

# O Protocolo “Polyharmonic Broadcasting” Sujeito a Restrições de Banda Passante

Rogério M. Zafalão, Nelson L. S. da Fonseca, Cid C. de Souza

<sup>1</sup>Instituto de Computação - Universidade Estadual de Campinas  
Caixa Postal 6176 - 13083-970 Campinas, SP  
{rzafalao,nfonseca,cid}@ic.unicamp.br

**Abstract.** *Periodic broadcasting is considered “the” technique that can provide scalability to reduce the cost of Video-on-Demand (VoD) services. This paper introduces a new periodic broadcasting protocol which minimizes the waste of bandwidth when clients have bandwidth restrictions.*

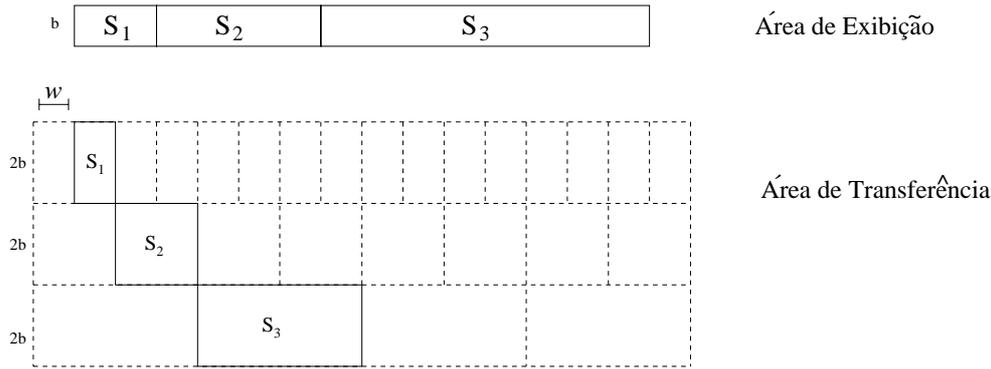
**Resumo.** *A difusão periódica de vídeos é considerada atualmente a técnica que provê a escalabilidade necessária para a diminuição dos custos das aplicações de Vídeo sob Demanda com o potencial de tornar esta aplicação atrativa comercialmente. O presente artigo introduz um novo protocolo de difusão periódica que minimiza a quantidade de banda passante desperdiçada no servidor quando clientes possuem restrições de banda passante.*

## 1. Introdução

Vídeo sob Demanda (*Video on demand*, ou VoD) permite a seleção de vídeos para exibição dentre uma coleção de vídeos armazenada em servidores. Fluxos de vídeo são transmitidos através de redes de comunicação aos *set-top-boxes*, aparelhos situados junto aos clientes e responsáveis pela recepção, armazenamento, codificação e exibição dos vídeos. A transmissão *unicast* limita severamente o número de clientes passíveis de atendimento. Sendo assim, protocolos de distribuição de vídeo via difusão (*broadcast*) e via difusão seletiva (*multicast*) vem sendo propostos [8, 1, 3, 5, 4, 6], de modo a promover um maior compartilhamento de fluxos de vídeo, aumentando a capacidade de aceitação de pedidos de exibição do sistema.

Em difusão periódica de vídeo, divide-se o vídeo em diversos segmentos, que são transmitidos periodicamente em canais lógicos alocados para a transmissão destes segmentos. Ao solicitar um vídeo, o usuário começa a receber simultaneamente segmentos de diversos canais transmitidos pelo servidor. Os segmentos podem ser exibidos de imediato ou armazenados para exibição posterior. Embora essa abordagem exija um tempo mínimo de espera para que os clientes possam assistir ao vídeo, tem-se a grande vantagem de utilizar uma largura de banda constante para cada vídeo independente do número de usuários, o que garante maior escalabilidade e maior eficiência, em especial sob altas taxas de requisição.

Dentre os protocolos de difusão periódica, o Protocolo de Difusão Poliharmônica (*Polyharmonic Broadcasting*) é o único que possui a característica de ser otimamente estruturado, o que implica em um desperdício mínimo de banda passante pelo servidor. No



**Figura 1: Mapa largura de banda-temporal do Protocolo de Difusão Piramidal para  $\alpha = 2$**

entanto, os protocolos de difusão periódica propostos até então assumem, em geral, a disponibilidade de um número ilimitado de canais. Entretanto, em muitos cenários reais, os clientes possuem uma largura de banda limitada, inferior ao número de canais demandados por estes protocolos, o que inviabiliza a utilização dos mesmos mediante estas limitações. O objetivo do presente trabalho é introduzir uma nova versão do Protocolo de Difusão Poliharmônica, a fim de que se possa operar sob limitação de banda passante no cliente, bem como se possa manter as características de otimalidade na utilização de banda passante. Para tal, redefine-se a segmentação do vídeo, via um problema de otimização não linear e inteiro, de forma a minimizar o desperdício de banda passante do servidor.

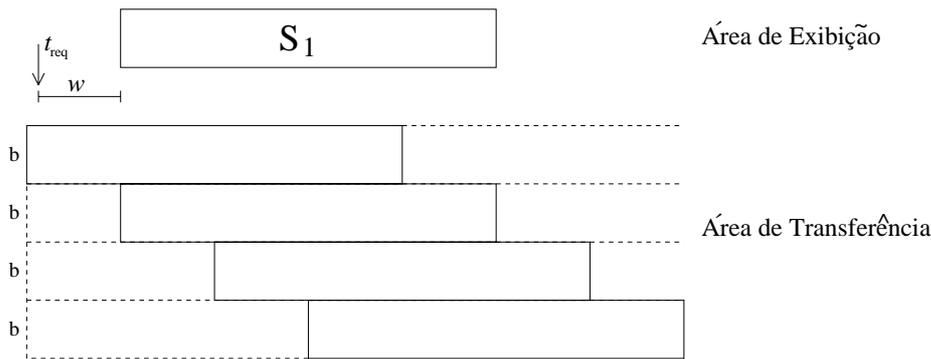
As seções restantes estão organizadas da seguinte forma: na Seção 2, são apresentados alguns protocolos de difusão periódica. Na Seção 3, os protocolos LPHB (*Limited Polyharmonic Broadcasting, ou Protocolo de Difusão Poliharmônica Limitada*) e sua extensão, o ELPHB (*Extended Limited Polyharmonic Broadcasting, ou Protocolo de Difusão Poliharmônica Limitada Estendido*) são apresentados. A Seção 4 apresenta os resultados numéricos, e finalmente, na Seção 5, as conclusões são apresentadas.

## 2. Protocolos de Difusão Periódica

Protocolos de difusão periódica difundem continuamente e periodicamente os segmentos de um vídeo. Na maioria dos protocolos, estes segmentos são transmitidos em canais lógicos exclusivos. Quando o cliente faz a solicitação de um vídeo, passa a seguir um calendário de recebimento dos segmentos, podendo obtê-los de vários canais simultaneamente. Estes segmentos são posteriormente exibidos na ordem original pela *set-top-box* do cliente.

Os protocolos do tipo difusão periódica podem ser representados por uma abstração denominada mapa de largura de banda-temporal [2], que é composto de duas partes (Figura 1). A parte superior do mapa, denominado área de exibição (*playout area*), indica o momento da exibição de cada segmento pela *set-top-box* do usuário.

A parte inferior do mapa, denominada área de transferência (*broadcasting area*), representa os canais lógicos transmitidos pelo servidor através do tempo. O eixo  $x$  representa o tempo, e o eixo  $y$  a largura de banda utilizada pelo servidor. As barras horizontais sobrepostas correspondem aos canais lógicos alocados pelo servidor e alturas indicam a largura de banda alocada a cada canal. As barras com contorno sólido indicam o momento



**Figura 2: Mapa largura do protocolo de Difusão Balanceada**

do início da recepção do segmento pelo cliente. Na Figura 1, todos os canais alocados possuem a mesma largura de banda  $2b$ .

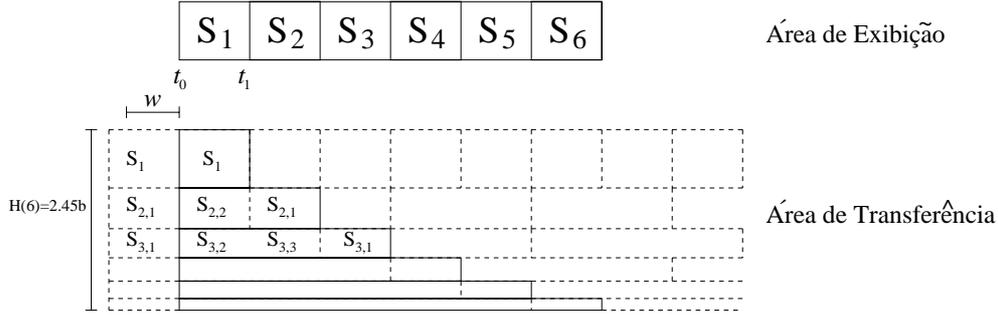
Um dos primeiros protocolos propostos foi o de Difusão Balanceada (*Staggered Broadcasting*). O protocolo (Figura 2) utiliza  $K$  canais com a mesma largura de banda da taxa de consumo do vídeo, isto é, a taxa em Mbps na qual o vídeo é exibido, doravante denotada por  $b$ . Cada canal  $K_i$  transmite todo o vídeo contínua e periodicamente, com um atraso de  $\frac{iS}{K}$  unidades de tempo em relação ao canal anterior. Como o cliente pode, no pior caso, acessar os canais um instante após o início de uma transmissão, o cliente pode ser obrigado a esperar até  $\frac{S}{K}$  unidades de tempo para iniciar sua exibição. A fim de se reduzir o tempo de espera do usuário, novos protocolos de difusão periódica foram propostos. Nestes, os vídeos são divididos em vários segmentos e transmitidos em canais lógicos exclusivos para transmissão destes segmentos.

O Protocolo de Difusão Piramidal (*Pyramid Broadcasting*, ou PB) [8] divide o vídeo em segmentos de tamanhos geometricamente crescentes com um fator  $\alpha$  — ou seja, a proporção do tamanho dos segmentos segue o padrão  $[1, \alpha, \alpha^2, \alpha^3, \dots]$ . Neste protocolo (Figura 1), segmentos recebidos pelo *set-top-box* são armazenados para exibição após o segmento exibido em um certo instante. A grande desvantagem deste protocolo é o elevado requisito de armazenamento (da ordem de 70% do vídeo) e de largura de banda do cliente. O Protocolo de Difusão Piramidal Baseado em Permutações [1] (*Permutation-based Pyramid Broadcasting*, ou PPB) tenta reduzir a alta demanda de armazenamento e largura de banda imposta ao cliente. Ao invés de transmitir um segmento em um canal com grande largura de banda, multiplexa cada canal em  $P$  subcanais e os transmite a uma taxa  $P$  vezes menor. Estes  $P$  subcanais são balanceados para satisfazer as mesmas restrições de tempo que o PB.

O protocolo de Difusão Rápida (*Fast Broadcasting*) [5], por sua vez, divide o vídeo em segmentos cujos tamanhos seguem a série  $[1, 2, 2^2, \dots, 2^{N-1}, 2^N]$ .

Um protocolo interessante sob o ponto de vista do cliente é o Protocolo de Difusão Arranha-céu (*Skyscraper Broadcasting*) [3] (SB), pois requer somente dois canais simultâneos devido à série  $[1, 1, 2, 2, 5, 5, 12, 12, 25, 25, 52, 52, \dots]$ , que dá origem ao tamanho de seus segmentos.

O Protocolo de Difusão Harmônica (*Harmonic Broadcasting* ou HB) [4] segue um padrão que difere dos anteriormente descritos. O vídeo é dividido em  $n$  segmentos



**Figura 3: Mapa largura de banda-temporal do Protocolo de Difusão Harmônica**

de tamanho igual, e a transmissão é realizada em canais lógicos de largura de banda decrescente, seguindo uma série harmônica. Cada segmento  $S_i$  é transmitido em um canal exclusivo a uma largura de banda igual a  $\frac{b}{i}$ . O cliente espera a ocorrência do início da transmissão do primeiro segmento e posteriormente recebe todos os segmentos ao mesmo tempo, requerendo uma largura de banda ( $L$ ) proporcional à série harmônica:

$$L_{HB(n)} = \sum_{i=1}^n \frac{b}{i} = bH(n) \quad (1)$$

onde  $H(n)$  é o número harmônico de  $n$ .

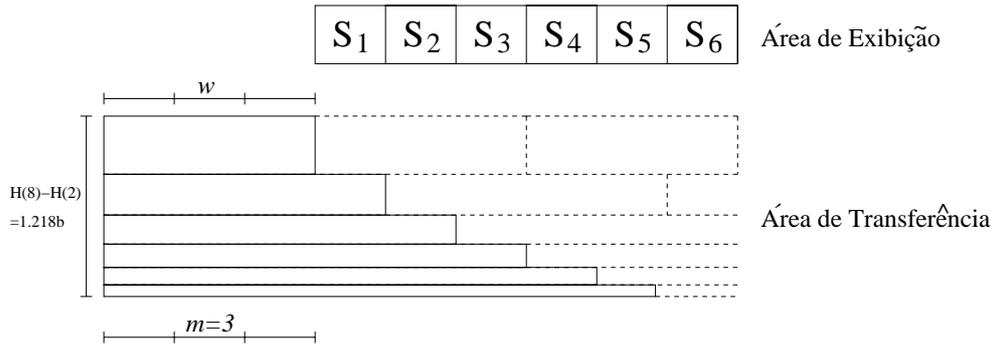
O protocolo HB possui a grande desvantagem de potencialmente não conseguir entregar segmentos no momento próprio em todas ocasiões, ou seja, não consegue entregar ao usuário os segmentos de acordo com o calendário de recepção do usuário. Na Figura 3, pode-se perceber que após o tempo de espera  $w$ , a recepção inicia-se em  $t_0$ , e em  $t_1$  a primeira parte do segmento  $S_2$  ainda não foi recuperada para exibição. Assim sendo, a solução é esperar pelo menos mais um *slot* de tempo antes de iniciar a exibição do vídeo. Um *slot* é definido como o tempo necessário para a transmissão do segmento inicial. No HB, cada segmento  $S_i$  leva  $i$  *slots* de tempo para ser transmitido.

O protocolo de Difusão Poliharmônica (*Polyharmonic Broadcasting*, ou PHB) [6] foi concebido na tentativa de resolver o problema do tempo de entrega de segmentos indevido e ao mesmo tempo reduzir a largura de banda utilizada em relação ao seu antecessor. O PHB (Figura 4) também divide o vídeo em  $n$  segmentos e os valores de largura de banda seguem uma série harmônica, iniciando com o valor  $\frac{b}{m}$ , onde  $m$  é um parâmetro de ajuste que permite um tempo de espera fixo igual a  $m$  slots.

### 3. Protocolos de Difusão Periódica Sujeitos a Limitação de Banda Passante

Os protocolos descritos anteriormente não consideram possíveis limitações de recursos existentes na rede, o que os torna irrealista em um contexto de redes de acesso com limitação de banda passante.

Em [7], foi investigado o impacto da limitação da largura de banda do cliente no desempenho da utilização de largura de banda do servidor, considerando os protocolos de Difusão Rápida e Difusão Pagoda (*Pagoda Broadcasting*), baseados em uma heurística



**Figura 4: Mapa do protocolo de Difusão Poliharmônica para  $m=3$  (fora de escala em  $y$ )**

sem preocupação de otimização da banda passante do servidor. Esta seção introduz protocolos baseados no PHB que operam sob limitação de banda no cliente.

No presente trabalho, a restrição de armazenamento do cliente não será levada em consideração, pois o avanço tecnológico nesta área indica um aumento da capacidade de armazenamento a custos cada vez menores.

### 3.1. O Protocolo de Difusão Poliharmônica Limitada

Para utilizar a largura de banda do servidor de forma mais eficiente possível, os protocolos devem seguir três regras básicas [2]: 1) não repetir segmentos em um mesmo canal durante uma transmissão; 2) não receber dados redundantes; e 3) entregar todos os segmentos em tempo. Protocolos de difusão periódica que seguem estas regras são denominados otimamente estruturados (*optimally-structured*), por minimizar o desperdício dos canais do servidor. Dentre todos os protocolos citados anteriormente, o único protocolo otimamente estruturado é o PHB.

Pretende-se, portanto, estudar o protocolo PHB sob limitação de banda passante no cliente a fim de se obter um protocolo mais próximo de um otimamente estruturado, minimizando, assim, a quantidade de banda desperdiçada durante a transmissão dos fluxos de vídeo, ou seja, o tempo que os canais ficam ociosos para efetivar uma transmissão. Como parâmetros do problema, foram considerados o tempo máximo de espera ( $w$ ) ao qual os clientes podem ser submetidos, e um parâmetro  $k$  correspondente à razão entre a largura de banda do cliente e a largura de banda utilizada para a exibição contínua do vídeo.

Utilizando o mapa largura de banda-temporal do PHB pode se derivar a função objetivo para minimizar o desperdício de banda passante (Figura 4), bem como as restrições do problema através da observação das áreas desejadas no mapa.

O problema de otimização associado ao PHB com restrições, denominado doravante Protocolo de Difusão Poliharmônica Limitada (*Limited Polyharmonic Broadcasting*, ou LPHB), é dado por:

$$\min Sb \left[ \frac{m+n-1}{n} (H(m+n-1) - H(m-1)) - 1 \right]$$

s.a.

$$\begin{cases} H(m+n-1) - H(m-1) \leq k \\ m \frac{S}{w} \leq n \leq n_{max} \\ 1 \leq m \leq m_{max} \end{cases}$$

onde  $m$  e  $n$  são os mesmos parâmetros utilizados no PHB, respectivamente, o termo inicial da série harmônica e o número de segmentos ao qual o vídeo é submetido.  $m_{max}$  e  $n_{max}$  definem o valor máximo destas duas variáveis. No presente trabalho, utilizamos  $m_{max} = 80$ .  $n_{max}$  define a granularidade da segmentação, acarretando em um compromisso entre desempenho e computabilidade. Se por um lado, uma segmentação menor traz um desempenho mais baixo, por outro lado uma grande segmentação traz uma complexidade computacional maior no gerenciamento destes segmentos.

A função objetiva corresponde à minimização da diferença entre a área total do mapa no período da transmissão de um vídeo e a área correspondente aos canais efetivamente utilizados nesta transmissão. A área total do mapa pode ser obtida através da soma das áreas correspondentes dos canais alocados. Considerando  $n$  barras, cada uma correspondendo a um canal, cuja altura é dada por  $bi$ , onde  $i$  segue a série harmônica e varia de  $m$  a  $n+m-1$ , e cujo comprimento é constante e dado por  $(m+n-1)$  slots de comprimento  $\frac{S}{n}$ , tem-se, então:

$$\begin{aligned} A_{tot} &= \sum_{i=m}^{m+n-1} \left( \frac{b}{i} (m+n-1) \frac{S}{n} \right) \\ &= Sb \frac{m+n-1}{n} \sum_{i=m}^{m+n-1} \frac{1}{i} \\ &= Sb \frac{m+n-1}{n} [H(m+n-1) - H(m-1)], \end{aligned} \quad (2)$$

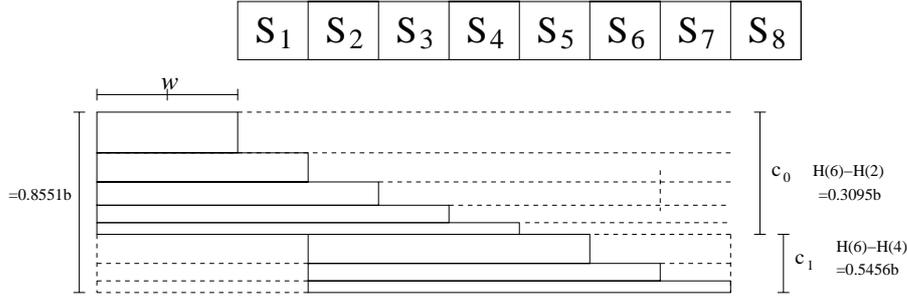
onde  $H(n)$  é o número harmônico de  $n$ .

A área útil, onde efetivamente é realizada a recepção dos dados, consiste para cada linha  $i$  do mapa,  $i$  slots:

$$A_{ut} = \sum_{i=m}^{m+n-1} \left( i \frac{Sb}{n i} \right) = Sb \quad (3)$$

A função objetivo é então dada por  $A_{tot} - A_{ut}$ :

$$F_{obj} = Sb \left[ \frac{n+m-1}{n} (H(n+m-1) - H(m-1)) - 1 \right] \quad (4)$$



**Figura 5: Mapa do ELPHB (fora de escala em  $y$ ) para  $d = 1$**

Dado que  $Sb$  é um termo multiplicativo, pode-se desprezar o termo na função objetiva. Tem-se, então, a função simplificada  $R$ , dependente somente de  $m$  e  $n$  e dada por:

$$R = \frac{m + n - 1}{n} [H(m + n - 1) - H(m - 1)] - 1 \quad (5)$$

A restrição (6) é o ponto central do LPHB. Ela representa a indicação da largura de banda máxima permitida a um cliente durante a recepção de um vídeo. Esta banda passante é denotada por  $kb$ , onde  $k$  é o múltiplo do número de canais em relação à taxa de consumo  $b$ . No PHB, o momento no qual a largura de banda exigida é máxima ocorre durante os primeiros  $m$  slots de tempo, quando o cliente recupera todos os  $n$  segmentos simultaneamente. Sendo  $\frac{b}{i}$  a largura de banda de cada  $i$ -ésimo canal, obtém-se, então, a seguinte restrição:

$$b(H(m + n - 1) - H(m - 1)) \leq bk$$

ou, simplificando,

$$H(m + n - 1) - H(m - 1) \leq k \quad (6)$$

Note que o cliente precisa esperar os primeiros  $m$  slots de tempo para poder armazenar inteiramente o primeiro segmento, e então iniciar a exibição do vídeo. Tendo cada slot duração de  $S/n$  segundos, e dado um limite  $w$  para o tempo de espera máximo, tem-se:

$$w \leq m \frac{S}{n},$$

rearranjando a expressão, tem-se

$$n \geq m \frac{S}{w} \quad (7)$$

### 3.2. O Protocolo de Difusão Poliharmônica Limitada Estendido

Nem sempre o LPHB obtém soluções viáveis dadas as restrições  $w$  e  $k$  do problema, uma vez que as mesmas são arbitrárias e podem restringir o problema de tal forma que não haja segmentação factível.

Atrasos no calendário de recepção de alguns segmentos são introduzidos (Figura 5), de forma a se obter uma solução viável tal que o cliente receba no máximo uma quantidade de segmentos equivalente a sua disponibilidade de banda passante. Esta é a idéia

do Protocolo de Difusão Periódica Limitada Estendido (*Extended Limited Polyharmonic Broadcasting* - ELPHB), uma extensão do protocolo LPHB. O ELPHB acarreta em uma perda de eficiência na utilização de banda passante em relação ao LPHB, porém consegue satisfazer condições mais restritivas.

Define-se um conjunto de canais como sendo um grupo de canais do qual o cliente recebe simultaneamente segmentos destes canais. Na Figura 5, por exemplo, vê-se dois conjuntos de canais:  $c_0$ , que consiste nos cinco primeiros canais recebidos imediatamente após a requisição de exibição do cliente, e  $c_1$ , compreendendo os três últimos canais, cuja recepção só se inicia com três slots de tempo de atraso. Durante o quarto slot de tempo ocorre um período de transição no qual o cliente recebe segmentos de canais de conjuntos adjacentes, até o término da recepção de segmentos do conjunto anterior. Denota-se por  $d$  a *dimensão* do problema, ou seja, o número adicional de conjuntos de canais em relação ao conjunto  $c_0$  existente no LPHB. Um problema no ELPHB cuja dimensão seja zero é equivalente ao LPHB, uma vez que só há o conjunto de canais  $c_0$ . Apesar do protocolo LPHB ser um caso particular do protocolo ELPHB, o LPHB foi introduzido separadamente a fim de se imprimir uma maior legibilidade ao artigo.

A formulação do ELPHB é dada por:

$$\min Sb \left[ \frac{m_0+n-1}{n} \sum_{i=0}^d \left( H(m_i + n_i - 1) - H(m_i - 1) \right) - 1 \right]$$

s.a.

$$\left\{ \begin{array}{l} H(m_0 + n_0 - 1) - H(m_0 - 1) \leq k \\ H(m_{i-1} + n_{i-1} - 1) - H(m_{i-1} + n_{i-1} - m_i) + \\ H(m_i + n_i - 1) - H(m_i - 1) \leq k, \forall i \in 1..d \\ m_{i-1} + n_{i-1} - m_i \geq 0, \forall i \in 1..d \\ n = \sum_{i=0}^d n_i \\ m_0 \frac{s}{w} \leq n \leq n_{max} \\ 1 \leq m_i \leq m_{max} \\ 1 \leq n_i \leq n - d, \forall i \in 0..d \end{array} \right.$$

Cada conjunto de canais  $c_i$  possui seus próprios parâmetros  $m_i$  e  $n_i$ , cujos significados são os mesmos do LPHB. Assim,  $m_i$  corresponde ao termo inicial da série harmônica correspondente à largura de banda alocada ao primeiro canal de  $c_i$ , e  $n_i$  corresponde ao número de segmentos de  $c_i$ . A soma de cada valor  $n_i$  corresponde ao número

total de segmentos do vídeo. Tem-se, então, que:

$$n = \sum_{i=0}^d n_i \quad (8)$$

A restrição de tempo de espera do ELPHB (7) é obtida da mesma maneira que no modelo LPHB, observando que o cliente deve esperar somente durante os primeiros  $m_0$  slots de tempo.

$$w \leq m_0 \frac{S}{n_0 + n_1 + \dots + n_d},$$

ou, rearranjando:

$$n_0 + n_1 + \dots + n_d \geq m_0 \frac{S}{w} \quad (9)$$

A restrição

$$1 \leq n_i \leq n - d, \forall i \in 0..d \quad (10)$$

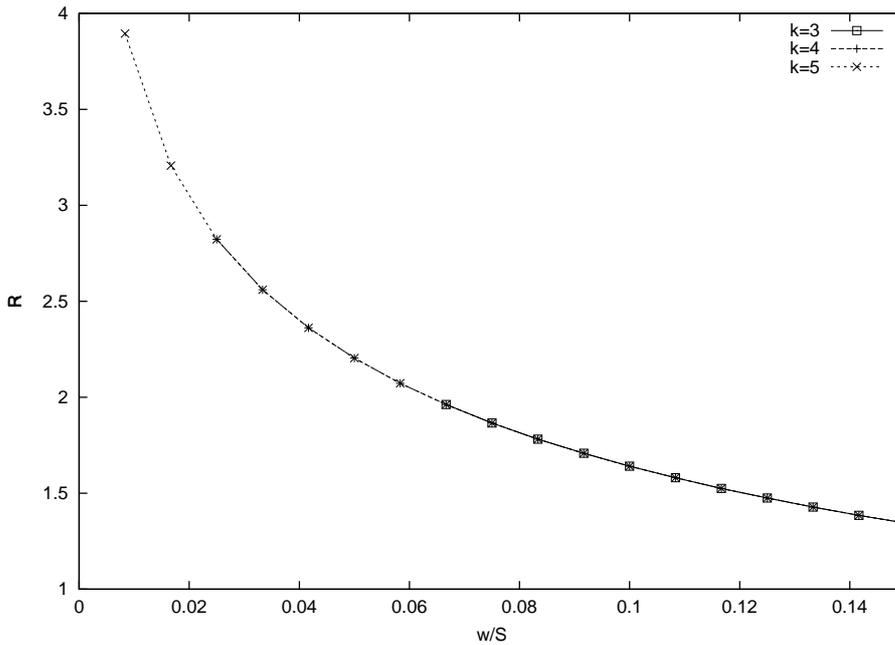
tem a finalidade de limitar o valor de cada uma das variáveis  $n_i$ ,  $0 \leq i \leq d$ .

#### 4. Exemplos Numéricos

Para se avaliar a efetividade do protocolo proposto, foram realizados estudos sobre o *trade-off* entre as limitações do lado do cliente, notadamente a largura de banda, o tempo de espera máximo ao qual o cliente é submetido, e a largura de banda necessária pelo servidor nos protocolos LPHB e ELPHB. Para tal fim, exemplos numéricos foram derivados.

Os problemas de otimização foram desenvolvidos em C e executados em ambiente Linux. Os problemas do LPHB e do ELPHB são problemas de otimização inteira e não-linear. Não existe algoritmo computacional para a solução específica destes problemas. Assim sendo, o problema de LPHB foi resolvido via avaliação de todas as possíveis soluções, e em ELPHB utilizou-se também algoritmos genéticos. Os parâmetros utilizados para os algoritmos genéticos foram: população de 2000 indivíduos, com taxas de cruzamento (*crossover*) e mutação iguais a 20% e 5%, respectivamente, durante 100 gerações. Como operadores genéticos, utilizou-se cruzamento em um ponto e mutação dos cromossomos, onde cada um desses corresponde aos valores de  $m_i$  ou  $n_i$ , onde  $i \leq d - 1$ . A fase de seleção dos indivíduos foi feita utilizando-se uma roleta com função de aptidão (*fitness*) igual a  $\frac{1}{R^2}$ . Também foi utilizada a reprodução seletiva, que garante que a melhor solução gerada até então sobreviva à próxima geração. O espaço de busca para a otimização da função de ELPHB torna-se muito grande, o que faz com que uma heurística que não faça avaliação de todas as possíveis soluções, como algoritmos genéticos, obtenha uma solução aproximada da ótima de forma muito mais rápida.

O tempo de execução de uma solução do LPHB é insignificativo, bem como o tempo de execução de algoritmos genéticos com  $d = 1$ . Para  $d = 2$  o tempo de espera



**Figura 6: LPHB: Valores ótimos de  $R$  em função de  $w/S$**

tornou-se inviável via avaliação de todas as possíveis soluções, e via algoritmos genéticos demorou entre cinco e dez minutos para gerar cada solução. A variação deste tempo se deve à fase inicial do algoritmo, durante a geração aleatória da população inicial.

Na Figura 6, mostra-se os valores ótimos de  $R$  em função da razão entre o tempo de espera e o tamanho total do vídeo,  $w/S$ . O gráfico mostra o limite de tempo de espera de acordo com o número de canais que o cliente possui. No caso do cliente possuir três canais ( $k = 3$ ), a fração  $w/S$  equivale a 0,067. Isto significa que, para um filme de duas horas de duração este cliente deverá esperar até oito minutos. Para  $k = 4$  e  $k = 5$ , o cliente deve esperar, respectivamente, três e um minuto. Pode-se observar ainda a sobreposição de todas as curvas, independentemente do número de canais do cliente. A diferença entre elas está no limite inferior  $w/S$  obtido. Para  $k = 4$ , este limite é de 0,021 e para  $k = 3$  é 0,067. Isto se deve ao fato do LPHB utilizar toda a largura de banda disponível, fazendo com que o cliente e o servidor necessitem ter os mesmos requisitos de largura de banda. Por exemplo, no primeiro ponto do gráfico onde  $w/S = 0,008$  e  $k = 5$ , a largura de banda demandada tanto pelo servidor quanto pelo cliente é equivalente a 4,9 canais. A restrição (7) do LPHB acaba por inviabilizar esta solução para clientes que possuam largura de banda inferior a este valor, o que evidencia o compromisso entre a largura de banda dos clientes e o tempo de espera necessário.

A Figura 7 mostra a influência da escolha de  $n_{max}$  para a resolução de ELPHB. Os gráficos mostram uma perda significativa de largura de banda e tempo de espera para uma segmentação pequena ( $n = 20$ ) em relação a uma segmentação grande ( $n = 1000$ ). Uma alternativa pode ser a utilização de uma segmentação intermediária que não requeira muita largura de banda adicional e ao mesmo tempo possua bons resultados em relação ao tempo de espera, como no caso de  $n = 100$ . Cabe salientar que uma segmentação excessiva poderia dificultar o processamento em servidores, acarretando um aumento de

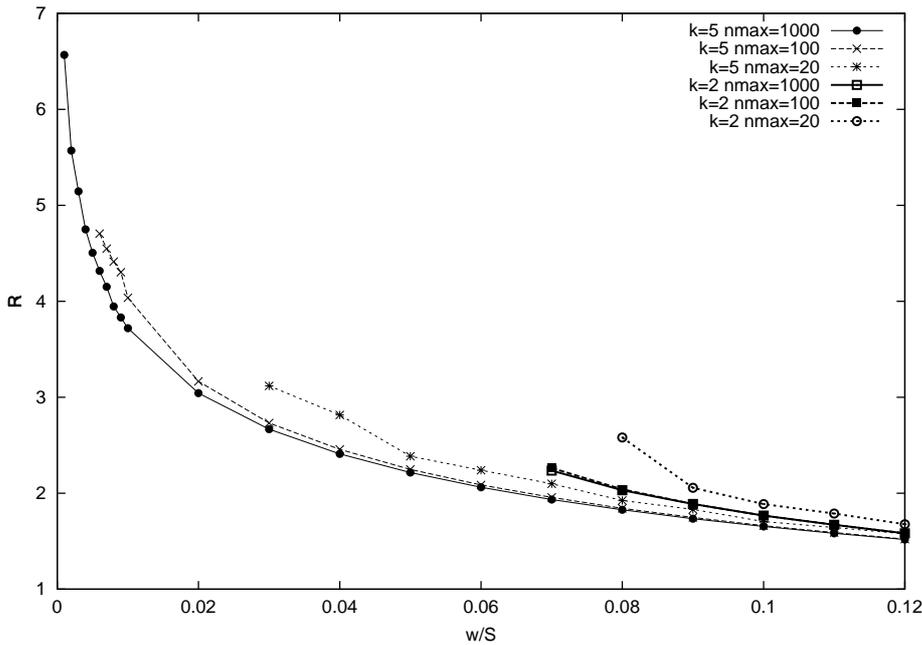


Figura 7: ELPHB: Estudo comparativo de  $n_{max}$

custos na infra-estrutura.

Na Figura 8, tem-se os valores de  $m$  (termo inicial da série harmônica que define a largura de banda do primeiro canal) quando  $R$  é ótimo, para os diferentes valores de tempo de espera  $w$ . Nota-se pelo gráfico uma tendência inicial no acompanhamento do valor de  $m$  à restrição (7) do LPHB, estabilizando-se então abaixo da linha de  $m_{max}$ . Realizando análise de sensibilidade dos parâmetros  $m$  e  $n$  sobre a função  $R$ , tem-se que valores de  $n$  além da restrição (7) podem ser desconsiderados, diminuindo o espaço das possíveis soluções e conseqüentemente diminuindo o tempo para se obter uma solução. Nota-se ainda neste gráfico a mesma sobreposição de curvas para os valores de  $k$  observados na Figura 6.

Pode se constatar na Figura 9 que para o ELPHB existe um pequeno ganho na utilização da largura de banda do servidor quando o cliente possui uma maior capacidade de largura de banda. Nota-se uma nítida vantagem em relação ao tempo de espera quando os clientes possuem uma largura de banda maior, além da diminuição do desperdício de banda ser menor. Clientes com largura de banda com  $k = 4$  e  $k = 5$ , isto é, com largura de banda 4 e 5 vezes maior que a taxa de exibição do vídeo, podem ser atendidos mesmo quando o tempo total do vídeo é superior a 200 vezes maior que o tempo de espera, o que significa em torno de 40 segundos de espera para um vídeo de duas horas. Em comparação com o LPHB (Figura 6), percebe-se um melhor tempo de espera em todos os casos. Para  $k = 5$ , consegue-se um tempo de espera equivalente a 0,001 do vídeo todo, enquanto que em LPHB o valor mínimo obtido foi de 0,008. Para estes casos onde se consegue um tempo de espera menor, deve-se ter com uma largura de banda adicional do lado do servidor. No ponto do gráfico onde  $w/S = 0,001$ , tem-se por exemplo uma utilização de 6,57 canais, porém, isto é verificado apenas em situações onde o LPHB não encontra soluções factíveis. Comparando as Figuras 6 e 9, não se nota uma diferença nítida na

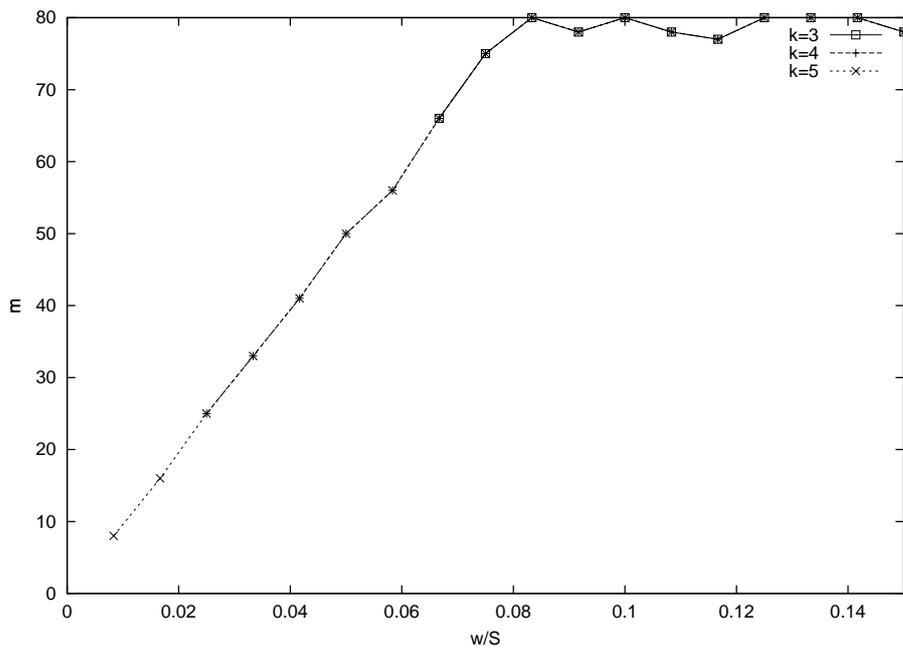


Figura 8: LPHB: Valores de  $m$  para valores de  $R$  ótimo

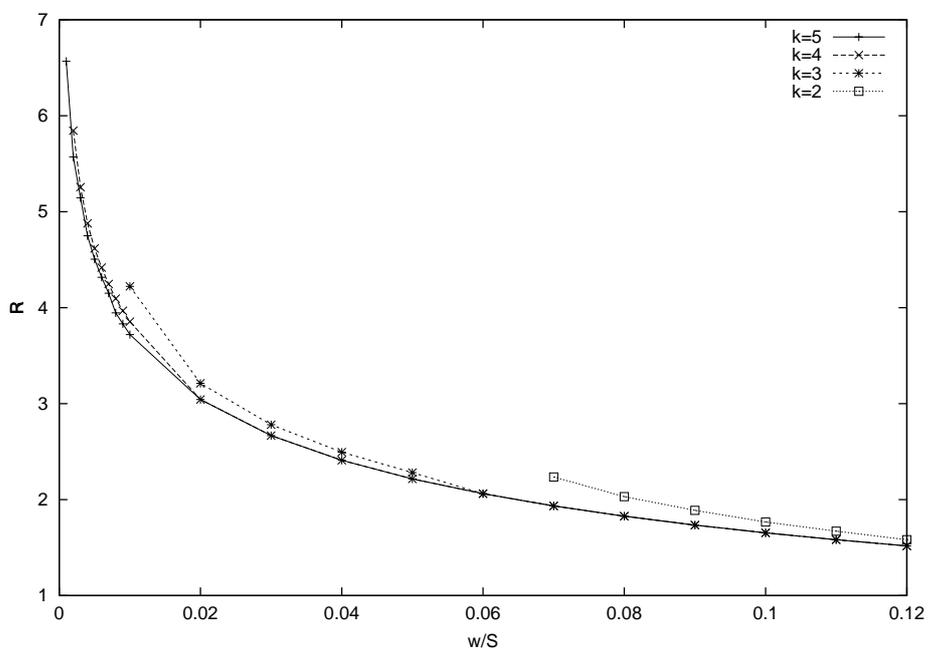
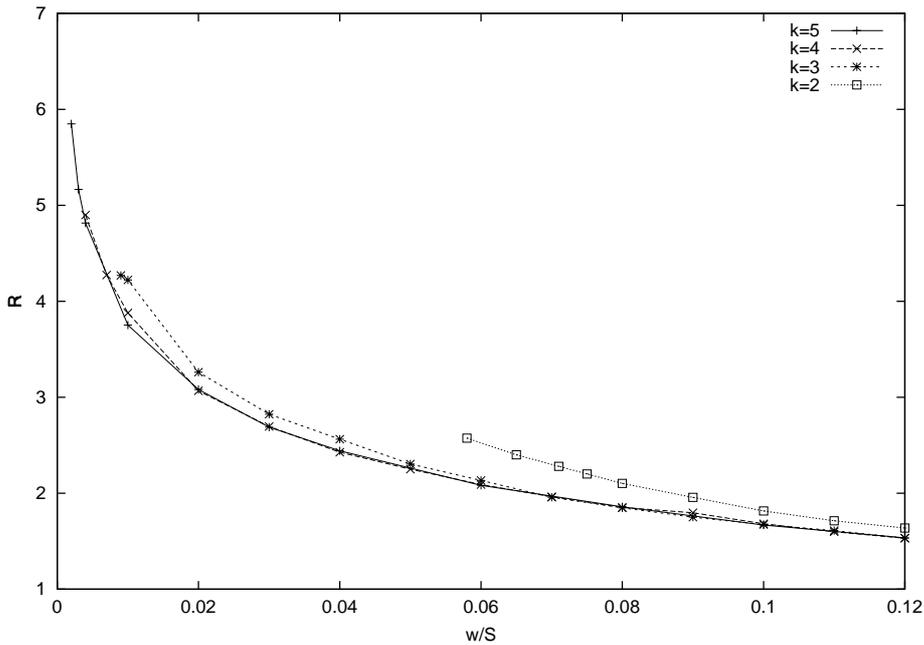


Figura 9: ELPHB ( $d=1$ ): Valores ótimos de  $R$  em função de  $w/S$



**Figura 10: ELPHB ( $d=2$ ): Valores ótimos de R em função de  $w/S$  utilizando algoritmos genéticos**

utilização de banda passante. Por exemplo, para  $w/S$  em torno de 0,1, LPHB utiliza 1,64 canais enquanto ELPHB utiliza 1,65.

À medida em que se aumenta a dimensão do problema ELPHB a busca de uma solução exata via avaliação de todas as possíveis soluções torna-se inviável, tornando necessária a utilização de uma heurística para a obtenção de soluções aproximadas do valor ótimo. Foram utilizados algoritmos genéticos como heurística na resolução de ELPHB, cujos resultados são apresentados na Figura 10, para a dimensão  $d = 2$ . Os resultados são semelhantes aos obtidos com ELPHB com dimensão  $d = 1$  (Figura 9). Nota-se um ligeiro aumento na largura de banda utilizada e um pequena redução no tempo de espera para clientes com 3 canais. Houve também um bom avanço na redução de tempo de espera para  $k = 2$ , de 0,070 com  $d = 1$  para 0,058 quando  $d = 2$ . Para  $k = 5$ , houve uma pequena redução no tempo de espera, conseguindo 0,002 do tempo total do vídeo.

Uma possível vantagem na utilização de ELPHB com dimensões maiores que 1 é o fato do cliente lidar com um menor número de segmentos simultaneamente, o que poderia acarretar em um menor custo para uma *set-top-box*. Embora possível com algoritmos genéticos, não foram realizados exemplos numéricos para dimensões maiores que 2, uma vez que o ELPHB com dimensão  $d = 2$  não apresentou ganhos significativos em relação ao ELPHB com dimensão 1.

## 5. Conclusões

Os protocolos de difusão periódica propostos até então assumem, em geral, a disponibilidade de um número ilimitado de canais. Entretanto, em muitos cenários reais, os clientes possuem uma largura de banda limitada, inferior ao número de canais demandados por estes protocolos, o que inviabiliza a utilização dos mesmos mediante estas limitações.

O presente artigo introduziu uma nova versão do protocolo “Polyharmonic Broadcasting” capaz de operar sob limitação de banda passante no cliente e que minimiza o desperdício de banda passante no servidor. A versão LPHB visa buscar uma segmentação de forma a respeitar a limitação de largura de banda do cliente bem como um limitante superior ao tempo máximo de espera de forma que a utilização da banda do servidor seja ótima. A versão ELPHB permite praticamente qualquer tempo de espera para exibição do vídeo mediante um atraso no calendário de recepção do cliente. O ELPHB é um protocolo eficiente, obtendo baixos tempos de espera com um custo baixo de banda passante adicional no servidor.

## Referências

- [1] C. C. Aggarwal, J. L. Wolf, and P. S. Yu. A permutation-based pyramid broadcasting scheme for video-on-demand systems. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Multimedia Computing and Systems '96*, Hiroshima, Japão, Junho de 1996.
- [2] Ailan Hu. Video-on-Demand broadcasting protocols: A comprehensive study. In *Proceedings of the IEEE Infocom 2001 Conference*, Anchorage, Alaska EUA, Abril de 2001.
- [3] K. A. Hua and Simon Sheu. Skyscraper broadcasting: A new broadcasting scheme for metropolitan Video-on-Demand systems. In *Proceedings of the ACM SIGCOMM '97 Conference*, Cannes, França, 1997.
- [4] Li-Shen Juhn and Li-Ming Tseng. Harmonic broadcasting for video-on-demand service. *IEEE Transactions on Broadcasting*, 43(3):268–271, Setembro de 1997.
- [5] Li-Shen Juhn and Li-Ming Tseng. Fast data broadcasting and receiving scheme for popular video service. *IEEE Transactions on Broadcasting*, 44(2):100–105, Março de 1998.
- [6] J. F. Pâris, S. W. Carter, and D. D. E. Long. A low bandwidth broadcasting protocol for video on demand. In *Proceedings of the 7th International Conference on Computer Communications and Networks (IC3N'98)*, pages 690–697, Outubro de 1998.
- [7] J. F. Pâris and D. D. E. Long. Limiting the receiving bandwidth of broadcasting protocols for video-on-demand. In *Proceedings of the Euromedia 2000 Conference, Antuérpia, Bélgica*, pages 107–111, Maio de 2000.
- [8] S. Viswanathan and T. Imielinski. Pyramid broadcasting for video on demand service. In *Proceedings of the IEEE Multimedia Computing and Networks Conference, San Jose, California*, 1995.