4
Algoritmos de Ajuste Elástico

Este capítulo descreve as principais técnicas e algoritmos de edição de dados no formato MPEG-2 que serviram de base para a solução de ajuste elástico proposta nesta dissertação, além de alternativas possíveis. As técnicas apresentadas atuam em diferentes níveis da estrutura do fluxo MPEG-2, sendo aplicadas nas camadas de sistemas, de compressão e em ambas as camadas. Alguns dos algoritmos e métodos apresentados foram descritos em trabalhos anteriores, enquanto que os algoritmos propostos nesta dissertação serão explicitamente indicados e detalhados.

A edição de vídeos no formato comprimido pode ser realizada através de filtros de diferentes funções. As operações que representam maior custo de processamento são as que envolvem a manipulação de coeficientes DCT e de vetores de movimento. Elas incluem a requantização dos coeficientes, alterando o valor do *quantum*, o descarte de coeficientes e a modificação da quantidade de bits utilizados no processo de quantização.

A Seção 4.1 discute as formas de realização do ajuste elástico no fluxo de vídeo e mostra o algoritmo desenvolvido para compressão e expansão do fluxo de vídeo, sem a preocupação com o controle do *buffer* do decodificador, a sincronização com o sinal de áudio relacionado e a recuperação do relógio do codificador.

A Seção 4.2 analisa o comportamento do *buffer* do decodificador frente às operações de inserção e descarte de quadros. Para tanto, esta dissertação, diferentemente das abordagens feitas nos trabalhos relacionados no Capítulo 3, desenvolve, na Subseção 4.2.1, um modelo analítico para o problema e descreve as condições a serem obedecidas a fim de evitar situações de *overflow* e *underflow*. A Subseção 4.2.2 detalha as técnicas de controle do *buffer* mencionadas na Seção 3.3. Utilizando as conclusões do modelo analítico desenvolvido, a Subseção 4.2.3 propõe um algoritmo de controle de ocupação do *buffer*.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310814/CB

Os problemas relacionados à manutenção da sincronização e à recuperação da referência de relógio são apresentados nas Seções 4.3 e 4.4, respectivamente.

4.1. Compressão e Expansão em Vídeo

As principais técnicas utilizadas para a realização do ajuste elástico no fluxo de vídeo são a alteração da taxa de exibição de quadros e a inserção e descarte de quadros. Para a alteração da taxa de exibição de fluxos MPEG-2, o decodificador deve disponibilizar o ajuste através de sua API de controle e saber modificar a taxa de exibição de quadros, após a decodificação.

Uma alternativa é a modificação da taxa de quadros indicada no próprio fluxo codificado, conforme determinada pela equação (Eq. 1) apresentada na Seção 2.2. Essa alteração não está em conformidade com a sintaxe definida no padrão, que especifica que a taxa de exibição de quadros seja constante, e somente pode ser adotada se a implementação do decodificador puder interpretar os diferentes valores de taxa. Os exibidores comerciais, normalmente, não possuem a flexibilidade de seguir quaisquer valores de taxa impostos no fluxo comprimido e permitem o ajuste apenas para um conjunto discreto de valores de taxa de exibição de quadros.

A estratégia de inserção e descarte de quadros, comumente utilizada para o controle da taxa em bits do fluxo audiovisual devido a restrições impostas pela rede de comunicação, pode ser empregada tanto para dados de vídeo não comprimidos quanto para os fluxos comprimidos. Para facilitar a nomenclatura, pode-se definir o ponto de edição como sendo a posição, no fluxo codificado, em que um quadro é inserido ou retirado.

A operação de descarte pode retirar quadros que foram utilizados como referência para a codificação de outros quadros que estarão presentes no fluxo resultante, segundo previsto pelo padrão para a codificação dos quadros do tipo P e B. Essa situação pode ser exemplificada na Figura 18, onde, na parte superior da figura, os quadros estão dispostos segundo a ordem de apresentação e o quadro P_3 é retirado do fluxo. A parte inferior apresenta o mesmo exemplo de acordo com a ordem de codificação.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310814/CB

Para a correta decodificação do quadro B_4, é necessária a anterior decodificação dos quadros P_3 e I_5. Portanto, a operação de descarte requer que a dependência temporal entre o quadro B_4 e P_3 seja eliminada, obrigando que o quadro B_4 só possua referência a macroblocos do quadro I_5 ou que o mesmo seja codificado como um quadro I. Quando um quadro B possui dependência apenas em relação a quadros a serem exibidos posteriormente, ele é dito possuir predição "para trás" (*backward prediction*). Caso um quadro B possua referência apenas a um quadro a ser exibido anteriormente, diz-se que o modo de predição é "para frente" (*forward prediction*). Assim, o quadro B_4 deve ser transformado em um quadro $B_{back,\ 4}$ ou em um quadro I. Essa última opção é adotada no exemplo, gerando o quadro I_4.

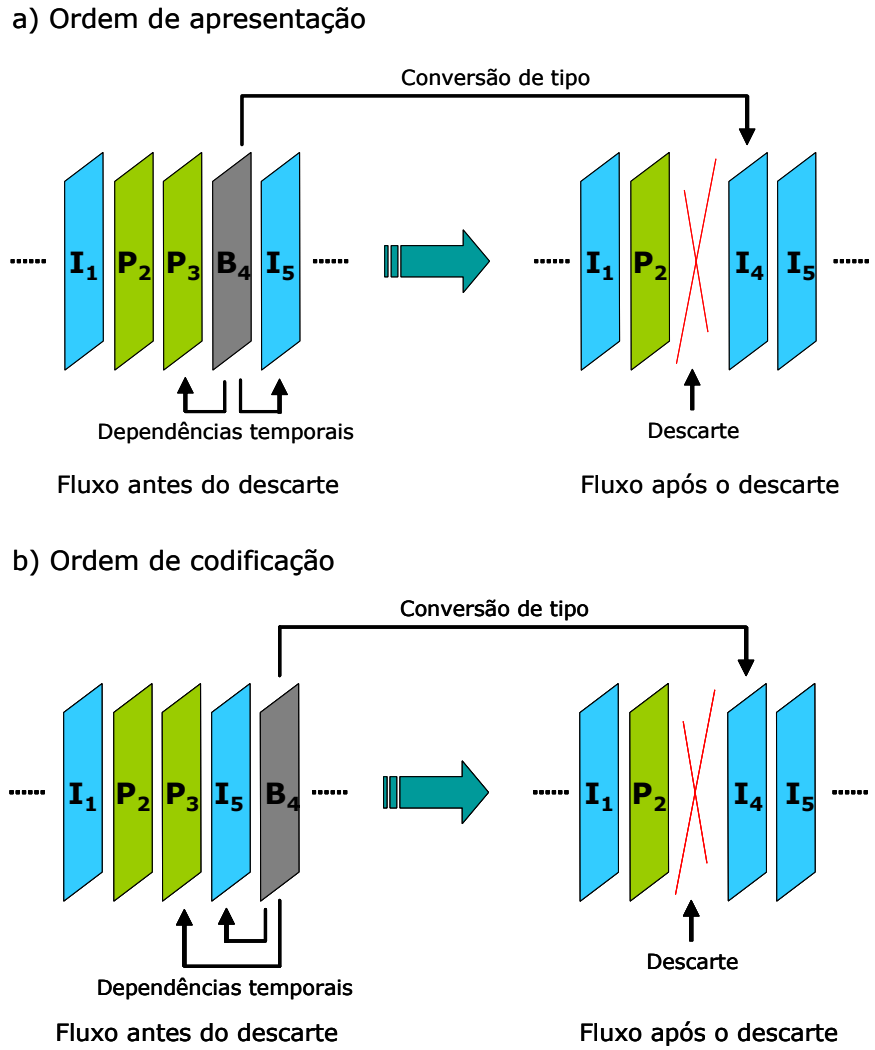

Figura 18: Descarte de quadros X Interdependência temporal.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310814/CB

É importante salientar que a conversão de tipo de quadro pode causar modificação na ordem em que as figuras devem ser transmitidas, ou ordem de codificação, conforme ilustrado no exemplo, em que há inversão no posicionamento das figuras 4 e 5. Caso o quadro 4 tivesse sido transformado para $B_{back,\,4}$, tal alteração não seria necessária.

Como regra geral, os quadros cujas referências foram retiradas têm que sofrer conversão de tipo, eliminando a predição temporal. A modificação do tipo de uma figura pode requerer a conversão de tipo de outras figuras do fluxo de vídeo e o re-ordenamento das figuras no fluxo a ser transmitido. Para ilustrar essa necessidade, considere-se uma modificação no exemplo anterior, ilustrada na Figura 19, que apresenta apenas a seqüência segundo a ordem de apresentação. Inicialmente, o quadro P_5 utiliza o quadro P_3 como referência temporal. A conversão do quadro B_4 para I_4 altera o quadro de referência que deve ser utilizado pelo quadro P_5, cujos coeficientes DCT necessitam ser recalculados através da predição em relação ao quadro I_4. Também nesse exemplo, a ordem de codificação é alterada de I_1 P_2 P_3 P_5 B_4 para I_1 P_2 I_4 P_5.

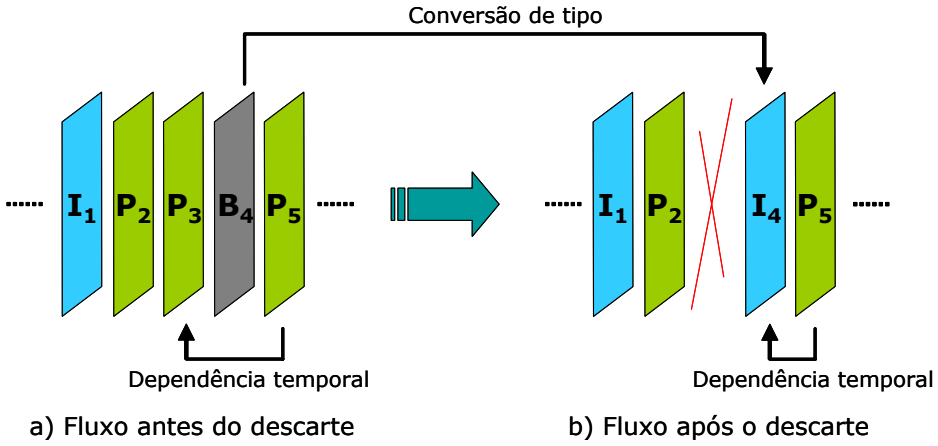

Figura 19: Efeito da conversão de tipo em quadros vizinhos.

Outra forma de diminuição do número de quadros do fluxo de vídeo é através da substituição de um conjunto consecutivo de quadros por um conjunto menor. Por exemplo, dois quadros consecutivos podem ser substituídos por um único, resultado da média, calculada *pixel* a *pixel* ou bloco a bloco, entre os dois quadros descartados.

A inserção de quadros em um fluxo codificado pode ser realizada através da duplicação de quadros existentes ou da criação e inserção de um novo quadro.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310814/CB

Nessa última alternativa, o novo quadro pode ser calculado através da interpolação dos quadros anterior e posterior em relação ao ponto de inserção, provendo uma mudança de imagem mais suave. Assim como no processo de descarte, o processo de inserção pode requerer a alteração da ordem de codificação dos quadros.

Qualquer que seja o processo de inserção ou descarte, ele causa impacto nos valores do parâmetro *temporal_reference*, que representa um contador de figuras, presente nos cabeçalhos das figuras posteriores ao ponto de edição, segundo a ordem de apresentação. Assim, todas as figuras cujas apresentações devem ocorrer posteriormente ao instante de inserção ou retirada de figuras necessitam ser reconfiguradas para manter a contagem correta. A atualização da referência de tempo presente no *GOP Header* não é mandatória, visto que o processo de decodificação não requer essa informação, conforme estabelecido no item 6.1.1.7 do padrão H.262 (ITU, 2000b).

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310814/CB

4.1.1. Algoritmo proposto de compressão e expansão de vídeo

Baseado nas condições descritas acima, foi implementado um algoritmo de compressão e expansão de fluxos de vídeo MPEG através da estratégia de inserção e descarte de quadros. Uma das premissas adotadas foi o de armazenamento da menor quantidade possível de quadros para diminuir o tempo de processamento necessário. A Figura 20 apresenta o algoritmo desenvolvido, onde *rate* representa o fator de ajuste desejado.

Apesar do fluxo de vídeo de entrada estar ordenado segundo a ordem de codificação, o algoritmo realiza o ajuste segundo a ordem de apresentação. Ou seja, a replicação de quadros do fluxo de entrada é feita de maneira a proporcionar um ajuste mais homogêneo possível, sem que seja necessária a conversão de tipo de quadros.

A replicação conforme a ordem de apresentação é obtida através da análise do tipo de cada figura e do armazenamento das figuras I ou P que foram utilizadas como referência na codificação de outras figuras. O algoritmo avalia, então, o momento em que essas figuras serão apresentadas para que sua replicação seja inserida na ordem correta dentro do fluxo de saída. As condições para essa

avaliação são apresentadas no próprio código da Figura 20. É importante salientar que os métodos *outputFrame()* e *replicateFrame()* atualizam o valor do parâmetro *temporal_reference* de uma figura.

```
// Fator de ajuste > 1
if (rate > 1) {
   /* Primeiro caso: a figura atual eh do tipo B. Nesse caso, a figura atual pode
    * ser replicada de acordo com o número de vezes necessário.
    */
   if (actualFrame.getPictureCodingType() == Constants.B_PIC) {
      inputFrames++;
      pretendedOutputFrames = (int) (rate * inputFrames);
      outputFrame(actualFrame);
      outputFrames++;

      int quantity = pretendedOutputFrames - outputFrames;
      if (quantity > 0)
         replicateFrame(actualFrame, quantity);
   }
   /* Segundo caso: a figura atual nao eh do tipo B.
    *
    * Se houver figura armazenada em bufferedFrame, esta serah apresentada antes
    * da figura atual. Portanto, a figura armazenada em bufferedFrame deve ser
    * considerada para a replicacao.
    *
    * Em seguida, a figura atual deve ser tratada. Para tanto, eh necessario
    * verificar se a proxima figura eh do tipo B. Se for, a figura atual estah
    * deslocada em relacao ao instante de apresentacao e deve ser armazenada
    * em bufferedFrame, nao devendo ser considerada para replicacao imediata.
    * A figura atual deve ser enviada para a saida.
    *
    * Se a proxima figura for do tipo I ou P, entao a figura atual estah no
    * instante certo de apresentacao e deve ser considerada para replicacao.
    */
   else {
      if (bufferedFrame != null) {
         inputFrames++; // conta o quadro I ou P que cuja ordem
                        // temporal foi alterada.
         outputFrames++;
         pretendedOutputFrames = (int) (rate * inputFrames);

         int quantity = pretendedOutputFrames - outputFrames;
         if (quantity >= 0)
            replicateFrame(bufferedFrame, quantity);
         bufferedFrame = null;
      }
      // Trata a figura atual. Depende do tipo da proxima figura
      nextFrameType = lookNextFrameType();

      // Tratamento da figura atual, quando a proxima figura eh do tipo B
      if (nextFrameType == Constants.B_PIC) {
         bufferedFrame = actualFrame;
         outputFrame(actualFrame);
      }
      // Tratamento da figura atual (I ou P), quando a proxima figura eh do
      // tipo I ou P
      else {
         inputFrames++;
         outputFrame(actualFrame);
         outputFrames++;

         pretendedOutputFrames = (int) (rate * inputFrames);
         int quantity = pretendedOutputFrames - outputFrames;
         if (quantity >= 0)
            replicateFrame(actualFrame, quantity);
      }
   }
}
```

Figura 20: Algoritmo de ajuste elástico: inserção de quadros.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310814/CB

Para a compressão do fluxo de vídeo, tem-se que fator de ajuste é menor que 1 e o algoritmo adotado é apresentado na Figura 21. Similarmente ao processo de inserção de quadros, o ordenamento das figuras no fluxo de transmissão e o momento do descarte de quadro também são considerados para a escolha dos quadros a serem descartados. As condições específicas de cada caso são mostradas na Figura 21.

```
// Fator de ajuste < 1
if (rate < 1) {
   /*
    * Casos: Se a figura atual eh do tipo B incrementa inputFrames decide se a
    * figura atual deve ser descartada.
    *
    * Se a figura atual eh do tipo I ou P:
    * Se ha figura armazenada em bufferedFrame:
    * a) incrementa inputFrames; b) incrementa outputFrames; c) esvazia
    * buferredFrame. Obs: neste caso, nao ha como descartar a figura do
    * bufferedFrame, pois essa jah foi inserida no fluxo anteriormente.
    *
    * Trata a figura atual (processActualIPFrame): verifica o tipo da proxima
    * figura. Se a proxima figura for do tipo B, armazena a figura atual em
    * bufferedFrames e transfere a figura atual para a saida. Se a proxima figura
    * for do tipo I ou P, incrementa inputFrames e decide se a figura atual deve
    * ser descartada.
    */
   if (actualFrame.getPictureCodingType() == Constants.B_PIC) {
      inputFrames++;
      if (!isDiscarded()) {
         outputFrame(actualFrame);
         outputFrames++;
      }
   }
   // Figura atual eh do tipo I ou P
   else {
      // Trata a figura armazenada em bufferedFrame
      if (bufferedFrame != null) {
         inputFrames++;
         outputFrames++;
         bufferedFrame = null;
      }

      // Trata a figura atual (que eh do tipo I ou P). Depende do tipo da
      // proxima figura
      int nextFrameType = lookNextFrameType();

      if (nextFrameType == Constants.B_PIC) {
         bufferedFrame = actualFrame;
         outputFrame(actualFrame);
      } else {
         inputFrames++;
         if (!isDiscarded()) {
            outputFrame(actualFrame);
            outputFrames++;
         }
      }
   }
}
```

Figura 21: Algoritmo ajuste elástico: descarte seletivo de quadros.

Quando o fator de ajuste é igual a 1, nenhuma operação de inserção ou descarte é realizada. Porém, o algoritmo necessita manter a contagem correta do número de figuras recebidas do fluxo de entrada e o número de figuras produzidas

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310814/CB

no fluxo de saída, a fim de que solicitações futuras de ajuste possam ser corretamente atendidas. A Figura 22 apresenta a parte do algoritmo utilizada quando o fator de ajuste é 1.

```
// Fator de ajuste = 1
   /*
    * Fator == 1 Se a figura atual eh do tipo B incrementa inputFrames
    * transfere a figura para a saida incrementa outputFrames
    *
    * Se a figura atual eh do tipo I ou P Se ha figura armazenada em
    * bufferedFrame incrementa inputFrames incrementa outputFrames esvazia
    * buferredFrame
    *
    * Trata a figura atual: verifica o tipo da proxima figura se a proxima
    * figura for do tipo B armazena a figura atual em bufferedFrames
    * transfere a figura atual para a saida se a proxima figura for do tipo
    * I ou P incrementa inputFrames transfere a figura atual para a saida
    * incrementa outputFrames
    */
   if (actualFrame.getPictureCodingType() == Constants.B_PIC) {
      inputFrames++;
      outputFrame(actualFrame);
      outputFrames++;
   } else {
      if (bufferedFrame != null) {
         inputFrames++;
         outputFrames++;
         bufferedFrame = null;
      }
         int nextFrameType = lookNextFrameType();

      if (nextFrameType == Constants.B_PIC) {
         bufferedFrame = actualFrame;
         outputFrame(actualFrame);
      } else {
         inputFrames++;
         outputFrame(actualFrame);
         outputFrames++;
      }
   }
```

Figura 22: Algoritmo de ajuste elástico: fator de ajuste = 1.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310814/CB

4.2. Controle de Ocupação do *Buffer*

As técnicas de compressão e expansão de fluxos de vídeo através da inserção e descarte de quadros alteram as premissas sobre as quais o codificador fez os cálculos para o controle do *buffer* de decodificação e pode ocasionar situações de *underflow* ou *overflow*. Antes de descrever os métodos de prevenção, é importante analisar-se o comportamento da ocupação desse *buffer* de acordo com as operações de inserção e descarte. Uma vez que a taxa instantânea de codificação de quadros pode sofrer pequenos desvios em relação à taxa nominal de codificação de quadros, os efeitos podem ser estudados de acordo com o tamanho do quadro inserido ou retirado, considerando-se a taxa instantânea de

codificação de quadros constante e, então, o impacto do ajuste elástico quando a taxa instantânea de codificação de quadros pode sofrer pequenos desvios em relação à taxa nominal. Essa segunda característica refere-se à variação do intervalo de tempo Δt necessário para a entrada, no *buffer* do receptor, de cada figura.

Os métodos de inserção e descarte de quadros adotados postergam ou adiantam o instante de chegada, no *buffer* do receptor, dos quadros localizados após o ponto de edição. A conseqüência dessa abordagem é a necessidade de utilização de um *buffer* anterior ao *buffer* de entrada do receptor, o qual amortiza as variações introduzidas pelo processo de ajuste elástico do fluxo, conforme ilustrado na Figura 23. Para o caso da diminuição do tempo de exibição do fluxo audiovisual através do descarte de quadros, é necessário que o receptor possa receber o fluxo a uma taxa superior à utilizada na codificação original.

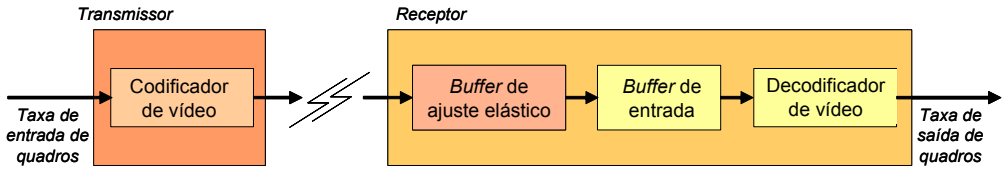

Figura 23: Transmissão de fluxo MPEG com compressão e expansão.

4.2.1. Modelagem analítica da ocupação do *buffer*

Esta dissertação desenvolve, a seguir, uma modelagem analítica do comportamento da ocupação do *buffer* decorrente dos processos de inserção e descarte de quadros. Mais do que descrever os efeitos, a análise estabelece as condições a serem obedecidas e serve de base para o algoritmo de controle de ocupação do *buffer* apresentado na Subseção 4.2.3.

Considerando-se os processos de entrada e saída de quadros do *buffer* do receptor, tem-se que seu nível de ocupação pode ser expresso recursivamente como:

(Eq. 12) $B_0 = 0$, e

(Eq. 13) $B_k = mín\{B_{k-1} - P_{k-1} + R_k t, B_{máx}\}$

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310814/CB

Onde, B_k representa o nível de ocupação do *buffer*; P_k significa o tamanho, em bits, do quadro k; R_k é a taxa, em bits por segundo, com que o quadro k entra no *buffer*, t é o instante de tempo analisado e $B_{máx}$ é o tamanho do *buffer* do receptor.

Analisando-se a ocupação do *buffer* apenas nos instantes múltiplos de $T = \frac{1}{taxa\ de\ quadros}$ e considerando-se, para simplificação da análise, que o valor do *vbv_delay* é um múltiplo de T, ou seja, $vbv_delay = C \bullet T$, e B_i o nível de ocupação do *buffer* no instante i, antes da retirada do quadro a ser consumido pelo decodificador nesse instante, tem-se que:

(Eq. 14) $B_k = \sum_{i=0}^{k} P_i \quad , \forall k < C$

(Eq. 15) $B_k = B_0 + \sum_{i=1}^{k} P_i - \sum_{j=1}^{k-C} P_j \quad , \forall k \geq C$

(Eq. 16) $B_k = B_A + \sum_{i=A+1}^{k} P_i - \sum_{j=A+1}^{k-C} P_j \quad , \forall k \geq C$

(Eq. 17) $B_k = B_{k-1} + P_k \quad , \forall k \geq C$

As equações (Eq. 14) e (Eq. 15) estabelecem a ocupação do *buffer* de acordo com o tamanho de todas as figuras que entram e saem do *buffer*, até o instante k. A equação (Eq. 16) mostra a ocupação do *buffer* no instante k em relação a um instante anterior A. A equação (Eq. 17) indica a ocupação em relação ao instante anterior $k-1$. Essa equação reflete o interesse na determinação da ocupação do *buffer* imediatamente antes do decodificador retirar um quadro do *buffer*, no instante k.

4.2.1.1. Efeito do tamanho de um quadro inserido ou descartado

Os processos de inserção e de retirada de quadros em um fluxo já comprimido produzem diferentes perturbações na manutenção do controle da ocupação do *buffer* do receptor, requerendo que sejam averiguados separadamente. Essa análise considera a taxa instantânea de codificação de

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310814/CB

quadros constante e igual à taxa nominal, o que significa que o período de tempo Δt necessário para a completa recepção de qualquer quadro do fluxo no *buffer* é idêntico, ou seja, $\Delta t = \frac{quantidade\ de\ bits\ do\ quadro\ k}{taxa,\ em\ bits\ por\ segundo,\ do\ quadro\ k}, \forall k$. A análise para o caso da taxa de codificação de quadros variável é apresentada na subseção 4.2.1.2.

4.2.1.1.1. Inserção de quadros

O efeito da inserção de um quadro do fluxo original é limitado entre o instante em que o mesmo é inserido e o instante em que é retirado do *buffer*, o que pode ser observado esquematicamente na Figura 24. A ilustração representa a ocupação do *buffer* de entrada do receptor com tamanho máximo igual a B, *vbv_delay* de todas as figuras igual a $3 \bullet T$, onde T é o inverso da taxa de quadros, e taxa de codificação de quadros constante e igual a $1/T$.

O gráfico da Figura 24.a representa a curva de ocupação do *buffer* conforme originalmente prevista pelo codificador. Na Figura 24.b, um quadro cujo tamanho é maior que o do quadro imediatamente posterior é inserido no fluxo. Essa situação é exemplificada dela duplicação do quadro P_2. Essa operação, além de aumentar o nível de ocupação do *buffer*, altera a ordem original com que as outras figuras são inseridas e retiradas do *buffer* e o instante em que o quadro inserido é consumido pelo decodificador. No exemplo da figura, os quadros P_3, P_4 e P_5 do fluxo original são inseridos antes da retirada dos quadros P_1, P_2 e P_3, respectivamente. Após a duplicação do quadro 2, a ordem de entrada e retirada de quadros é invertida, conforme visualizado no segundo gráfico. O aumento do nível de ocupação do *buffer* decorrente da duplicação de um quadro pode causar o *overflow* do *buffer*.

A situação inversa, ou seja, a inserção de um quadro cujo tamanho é menor que o do quadro imediatamente posterior, diminui o nível de ocupação do *buffer*, também alterando, temporariamente, a ordem com que os quadros são inseridos e retirados do *buffer*. A Figura 24.c ilustra esse comportamento através da duplicação do quadro P_4.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310814/CB

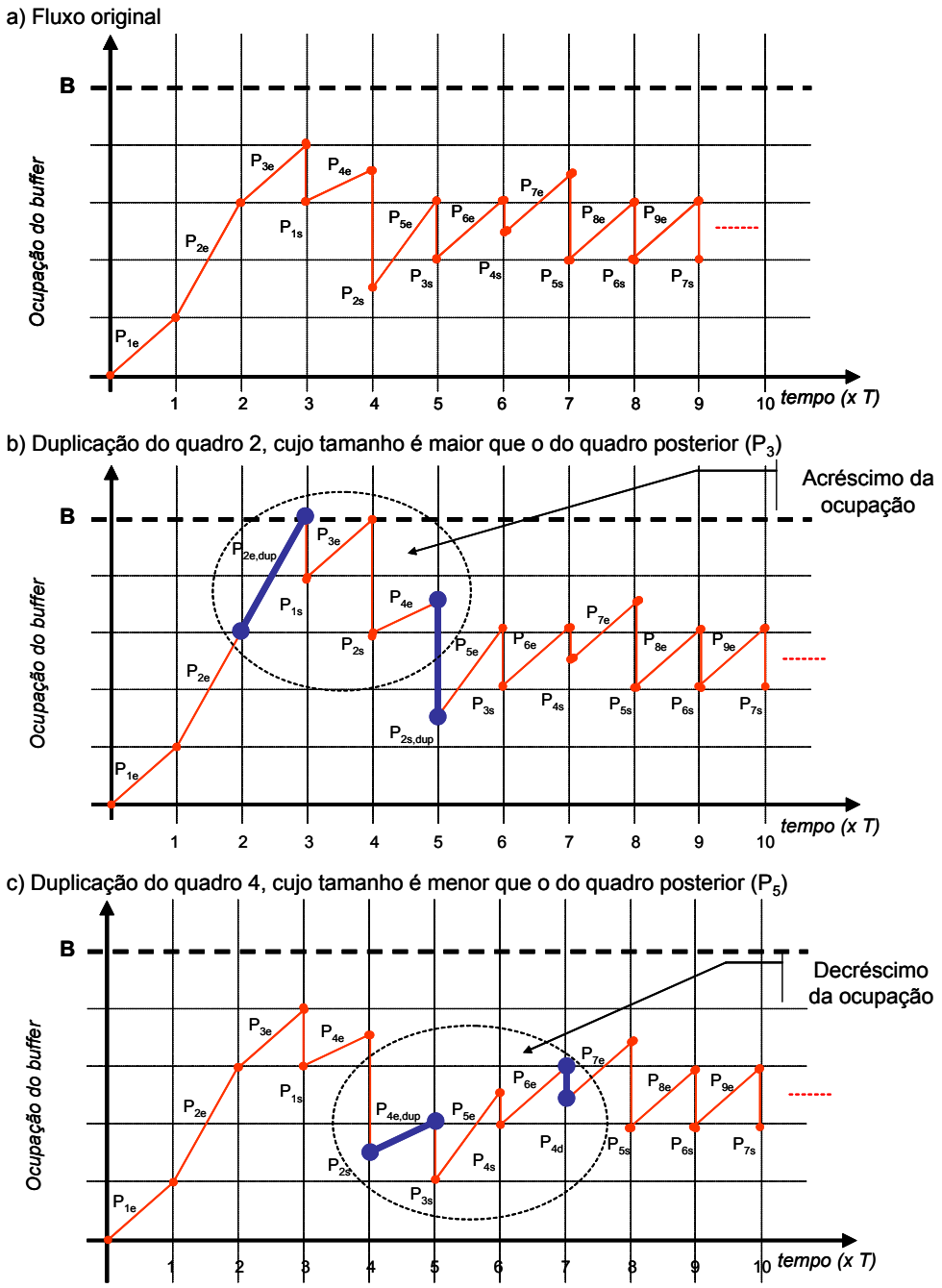

Figura 24: Efeito da duplicação de quadros.

Adotando-se a notação utilizada nas equações (Eq. 14) a (Eq. 17), a avaliação analítica do efeito do tamanho de um quadro inserido na ocupação do *buffer* pode ser dividida em dois casos, expostos a seguir. Para que não haja problemas de *overflow*, é necessário garantir que $B_k^{'} \leq B, \forall k > 0$, onde $B_k^{'}$ representa o nível de ocupação do *buffer* após a inserção de um quadro e B é o

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310814/CB

tamanho máximo desse *buffer*. O quadro inserido será denominado de P_x, o qual já terá sido recebido no *buffer* no instante A.

a) Para $k \geq C + A$, ou seja, analisando-se a ocupação do *buffer* após o período em que o quadro P_x inserido é consumido pelo decodificador. Utilizando-se a (Eq. 16), tem-se:

(Eq. 18) $B_k = B_A + \sum_{i=A+1}^{k} P_i - \sum_{j=A+1}^{k-C} P_j$

Depois da inserção do quadro P_x, inserido após o instante A, a nova ocupação $B_k^{'}$ é dada por:

(Eq. 19) $B_k^{'} = B_A + \left(\sum_{i=A+1}^{k} P_i + P_x - P_k \right) - \left(\sum_{j=A+1}^{k-C} P_j + P_x - P_{k-C} \right)$

Onde foi considerado que o quadro P_k, devido à inserção, somente chegará ao *buffer* no instante $k+1$, não devendo ser contabilizado para $B_k^{'}$. O quadro P_{k-C} será retirado do *buffer* apenas no instante k, não devendo ser incluído no cálculo de $B_k^{'}$. Os termos referentes a P_x indicam que esse quadro foi inserido e retirado do *buffer*. Da (Eq. 19):

(Eq. 20) $B_k^{'} = B_A + \left(\sum_{i=A+1}^{k} P_i - P_k \right) - \left(\sum_{j=A+1}^{k} P_{j-C} - P_{k-C} \right)$

$$B_k^{'} = B_A + \sum_{i=A+1}^{k-1} P_i - \sum_{j=A+1}^{k-1} P_{j-C}$$

Aplicando-se a (Eq. 16),

(Eq. 21) $B_k^{'} = B_{k-1} \quad , \forall k \geq C + A$

O resultado acima indica que a ocupação do *buffer*, para instantes de tempo posteriores ao momento de retirada, pelo decodificador, do quadro inserido, é idêntica à ocupação do fluxo original relativa ao instante anterior. A conseqüência é que, uma vez que o processo de codificação garanta que $B_k \leq B, \forall k > 0$, a inserção de um quadro não causará *overflow* no *buffer* do receptor para $k \geq C + A$.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310814/CB

b) Para $A < k < C + A$, o quadro P_k já terá entrado no *buffer*, porém, ainda não terá sido consumido pelo decodificador. Para garantir que não haja *overflow*, tem-se que,

$$B_k^{'} = B_A + \left(\sum_{i=A+1}^{k} P_i + P_x - P_k \right) - \sum_{j=A+1}^{k-C} P_j$$

$$B_k^{'} = B_A + \sum_{i=A+1}^{k} P_i - \sum_{j=A+1}^{k-C} P_j + P_x - P_k$$

Usando-se o limite *B*,

(Eq. 22) $B_k^{'} = B_k - P_k + P_x \leq B$

Utilizando-se a (Eq. 17),

$$B_k^{'} = B_{k-1} + P_x \leq B$$

(Eq. 23) $P_x \leq B - B_{k-1}$, $\forall k : k \in (A, C + A)$

Da (Eq. 22), pode-se escrever:

$$P_x \leq B - B_k + P_k$$

Uma forma de garantir essa desigualdade, visto que $B - B_k \geq 0$, é adotando-se:

(Eq. 24) $P_x \leq P_k, \forall k : k \in (A, C + A)$

Ou seja, a condição apresentada na (Eq. 23) é necessariamente obedecida escolhendo-se o tamanho de P_x menor do que qualquer quadro P_k contido no intervalo $(A, C + A)$.

4.2.1.1.2.
Descarte de quadros

Considerando-se a taxa de codificação de quadros constante, o efeito da retirada de um quadro do fluxo original também é limitado entre o instante em que ele originalmente deveria entrar no *buffer* e o instante em que ele seria consumido pelo decodificador, o que pode ser exemplificado esquematicamente na Figura 25. A ilustração representa a ocupação do *buffer* de entrada do receptor, com tamanho máximo igual a B, com *vbv_delay* de todas as figuras igual a $3 \bullet T$, onde *T* é o

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310814/CB

inverso da taxa de quadros, e com taxa de codificação de quadros constante e igual a $1/T$.

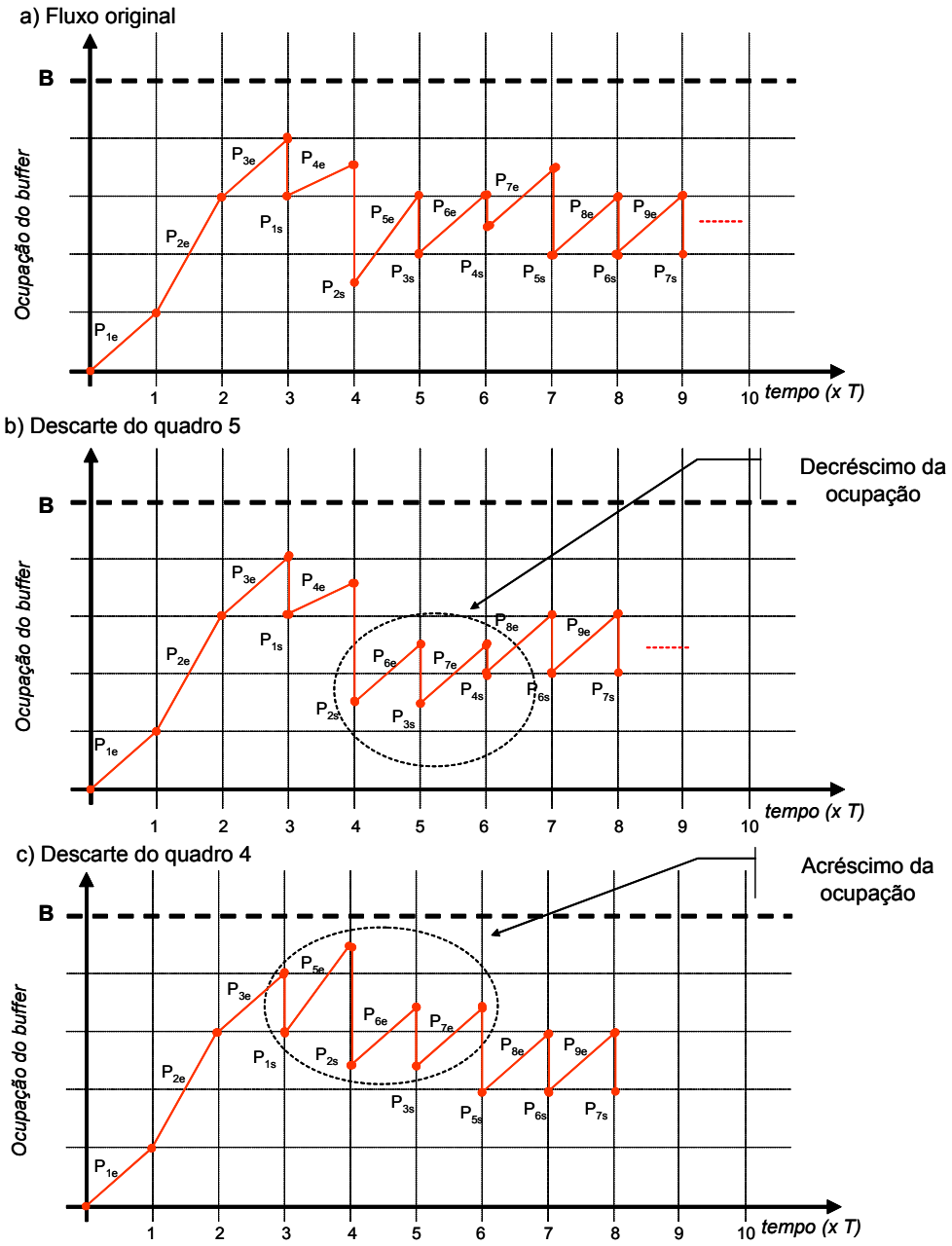

Figura 25: Efeito do descarte de um quadro.

A Figura 25.a representa a curva de ocupação do *buffer* conforme originalmente prevista pelo codificador. O segundo e o terceiro gráfico da Figura 25 mostram que a ocupação do *buffer* pode aumentar ou diminuir, de acordo com o tamanho do quadro escolhido para ser descartado. No segundo gráfico, o quadro

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310814/CB

P_5, de tamanho superior ao quadro P_6, é descartado, causando um decréscimo no nível de ocupação. No terceiro gráfico, o quadro P_4 é selecionado para descarte. Como seu tamanho é inferior ao quadro imediatamente posterior, P_5, sua retirada aumenta temporariamente o nível de ocupação, o que pode ocasionar *overflow*.

A operação de descarte, além de alterar o nível de ocupação do *buffer*, modifica a ordem original com que as outras figuras são inseridas e retiradas do *buffer*. De acordo com o segundo gráfico da figura acima os quadros P_3 e P_4, no fluxo original, são consumidos antes da chegada dos quadros P_6 e P_7, respectivamente. A retirada do quadro P_5 causa a inversão dessa ordem de entrada e retirada de quadros.

A premissa da taxa de geração de quadros constante e igual à taxa de quadros do fluxo de vídeo implica que situações de *underflow* nunca ocorrem. Para verificar o efeito decorrente do descarte de um quadro, determinando-se as condições para que não haja *overflow*, a avaliação analítica pode ser dividida em dois casos, conforme a seguir. O quadro retirado será denominado de P_s e é utilizada a mesma notação das equações (Eq. 14) a (Eq. 17).

a) O primeiro caso considera $k > s + C$, ou seja, é aplicado para instantes de tempo posteriores ao momento em que o quadro P_s seria consumido pelo decodificador, segundo determinado no fluxo original de vídeo. Tem-se, então:

(Eq. 25) $$B_k^{'} = B_A + \left(\sum_{i=A+1}^{k} P_i - P_s + P_{k+1} \right) - \left(\sum_{j=A+1}^{k-C} P_j - P_s + P_{k-C+1} \right)$$

A expressão acima considera que o quadro P_s não deve ser contabilizado no cálculo da ocupação do *buffer*. Seu descarte faz com que, no instante *k*, o quadro P_{k+1} tenha sido recebido no *buffer* e que o quadro P_{k-C+1} já tenha sido consumido pelo decodificador. Portanto:

$$B_k^{'} = B_A + \sum_{i=A+1}^{k+1} P_i - \sum_{j=A+1}^{k+1-C} P_j$$

Logo,

(Eq. 26) $$B_k^{'} = B_{k+1} \quad , \forall k > s + C$$

A equação (Eq. 26) garante que a ocupação do *buffer* não apresenta *overflow* devido ao descarte, uma vez que o processo de codificação, se executado corretamente, garante que $B_k \leq B, \forall k \geq 0$.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310814/CB

b) Para o caso em que $k \leq s + C$, há inversão na ordem de entrada e saída de quadros, em comparação ao fluxo original, devido à antecipação da entrada, no *buffer*, dos quadros posteriores a P_s. O quadro P_s não deve ser contabilizado como quadro entrante. Tem-se, então:

$$B_k^{'} = B_A + \left(\sum_{i=A+1}^{k} P_i - P_s + P_{k+1} \right) - \sum_{j=A+1}^{k-C} P_j$$

$$B_k^{'} = \left(B_A + \sum_{i=A+1}^{k} P_i - \sum_{j=A+1}^{k-C} P_j \right) - P_s + P_{k+1}$$

$$B_k^{'} = B_k + \left(P_{k+1} - P_s \right)$$

Para não haver *overflow*:

$$B_k + \left(P_{k+1} - P_s \right) \leq B$$

(Eq. 27) $\left(P_{k+1} - P_s \right) \leq B - B_k \ , \forall k : k \in \left(s, C + s \right)$

Portanto, para não haver *overflow*, para cada instante *k*, a diferença de tamanho entre o próximo quadro (*k+1*) e o quadro retirado P_s não pode ser superior à quantidade de bits que faltam, no instante *k*, para que o *buffer* atinja seu limite máximo.

4.2.1.2. Efeitos da inserção e retirada de quadros sobre a taxa instantânea de codificação de quadros

Uma vez que a taxa instantânea de codificação de quadros não é constante e apresenta pequenos desvios em relação à taxa nominal de codificação, os processos de inserção e descarte de figuras causam impacto na taxa média de codificação de quadros.

O intervalo Δt de recebimento de um quadro no *buffer* é determinado através da (Eq. 28). Para facilitar a nomenclatura, o intervalo Δt_k será chamado de intervalo de recepção no *buffer* da figura *k*. A taxa instantânea de codificação de quadros é obtida por $r_k = \dfrac{1}{\Delta t_k}$.

(Eq. 28) $\Delta t_k = \dfrac{quantidade\ de\ bits\ do\ quadro\ k}{taxa,\ em\ bits\ \ por\ segundo,\ do\ quadro\ k}, \forall k$

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310814/CB

Conforme mencionado no item 2.2.3.1 do Capítulo 2, o aumento da taxa instantânea de codificação de quadros, por um intervalo de tempo suficientemente grande, pode gerar *overflow* no *buffer*, visto que a taxa de consumo de quadros pelo decodificador é constante e igual à taxa nominal. Analogamente, se a taxa instantânea de codificação de quadros mantiver-se menor que a taxa nominal por um intervalo de tempo suficientemente grande, pode haver *underflow* do *buffer*. O codificador é responsável por manter a taxa média de codificação de quadros igual à taxa nominal e de garantir que a variação da taxa instantânea não ocasione *overflow* ou *underflow*.

A inserção de um quadro cujo intervalo de recepção Δt_k seja inferior ao inverso da taxa nominal (T) faz com que a ocupação do *buffer* aumente, visto que a quantidade de quadros presentes no *buffer* cresce devido ao aumento na taxa instantânea de codificação de quadros. Similarmente, a inserção de um quadro cujo intervalo de recepção Δt_k seja superior a T causa uma diminuição do nível de ocupação do *buffer*, através da diminuição da quantidade de quadros presentes no mesmo.

Esse comportamento pode ser observado esquematicamente na Figura 26. As linhas tracejadas foram dispostas apenas para auxiliar na visualização do tamanho e duração de cada quadro. O quadro inserido possui uma linha mais espessa. No segundo gráfico da figura, o quadro P_x, cujo intervalo de recepção é menor que T, causa o aumento da ocupação. De forma análoga, comparando-se o nível de ocupação antes do início de cada figura entre os gráficos *a* e *c*, percebe-se que a inserção do quadro P_x, com intervalo de recepção superior a T, diminui o nível de ocupação do *buffer*.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310814/CB

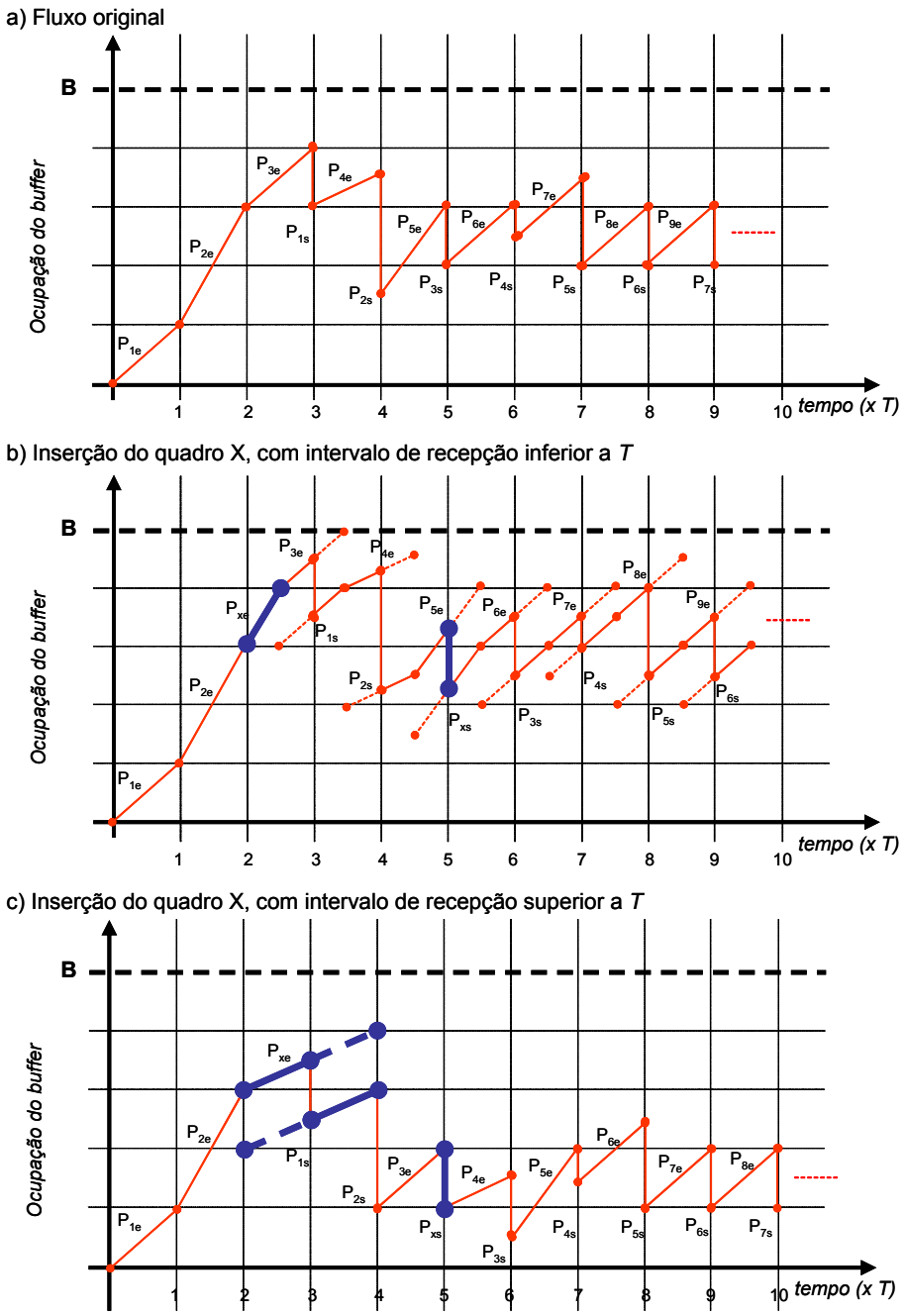

Figura 26: Efeito da inserção de um quadro com $\Delta t \neq 1/T$.

Análise semelhante pode ser realizada em relação à operação de descarte de quadros com intervalo de recepção diferente de *T*, cujos resultados podem ser visualizados na Figura 27. A retirada de um quadro cujo intervalo de recepção é inferior a *T* diminui a quantidade de quadros presentes no *buffer*, produzindo uma redução no nível de ocupação do *buffer*, conforme ilustrado no segundo gráfico da figura. O descarte de um quadro com intervalo de recepção maior que *T* produz o

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310814/CB

efeito inverso, aumentando o número de quadros presentes no *buffer* e sua ocupação.

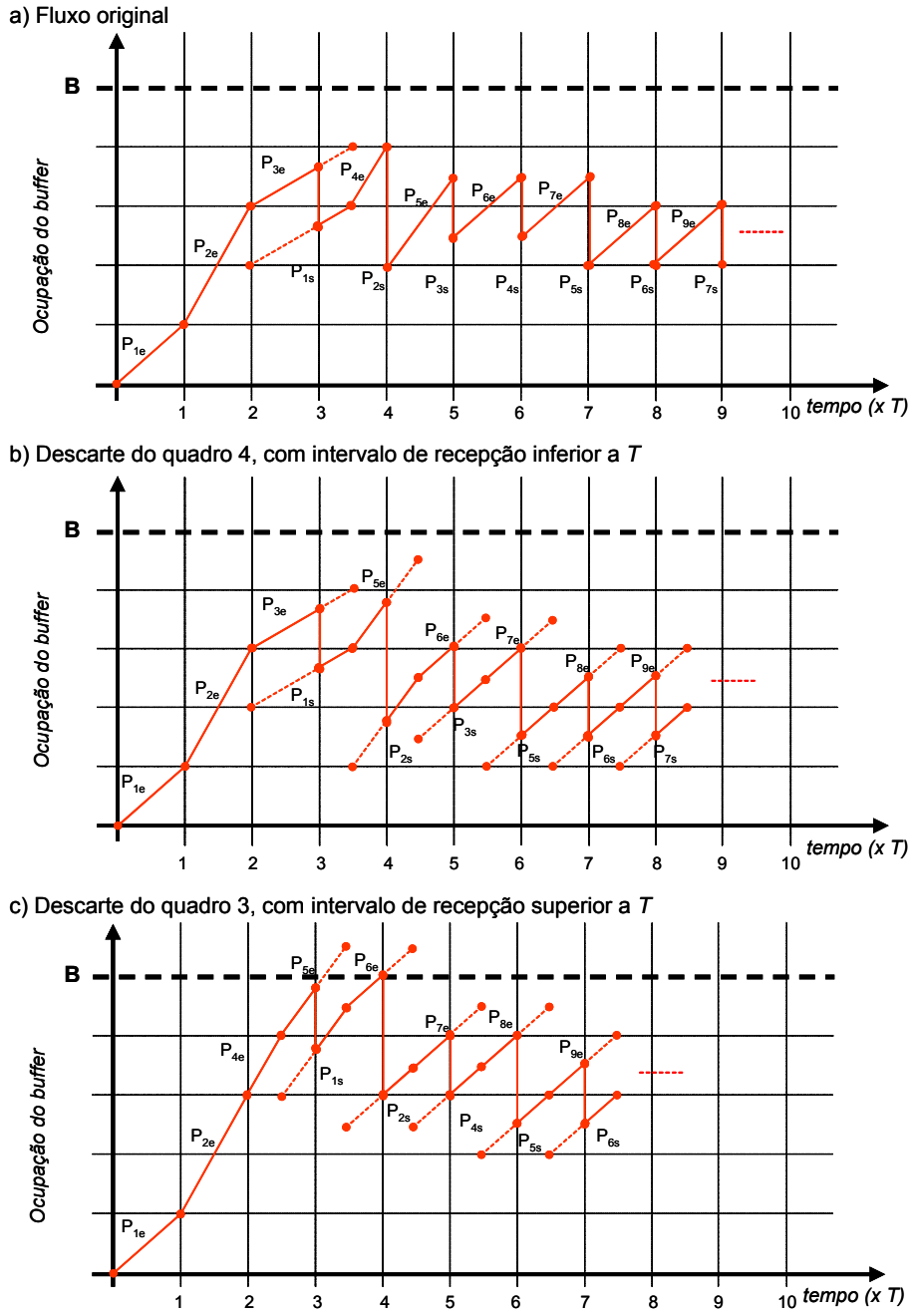

Figura 27: Efeito do descarte de um quadro com $\Delta t \neq 1/T$.

4.2.2. Métodos de prevenção de *overflow* e *underflow*

As principais técnicas de prevenção de situações de *overflow* e *underflow* do *buffer* do receptor foram desenvolvidas para aplicações de corte e concatenação de

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310814/CB

segmentos de vídeo. Para essas aplicações, os métodos utilizados para fazer a concatenação dos segmentos podem exigir a conversão de tipo tanto para quadros pertencentes ao final do primeiro segmento, quanto para quadros localizados no início do segundo segmento, como forma a eliminar a predição em relação a quadros que não mais estarão presentes no fluxo concatenado. As operações necessárias para a concatenação de segmentos de vídeo podem resultar em ocorrência de *overflow* ou *underflow* do *buffer* do receptor, durante a exibição do segundo segmento de vídeo.

As operações de conversão do tipo de um quadro alteram a quantidade de bits necessária para sua codificação, modificando o intervalo de tempo necessário para a recepção desse quadro no *buffer* de entrada do receptor. Essa modificação causa uma variação na taxa instantânea de codificação de quadros. Como a conversão de tipo necessária para a eliminação da dependência temporal entre quadros normalmente aumenta a quantidade de bits dos quadros modificados, a taxa instantânea de quadros diminui, podendo causar *underflow* no *buffer*.

Outra situação que pode ocasionar *underflow* é inerente aos pequenos desvios da taxa instantânea de codificação em relação à taxa nominal. Caso as taxas instantâneas do final do primeiro segmento de vídeo e do início do segundo segmento de vídeo, os quais formarão o fluxo concatenado, permanecerem inferiores à taxa nominal por um intervalo de tempo suficientemente grande, o fluxo resultante pode apresentar *underflow*. A diferença dessa situação em relação à codificação original dos dois segmentos é que a taxa instantânea inferior, prevista durante a codificação de cada trecho de vídeo pelo codificador, seria compensada em outras partes dos vídeos.

A concatenação de segmentos de vídeo cujas taxas instantâneas de codificação de quadros, próximas ao ponto de edição, sejam superiores à taxa nominal pode resultar na ocorrência de *overflow* do *buffer*. Outra situação que pode ocasionar *overflow* deriva-se do nível de ocupação do *buffer*, no momento em que a primeira figura do segundo segmento entra no *buffer*, e do tamanho das figuras pertencentes ao primeiro segmento de vídeo e que serão retiradas do *buffer* após a entrada de figuras do segundo segmento de vídeo. Se o nível de ocupação do *buffer*, ao final do primeiro segmento, for superior ao previsto na codificação original do segundo segmento e/ou se os tamanhos das figuras do primeiro segmento de vídeo, que serão retiradas após o recebimento de qualquer figura do

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310814/CB

segundo segmento, forem menores que as figuras previstas na codificação original do segundo vídeo, pode ocorrer *overflow*.

As técnicas de prevenção de *underflow* e *overflow* em aplicações de corte e concatenação de segmentos de vídeo serão discutidas a seguir.

4.2.2.1. Prevenção de *underflow*

Os principais métodos de prevenção do *underflow* são a conversão do modo de predição de quadros, a requantização ou, no limite, o descarte de coeficientes DCT e a transformação de macroblocos codificados em *skipped macroblocks*. Todos os processos mencionados visam à diminuição da quantidade de bits necessários para a codificação de uma figura, diminuindo o intervalo de recepção das mesmas e aumentando a taxa instantânea de codificação de quadros.

As conversões de quadros I para P, de quadros P para B e de quadros I para B podem diminuir a quantidade de bits utilizada na codificação da figura sempre que não haja uma mudança de cena entre os quadros. Devido à menor complexidade computacional e à redução de tamanho obtida, a conversão do tipo I para o P é indicada como a mais adequada para evitar situações de *underflow* (Meng & Chang, 1996; Wee & Vasudev, 1997; Wang & Woods, 2000). Esse método, por exigir a decodificação e recodificação parcial do fluxo de vídeo, não é adequado para ser utilizado em aplicações que possuam fortes restrições temporais.

Grandes reduções em bits podem ser obtidas através da conversão de quadro. Porém, a quantidade de bits gerada pela nova figura não é facilmente controlada, o que significa que esse método não é adequado para pequenos ajustes, impossibilitando um ajuste preciso da ocupação do *buffer*. O momento de realização da conversão também é uma variável não controlada externamente, visto depender da seqüência de figuras codificadas no fluxo comprimido. Uma vantagem desse método é que a qualidade visual pode ser mantida.

O descarte de coeficientes DCT, inicialmente descrito em (Meng & Chang, 1996), é uma técnica computacionalmente mais simples de ser aplicada do que a conversão de quadros e consiste na remoção dos coeficientes DCT de mais alta freqüência. Obviamente, esse método impõe uma degradação na qualidade no

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310814/CB

vídeo que, em casos extremos, pode tornar-se incômoda à percepção humana. Por outro lado, uma vez que a escolha dos coeficientes e das figuras em que o método é aplicado pode ser determinada externamente, essa técnica produz um controle preciso da quantidade de bits de uma figura e da ocupação do *buffer*. Essa técnica também tem a vantagem de poder ser aplicada a qualquer figura do fluxo, provendo flexibilidade no ajuste.

A generalização da técnica anterior é a requantização de coeficientes DCT, descrita em (Wee & Vasudev, 1997) e através da qual os coeficientes podem ser codificados com diferentes quantidades de bits, requerendo a modificação da matriz de quantização utilizada. Apesar de também prover boa precisão na manipulação da quantidade de bits, essa técnica exige um poder e tempo de processamento substancialmente superiores ao processo de descarte de coeficientes.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310814/CB

4.2.2.2. Prevenção do *overflow*

Para prevenir a ocorrência de *overflow* do *buffer* de decodificação, as técnicas mais utilizadas são a inserção de bits de enchimento, a conversão do modo de previsão dos quadros e a aplicação de algoritmos de alocação de bits. Essas técnicas visam diminuir a taxa instantânea de codificação de quadros.

A inserção de bits de enchimento, já mencionada em (Meng & Chang, 1996), é a forma mais simples de aumentar a quantidade de bits de uma figura. De acordo com a sintaxe do padrão MPEG-2 de Vídeo, bits de enchimento podem ser adicionados no final de um *slice* ou de uma figura, permitindo um ajuste preciso.

Caso a quantidade de bits que se deseja acrescentar no fluxo for alta, pode-se alterar o modo de predição de figuras, efetuando-se conversões de quadros P para I ou de quadros B para I ou P. Conforme já mencionado, essas transformações exigem operações de decodificação parcial e recodificação, requerendo alto poder de processamento.

Os algoritmos de alocação de bits, tal como o definido pelo TM5, permitem que seja escolhida a quantidade exata de bits a serem utilizados. Como requer o processo completo de decodificação e recodificação, essa técnica não é utilizada em sistemas de ajuste elástico.

4.2.3.
Algoritmo proposto para o controle de ocupação do *buffer*

A proposta desta dissertação para o controle da ocupação do *buffer* utiliza os resultados anunciados nas subseções anteriores, em especial, a análise matemática desenvolvida nesta dissertação. Para tanto, deve-se acompanhar o nível de ocupação do *buffer* de acordo com os quadros presentes no fluxo original e de acordo com os quadros presentes no fluxo após o ajuste elástico. A forma de realização das operações de ajuste também se baseia na observação de que os codificadores, em condições normais, mantêm a ocupação do *buffer* dentro de um intervalo razoavelmente fixo, equilibrando a taxa de entrada de bits com a de consumo pelo decodificador. Tal observação pode ser exemplificada pelas seqüências de vídeo mostradas na Figura 28 (Wee & Vasudev, 1997). Esses gráficos mostram que pequenos acréscimos causados pela inserção ou retirada de um quadro normalmente não ocasionam *overflow* do *buffer*.

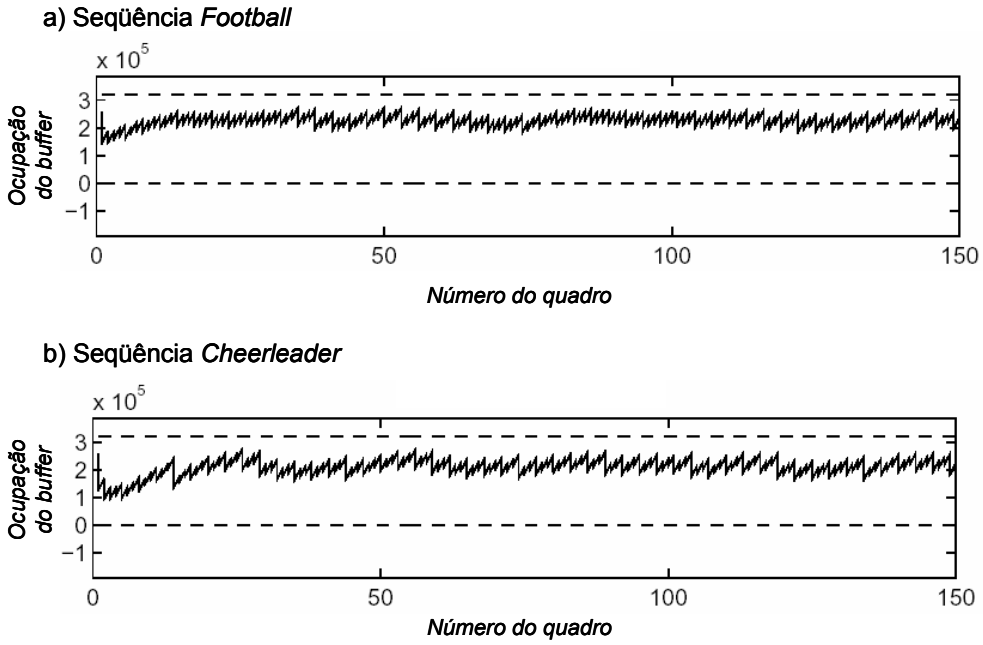

Figura 28: Ocupação do *buffer* em fluxos de vídeo.

Em relação ao tamanho dos quadros inseridos ou descartados, é importante lembrar que sua influência sobre a ocupação do *buffer*, considerando-se a taxa nominal de codificação de quadros, é limitada ao período compreendido entre o instante em que o quadro é inserido ou descartado e o instante em que o quadro inserido é retirado do *buffer* ou o instante em que o quadro descartado seria

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310814/CB

retirado do *buffer*. Esse intervalo de tempo é igual ao *vbv_delay* do quadro inserido ou descartado.

As operações de inserção são realizadas através da duplicação de quadros. O quadro duplicado, no entanto, deve ser manipulado a fim de causar o mínimo impacto na ocupação do *buffer*. Em relação ao seu tamanho, o quadro duplicado deve satisfazer a desigualdade da expressão em (Eq. 23) para garantir que não ocorra *overflow*. A equação (Eq. 24) traz uma condição mais restritiva que garante a não existência de *overflow*. Essa equação mostra que o quadro a ser escolhido para a duplicação deve ser menor que qualquer outro quadro presente no fluxo, no intervalo de tempo entre a inserção do novo quadro e seu consumo pelo decodificador.

Dessa forma, os quadros selecionados para a duplicação são os de tipo B, por, normalmente, apresentarem menor tamanho em relação aos quadros de outros tipos. Obviamente, a escolha criteriosa do quadro a ser duplicado não garante que seja satisfeita a (Eq. 24). A não ocorrência de *overflow* só pode ser garantida através da verificação do nível de ocupação do *buffer* a cada instante de tempo, dentro do intervalo indicado no *vbv_delay*.

Se for verificado que a condição expressa na (Eq. 23) não será satisfeita para algum valor de *k*, deve-se diminuir a quantidade de bits do quadro P_{k-1}, através do descarte de coeficientes, por exemplo. Neste caso, novo período de observação deve ser iniciado, cuja duração é igual ao valor *vbv_delay* da última figura modificada.

Para não causar impacto na taxa média de codificação de quadros, o quadro inserido deve entrar no *buffer* no período de um quadro, ou seja, o tempo necessário para que o quadro seja recebido totalmente no *buffer* deve ser igual ao inverso da taxa nominal de quadros. Se o quadro selecionado para duplicação possuir intervalo de recepção $\Delta t < T$, bits de enchimento devem ser inseridos no quadro. Caso $\Delta t > T$, deve haver retirada de bits de enchimento ou descarte de coeficientes DCT. Dessa forma, evita-se o aparecimento dos efeitos descritos na Subseção 4.2.1.2. Sendo necessária a alteração da quantidade de bits de alguma figura, outro período de observação deve ser iniciado.

As operações de descarte, visando evitar a ocorrência de *overflow*, devem satisfazer a condição expressa na (Eq. 27). Segundo essa expressão, a melhor alternativa é a seleção dos maiores quadros do fluxo. Porém, os quadros com

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310814/CB

maiores tamanhos podem ser do tipo I ou P, cuja retirada pode resultar na necessidade de conversão de tipo e reordenamento de outras figuras do fluxo. Para que quadros do tipo B sejam selecionados para o descarte, é necessária a verificação da condição de prevenção do *overflow* a cada instante de tempo, dentro do intervalo definido no *vbv_delay* da figura retirada. O ajuste deve ser realizado através da retirada de bits de enchimento ou descarte de coeficientes DCT.

Se, durante o período de observação, for verificada a necessidade de modificação da quantidade de bits de alguma figura, novo período de observação deve ser iniciado, com duração igual ao *vbv_delay* da última figura modificada.

Com relação à taxa instantânea de codificação de quadros, deve-se considerar o intervalo de recepção da figura selecionada para o descarte. Caso seu intervalo de recepção seja menor que *T*, quadros posteriores devem ter seu intervalo de recepção reduzido. Se o intervalo de recepção do quadro descartado for maior que *T*, quadros posteriores devem ter seu intervalo de recepção aumentado.

4.3. Sincronização Intra e Intermídia

As operações de ajuste elástico por inserção e descarte de quadros alteram o instante de tempo em que as unidades de informação devem ser decodificadas e apresentadas. Assim, os quadros posteriores a qualquer ponto de edição devem ter os valores de suas marcas de tempo recalculados em função do número de quadros inseridos ou retirados. Essa operação tem por objetivo a manutenção da sincronização intramídia.

Outro problema refere-se à modificação da ordem de multiplexação de pacotes dos fluxos PES, de mídias diferentes, no fluxo de sistema. A reordenação de segmentos de vídeo e áudio deve-se ao processo de comparação entre os instantes de apresentação dos pacotes de cada fluxo elementar e à inclusão, no fluxo de sistema, do pacote PES que tiver o menor valor de marca de tempo. É importante observar que os valores das marcas de tempo dos fluxos elementares de um programa podem ser comparados diretamente, uma vez que são gerados a partir de uma mesma referência de relógio.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310814/CB

Os pacotes PES que não tiverem a marca de tempo podem ter sua posição temporal determinada por interpolação. Infere-se assim que, para evitar a reordenação, cortes ou inserções em um PES devem causar cortes ou inserções no outro PES sincronizado, dentro das mesmas marcas de tempo. Pode ser, entretanto, que isso não seja possível, exigindo a reordenação e o recálculo das marcas de tempo.

4.4. Recuperação da Referência de Relógio

As marcas de tempo inseridas na subcamada Mux, conforme mencionado na Seção 2.1, são utilizadas pelo decodificador para a sincronização de seu relógio local. Essas marcas, PCR ou SCR, indicam o instante de tempo em que o último bit desses campos entra no decodificador do fluxo MPEG de Sistemas e são geradas e extraídas conforme ilustrado na Figura 7. Essa figura indica que as marcas de tempo são retiradas antes que os fluxos elementares (vídeo ou áudio, por exemplo) sejam entregues aos seus respectivos decodificadores. Assim, qualquer perturbação que modifique o instante de chegada das amostras no decodificador do fluxo de sistemas introduz *jitter* no sinal de relógio e dificulta o processo de reconstrução. Os efeitos introduzidos pela rede de comunicação não são considerados pelo padrão MPEG.

Operações de ajuste elástico através de inserção e descarte de quadros prejudicam a recuperação do relógio, pois podem modificar o instante de chegada e o espaçamento entre as amostras da referência de relógio, conforme é exemplificado na Figura 29 para o caso de inserção de quadros. A mudança da quantidade de bits, decorrente do aumento ou diminuição de quadros, entre as amostras de relógio, induzem o relógio do decodificador a funcionar em uma freqüência diferente da utilizada na codificação.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310814/CB

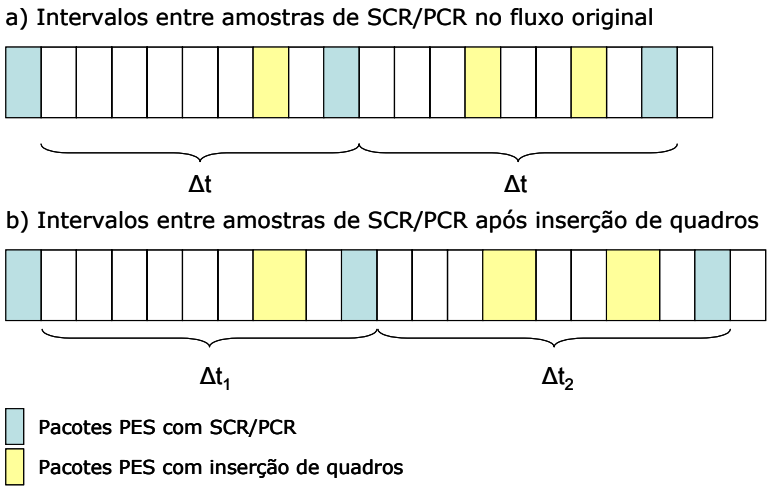

Figura 29: Efeito da inserção de quadros no relógio de referência.

Uma possível solução é a geração de novos valores das amostras do relógio após o ajuste realizado. Nesse caso, seria necessária a recuperação, local, do relógio utilizado pelo codificador. Entretanto, a recuperação via *software* não proporciona uma boa precisão, sendo necessária a utilização de um *hardware* específico.

Outros métodos podem, no entanto, ser adotados e estão relacionados à manutenção do instante de chegada, no decodificador, das amostras do relógio de referência. Aplicando-se a idéia apresentada em (Yu & Nahrstedt, 2002) para o caso do ajuste elástico, tem-se que uma das formas é através da inserção ou retirada de bits de enchimento no fluxo de sistema, mantendo-se a taxa de bits desse fluxo. Bits de enchimento podem ser inseridos em quadros existentes ou ser reunidos em pacotes nulos no fluxo de sistema, que são descartados pelo decodificador. Uma alternativa é através da alteração da taxa de bits de parte do fluxo de sistema, mantendo-se a sua quantidade de bits.

A restrição sobre o espaçamento máximo entre o envio de duas amostras consecutivas da referência de relógio pode exigir que, após a execução de operações de aumento do tempo de exibição de um fluxo, novas amostras, determinadas através da interpolação entre as existentes, devam ser inseridas no fluxo. O cálculo das novas amostras tem que levar em consideração a quantidade de bits acrescida e a taxa de bits do fluxo original.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310814/CB