

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE EDUCAÇÃO FÍSICA  
DEPARTAMENTO DE EDUCAÇÃO MOTORA  
LABORATÓRIO DE INSTRUMENTAÇÃO PARA BIOMECÂNICA**

**TIAGO GUEDES RUSSOMANNO**

**MÉTODO DE SINCRONIZAÇÃO DE CÂMERAS DE VÍDEO  
UTILIZANDO A BANDA DE ÁUDIO**

Campinas, 2005.

**TIAGO GUEDES RUSSOMANNO**

**MÉTODO DE SINCRONIZAÇÃO DE CÂMERAS DE VÍDEO  
UTILIZANDO A BANDA DE ÁUDIO**

Este exemplar corresponde à redação final da dissertação de mestrado defendida pelo aluno Tiago Guedes Russomanno e sob orientação do Prof.Dr. Ricardo Machado Leite de Barros, aprovada pela Comissão Julgadora em 25 de fevereiro de 2005.

---

Dr. Ricardo M. L. Barros

Campinas, 2005.

**FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA  
BIBLIOTECA FEF - UNICAMP**

R921m Russomanno, Tiago Guedes.  
Método de sincronização de câmeras de vídeo utilizando a  
banda de áudio / Tiago Guedes Russomanno. - Campinas, SP: [s.n],  
2005.

Orientadora: Ricardo Machado Leite de Barros  
Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Educação Física,  
Universidade Estadual de Campinas.

1. Sincronização. 2. Câmeras de vídeo. 3. Biomecânica. I.  
Barros, Ricardo Machado Leite de. II. Universidade Estadual de  
Campinas, Faculdade de Educação Física. III. Título.

**Universidade Estadual de Campinas**  
**Faculdade de Educação Física**  
**Departamento de Educação Motora**  
**Laboratório de Instrumentação para Biomecânica**

**Orientador:** \_\_\_\_\_  
Dr. Ricardo M. L. Barros  
FEF/UNICAMP

**Titular:** \_\_\_\_\_  
Dra. Annie France Frere Slaets  
USP/ São Carlos

**Titular:** \_\_\_\_\_  
Dr. Marcos Duarte  
Laboratório de Biofísica /Escola de Educação Física/USP

**Suplente:** \_\_\_\_\_  
Dr. Pascual Jovino Figueroa  
FEF/UNICAMP

## **Dedicatória**

*“O que vale na vida não é o ponto de partida e  
sim a caminhada, Caminhando e semeando,  
no fim terás o que colher.” (Cora Coralina)*

Aos meus pais pelo incentivo e apoio.  
Aos amigos, que sempre estiveram do meu lado.

## **Agradecimentos**

Ao Professor Ricardo Machado Leite de Barros, pela oportunidade e dedicação, paciência e pelas inúmeras correções feitas e pela realização deste trabalho.

Aos professores Marcos, Annie e Pascual pelas sugestões e contribuições.

Aos amigos do laboratório que de uma forma ou outra contribuíram para realização deste trabalho e para a minha formação.

Ao professor René, Barreto e Euclides pelas conversas e ensinamentos.

Aos meus irmãos do LIB, Luciane, Antonio, Olival.

Aos colegas da república que me aturaram todos estes anos

Aos amigos, que me ajudaram e foram amigos em todos os momentos, desde as conversas no bandeirão, as baladas e as noites acordados jogando... e de vez em quando estudando.

E especialmente ao Milton e ao Pascual por tudo que vocês me ajudaram e ensinaram durante este trabalho.

A minha família que sempre me apoiou e esteve do meu lado durante todo o meu trabalho.

Aos funcionários na Faculdade de Educação Física da Unicamp.

A CAPES pelo apoio financeiro recebido.

Método de sincronização de câmeras de vídeo utilizando a banda de áudio.

Aluno: Tiago Guedes Russomanno sob orientação do Prof. Dr. Ricardo Machado Leite de Barros.

## **RESUMO**

Este trabalho propõe e avalia um novo método de sincronização para câmeras de vídeo utilizando a banda de áudio. O método consiste em gerar e transmitir um sinal de áudio através de radiofrequência para receptores conectados a entrada de microfone das câmeras inserindo o sinal na banda de áudio. Em um software, a defasagem temporal entre os sinais é calculada e então é utilizada para interpolar as trajetórias das projeções 2D sincronizadas. A validação do método foi baseada em: 1) Análise da defasagem temporal em função do tempo para dois sinais de vídeos. 2) Comparação entre os valores obtidos por leitura em osciloscópio e no método proposto. 3) Estimativa da melhora na acurácia das medidas de distância entre dois pontos fixados sobre um corpo rígido em movimento aplicando o método proposto. Os resultados mostraram que a defasagem temporal varia lentamente em função do tempo (0.15ms/min) e linearmente. Os valores medidos pelo método proposto e por um osciloscópio mostraram-se equivalentes ( $R^2 = 0.998$ ), o erro médio quadrado da diferença entre as medidas foi de 0.10 ms e a máxima diferença encontrada foi de 0.31 ms. Aplicando-se o novo método, a acurácia na reconstrução 3D teve uma melhora significativa. A acurácia, a simplicidade e a ampla aplicabilidade do método constituem a principal contribuição deste trabalho.

Método de sincronização de câmeras de vídeo utilizando a banda de áudio.

Aluno: Tiago Guedes Russomanno sob orientação do Prof. Dr. Ricardo Machado Leite de Barros.

## **ABSTRACT**

This work proposes and evaluates a novel method for synchronisation of video cameras using the audio band. The method consists in generating and transmitting an audio signal through radio frequency for receivers connected to the microphone input of the cameras and inserting the signal in the audio band. In a software environment, the phase differences among the video signals are calculated and used to interpolate the synchronous 2D projections of the trajectories. The validation of the method was based on: 1) Analysis of the phase difference changes in function of time of two video signals. 2) Comparison between the values measured with an oscilloscope and by the proposed method. 3) Estimate of the improvement in the accuracy in the measurements of the distance between two markers mounted on a rigid body during movement applying the method. The results showed that the phase difference changes in time slowly (0.150 ms/min) and linearly, even when the same model of cameras are used. The values measured by the proposed method and by oscilloscope showed equivalence ( $R^2 = 0.998$ ), the root mean square of the difference between the measurements was 0.10 ms and the maximum difference found was 0.31 ms. Applying the new method, the accuracy of the 3D reconstruction had a statistically significant improvement. The accuracy, simplicity and wide applicability of the proposed method constitute the main contributions of this work.

*Keywords: Synchronisation, Methods, Video Cameras, Biomechanics, videogrammetry.*

## Sumário

RESUMO .....	xi
ABSTRACT .....	xiii
Sumário.....	xv
Lista de Figuras .....	xvii
Introdução.....	1
Objetivo .....	4
Capítulo 1 Tópicos em videogrametria .....	5
1.1 Breve histórico.....	5
1.2 Leitura dos campos.....	7
1.3 Registro em vídeo.....	8
1.4 Resolução espacial.....	12
1.5 Resolução temporal .....	12
1.6 Tempo de exposição (shutter).....	12
Revisão de Literatura.....	14
2 Métodos de sincronização para Biomecânica.....	14
2.1 Métodos de sincronização interframes .....	15
2.2 Métodos de sincronização intraframes .....	17
Capítulo 3 .....	20
3 Metodologia.....	20
3.1 Proposição .....	22
3.2 Implementação .....	23
3.2.1 Geração do sinal .....	23
3.2.2 Transmissão .....	25
3.2.3 Aquisição .....	26
3.2.4 Identificação por software do sinal.....	27
3.2.5 Sincronização Interframes.....	30
3.2.6 Sincronização intraframes .....	33
3.2.7 Correção da defasagem temporal .....	36
Capítulo 4 .....	37
4 Validação do método.....	37
4.1 1º Experimento: modelo de defasagem temporal .....	37
4.2 2º Experimento: comparação entre os métodos.....	39
4.3 3º Experimento: Efeitos da sincronização sobre a reconstrução 3D de coordenadas.....	42
Capítulo 5 .....	45
5 Discussão.....	45
Conclusão .....	47
Bibliografia.....	48

## Lista de Figuras

Figura 1: Representação dos pixels numa imagem .....	6
Figura 2: CCD visto em um microscópio e um chip contendo um CCD.....	9
Figura 3: Esquema de funcionamento de um CCD FT (THORPE, 1997, p.26) .....	10
Figura 4: Esquema de funcionamento de um CCD IT (THORPE, 1997, p.27) .....	10
Figura 5: Esquema de funcionamento de um CCD FIT (THORPE, 1997, p.27).....	11
Figura 6: Gráfico referente aos valores da altura do sinal de áudio .....	23
Figura 7: Seqüência do sinal de áudio.....	24
Figura 8: Sistema de captura .....	26
Figura 9 :Software Dvideow exibindo arquivo de imagens com os registros de vídeo e áudio.....	27
Figura 10 :Sinal encontrado pelo programa .....	28
Figura 11: Sinal identificado .....	28
Figura 12:Leitura do sinal de áudio identificando o número do sinal e sua defasagem temporal.....	29
Figura 13 : Câmeras 1 e 2 carregadas no programa .....	30
Figura 14:Câmeras 1 e 2 carregadas com o sinal de áudio.....	31
Figura 15 : Menu para a sincronização interframes .....	31
Figura 16: Seqüência de informações dadas pelo programa referentes ao numero do sinal de áudio identificado e suas respectivas defasagens. ....	32
Figura 17: Defasagem temporal entre duas câmeras .....	33
Figura 18: Menu de acesso para sincronização intraframes .....	34
Figura 19: Caixa de dialogo para sincronização intraframe .....	35
Figura 20: 1º experimento .....	37
Figura 21: Regressão linear da defasagem temporal em função do tempo de dois sinais de vídeos medidos em um osciloscópio. ....	39
Figura 22:Esquema experimental .....	40
Figura 23: Comparação das medidas de defasagem temporal entre dois sinais de vídeos obtidas utilizando um osciloscópio ( Método I) e pelo método de sincronização proposto ( Método II) .....	41
Figura 24: Distribuição dos resíduos em torno da media e dos desvio padrão .....	42
Figura 25: Barra rígida com marcadores planares.....	43
Figura 26: Distribuição dos valores de distância entre dois marcadores fixados sobre um corpo rígido, com um field de sincronização( não sincronizado) e após a aplicação do método proposto de sincronização (MII).....	44

## Introdução

O movimento humano é objeto de estudo de diversas áreas da ciência. Neste sentido a biomecânica tem desenvolvido pesquisas que buscam obter dados quantitativos referentes ao movimento humano, seja este movimento no dia-a-dia ou no esporte.

Dentre as metodologias utilizadas na biomecânica, a videogrametria é uma das técnicas bastante difundidas e consiste na utilização de câmeras de vídeo para registro de imagens para análise cinemática de movimentos humanos. Através da cinemática pode-se obter variáveis como posição, velocidade e aceleração. Essas variáveis são obtidas através da aquisição de imagens registradas em câmeras de vídeo. As imagens obtidas são utilizados para se obter informações 3D, para isso é necessário à utilização de pelo menos duas câmeras e que os registros dessas câmeras sejam simultâneos.

Um dos problemas no uso da videogrametria para reconstrução 3D de movimentos está em garantir a simultaneidade entre os registros das câmeras, uma vez que a maioria das câmeras convencionais existentes no mercado não permite sincronização externa. A falta de sincronização entre câmeras convencionais provém da defasagem temporal existente entre elas, que é a diferença em tempo entre os registros feitos por cada uma das câmeras, em um dado instante  $t$ . A defasagem temporal  $\Delta T$  entre dois sinais de vídeo tem basicamente duas causas.

A primeira decorre da impossibilidade (dificuldade) de se inicializar os registros das câmeras no mesmo instante, o que origina um retardo ou avanço nos registros das câmeras.

A segunda decorre da possível diferença na frequência de aquisição das câmeras, sendo que este efeito pode induzir mudanças contínuas na defasagem temporal entre as

câmeras. Para este problema de defasagem temporal, existem basicamente dois tipos de solução. A primeira é a chamada sincronização por hardware. Esta solução implica que as câmeras sejam controladas por um único dispositivo externo (genlock), que garante a inicialização simultânea das câmeras e que elas operem na mesma frequência durante toda a aquisição. Contudo, esta solução só se aplica a câmeras especiais ou profissionais. Genlock é o termo referente a uma técnica na qual a saída de um sistema é utilizada para sincronizar o outro sistema. Quando dois sistemas estão sincronizados dessa maneira usa-se o termo genlock.

A segunda solução é a sincronização por software. Este procedimento exige a determinação dos parâmetros para sincronização entre os registros e a geração por interpolação matemática das posições intermediárias nas trajetórias das projeções de interesse, obtendo-se as coordenadas simultâneas entre as seqüências de imagens.

A utilização de câmeras convencionais para análise cinemática 3D de movimentos humanos, necessita de métodos de sincronização para garantir uma melhor acurácia nos resultados.

Em função das características das câmeras, este trabalho propõe e avalia um novo método genérico e acurado de sincronização de câmeras de vídeo aplicável a qualquer tipo de câmera que possua entrada de áudio sincronizada com vídeo. O método de sincronização desenvolvido neste trabalho foi implementado no sistema para análise cinemática de movimento humano Dvideow (Barros et al. 1999) que será descrito nos próximos capítulos e está organizado da seguinte forma:

O primeiro capítulo é sobre conceitos de videogrametria e funcionamento de câmeras de vídeo, o segundo capítulo é uma revisão bibliográfica sobre os métodos de sincronização e está dividido em duas partes: a) métodos de sincronização interframes, com

acurácia maior que 1 sobre a frequência de amostragem. b) métodos de sincronização intraframes, com acurácia menor que 1 sobre a frequência de amostragem. O terceiro capítulo trata da descrição da metodologia adotada no trabalho, relacionada a procedimentos de medição, aquisição, calibração e reconstrução. O quarto capítulo trata da validação do método desenvolvido, através da realização de 3 experimentos independentes, os quais são descritos sua respectivas metodologias e resultados alcançados.

## **Objetivo**

Este trabalho consistiu em desenvolver e avaliar um novo método genérico e acurado de sincronização para câmeras de vídeo.

Os objetivos específicos foram:

1. Analisar e propor um modelo para a variação da defasagem temporal entre câmeras em função do tempo.
2. Validar o método proposto, comparando as medidas obtidas com as medidas em osciloscópio.
3. Estimar a melhora na acurácia das medidas de distâncias entre dois marcadores em ambiente controlado aplicando o método proposto.

## Capítulo 1 Tópicos em videogrametria

Este capítulo tem por objetivo esclarecer aspectos referentes a videogrametria, uma vez que a videogrametria é a ferramenta base da análise cinemática tridimensional de movimentos humanos, que por sua vez é feita através de câmeras de vídeo. Os conceitos norteadores sobre o funcionamento de câmeras e sua operação são de suma importância para a análise cinemática tridimensional.

Os tópicos apresentados neste capítulo estão relacionados ao registro em vídeo, à resolução espacial, à resolução temporal, ao tempo de exposição (“shutter”) e à câmera de vídeo digital.

### 1.1 Breve histórico

As primeiras câmeras de vídeo comerciais coloridas foram aprovadas pela FCC (*Federal Communications Commission*) em 1952 para as redes de televisão. Estas câmeras utilizavam tubos de vácuo, sendo em sua grande maioria instáveis, impedindo assim a difusão destas câmeras. Somente em 1960 com a utilização de transistores estáveis *Pumblicon*, as câmeras branco e preto começaram a ser substituídas pelas câmeras coloridas.

Durante os últimos 40 anos, muito foi feito para tornar as câmeras de vídeo menores, mais leves e estáveis, com uma significativa melhora na sensibilidade e na sua resolução. Isso tudo foi realizado graças aos avanços tecnológicos no desenvolvimento de lentes, circuitos integrados e microprocessadores. Todo este desenvolvimento resultou nas atuais

câmeras de vídeo comerciais existentes no mercado, que são utilizadas para as mais diversas funções.

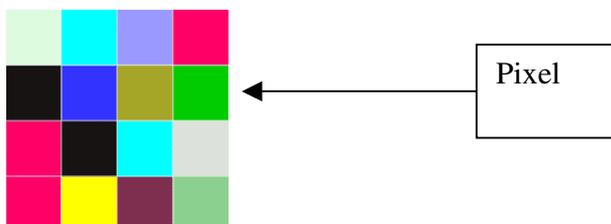
A câmera de vídeo foi o primeiro sistema eletrônico a converter uma imagem em sinais elétricos, codificando, transmitindo e exibindo uma imagem original em um local remoto.

Toda a tecnologia é baseada na conversão dos raios de luz de um objeto para sinais elétricos, que são armazenados ou transmitidos e posteriormente exibidos em uma tela.

Este processo de conversão é dotado de:

- Análise da imagem através de um equipamento fotoelétrico que varre horizontalmente a imagem do início ao fim, produzindo um sinal elétrico no qual os valores de brilho e cor de cada pixel são representados por níveis diferentes de voltagem no sinal de vídeo.
- Transmissão dos valores de cada pixel em seqüência em níveis de voltagem de um sinal de vídeo.
- Reprodução da imagem original a partir do sinal de vídeo.

Na câmera, uma imagem é formada por um quadro que é composto por um mosaico de pontos, estes pontos são os pixels (picture element). Um pixel é definido como a menor área na imagem, que pode ser transmitida.



**Figura 1: Representação dos pixels numa imagem**

## 1.2 Leitura dos campos

Quando o padrão NTSC foi criado, o registro das 525 linhas que compõem a imagem não era realizado simultaneamente, pois a tecnologia adotada na época não era capaz de captar, transmitir e exibir toda a informação de imagem de uma única vez. A solução encontrada consistiu em captar primeiramente as linhas pares e depois as linhas ímpares.

Sendo assim, as cargas elétricas na imagem padrão da câmera são convertidas em um sinal de vídeo, numa seqüência de elementos de imagens durante o processo de leitura. No final de cada linha horizontal varrida o sinal de vídeo fica em espaço em branco enquanto o feixe de leitura retorna rapidamente para o lado esquerdo da imagem e começa ler próxima linha. Este processo é contínuo e é realizado até que a imagem seja totalmente lida de cima a baixo para completar um campo lido.

Após a conclusão da varredura do primeiro campo, o feixe de leitura retorna para o ponto central da última linha lida, e volta para o topo onde o processo se repete para varrer o segundo campo da imagem.

Devido à defasagem de meia linha no início da varredura do segundo campo, as linhas do segundo campo encontram-se entre as linhas do primeiro campo. Desta maneira as linhas varridas dos dois campos estão entrelaçadas. Os dois campos entrelaçados constituem um único quadro da imagem.

O padrão de imagem adotado com dois campos formando um quadro é originário do padrão inicial de televisão monocromático de 525 linhas, que foi mantido no sistema colorido por recomendação da *National Television System Committee* (NTSC) no início dos anos 50. Em 1953 a FCC (*Federal Communications Commission*) especificou que o sistema de varredura das 525 linhas que então formavam a imagem de televisão, era constituído por

dois campos entrelaçados de 262,5 linhas por campo, numa frequência de 59,94 Hz. Na qual 42 linhas das 525 presentes em cada quadro ficam reservadas para a transmissão do sinal de sincronização vertical do sinal de vídeo. O que resulta em 483 linhas visíveis em uma imagem.

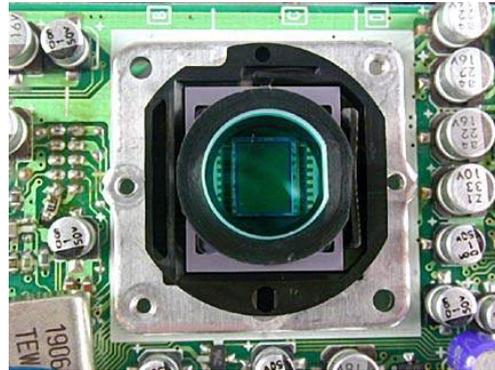
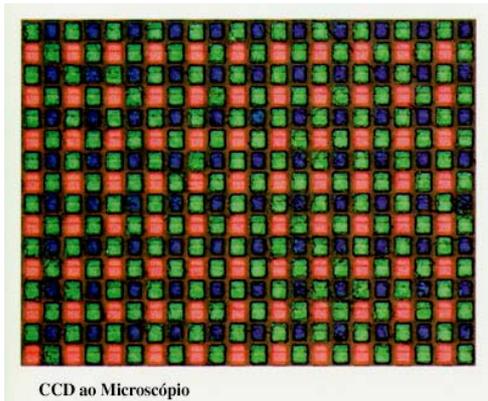
### **1.3 Registro em vídeo**

A imagem de vídeo para câmeras no padrão NTSC é formada por 525 linhas horizontais, sendo que cada linha é formada por 720 pixels (do inglês picture element – elemento de imagem). Este elemento de imagem armazena informações referentes ao brilho da imagem naquele ponto e também sobre a quantidade das três cores primárias que constituem a cor dele. As três cores primárias são: verde, vermelho e azul, abreviadas pela sigla RGB.

O registro da imagem na câmera é feito por um dispositivo óptico eletrônico, um transdutor que é capaz de converter fótons (luz) em elétrons (eletricidade).

Este dispositivo é o CCD (Charge-Coupled-Device – Dispositivo de Carga Acoplada), que é um “chip” que suporta e transfere cargas elétricas em função da quantidade de luz que atinge suas células fotossensíveis.

Cada um dos pontos sensíveis à luz assemelha-se a uma pastilha em um mosaico de pastilhas de mesmo tamanho alinhadas simetricamente lado a lado e recebe o nome de pixel. Como cada pixel ocupa uma determinada área da imagem, para a qual é medida uniformemente a intensidade luminosa, quanto mais pixels no CCD maior o detalhamento da imagem registrada.



**Figura 2: CCD visto em um microscópio e um chip contendo um CCD.**

Existem três tipos de CCD: *Frame Transfer (FT)*, *Interline Transfer (IT)*, *Frame Interline Transfer (FIT)*.

- *Frame Transfer*: Foi o primeiro CCD desenvolvido, ele é um chip formado por dois sensores, sendo que o primeiro sensor fica exposto a imagem produzida pela objetiva, enquanto o outro sensor fica protegido para não receber a luz e é usado para armazenar a informação elétrica gerada pelo primeiro sensor. Entre os dois sensores existe um obturador mecânico que bloqueia a luz deixando ela só atingir o chip no momento da captação. Este tipo de CCD tem a vantagem de lidar bem com fontes de luz intensas e como só os sensores recebem luz, os pixels podem ser maiores aumentando assim a sensibilidade da câmera.



Figura 3: Esquema de funcionamento de um CCD FT (THORPE, 1997, p.26)

- *Interline Transfer:* Este tipo de CCD tem sensores que tem a função de receber a imagem. As áreas de armazenamento estão situadas verticalmente entre os sensores e são mascaradas para evitar que luzes residuais as atinjam. Este tipo de arranjo faz com que os sensores sejam um pouco menores que os CCD FT, e conseqüentemente, menos sensíveis.

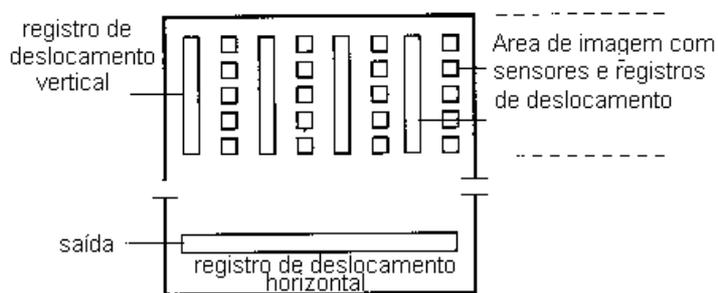
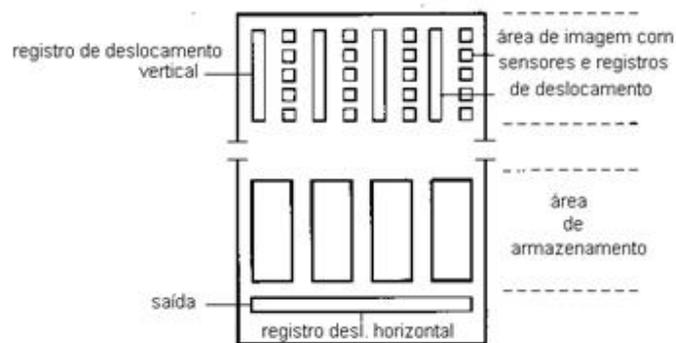


Figura 4: Esquema de funcionamento de um CCD IT (THORPE, 1997, p.27)

- *Frame Interline Transfer*: Este tipo de CCD é muito similar ao IT, exceto pela duração do apagamento vertical quando duas transferências de cargas elétricas tem lugar, ao invés de uma. Isto faz com que o tempo de transferência do FIT seja de até 40 vezes mais rápido que o IT. Esta característica permite a obturação eletrônica da câmera, ou seja, este tipo de CCD permite a utilização do shutter eletrônico que armazena informação luminosa por um curto período de tempo.



**Figura 5: Esquema de funcionamento de um CCD FIT (THORPE, 1997, p.27)**

## **1.4 Resolução espacial**

A resolução espacial é uma medida da definição ou grau de detalhes de uma imagem e é definida em termos de largura e altura da imagem. Assim, quanto maior for quantidade de "pixels" para representar uma imagem, maior será a resolução espacial. Ou seja, possibilita um maior detalhe e nitidez da imagem.

## **1.5 Resolução temporal**

A resolução temporal máxima de uma câmera de vídeo é determinada pelo inverso da frequência de aquisição da câmera. É a propriedade da câmera em distinguir temporalmente dois eventos seqüenciais. No sistema NTSC, o tempo gasto para a leitura da matriz de fotossensores de um campo é de 1/59.9 s. Em seguida, a informação sobre a luminosidade acumulada é transformada em um sinal de vídeo.

## **1.6 Tempo de exposição (shutter)**

A câmera de vídeo possui um dispositivo para controlar o tempo de acumulação de luz no CCD que funciona analogamente a um obturador de uma câmera fotográfica. Ou seja, controla o intervalo de tempo em que a imagem é exposta para que os fótons sejam coletados pelo CCD e para que se inicie novamente o ciclo de exposição.

Ao contrário das máquinas fotográficas tradicionais, onde o obturador é um dispositivo mecânico, com lâminas móveis que se abrem e fecham rapidamente para expor

o filme, na câmera de vídeo, embora o nome tenha sido mantido, o obturador é um dispositivo eletrônico. Na realidade, o que faz o obturador funcionar na câmera de vídeo é uma função eletrônica de 'apagamento': uma corrente elétrica, denominada corrente de *purge* (apagar) percorre as linhas do CCD um pouco antes do ponto em que o mesmo está sendo lido, e esta distância é que permite o controle de uma menor ou maior exposição do CCD. Como este controle é eletrônico, não possui partes móveis, é possível obter-se velocidades elevadas de obturação (1/10.000 s., por exemplo), o que permite nas câmeras que possuem esse recurso 'congelar' com facilidade uma imagem em movimento rápido.

A regulagem do “shutter” é realizada em função da velocidade do evento a ser registrado. Assim, num evento como uma caminhada que é de baixa velocidade, o tempo de exposição pode ser longo, no máximo(1/60s). No entanto, num evento como na tacada de golfe que é de alta velocidade, o tempo de exposição deve ser curto para que a imagem não fique borrada.

## **Revisão de Literatura**

### **2 Métodos de sincronização para Biomecânica**

O desenvolvimento de métodos de sincronização para câmeras de vídeo para sistemas de análise cinemática 3D tem sido objeto de pesquisas na área de Biomecânica.

Considerando os trabalhos sobre metodologias para sincronização de câmeras de vídeo para análise cinemática 3D, a revisão de literatura neste trabalho foi dividida em duas partes.

- Métodos de sincronização interframes: são métodos utilizados para sincronização temporal das câmeras de vídeo, que permitem uma sincronização com erros maiores que  $1/60s$ .
- Métodos de sincronização intraframes: são métodos de sincronização utilizados para sincronização de câmeras de vídeo que permitem uma sincronização mais acurada com erros menores que  $1/60s$ .

## 2.1 Métodos de sincronização interframes

Blievernicht (1967) desenvolveu um equipamento para sincronizar registros cinematográficos. Este equipamento consistia em um temporizador (um relógio com resolução temporal de 0.005s) que era colocado no local da coleta de dados e enquadrado por cada uma das câmeras. Feito os registros, as imagens eram então analisadas e para cada seqüência de imagem havia um registro de tempo dado pelo temporizador, possibilitando calcular a defasagem temporal entre as câmeras a partir do tempo registrado.

A sincronização era feita através da utilização destes tempos encontrados como referência para aproximar temporalmente um quadro de uma câmera com o quadro de uma outra. As informações referentes à defasagem temporal não eram utilizadas para corrigir os dados.

Walton (1970) desenvolveu um equipamento para sincronização em cinematografia, que consistiu em um conjunto de "led" (Light Emitting Diodes), dispostos em seqüência sobre uma base, que pulsavam a uma freqüência de 1000 Hz. Durante o experimento, o equipamento foi colocado no local da coleta de dados de tal forma que era enquadrado pelas duas câmeras.

A informação do conjunto de "leds" presente nas duas seqüências de imagens possibilitou ao autor verificar a defasagem temporal e, com isto, realizar a sincronização. Apesar da alta freqüência do equipamento, seus resultados só conseguiram aproximar temporalmente um quadro de uma câmera em relação ao outro.

Miller et. al. (1980) desenvolveu um equipamento formado por uma manivela fixada em motor elétrico que girava. Cada vez que a manivela completava uma rotação em torno de seu eixo um diodo era aceso por um circuito elétrico.

Utilizando duas câmeras foi feito o registro da manivela em movimento utilizando a luz emitida pelo diodo como evento comum para sincronizar os registros de seu experimento. Os resultados alcançados com este método eram dependentes da velocidade de rotação da manivela que acionava o diodo e da resolução temporal das câmeras em registrar a luz emitida pelo diodo. A sincronização foi feita através da observação do momento em que o diodo se acendia em cada um dos registros pegando o primeiro sinal de luz como referência para sincronizar as câmeras.

Mann et. al. (1983) utilizou o sistema SELSPOT I (Selective Electronics AB, Partille, Sweden) que é constituído por um conjunto de 30 LEDs (Light Emitting Diodes) e por câmeras infravermelha (315 Hz de frequência de aquisição) e uma unidade de controle dos LEDs. Esta unidade de controle aciona seqüencialmente cada LED, que ficam ativos durante 50 micro segundos. Uma vez que a frequência de pulso dos LEDs é conhecida, a sincronização torna-se possível devido à determinação da defasagem temporal entre as câmeras.

Degueurce et. al. (1996) em seu trabalho sobre análise da locomoção de cavalos em ambientes externos utilizou 4 câmeras, modelo Sony FX700. A análise dos registros das câmeras foi realizada a 50 quadros por segundo e durante a coleta de dados foi utilizado um shutter de 1ms. No início de cada coleta uma lâmpada comum de 60W foi acesa, marcando o início de cada coleta. Sabendo que o filamento da lâmpada permanecia aceso por 20ms os registros feitos para cada coleta de dados foram sincronizados utilizando a informação luminosa registrada em cada uma das câmeras. Alcançando assim uma sincronização com um erro maior que 1/50s.

## 2.2 Métodos de sincronização intraframes

Capozzo et. al.(1983) desenvolveu um sistema de análise cinemática denominado CoSTEL. Nesse sistema, era utilizado leds que pulsavam numa frequência conhecida para encontrar os quadros equivalentes em cada câmera. Uma vez encontrados os quadros os registros feitos pelos CCD das câmeras eram interpolados, e a informação sobre a defasagem entre os registros era usada para encontrar os registros virtuais (criados por interpolação) simultâneos.

Yeadon (1989) desenvolveu um método de sincronização utilizando interpolação por “spline”. Ele assumia que em uma trajetória conhecida, salto com esqui, pode-se encontrar trechos onde é possível relacionar uma razão entre os deslocamentos das projeções dos raios de luz captados por cada câmera, em um determinado plano, com a defasagem entre os registros. Uma vez encontrado estes valores de defasagem temporal os dados de uma câmera são interpolados e então reconstruídos com a outra câmera.

Barros et.al.(1993) propôs um método de sincronização para câmeras de vídeo não sincronizadas para descrição 3D de movimentos humanos. Sabendo que os principais problemas na utilização de câmeras de vídeo não sincronizadas, estão em que os registros de imagem não se iniciam ao mesmo tempo e que também existe uma possível diferença de frequência entre as câmeras de vídeo.

O método desenvolvido nesse trabalho realizou a sincronização de imagens posteriormente através da interpolação das projeções de uma seqüência de imagens. Aplicando um processo de otimização para determinar a defasagem temporal inicial entre os registros. Comparando os resultados esperados com os obtidos na reconstrução das trajetórias de uma bola de tênis em queda livre, concluiu-se que o desvio padrão para a

posição tanto no plano horizontal como no vertical era de 4.6mm. Considerando que as câmeras estavam a aproximadamente 12 m do local, a precisão foi satisfatória e a estimativa experimental para a aceleração da gravidade foi  $g = 9.87\text{m/s}^2$ .

Barros et al. (1997) propôs uma solução baseada na utilização de um sinal elétrico, que era somado simultaneamente aos sinais de vídeo de cada câmera, uma vez conhecido o tempo de formação de cada linha e o número de linhas na imagem, era identificado e medido a posição deste sinal nas imagens, fazendo-se a diferença em número de linhas dos valores obtidos para cada câmera, calculava-se a defasagem temporal entre as câmeras sempre tomando uma das câmeras como referência.

Yeadon et. al.(1999) apresentou um método para a sincronização de seqüências de imagens de vídeo utilizando uma aproximação matemática baseada em técnicas de reconstrução por DLT. O método foi testado utilizando 2 câmeras Sony com genlock, com frequência de 50Hz. Foram analisados os movimentos de ginastas em 4 diferentes aparelhos, em cada ginasta foram fixados 15 marcadores.

Os dados obtidos referentes a cada seqüência de imagem foram ajustados por uma spline para obter os valores interpolados para diferentes defasagens temporais. O genlock das câmeras foi utilizado como base de referência para sincronizar as câmeras. O erro médio da sincronização entre as câmeras foi de 2ms.

Pourcelot (2000) descreve um método que permite a sincronização de múltiplas câmeras. Primeiramente, as câmeras são sincronizadas por um evento comum, no caso o acender e apagar de uma lâmpada. Depois, é utilizado um método numérico, para estimar a defasagem e então sincronizar as imagens gravadas das câmeras.

A sincronização das câmeras pelo método numérico é feita para cada seqüência de imagens. Essa sincronização foi conduzida da seguinte forma. Uma câmera foi escolhida

como referência e as outras foram sincronizadas. Para sincronizar uma câmera com a de referência (chamadas respectivamente de escrava e mestre), diferentes valores de defasagem temporal entre as câmeras foram testados. Os testes eram feitos, calculando-se para cada câmera, a localização 2D dos marcadores interpolados utilizando uma função “spline” cúbica. O valor de defasagem temporal corresponde ao menor valor médio de erro no DLT Abdel-Aziz e Karara (1971), que é então utilizado para sincronizar ambas as seqüências gravadas, calculando, para câmera escrava a coordenada 2D interpolada dos marcadores utilizando uma função spline cúbica.

Kang et al. (2002) apresentou uma solução baseada em minimização das distâncias entre as trajetórias como parâmetro para sincronizar as câmeras de vídeo.

Os métodos baseados na visualização simultânea de eventos em todas as câmeras têm a restrição de interferirem no ambiente de coleta, sendo inadequadas em diversas situações experimentais. O uso de dispositivos eletrônicos implica na conexão de cabos e inutilizam parte da imagem, além de, na maioria dos casos, estar restrito a uma resolução temporal máxima de 1 ms.

As soluções baseadas na otimização de parâmetros como trajetória ou resíduos das equações de reconstrução do método DLT, são influenciadas pelos efeitos dos erros experimentais, não podendo ser aplicados a qualquer tipo de experimento. Em todas as soluções a utilização de um número maior de câmeras dificulta a aplicação do método. Além disso, caso haja a necessidade de sincronização com outro sistema de medição, dinamometria ou eletromiografia, é necessário um novo sistema de sincronização.

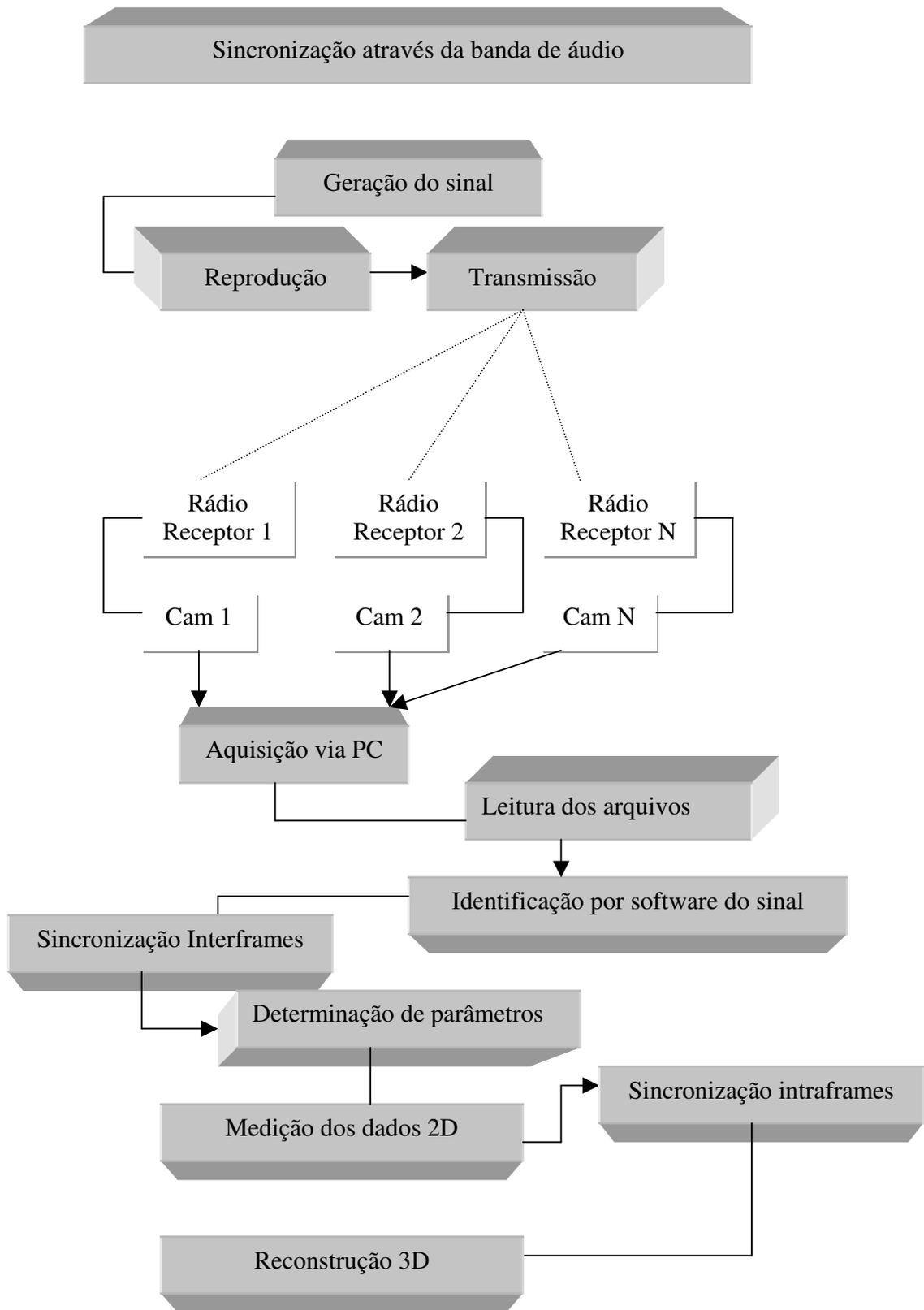
## Capítulo 3

### 3 Metodologia

O método de sincronização desenvolvido neste trabalho está integrado ao sistema de análise cinemática Dvideow, que foi desenvolvido no Laboratório de Instrumentação para Biomecânica na Faculdade de Educação Física da Unicamp com a finalidade de possibilitar a análise cinemática de movimentos humanos.

O diagrama de blocos apresentado a seguir mostra como o método de sincronização foi proposto e como foi implementado no sistema Dvideow.

No entanto a sincronização é independente, podendo ser utilizado em qualquer sistema que utilize câmeras de vídeo que permitam a utilização da banda de áudio para sincronização.



Esta parte do trabalho esta organizada em duas partes, a primeira parte é a proposta do método e a segunda é como o método foi implementado no sistema Dvideow.

### **3.1 Proposição**

O método proposto de sincronização de câmeras de vídeo através da banda de áudio consistiu em:

- a)* Geração e gravação de um sinal de áudio na forma de uma seqüência de pulsos em um CD-R..
- b)* Transmissão do sinal de áudio através de radiofrequência. Os sinais são recepcionados por rádio-receptores (rádios ) conectados a entrada de microfone de cada câmera
- c)* Captura dos sinais de vídeo e áudio das câmeras para o formato de arquivo áudio e vídeo “Interleaved” (AVI). Onde estes arquivos contem os fluxos de áudio e vídeo relacionados à mesma linha de tempo.
- d)* Identificação das posições dos códigos de áudio na linha de tempo por software para cada fluxo de dados. Considerando que os códigos são inseridos simultaneamente, e que áudio e vídeo estão sincronizados para cada arquivo, A defasagem temporal entre os vídeos na linha de tempo corresponde a posição do áudio em cada arquivo.
- e)* Sincronização intraframe utilizando as coordenadas 2D medidas. As projeções simultâneas para cada ponto são encontradas através de interpolação utilizando a defasagem temporal entre os arquivos.
- f)* Reconstrução 3D das coordenadas utilizando as projeções sincronizadas. A reconstrução foi baseada no método do DLT Abdel-Aziz et al.(1971).

## 3.2 Implementação

Esta parte do trabalho tem por objetivo explicar como o método de sincronização foi implementado, baseado na proposta do método.

### 3.2.1 Geração do sinal

Para a sincronização das câmeras de vídeo através da banda de áudio, foi gerado um sinal de áudio para ser transmitido e recepcionado pelas câmeras.

Este sinal foi construído em ambiente Matlab na forma de uma seqüência de pulsos (uma onda quadrada). Para a construção dessa seqüência de pulsos foi gerado um vetor constituído por amostras de números (no caso foram utilizados os números 0 e 255). Estes números determinam a altura, sendo 0 a altura mínima e 255 a máxima do pulso e a largura é determinada pelo número de amostras do número 255 que aparecem em um pulso.

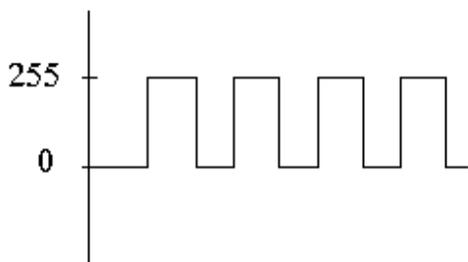


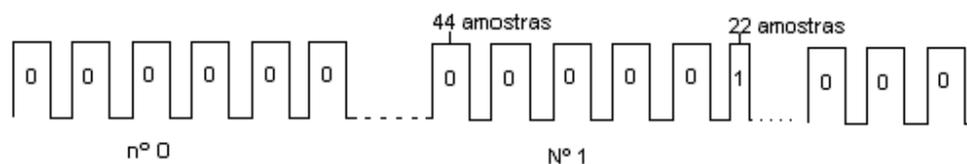
Figura 6: Gráfico referente aos valores da altura do sinal de áudio

Determinada a altura do pulso, a sua largura foi construída da seguinte forma:

22 amostras representam um bit 1; 

44 amostras representam um bit 0; 

Com essa configuração o sinal foi construído com seqüências de 6 bits, que representam os números de 0 a 59.



**Figura 7: Seqüência do sinal de áudio**

Este sinal gerado foi convertido em ambiente Matlab para o formato de um arquivo de som, do tipo wave 'wav' e foi gravado a 44kHz utilizando um código com incrementos de 8 bits, com uma duração total de 59 minutos..

O arquivo de som contendo o sinal de áudio foi então gravado em um CD para facilitar a sua reprodução, podendo ser reproduzida em um CD "player" comum, facilitando assim a utilização desta metodologia, por não depender de recursos computacionais para reproduzir o sinal.

### **3.2.2 Transmissão**

No caso deste trabalho a transmissão do sinal foi feita via radiofrequência através de um transmissor de frequência modulada de baixa potência, com um alcance de aproximadamente 1 Km.

O sinal é transmitido para receptores ( rádios FM) conectados por cabos de áudio a entrada de microfone de cada uma das câmeras utilizadas no sistema. Uma vez conectados a entrada de microfone das câmeras, estas desabilitam outros microfones externos, impedindo a entrada de áudio por outros canais.

### 3.2.3 Aquisição

A aquisição foi feita através de câmeras de vídeo digital modelo JVC GRV9500 padrão NTSC, as câmeras são conectadas a microcomputadores via cabos firewire padrão IEEE1394. Para gerenciamento da captura é utilizado o sistema de análise Dvideow Figueroa et al. (2003), onde a captura de áudio e vídeo das câmeras é armazenada no formato de arquivo áudio e vídeo “*interleaved*” (AVI), estes arquivos contém o fluxo de áudio e vídeo relacionados à mesma linha de tempo. O sistema gerencia o início da captura dos registros em cada câmera através de um sistema de gerenciamento mestre-escravo através da rede local do laboratório. A frequência de amostragem foi de 30 quadros por segundo. Para a análise dos dados as seqüências imagens das câmeras os registros foram desentrelaçados, obtendo assim uma frequência de 60 campos por segundo.

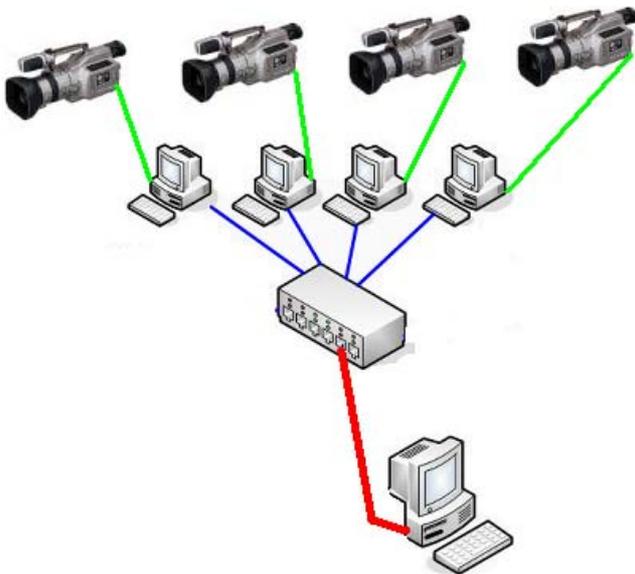
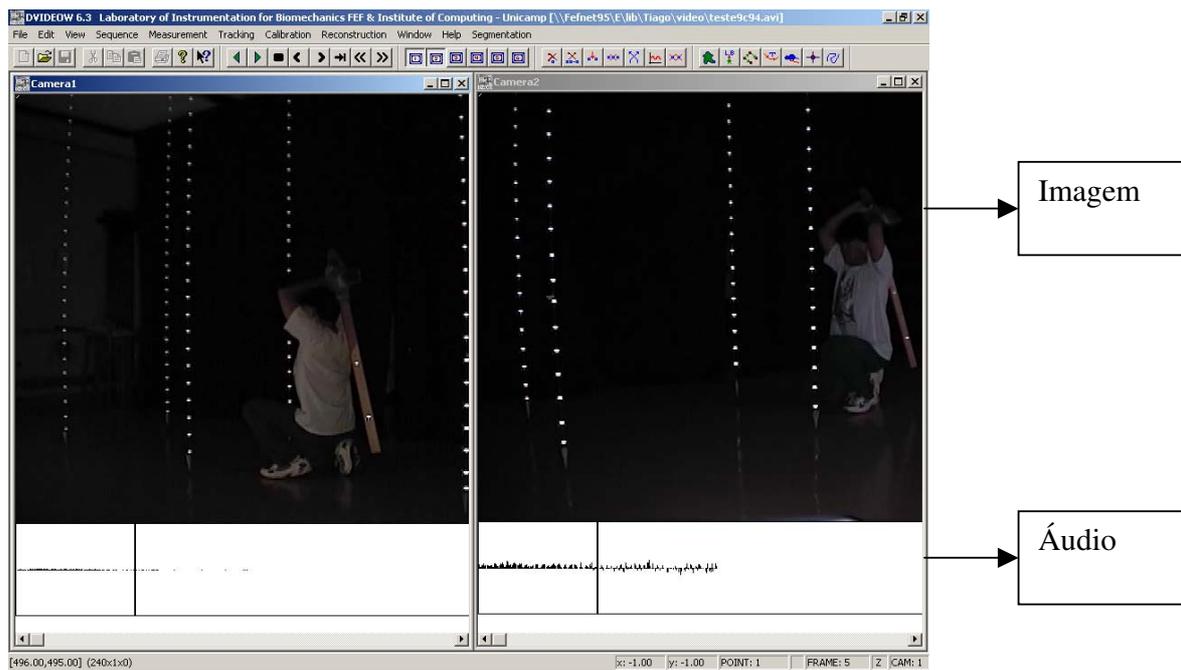


Figura 8: Sistema de captura

### 3.2.4 Identificação por software do sinal

A identificação das posições dos códigos de áudio na linha de tempo por software para cada fluxo de dados é feita considerando que os códigos são inseridos simultaneamente, e que áudio e vídeo estão sincronizados para cada arquivo. A defasagem temporal entre os vídeos na linha de tempo corresponde à posição do áudio em cada arquivo.

Uma vez feita à coleta de dados, os arquivos de imagens contendo os registros são carregados no programa Dvideow, o qual mostra a seqüência de imagem correspondente a cada câmera quadro a quadro, contendo a suas respectivas bandas de áudio.



**Figura 9** :Software Dvideow exibindo arquivo de imagens com os registros de vídeo e áudio.

Na banda de áudio de cada arquivo o sinal de áudio inicialmente projetado com valores de amplitude entre 0 e 255, durante a sua digitalização tem seus valores amostrados com amplitude entre  $-128$  e  $+128$ .

Com estas seqüências de imagens o programa inicia a identificação dos sinais dentro da banda de áudio. Na banda de áudio as amostras que compõem o sinal são lidas. Em menu do programa é pré-determinado um valor um (range) de busca para o programa identificar valores acima desta amplitude como sendo parte do sinal. Dado este valor o programa busca dentro das amostras do sinal valores acima deste pré-determinado, uma vez identificado um primeiro valor na banda de áudio o programa considera este valor como (starter) do sinal, procurando outros valores semelhantes iniciando então a contagem de amostras. Encontradas varias amostras com este valor de amplitude o programa conta o numero de amostras, encontradas 44 amostras o programa identifica como um bit 0 se for encontradas 22 amostras ele identifica como um bit 1, encontrados os seis bits no sinal o programa rotula aquela seqüência de pulsos com um numero decimal correspondente.



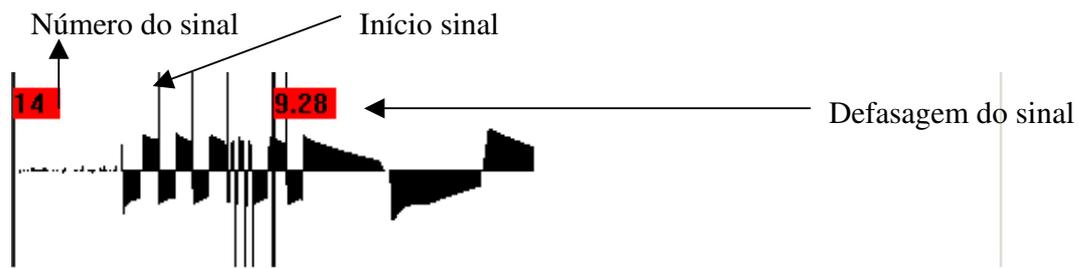
**Figura 10 :Sinal encontrado pelo programa**

Uma vez encontrado o sinal de áudio o programa lê e identifica cada amostra do sinal para formar o número binário representado por aquele sinal codificado.



**Figura 11: Sinal identificado**

Identificado o sinal ele é rotulado conforme o número binário que ele representa. Após a identificação é feito o cálculo da defasagem do sinal de áudio em relação ao início do quadro, ou seja, o tempo em que levou para aparecer a primeira amostra do sinal (starter) a partir do início da formação do quadro (frame).



**Figura 12:Leitura do sinal de áudio identificando o número do sinal e sua defasagem temporal**

### 3.2.5 Sincronização Interframes

Com os arquivos de imagens contendo vídeo e com os sinais de áudio identificados em cada uma das seqüências de imagens, é feita a sincronização interframes. A sincronização interframes permite uma sincronização grossa entre os registros das câmeras com erros maiores que 1/60s.

Para se realizar a sincronização dentro do programa Dvideow os arquivos contendo as imagens de vídeo são carregados.

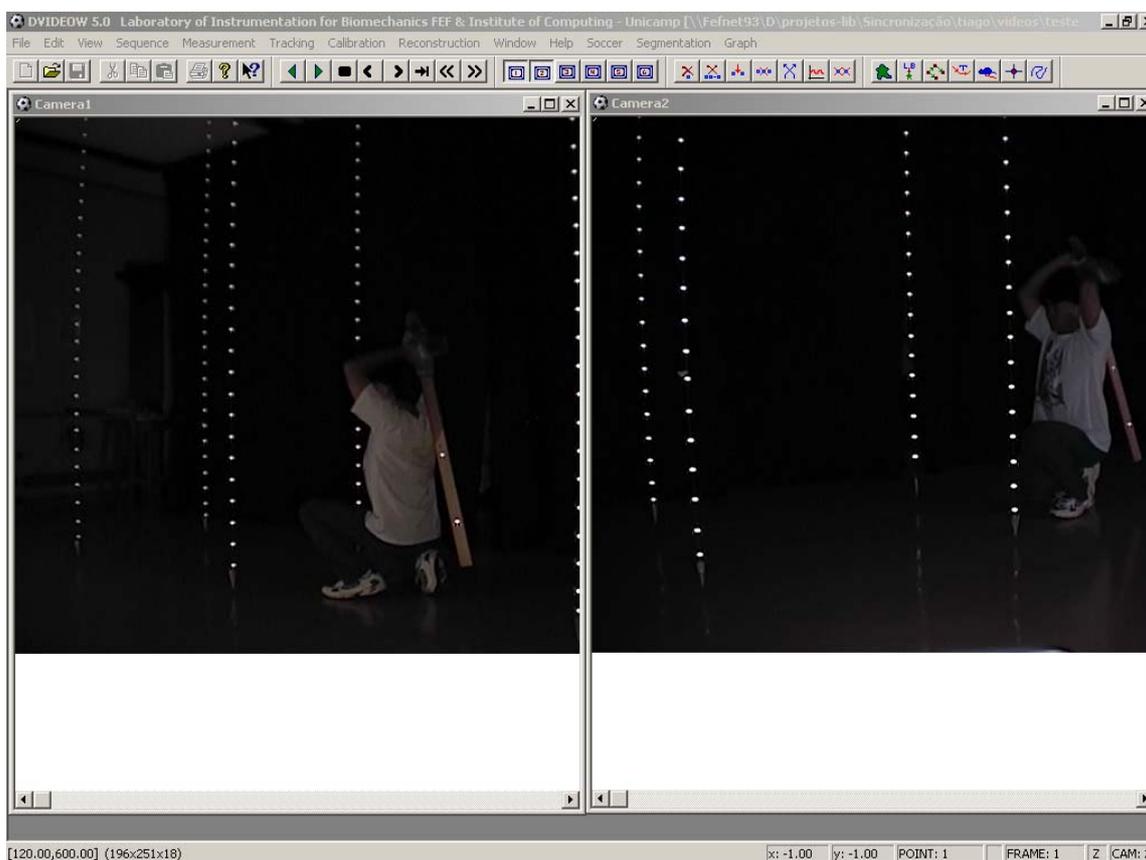


Figura 13 : Câmeras 1 e 2 carregadas no programa

Com os arquivos carregados o operador habilita no menu principal do programa a opção para que o sinal de áudio seja visualizado juntamente com o vídeo e em seguida escolhe-se a opção de sincronização interframes entre as duas seqüências de imagens.

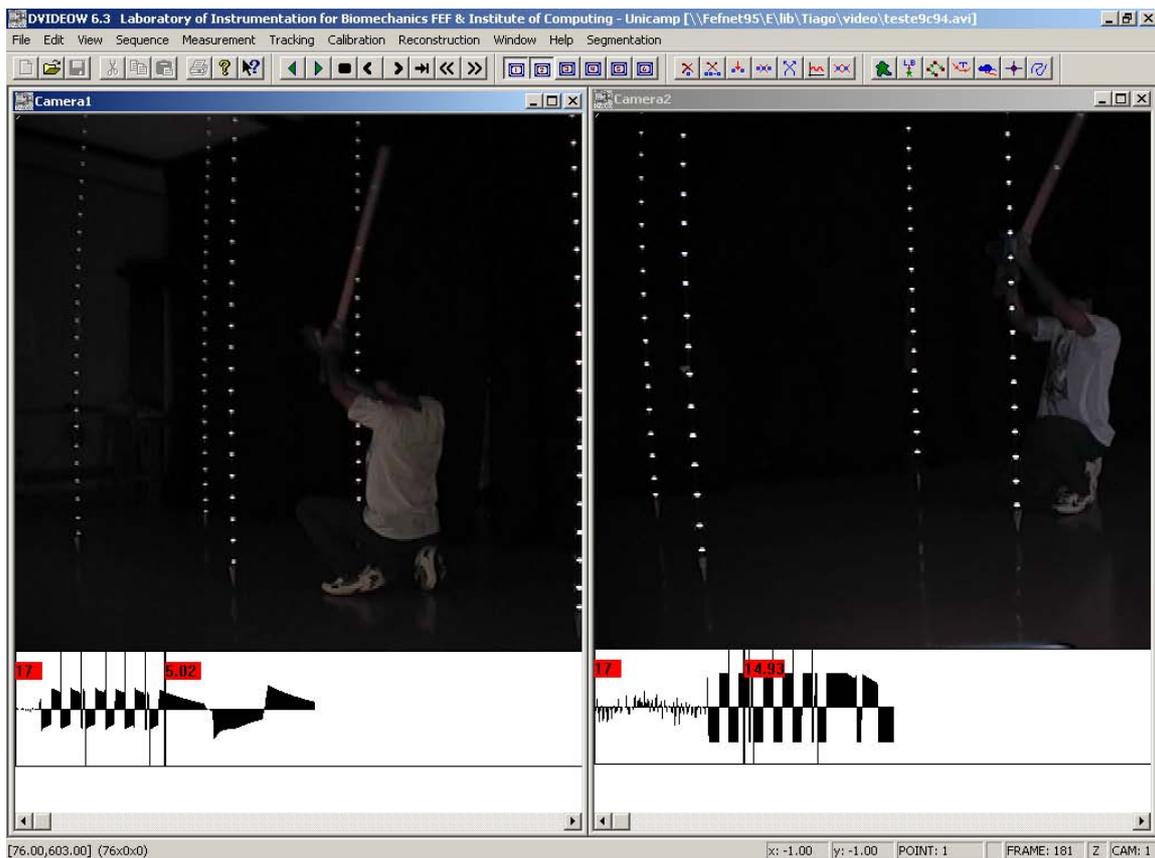


Figura 14: Câmeras 1 e 2 carregadas com o sinal de áudio

No menu principal do programa Dvideow acessa-se as seguintes opções:

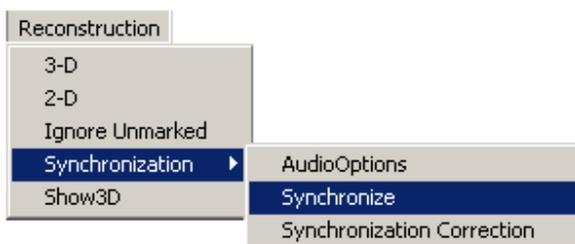
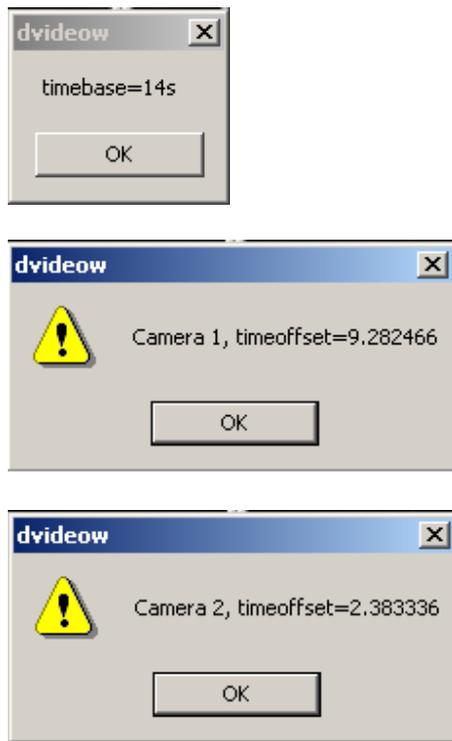


Figura 15 : Menu para a sincronização interframes

Uma vez acessado o menu, o programa inicia automaticamente a busca pelo primeiro sinal de áudio comum às duas câmeras. O programa fornece para o operador o valor do primeiro sinal de áudio encontrado comum as câmeras e concomitantemente os valores referentes ao intervalo de tempo entre o início do quadro e o início do sinal de áudio. Encontrado este sinal comum às câmeras estas estão sincronizadas.



**Figura 16: Seqüência de informações dadas pelo programa referentes ao numero do sinal de áudio identificado e suas respectivas defasagens.**

### 3.2.6 Sincronização intraframes

Com os registros das câmeras sincronizados interframes, é realizado então a sincronização intraframes, que permite uma sincronização mais acurada com erros menores que 1/60s. A sincronização intraframes tem por objetivo corrigir os dados 2D medidos, criando projeções simultâneas para as duas câmeras. As projeções simultâneas dos registros de uma câmera em relação à outra são obtidas através de uma interpolação numérica das coordenadas 2D medidas.

Os parâmetros de sincronização obtidos na sincronização interframes são utilizados para interpolar os dados das câmeras a serem sincronizadas.

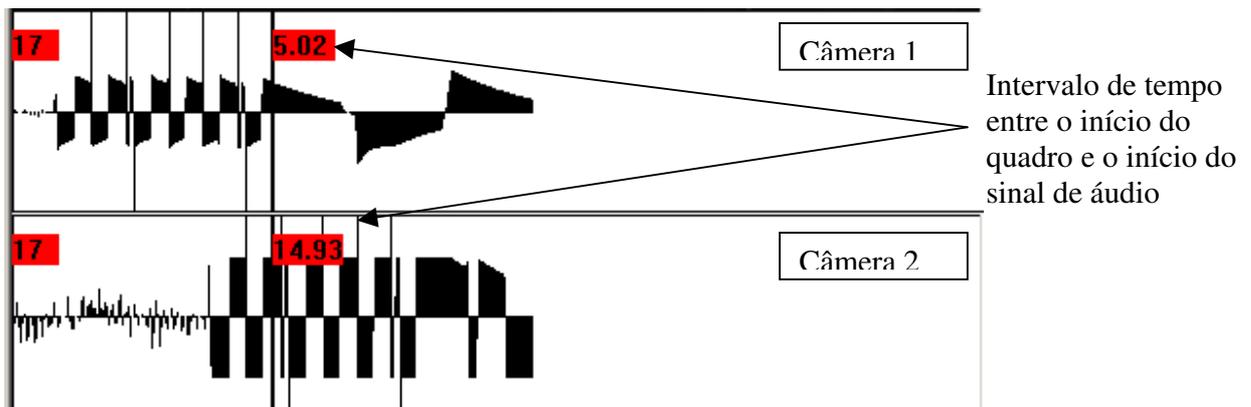


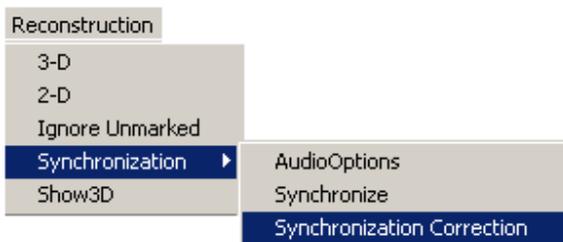
Figura 17: Defasagem temporal entre duas câmeras

A figura 17 mostra o sinal de áudio de duas seqüências de imagens, e os valores referentes aos intervalos de tempo entre o início do quadro e o início do sinal de áudio. Com esses valores, utilizando a equação (1), calcula-se a defasagem temporal existente entre as câmeras. Considera-se uma câmera como referência, e avaliam-se se as outras câmeras estão atrasadas ou adiantadas em relação à câmera de referência.

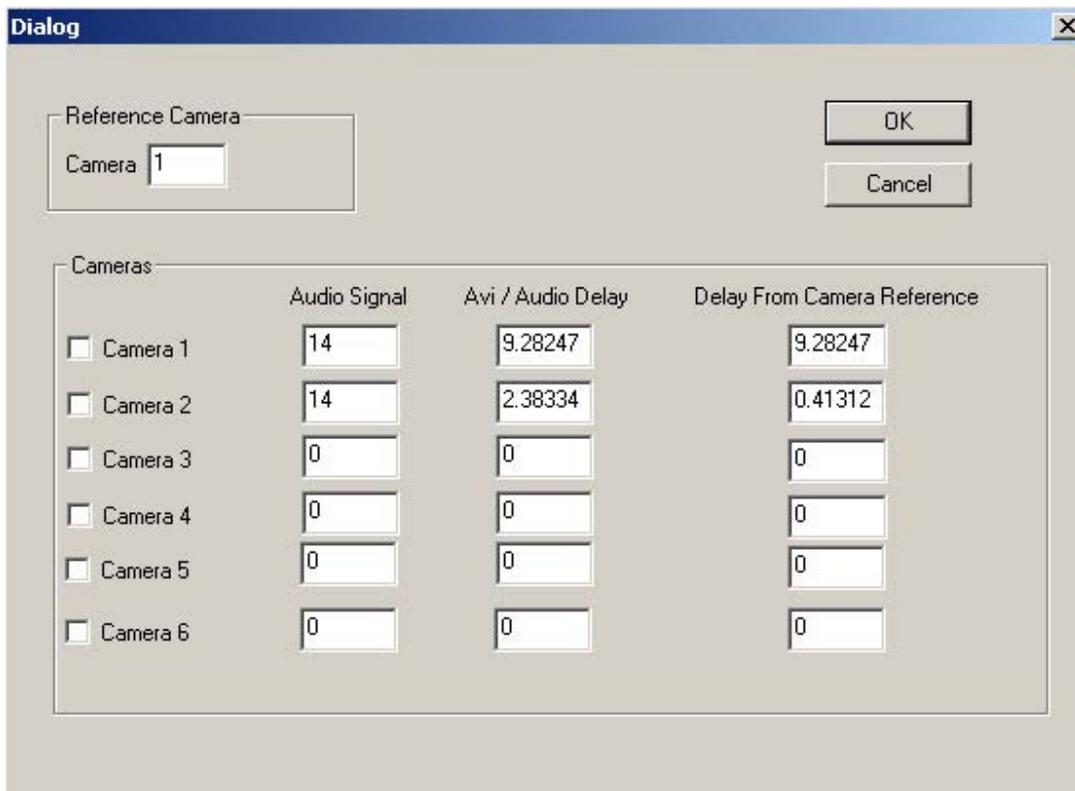
$$\Delta T = t_2 - t_1 = 5.02 - 14.93 = 9.91 \quad (1)$$

Dentro do programa Dvideow foi implementada uma rotina que realiza automaticamente a sincronização interframe, calculando a defasagem temporal ente as câmeras e corrigindo as projeções 2D.

Nessa rotina, o operador acessa um menu, que habilita uma caixa de dialogo, na qual o valor de defasagem do sinal de áudio aparece, confirmado os valores pelo operador as projeções da câmera a ser sincronizada são corrigidas através de uma interpolação. Uma vez corrigidos os dados estes podem ser reconstruídos.



**Figura 18:** Menu de acesso para sincronização intraframes



**Figura 19: Caixa de dialogo para sincronização intraframe**

A figura 19 mostra a caixa de dialogo acessada pelo operador antes de se realizar a sincronização interframes, com as informações referentes a sincronização e os respectivos valores para o sinal de áudio, intervalo de tempo entre o início do quadro e o início do sinal e o valor de defasagem a ser utilizado para correção dos dados.

### 3.2.7 Correção da defasagem temporal

A correção da defasagem temporal (sincronização) é feita através de uma função spline cúbica que interpola as projeções da câmera a ser sincronizada, através dos parâmetros obtidos no sinal de áudio de cada uma das câmeras.

A função utilizada para a sincronização, foi desenvolvida em ambiente Matlab, onde a entrada da função é um arquivo com as coordenadas 2D medidas de uma câmera e os valores de intervalo entre o início do quadro e o início do sinal de áudio da câmera de referência e da câmera a ser sincronizada. Dentro da função é calculada a defasagem temporal entre os registros através da seguinte equação:

$$\Delta T(t) = Cam1 - Cam2$$

Com a defasagem calculada utiliza-se a função *csaps* do Matlab para interpolar as projeções. A função *csaps* é uma spline cúbica, que é uma técnica de aproximação que consiste em se dividir o intervalo de interesse em vários subintervalos e interpolar, da forma mais suave possível, nestes subintervalos com polinômios de grau pequeno.

Definição. Sejam uma subdivisão do intervalo  $[a,b]$ . Uma função spline de grau  $p$  com nós nos pontos  $(x_i, f_i) (i=0,m)$  é uma função  $sp(x)$  com as propriedades:

- a) em cada subintervalo  $[x_i, x_{i+1}] (i=0,m-1)$ ,  $sp(x)$  é um polinômio de grau  $p$ .
- b)  $sp(x)$  é contínuo em  $[a,b]$  e tem derivada contínua em  $[a,b]$  até ordem  $p$ .

## Capítulo 4

### 4 Validação do método

Este capítulo tem como objetivo descrever a validação do método de sincronização. Para validar o método foram realizados três diferentes experimentos.

#### 4.1 1º Experimento: modelo de defasagem temporal

O primeiro experimento realizado mediu a defasagem temporal entre duas câmeras diretamente através de um osciloscópio para verificar o comportamento da defasagem em função do tempo.

Para isso foram utilizados duas câmeras digitais, da marca JVC modelo GRV9500, padrão NTSC e um osciloscópio Textronic modelo 2432 A.

O experimento foi realizado em uma sala com temperatura controlada, onde as câmeras foram conectadas no osciloscópio. As medições de defasagem foram feitas uma hora após os equipamentos estarem ligados e conectados para assim garantir a estabilização dos equipamentos.

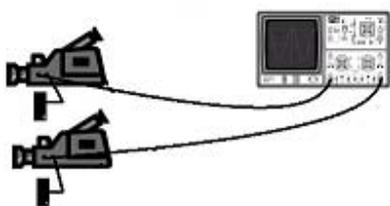


Figura 20: 1º experimento

O tempo base do osciloscópio foi ajustado ao sinal de vídeo de uma das câmeras. A defasagem temporal entre os dois sinais foi medida levando-se em consideração o atraso entre os sinais de sincronização vertical, que marcam o início de cada frame. A acurácia nas medidas foi de 1  $\mu$ s (microsegundo). Ao todo foram feitas 14 medidas de defasagem temporal entre os sinais de vídeo, em intervalos de aproximadamente 10 minutos entre uma medida e outra.

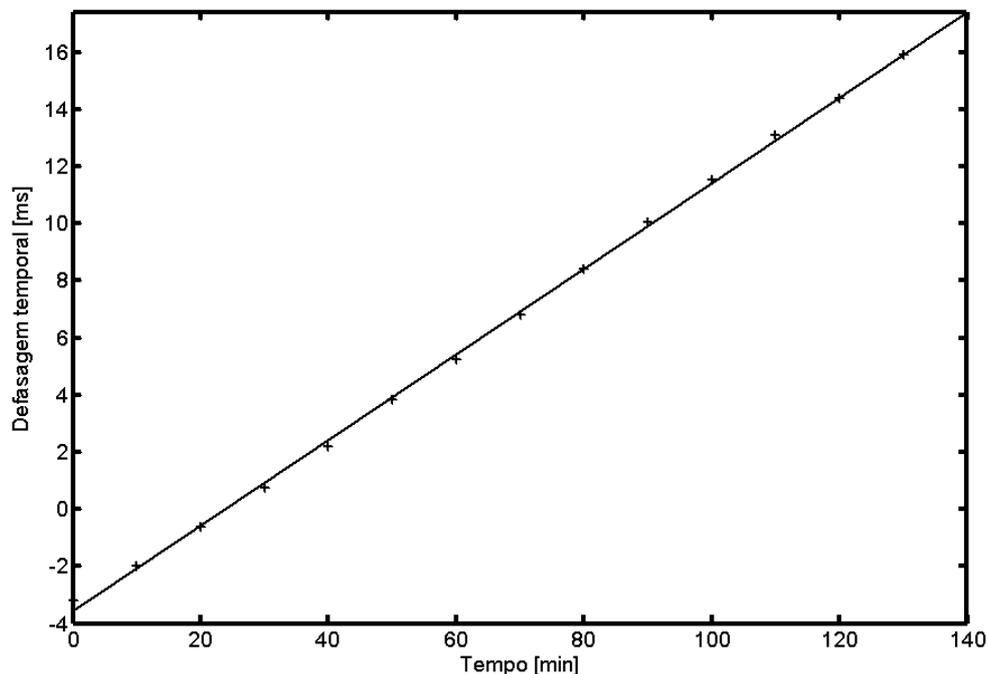
Com as 14 medidas, foi feita uma regressão linear da defasagem temporal em função do tempo. Os resultados apresentaram um modelo de variação da defasagem com  $R^2=0.993$ . Com coeficiente angular (a), correspondente à mudança da defasagem temporal de  $a = 0.150\text{ms/min}$  com intervalo de confiança de 95 por cento entre [0.149; 0.151], e coeficiente linear  $b = -3.570\text{ms}$ , com intervalo de confiança de 95 por cento entre [-3.628; -3.509], que corresponde à diferença de fase no instante  $t=0$ .

O modelo de variação da defasagem temporal em função do tempo encontrada neste experimento é dado pela equação (2), onde  $t$  é o tempo em minutos e  $\Delta T$  é a defasagem temporal em milissegundos.

$$\Delta T(t) = 0.149 \cdot t - 3.569 \quad (2)$$

#### **Equação 2**

Sabendo-se o comportamento da defasagem é possível, com a equação 1 determinar a defasagem temporal entre as câmeras em um instante  $t$  qualquer.



**Figura 21: Regressão linear da defasagem temporal em função do tempo de dois sinais de vídeos medidos em um osciloscópio.**

## 4.2 2º Experimento: comparação entre os métodos

O segundo experimento teve como objetivo comparar os valores de defasagem temporal medidos em osciloscópio denominado MI, com os valores obtidos pelo método proposto, denominado MII.

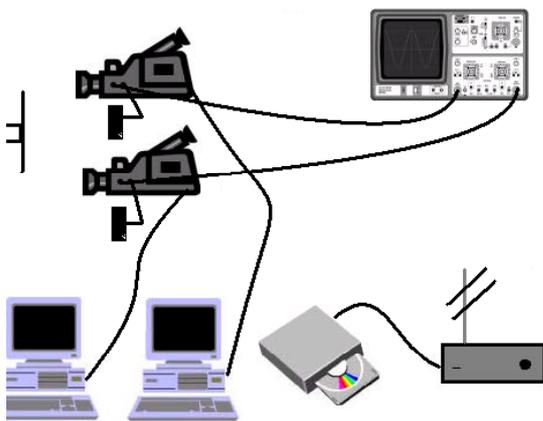
Para isso, foram utilizadas 2 câmeras digitais, da marca JVC modelo GRV9500, padrão NTSC, um osciloscópio Textronic modelo 2432 A, 2 microcomputadores Pentium III, 2 radio receptores, um transmissor e um CD player.

As câmeras foram conectadas ao osciloscópio, como no primeiro experimento, os microcomputadores foram também conectados as câmeras para captura e armazenamento

das seqüências de imagem e o sistema de sincronização via banda de áudio foi utilizado para sincronizar as seqüências de imagens.

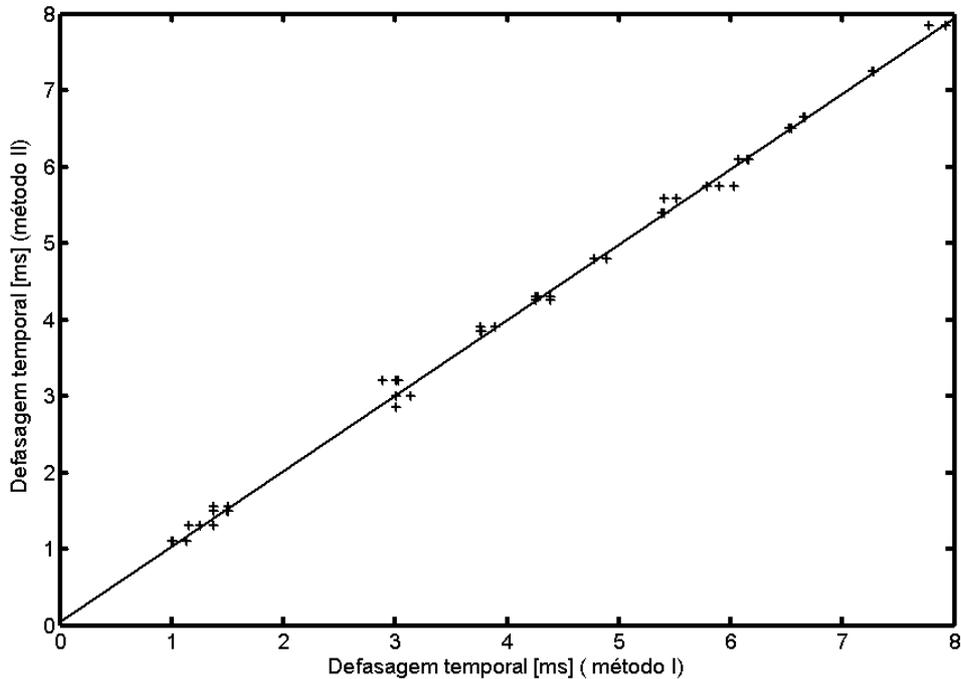
Sessenta e três medidas independentes de defasagem temporal foram feitas utilizando-se os dois métodos. Entre uma medição e outra as câmeras foram desligadas para garantir a independência entre as medições.

O método MI foi considerado mais preciso que MII e, portanto, assumindo que as medidas obtidas pelo MI foram obtidas sem erros apreciáveis, foi feita uma regressão linear dos dados obtidos com o método II (MII) em relação ao método I (MI).



**Figura 22:Esquema experimental**

Os resultados deste experimento são mostrados na análise de regressão linear na figura 23. A comparação entre o método MI e MII obteve  $R^2= 0.998$ , e coeficiente angular  $a=0.988$ , com intervalo de confiança de 95 por cento entre  $[0.976; 1.000]$ , e coeficiente linear  $b=0.053$  com intervalo de confiança de 95 por cento entre  $[-0.006; 0.112]$ .



**Figura 23: Comparação das medidas de defasagem temporal entre dois sinais de vídeos obtidas utilizando um osciloscópio ( Método I) e pelo método de sincronização proposto ( Método II)**

Considerando que ambos intervalos de confiança contém os valores um e zero, respectivamente para o coeficiente angular, e para intercepto e coeficiente linear, os métodos não são estatisticamente diferentes (Browlee 1960). A estimativa da variância observada em torno do valor real foi de  $0.010 \text{ [ms}^2\text{]}$ , o que corresponde a um desvio padrão de  $0.102\text{ms}$ . A diferença máxima encontrada entre MI e MII foi de  $0.3\text{ms}$ .

Para testar a distribuição dos resíduos foi utilizado o teste de Lilliefors Conover (1980), que avalia a hipótese de que os resíduos têm uma distribuição normal, este teste compara a distribuição empírica dos resíduos com uma distribuição normal que tem a mesma media e variância que o resíduo.

A figura 24 contém o conjunto dos resíduos, e a sua dispersão em torno da média e do desvio padrão, dado pela diferença entre a medida real e a medida estimada pelo método II. A distribuição dos resíduos apresentou uma distribuição normal para  $p < 0.05$ .

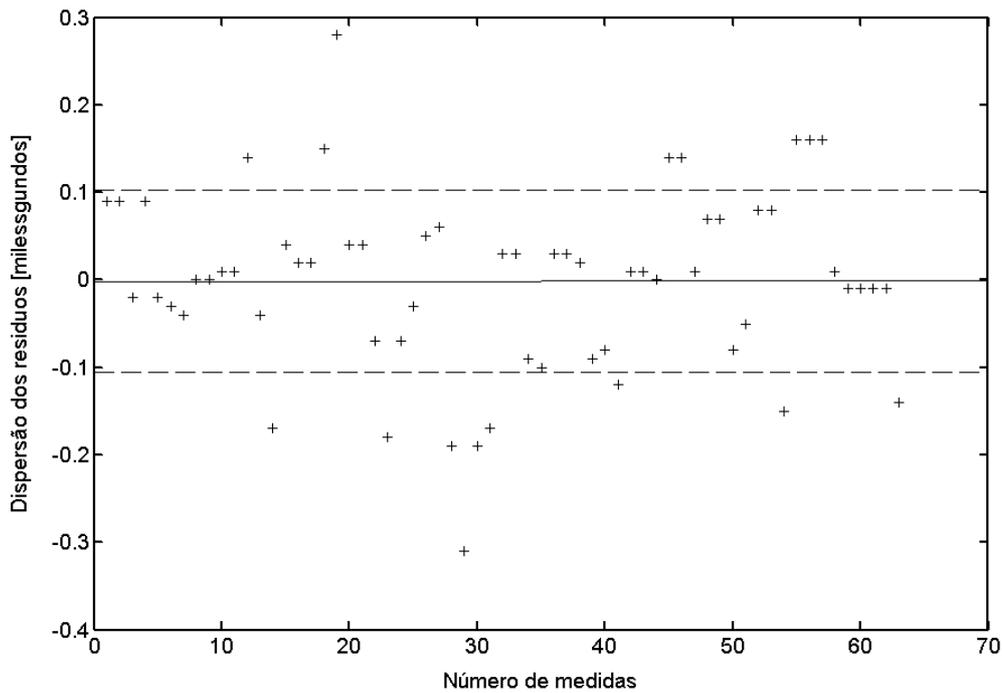


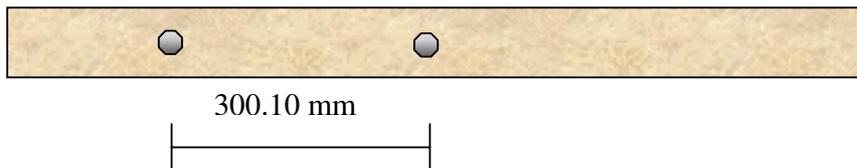
Figura 24: Distribuição dos resíduos em torno da média e dos desvio padrão

### 4.3 3º Experimento: Efeitos da sincronização sobre a reconstrução 3D de coordenadas.

O terceiro experimento teve como objetivo avaliar o efeito da sincronização na reconstrução 3D. Para isso dois marcadores planares retro-reflexivos de 10 mm de diâmetro foram fixados a uma barra rígida em movimento dentro de um volume calibrado de aproximadamente 2.5 x 2.0 x 0.5 metros cúbicos. Duas câmeras digitais da marca JVC modelo GRV9500, padrão NTSC, registraram o movimento da barra. A velocidade máxima

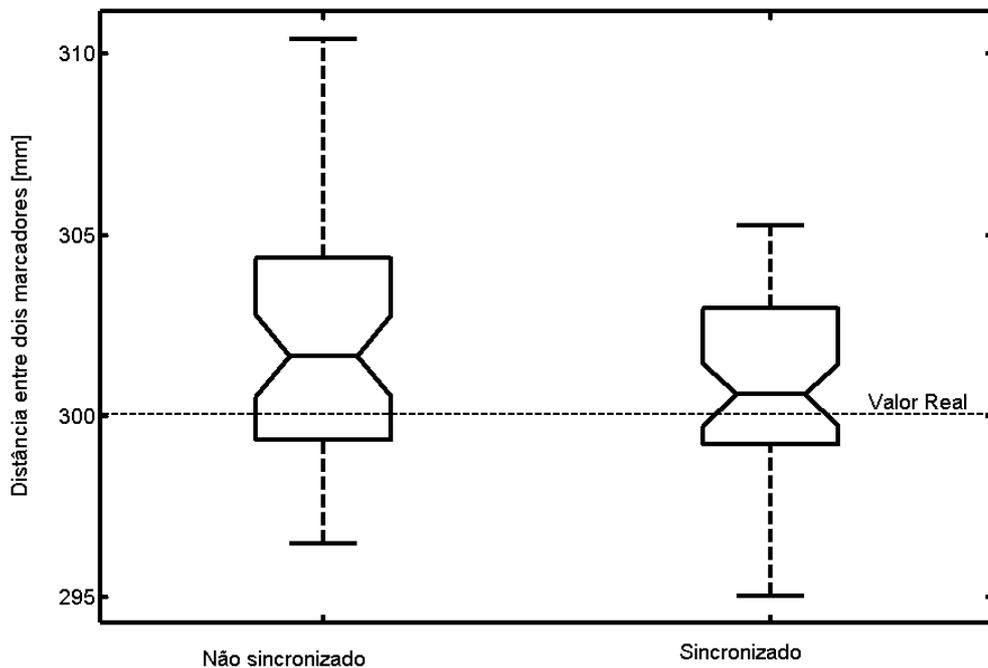
alcançada pela barra foi de  $v = 5$  m/s. A medida entre os marcadores obtidos diretamente através de um paquímetro de resolução 0.02mm foi de 300.10mm, sendo esta distância assumida como valor real.

As coordenadas tridimensionais dos marcadores planares foram reconstruídas utilizando-se o programa de análise cinemática Dvideow. A acurácia nas medidas de distância entre os marcadores foi assumida como representativa aos erros inerentes ao sistema de medida. A acurácia ( $a$ ) foi calculada segundo a seguinte formula  $a^2 = (b^2 + p^2)$ , onde  $p^2$  é a variância dos dados experimentais e  $b$  é o bias dado pela diferença entre o valor experimental e o valor real. Os resultados com um erro de um field ( $\pm 16.7$ ms) de sincronização foram comparados com os resultados obtidos utilizando o método proposto.



**Figura 25: Barra rígida com marcadores planares**

Os resultados obtidos neste experimento referentes aos efeitos da sincronização são mostrados no boxplot na figura 26, que representa a distribuição dos valores de distância entre dois marcadores fixados a um corpo rígido com um field (campo) de sincronização (denominado não sincronizado) e após a utilização do método proposto MII (denominado sincronizado). A defasagem temporal encontrada neste exemplo foi de 9.780ms.



**Figura 26: Distribuição dos valores de distância entre dois marcadores fixados sobre um corpo rígido, com um field de sincronização( não sincronizado) e após a aplicação do método proposto de sincronização (MII)**

A acurácia na medida das distâncias dos dados não sincronizados foi de 3.79mm e após a utilização do método proposto este valor foi para 2.65mm, o que significa uma melhora de 29%. Na figura 26, podemos ver que o valor real esta dentro do intervalo de confiança (95% para a mediana) no boxplot referente às distâncias dos dados sincronizados.(McGill et al. 1978). O mesmo não ocorre no boxplot referente às distâncias dos dados não sincronizados, mostrando assim os efeitos da sincronização.

## Capítulo 5

### 5 Discussão

O método de sincronização de câmeras de vídeo apresentado neste trabalho demonstrou uma solução simples e acurada para a sincronização de registros de câmeras de vídeo.

Os resultados encontrados no trabalho para o primeiro experimento, mostraram que a defasagem temporal medida entre os sinais das duas câmeras foi de aproximadamente 0.15ms/min. Sendo esta variação linear em função do tempo. É importante enfatizar que este modelo de comportamento linear encontrado neste trabalho pode ser particular deste experimento, considerando que as câmeras utilizadas eram similares (mesmo modelo). A avaliação da defasagem entre câmeras já foi mencionada em trabalhos anteriores (Barros et. al. 1993, Yeadon et. al. 1999). Contudo outros modelos podem ser encontrados, utilizando outras câmeras.

Esta avaliação de comportamento da defasagem temporal em função do tempo não é importante considerando-se alguns segundos de aquisição. Contudo este efeito pode ser significativo em experimentos de longa duração ou em experimentos onde haja alguns minutos de intervalo entre a medição da defasagem temporal e a aquisição dos dados. Isso acontecendo, torna-se necessário obter estes parâmetros de defasagem para eventuais correções.

O segundo experimento mostrou que o método proposto de sincronização através da banda de áudio é capaz de medir a defasagem temporal entre as câmeras. É importante enfatizar que o limite de resolução temporal do método é dado pela taxa máxima permitida

nos canais de áudio, usualmente 44kHz, sendo assim uma resolução temporal de 0.02ms. Os métodos de sincronização para câmeras de vídeo relatados na literatura, não são tão acurados assim, comparado ao trabalho de Yeadon (1999) os resultados alcançados são satisfatórios uma vez que o método proposto tem a vantagem de ser independente dos erros no processo de medição, contudo algumas fontes de erros podem aparecer em função da interferência na transmissão do sinal via radiofrequência e na identificação do sinal no programa.

O terceiro experimento mostrou os efeitos da sincronização na reconstrução 3D, obtendo uma melhora significativa na acurácia das medidas de distância entre 2 marcadores, e que o efeito da sincronização também é em função da velocidade do movimento.

A dispersão dos resíduos em torno do valor médio ficou abaixo dos 0.002s encontrados na literatura, mostrando assim uma melhor acurácia do método proposto.

## **Conclusão**

Os resultados encontrados no trabalho mostram que a avaliação da defasagem e seus efeitos são de suma importância para análise cinemática 3D de movimentos humanos. Demonstrando uma melhora significativa nos dados reconstruídos.

O método tem algumas vantagens sobre os métodos anteriores descritos na literatura, pois não necessita de dispositivos luminosos ou marcadores na imagem das câmeras, podendo ser utilizado em ambientes externos e de competição. O método se mostrou simples e acurado, independente de sistemas de medição, uma vez conhecida a defasagem e seu modelo é possível prevê sua evolução ao longo do tempo.

No futuro, o uso desta metodologia poderá ser testado para sincronizar diferentes sistemas de medição em biomecânica, como dinamometria e eletromiografia. A acurácia, simplicidade de aplicação do método proposto constituem a maior contribuição deste trabalho.

## Bibliografia

- ADBEL-AZIZ, Y. I. and H. M. KARARA. **Direct Linear transformation from comparator coordinates into object-space coordinates**. ASP/UI Symposium on Close-Range Photogrammetry., Falls Church, VA, American Society of Photogrammetry. 1971.
- BARROS, R. M. L. et al. Synchronization of registers for 3D description of human movement. INTERNATIONAL SOCIETY OF BIOMECHANICS XIV CONGRESS, Paris, International society of Biomechanics. 1993.
- BARROS, R. M. L. **Concepção e implementação de um sistema para análise cinemática de movimentos humanos**. Campinas, Universidade Estadual de Campinas. 1997.
- BARROS, R. M. L. et. al. Desenvolvimento e avaliação de um sistema para análise cinemática de movimentos humanos. **Revista Brasileira de Engenharia Biomédica**.15(1-2): 79-86. 1999.
- BLIEVERNIGHT, D. A multidimensional timing device for cinematography. **Research Quarterly** 38: 146-148. 1967.
- BROWNLIE, K. A. **Statistical theory and methodology in science and engineering**. Canada: John Wiley & Sons. pp342-346. 1960.
- CAPPOZZO, A., LEO, T., MACELLARI, V. **The CoSTEL Kinematics Monitoring System: Performance and Use in Human Movements Measurements**. International Series on Biomechanics, Nagoya, v.4-B : 1067-1074. 1983.
- CONOVER, W. J.. **Practical Nonparametric Statistics**. New York, Wiley. 1980.
- DEGUEURCE, C., DIETRICH, G., POURCELOT, P., DENOIX, J. M., GEIGER, D. Three-Dimensional Kinematic Technique for Evaluation of Horse Locomotion in Outdoor Conditions. **Medical & Biological Engineering & Computing**. 34: 249-252. 1996.
- FIGUEROA, P. J., N. J. LEITE and R. M. L. BARROS. A flexible software for tracking of markers used in human motion analysis. **Computer Methods and Programs in Biomedicine** 72(2): 155-165. 2003.
- KANG, J., I. COHEN and G. MEDIONI. Continuous multi-views tracking using tensor voting. WOKSHOP ON MOTION AND VIDEO COMPUTING, Orlando, Florida. 2002.

- MANN, R. W., ROWELL, D., DALRYMPLE, G., CONATI, F., TETESKY, A., OTTENHEIMER, D., ANTONSSON, E.,. **Precise, Rapid, Automatic 3D Position and Orientation Tracking of Multiple Moving Bodies**. International Series on Biomechanics, Nagoya, v.4-B: 1105-1112. 1983.
- MCGILL, R., TUKEY, J., LARSEN, W. A.,. Variations of Box Plots. **The American Statistician**, 32(1):12-16. 1978.
- MILLER, N. R., R. SHAPIRO and T. M. MCLAUGHLIN. A technique for obtaining spatial kinematic parameters of segments of biomechanical systems from cinematographic data. **Journal of Biomechanics** 13(7): 535-47. 1980.
- POURCELOT, P., F. AUDIGIE, C. DEGUEURCE, D. GEIGER and J. M. DENOIX. A method to synchronise cameras using the direct linear transformation technique. **Journal of Biomechanics** 33(12): 1751-1754. 2000.
- THORPE, L. J. **Television cameras**. **Electronic Engineers Handbook**, 4<sup>th</sup> ed., McGraw-Hill, New York NY. 1997.
- WALTON, J. S. **Close-range cine-photogrammetry: a generalized technique for quantifying gross human motion**, Pennsylvania State University. 1981.
- WHITAKER, J. C., BENSON, K. B. **Standard Handbook of Video and Television Engineering** . McGraw-Hill. 2000.
- YEADON, M. R. The simulation of aerial movement-1 The determination of orientation angles from film data. **Journal of Biomechanics** 23(1): 59-66. 1990.
- YEADON, M. R. AND M. A. KING. A method for synchronising digitised video data. **Journal of Biomechanics** 32(9): 983-986. 1999.