RED}, 0.7 \times \delta_{RED}, P_3 = 0.075)$, $(0.7 \times \delta_{RED}, 0.9 \times \delta_{RED}, P_4 = 0.1)$.

Isso corresponde a quatro filas com prioridade distintas: P_1, P_2, P_3 e P_4 .

Referências Bibliográficas

- Ahmed, T., Buridant, G. and Mehaoua, A. (2001). Encapsulation and Marking of MPEG-4 Video over IP Differentiated Services Commentaire, *IEEE Symposium on Computers and Communications - ISCC2001*.
- Ahmed, T., Mehaoua, A. and Buridant, G. (2001). Implementing MPEG-4 Video On Demand Over IP Differentiated Services, *Globecom*.
- Alanesse, A. (1994). Priority Encoding Transmission, *Technical Report RT-94-039*, Department of Computer Science - UCLA.
- Baker, F. (1999). *Aggregation of RSVP for IPv4 and IPv6 Reservations*, Internet Draft.
- Baugartnet, F., Braun, T. and Habegger, P. (1998). *Differentiated Services: A New Approach for Quality of Service in the Internet*, 8th IFIP Conference on High Performance Networking - HPN'98.
- Blake, S., Black, D., Carlson, M., Davies, E., Wang, Z. and Weiss, W. (1998). An Architecture for Differentiated Services, Internet RFC 2475. <http://www.ietf.org/rfc/rfc2475.txt>.
- Braden, R., Clark, D. and Shenker, S. (1994). *Integrated Services in the Internet Architecture: an Overview*, Internet RFC. RFC 1633.
- Busse, I., Deffner, B. and Schulzrinne, H. (1996). Dynamic QoS control of multimedia applications based on RTP, **19**(1): 49–58.
- Callon, R. (1999). *A Framework for Multiprotocol Label Switching*, Internet Draft. Work in Progress.
- Cheung, S., Ammar, M. H. and Li, X. (1996). On the Use of Destination Set Grouping to Improve Fairness in Multicast Video Distribution, *IEEE INFOCOM'96*.

- Chiariglione, L. (1996). Short MPEG-1 description - Coding of moving pictures and associated audio for digital storage media at up to about 1,5 Mbits/s, Internet Article. <http://www.chiariglione.org/mpeg/standards/mpeg-1/mpeg-1.htm>.
- Chiariglione, L. (2000). Short MPEG-2 description - Generic coding of moving pictures and associated audio information, Internet Article. <http://www.chiariglione.org/mpeg/standards/mpeg-2/mpeg-2.htm>.
- Chung, J. and Claypool, M. (2002). Rate-Based Active Queue Management with Priority Classes for Better Video Transmission, *Proceedings of the Seventh IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC)*, Taormina/Giardini Naxos, Italy. <http://www.cs.wpi.edu/~claypool/papers/rb-rio/>.
- Clark, D. D. and Fang, W. (1998). Explicit Allocation of Best Effort Packet Delivery Service, *IEEE/ACM Transactions on Networking* **6**(4).
- Comes, S. (1995). *Les Traitements Perceptifs D'images numérisées*, PhD thesis, Université Catholique de Louvain.
- Costa, L. H. M. K. and Duarte, O. C. M. B. (1999). *A Scalable QoS-based Routing Mechanism for Supporting Multimedia Applications*, *IEEE ICMCS'99 - International Conference on Multimedia Computing and Systems*, Vol. 2, IEEE, pp. 347–351.
- Cotê, G., Erol, B., Gallant, M. and Kossentini, F. (1998). H.263+: Video Coding at Low Bit Rates, *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology* **8**(7): 849–866.
- Crawley, E., Nair, R., Rajagopalan, B. and Sandick, H. (1998). *A Framework for QoS-Based Routing*, Internet RFC. RFC 2386.
- Côté, G., Erol, B., Gallant, M. and Kossentini, F. (1999). Using RFC2429 and H.263+ at low to medium bit-rates for low-latency applications, *Packet Video Workshop '99*.
- da S. Gonçalves, P. A., de Rezende, J. F., Duarte, O. C. and Pujolle, G. (2000). Improving Layered Video Multicast using Active Networks, Internet Article. <http://www.gta.ufrj.br/ftp/gta/TechReports/GRD00b.ps.gz>.
- DARPA and NFS (2004). The Network Simulator - ns (version 2). <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>.
- Davie, B., Charny, A., Bennett, J., Benson, K., Boudec, J. L., Courtney, W., Davari, S., Firoiu, V. and Stiliadis, D. (2002). An Expedited Forwarding PHB (Per-Hop Behavior), Internet RFC 3246. <http://www.ietf.org/rfc/rfc3246.txt>.

- de Ridder, H., Blommaert, F. J. and Fedorovskaya, E. A. (1995). Naturalness and Image Quality: Chroma and hue variation in color images of natural scenes, *SPIE Human Vision, Visual Processing and Digital Display*, Vol. 2411, San Jose, CA.
- Dovrolis, C., Stiliadis, D. and Ramanathan, P. (1999). Proportional Differentiated Services: Delay Differentiation and Packet Scheduling, *SIGCOMM'99* pp. 109–120.
- Eskicioglu, A. M. and Fisher, P. S. (1995). Image quality measures and their performance, *IEEE Transactions on Communications* .
- Fedorovskaya, E. A., de Ridder, H. and Blommaert, F. J. (1997). Chroma Variations and Perceived Quality of Color Images of Natural Scenes, *Color Research and Application*.
- Fitzek, F. H. and Reisslein, M. (2004). *MPEG-4 and H.263 Video Traces for Network Performance Evaluation*, <http://www-tkn.ee.tu-berlin.de/research/trace/trace.html>. O referido sítio foi verificado como estando ativo até 21 de fevereiro de 2004.
- Floyd, S. and Jacobson, V. (1993). Random Early Detection gateways for Congestion Avoidance, *IEEE/ACM Transactions on Networking* **1**(4): 397–413.
- Frossard, P. and Versheure, O. (2001). Joint Source/FEC Rate Selection for Quality-Optimal MPEG-2 Video Delivery, *IEEE Transactions on Image Processing* **10**(12): 1815.
- Gall, D. L. (1992). The MPEG Video Compression Algorithm, *Signal Processing: Image Communication*.
- Heinanen, J., Baker, F., Weiss, W. and Wroclawski, J. (1999). Assured Forwarding PHB Group, Internet RFC 2597. <http://www.ietf.org/rfc/rfc2597.txt>.
- Hemy, M., Hengartner, U., Steenkiste, P. and Gross, T. (1999). MPEG System Streams in Best-Effort Networks, *Proc. Packet video Workshop'99*.
- Hoffman, D., Fernando, G., Goyal, V. and Civanlar, M. (1998). RTP Payload Format for MPEG1/MPEG2 Video, Internet RFC 2250. <http://www.ietf.org/rfc/rfc2250.txt>.
- ISO/IEC/MPEG-2/13818-2 (2000). ISO/IEC 13818-2:2000 Information technology – Generic coding of moving pictures and associated audio information: Video. <http://www.iso.ch/cate/d31539.html>.
- ITU (2000). Recommendation BT.500.10, Methodology for the subjective assessment of the quality of television pictures.

- ITU-T/H.261 (1990). Recommendation H.261 : Video codec for audiovisual services at $p \leq 64$ kbits/s, White Book.
- ITU-T/H.263 (1996). Recommendation H.263, Video Coding for Low Bitrate Communication, ITU-T Recommendation H.263.
- ITU-T/H.263+ (1997). Recommendation H.263, Video Coding for Low Bitrate Communication, Draft ITU-T Recommendation H.263 Version 2.
- J.L.Mitchell, W.B.Pennebaker, C.E.Fogg and D.J.LeGall (1997). MPEG Video Compression Standard, *Digital Multimedia Standards Series*, Chapman and Hall.
- Johanson, M. (2003). Adaptive forward error correction for real-time internet video, *Packet Video 2003*.
- Kikuchi, Y., Nomura, T., Fukunaga, S., Matsui, Y. and Kimata, H. (2000). RTP Payload Format for MPEG-4 Audio/Visual Streams, Internet RFC 3016. <http://www.ietf.org/rfc/rfc3016.txt>.
- Koenen, R. (2002). Overview of the MPEG-4 Standard, ISO/IEC 14496, Internet Article. <http://www.chiariglione.org/mpeg/standards/mpeg-4/mpeg-4.htm>.
- Koliver, C., Farines, J.-M., Fraga, J. S. and dos Reis, H. L. (2000). Um modelo para Adaptação de QoS Orientado ao Usuário Final, *Anais 2000 do 18 Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores*, pp. 135–149.
- Lambrecht, C. J. V. D. B. (1996). A Working Spatio-temporal Model of the Human Visual System for Image Restoration and Quality Assessment Applications, *Proceedings of the International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*.
- Leicher, C. (1994). Hierarchical Encoding of MPEG Sequences Using Priority Encoding Transmission (PET), *Technical Report TR-94-058*, The International Computer Science Institute Berkeley, Berkeley, CA. <http://citeseer.nj.nec.com/leicher94hierarchical.html>.
- Leite, C. A. B. B. and Farines, J. M. (2004). Combining Proactive Techniques for Improving QoS in Digital Video Transmission, Submetido a revista Computer Communications da Editora Elsevier em 11/12/2004. <http://www.dee.ufma.br/~cbrandao/download/tese/article2004-elsevier-CC.pdf>.
- Liu, H., Ma, H., Zarki, M. E. and Gupta, S. (1997). Error Control Schemes for Networks: An Overview, *Mobile Networks and Applications 2*, p. 167 a 182.

- Magalhães, J. M. H. and Guardieiro, P. R. (2001). Avaliação de um ambiente de serviços diferenciados com tráfego de vídeo mpeg-4, *Anais do IX Simpósio Brasileiro de Telecomunicações*.
- Makkar, R., Lambadaris, I., Salim, J. H., Seddigh, N., Nandy, B. and Babiartz, J. (2000). *Empirical Study of Buffer Management Scheme for DiffServ Assured Forwarding PHB*, *IEEE ICCCN2000 - International Conference on Computer Communications and Networks*.
- Martins, R. F., Leite, C. A. B. B. and Farines, J.-M. (2003). Towards Quality Evaluation and Improvement of a MPEG Video Stream, *The 3rd IEEE Latin American Network Operations and Management Symposium Proceedings*, UFPR and UNIOESTE, Iguassu Falls, Brazil, pp. 175–182.
- McCanne, S. and Jacobson, V. (1996). *Receiver-Driven Layered Multicast*, *ACM SIGCOMM'96*.
- Meempat, G. and Kan, L. (1998). *A QoS Engineering Architecture for the Next-Generation-Internet*, *IEEE International Conference on Computer Communications and Network*, IEEE.
- Metz, C. (1999). *RSVP - General-Purpose Signaling for IP*, *IEEE Internet Computing*.
- Moy, J. (1998). *OSPF Version 2*, Internet RFC. RFC 2178.
- Nichols, K., Jacobson, V. and Zhang, L. (1997). A Two-bit Differentiated Services Architecture for the Internet. <http://citeseer.nj.nec.com/nichols97twobit.html>.
- Pearson, D. E. (1998). Viewer Response to Time-Varying Video Quality, in B. E. Rogowitz and T. N. Pappas (eds), *SPIE Human Vision and Electronic Imaging*, Bellingham, WA, pp. 16–25.
- Postel, J. (1981). Service Mappings, Internet RFC 0795. <http://www.ietf.org/rfc/rfc0795.txt>.
- Reyes, G., Reibman, A. and Chang, S. F. (1999). A Corruption Model for Motion Compensated Video Subject to Bit Errors, *Proc. Packet video Workshop'99*.
- Rosen, E. C., Viswanathan, A. and Callon, R. (1999). *Multiprotocol Label Switching Architecture*, Internet Draft. Work in Progress.
- Sander, V. and Fidler, M. (n.d.). Evaluation of a Differentiated Services based Implementation of a Premium and an Olympic Service. <http://citeseer.nj.nec.com/sander02evaluation.html>.

- Sayood, K. (2000). *Introduction to Data Compression*, 2nd edition (february 28, 2000) edn, Morgan Kaufmann.
- Schimidt, A. L. P. and Leão, R. M. M. (2000). Análise de Qualidade de Qerwiço na Internet usando Reserva de Recursos, *Anais do SBT - Simpósio Brasileiro de Telecomunicações, Gramado*.
- Schulzrinne, H., Casner, S., Frederick, R. and Jacobson, V. (1996). RTP: A Transport Protocol for Real-Time Applications, Internet RFC 1889.
- Shenker, S. and Wroclawski, J. (1997). *General Characterization Parameters for Integrated Service Network Elements*, Internet RFC. RFC 2215.
- Shin, J., Kim, J. and Kuo, C. C. J. (2000). Content-Based Packet Video Forwarding Mechanism in Differentiated Service Networks. Sardinia, Italy.
- Shooman, M. L. and Associates, M. L. S. . (2002). *Reliability of Computer Systems and Networks: Fault Tolerance, Analysis, and Design*, JOHN WILEY & SONS, INC.
- Stoica, I. and Zhang, H. (1999). *Providing Guaranteed Services Without Per Flow Management*, *ACM Sigcomm'99*, ACM.
- Storn, R. (1995). Modeling and Optimization of PET-Redundancy Assignment for MPEG Sequences, *Technical report*, International Computer Science Institute, Berkeley University.
- Teitelbaum, B. (1999). QBone Architecture (v1.0), Internet Draft. <http://qos.internet2.edu/wg/documents-informational/draft-i2-qbone-arch-1.0/>.
- Tobagi, F., Noureddine, W., Karam, M., Markopoulou, A., Fraleigh, C., Pulido, J. M., Kimura, J. I. and Chen, B. (2001). Service Differentiation in the Internet to support Multimedia Traffic, *IWDC '01 Proc*.
- Turletti, T. and Huitema, C. (1996). RTP Payload Format for H.261 Video Streams, Internet RFC 2032. <http://www.ietf.org/rfc/rfc2032.txt>.
- Villamizaar, C. and Li, T. (1998). *IS-IS Optimized Multipah (IS-IS OMP)*, Internet Draft. Work in Progress.
- Wenger, S., Knorr, G., Ott, J. and Kossentini, F. (1998). *Error Resilience Support in H.263+*, *IEEE Transaction on Circuit and Systems for Video Technology* **8**(7).
- Western, S., Lagendijk, K. L. and Biemond, J. (1995). Perceptual Image Quality based on a Multiple Channel HVS Model, *ICASSP*, pp. 2351–2354.
- Winkler, S. (2000). *VISION MODELS AND QUALITY METRICS FOR IMAGE PROCESSING APPLICATIONS*, PhD thesis, École Polytechnique Fédérale de Lausanne.

- Wolfinger, B. E. (1997a). Efficiency of PET and MPEG Encoding for Video Streams: Analytical QoS Evaluations, *Technical Report TR-97-015*, International Computer Science Institute - Berkeley University, Berkeley, CA. <http://www.icsi.berkeley.edu/ftp/global/pub/techreports/1997/tr-97-015.pdf>.
- Wolfinger, B. E. (1997b). On the Potential of FEC Algorithms in Building Fault-Tolerant Distributed Applications to Support High QoS Video Communications, *Proceedings of the sixteenth annual ACM symposium on Principles of distributed computing*, ACM Press, pp. 129–138.
- Wroclawski, J. (1997). *Specification of the Controlled-Load Network Element Service*, Internet RFC. RFC 2211.
- Xiao, X. and Ni, L. M. (1999). *Internet QoS: the Big Picture*, *IEEE Network*.
- Xu, Y. and Zhang, T. (2000). An Adaptive Redundancy Technique for Wireless Indoor Multicasting, *Proceedings of the ISCC'2000*, Antibes-Juan les Pins, France.
- Zhang, L., et al and et al (1993). RSVP: A New Reservation Setup Protocol, *IEEE Network*.
- Zhang, T., Jennehag, U. and Xu, Y. (2000). Numerical Modeling of Transmission Errors and Video Quality of MPEG-2, *Proceedings of the 10th International Packet Video Workshop*.
- Zhang, T. and Xu, Y. (1999). Unequal Packet Loss Protection for Layered Video Transmission, *IEEE Transaction on Broadcasting*, **42**(2).
- Zhu, C. (1997). RTP Payload Format for H.263 Video Streams, Internet RFC 2190. <http://www.ietf.org/rfc/rfc2190.txt>.
- Ziviani, A., Rezende, J. F., Duarte, O. C. M. B. and Fdida, S. (2001). Vídeo MPEG sobre Serviços Diferenciados, *Anais do IX Simpósio Brasileiro de Telecomunicações*.
- Ziviani, A., Rezende, J. F., Duarte, O. C. M. B. and Fdida, S. (2002). Improving the Delivery Quality of MPEG Video Streams by Using Differentiated Services, *Proc. of the 10th European Conference on Multiservice Networks — ECUMN'2002*, pp. 107–115. <http://citeseer.nj.nec.com/ziviani02improving.html>.
- Ziviani, A., Wolfinger, B. E., Rezende, J. F., Duarte, O. C. M. B. and Fdida, S. (2002a). Joint Adoption of QoS Schemes for MPEG Streams, *Multimedia Tools and Applications*.
- Ziviani, A., Wolfinger, B. E., Rezende, J. F., Duarte, O. C. M. B. and Fdida, S. (2002b). On the Combined Adoption of QoS Schemes to Improve the Delivery Quality of MPEG Video Streams, *Intern. Symp. on Performance Evaluation of Computer and Telecommunications Systems - SPECTS'2002*.