

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**

**FACULDADE DE EDUCAÇÃO FÍSICA**

**CLAUDIO LUÍS ROVERI VIEIRA**

**PROPOSIÇÃO E VALIDAÇÃO DE UM MÉTODO DE  
ANÁLISE DE MOVIMENTAÇÃO DE JOGADORES DE TÊNIS  
DE CAMPO POR RASTREAMENTO AUTOMÁTICO**

Campinas  
2011

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**

**FACULDADE DE EDUCAÇÃO FÍSICA**

**CLAUDIO LUÍS ROVERI VIEIRA**

**PROPOSIÇÃO E VALIDAÇÃO DE UM MÉTODO DE  
ANÁLISE DE MOVIMENTAÇÃO DE JOGADORES DE TÊNIS  
DE CAMPO POR RASTREAMENTO AUTOMÁTICO**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentada à Graduação da  
Faculdade de Educação Física da  
Universidade Estadual de  
Campinas para obtenção do título  
de Bacharel em Educação Física.

**Orientador: Prof. Dr. Ricardo Machado Leite de Barros**

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE  
À VERSÃO FINAL DO TRABALHO  
DE CONCLUSÃO DE CURSO  
DEFENDIDO PELO ALUNO  
CLAUDIO LUIS ROVERI VIEIRA, E  
ORIENTADO PELO PROF. DR  
RICARDO MACHADO LEITE DE  
BARROS.

---

Assinatura do Orientador

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA POR ANDRÉIA DA SILVA MANZATO – CRB8/7292  
BIBLIOTECA "PROFESSOR ASDRÚBAL FERREIRA BATISTA"  
FACULDADE DE EDUCAÇÃO FÍSICA - UNICAMP

V673p Vieira, Cláudio Luís Roveri, 1985-  
Proposição e validação de um método de análise de movimentação de jogadores de tênis de campo por rastreamento automático / Cláudio Luís Roveri Vieira. - Campinas, SP: [s.n], 2011.

Orientador: Ricardo Machado Leite de Barros  
Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Faculdade de Educação Física, Universidade Estadual de Campinas.

1. Tênis (Jogo). 2. Rastreamento (posição). 3. Cinemática. 4. Biomecânica. I. Barros, Ricardo Machado Leite de. II. Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Educação Física. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

**Título em inglês:** Proposition and validation of a method for motion analysis of tennis players using automatic tracking.

**Palavras-chaves em inglês:** Tennis; Tracking; Kinematics; Biomechanics.

**Titulação:** Bacharelado em Educação Física

**Banca examinadora:**

Ricardo Machado Leite de Barros [orientador]

Milton Shoiti Misuta

**Data da defesa:** 11-10-2011

## COMISSÃO JULGADORA

Prof. Dr. Ricardo Machado Leite de Barros

**Orientador**

Prof. Dr. Milton Shoiti Misuta

## **Dedicatória**

*Ao meu avô Elci (in memoriam) que nunca necessitou de educação formal para provar sua inteligência e sabedoria.*

## Agradecimentos

Primeiramente a Deus, que é o norte da minha vida. A ele toda honra e toda a glória, agora e para sempre!

Aos meus pais, pessoas sem as quais eu não teria chegado aonde cheguei.

À minha avó Beatriz que sempre me apoiou e confiou na minha capacidade.

À minha amada noiva que sempre esteve ao meu lado em todos os momentos e que, agora, desfruta deste grande momento da minha vida.

Ao meu orientador Prof. Dr. Ricardo Machado Leite de Barros pela oportunidade dada em seguir uma carreira acadêmica (que é o meu sonho) mesmo não possuindo nenhuma experiência. Obrigado por acreditar na minha capacidade de aprender e produzir!

À turma 07N da FEF, principalmente ao Leandrão, Bruna, Adriana, Adriano, Duzão, Dirley e Edsão, que foram as pessoas que mais acompanharam minha jornada na faculdade. Vocês são dez!

Ao pessoal do LIB, “Jú” Araújo, “Jú” Rodrigues, “Jú” Silvatti, Jú Landolfi, Jú Exel, Jú Carmona, “Jú” Lorena, “Jú” Lattes e, em especial, Jú Paris que sempre me encorajaram a continuar na vida acadêmica.

Agradeço também à Jerusa, Miltinho, Ana e Felipe pela grande ajuda neste trabalho.

Vieira, Claudio Luís Roveri. Proposição e validação de um método de análise de movimentação de jogadores de tênis de campo por rastreamento automático. 2011. 41f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação) – Faculdade de Educação Física. Universidade Estadual de Campinas, Campinas 2011.

## Resumo

O objetivo deste trabalho é propor e validar um método de rastreamento automático para jogadores de tênis de campo. Este método é baseado em algoritmos de calibração de câmeras, pré-processamento de imagens, segmentação, filtragem, rastreamento, dentre outras ferramentas de processamento de imagem e visão computacional. Duas câmeras fixas (30 Hz) são usadas para a aquisição das imagens, sendo que cada uma enquadra metade da quadra de tênis. A validação da reconstrução 2D dos pontos na quadra mostraram ser reprodutíveis (0,009 m), replicáveis (0,007 m), sensíveis (0,03% para comprimento e 0,06% para largura) e com excelente concordância entre avaliadores ( $ICC_c = 0,88$  e  $ICC_a = 0,89$ ,  $p < 0,05$ ). Para ambas as coordenadas (x, y) houve uma regressão linear significativa ( $p < 0,05$ ) das posições obtidas pelos procedimentos de rastreamento manual (referência) e automático ( $R^2 = 0,9967$  para a coordenada x,  $R^2 = 0,96$  para a coordenada y). O percentual de rastreamento automático alcançado foi de 99,98% dos 22.000 quadros processados. As trajetórias dos dois jogadores durante um set de um jogo-treino de tênis foram apresentadas, bem como as distâncias percorridas por cada um (jogador A 1229,6 m, jogador B 1083,1 m). Em suma, o método proposto neste trabalho revelou ser simples, válido, consistente e com alto percentual de rastreamento automático de jogadores de tênis.

**Palavras chave:** tênis de campo; rastreamento; cinemática; biomecânica.

Vieira, Claudio Luís Roveri. Proposition and validation of a method for motion analysis of tennis players using automatic tracking. 2011. 41f. Course conclusion project (Graduação) – Physical Education. Universidade of Campinas, Campinas 2011.

## Abstract

The aim of this work is to propose and validate a novel automatic method for tracking tennis players. This method is based on algorithms for camera calibration, image pre-processing, segmentation, filtering, tracking, among others computer vision tools. Two fixed digital video cameras (30 Hz) are used to acquire the game, each one covering a half court. The validation of the 2D reconstruction of points in court showed reproducibility (0.009 m), repeatability (0.007 m), sensitivity (0.03% length and 0.06% width), ICC (0.88 consistence and 0.89 absolute agreement,  $p < 0.05$ ). For both coordinates (x,y) there were a significant linear regression ( $p < 0.05$ ) of positions obtained by automatic and manual (reference) tracking procedures ( $R^2 = 0.9967$  for x-coordinate,  $R^2 = 0.96$  for y-coordinate). The percentage of automatic tracking reached 99.98% in 22,000 frames processed. The trajectories of two players during a set of a training tennis match were presented as well as the distances covered by each one (player A 1229.6 m, player B 1083.1 m). In conclusion, the method proposed in this paper revealed to be simple, valid, consistent and with a high percentage of automation to track tennis players.

**Keywords:** tennis; tracking; kinematics; biomechanics.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> - O Sistema Dvideo que foi usado para fazer a segmentação e o rastreamento automático dos jogadores. ....	19
<b>Figura 2</b> - Etapas do método utilizado para a realização do rastreamento dos jogadores de tênis.....	20
<b>Figura 3</b> - Enquadramento utilizado para filmagem em um dos lados da quadra.....	21
<b>Figura 4</b> - Marcações e sistema de coordenadas utilizados para a transformação 2D imagem-objeto da câmera 1 (a) e da câmera 2 (b).....	22
<b>Figura 5</b> – Imagens referentes à área de interesse do quadro corrente (a), à extração de fundo (b), à binarização obtidas com filtros passa-alta e/ou passa-baixa específicos (c) e a rotulação dos blobs ao jogador correspondente (d).....	24
<b>Figura 6</b> – Grafo construído a partir do blobs do jogador gerados em quadros subsequentes. ....	25
<b>Figura 7</b> – Pontos arbitrários usados para validação de reconstrução 2D dos pontos pertences à quadra de tênis .....	27
<b>Figura 8</b> – Representação dos erros de medição (média $\pm$ desvio padrão) em cada um dos 10 pontos arbitrários (25 medições por ponto) usados na validação. O valores estão em metros.	30
<b>Figura 9</b> – Análise de regressão linear realizada com as posições dos jogadores na coordenada x obtidas pelo procedimento de rastreamento manual e automático.....	32
<b>Figura 10</b> – Análise de regressão linear realizada com as posições dos jogadores na coordenada y obtidas pelo procedimento de rastreamento manual e automático.....	32
<b>Figura 11</b> – Trajetórias realizadas por ambos os jogadores durante um set.....	34

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> - Validação de reconstrução 2D dos dez pontos aleatórios da quadra de tênis .....	31
<b>Tabela 2</b> – Distância percorrida acumulada por cada jogador por game.....	35

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

<b>LIB</b>	Laboratório de Instrumentação para Biomecânica
<b>FEF</b>	Faculdade de Educação Física
<b>UNICAMP</b>	Universidade Estadual de Campinas
<b>m</b>	Metros
<b>mm</b>	Milímetros
<b>GPS</b>	<i>Global Positioning System</i>
<b>Hz</b>	Hertz
<b>ICC</b>	<i>Intraclass Correlation Coefficient</i>

## Sumário

<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>13</b>
1.1 Metodologias de análise cinemática automática aplicada em modalidades esportivas coletivas	13
1.2 Metodologias de análise cinemática automática aplicada ao tênis de campo	15
<b>2 OBJETIVOS</b>	<b>17</b>
2.1 Geral	17
2.2 Específicos	17
<b>3 METODOLOGIA</b>	<b>18</b>
3.1 Local de filmagem	18
3.2 Materiais e softwares utilizados	18
3.3 Descrição do método	19
3.3.1 Aquisição de dados e transformação 2D imagem-objeto	21
3.3.2 Transferência das Imagens	23
3.3.3 Segmentação dos jogadores	23
3.3.4 Rastreamento dos jogadores	25
3.4 Validação do método	26
3.4.1 Validação da reconstrução 2D de pontos arbitrários	26
3.4.2 Validação de medições da distância percorrida pelos jogadores ao longo do tempo	28
3.4.2.1 Validação de rastreamento manual x automático	28
3.4.2.2 Porcentagem de rastreamento automático	28
3.4 Aplicação do método de rastreamento automático	29
<b>4 RESULTADOS</b>	<b>30</b>
4.1 Reconstrução 2D de pontos arbitrários	30
4.2 Reprodutibilidade, replicabilidade, sensibilidade e ICC	31
4.3 Rastreamento manual x automático	31
4.4 Percentual de rastreamento automático	33
4.6 Exemplos de aplicação do método	33
<b>5 DISCUSSÃO</b>	<b>36</b>
<b>6 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>38</b>
<b>7 REFERÊNCIAS</b>	<b>39</b>

# 1 INTRODUÇÃO

Os sistemas de análise cinemática ou de movimentos estão cada vez mais em evidência para análise de vídeos esportivos. Com eles podem ser extraídas, através do processamento das imagens contidas em vídeo, informações que podem caracterizar detalhadamente as movimentações dos jogadores na quadra, bem como obter informações quantificadas de distância percorrida e velocidades atingidas por todos os jogadores participantes da partida. Além disso, o estudo destas variáveis pode fornecer resultados e ampliar conhecimentos relativos à demanda técnica, tática e, principalmente, física da modalidade esportiva a ser estudada.

Tanto em esportes coletivos quanto em individuais, a obtenção das distâncias percorridas pelos jogadores, bem como as trajetórias realizadas pelos mesmos a partir de um sistema pode representar um avanço científico e metodológico considerável na área do treinamento esportivo. Assim, é possível descrever as principais demandas físicas, técnicas e táticas da própria modalidade, através da caracterização da movimentação dos dois jogadores integrantes ao longo do tempo numa partida. Além disso, através da compreensão da dinâmica do jogo e das demandas dos jogadores, pode-se obter algum tipo de ganho competitivo gerando assim, um sucesso esportivo (SARRO et al., 2010).

## 1.1 Metodologias de análise cinemática automática aplicada em modalidades esportivas coletivas

Vários métodos surgiram ao longo do tempo para obter ao longo do tempo a posição dos jogadores de forma acurada e precisa, fazendo-se uso geralmente de recursos de visão computacional e processamento de imagens.

Misuta (2004) fez um levantamento dos principais métodos de rastreamento automático ao longo dos anos. Em seu estudo ele segregou os métodos baseados em: a) baseados em estimativa visual, no qual geralmente fazia-se uso de notação manual cuja desvantagem era a imprecisão dos resultados; b) baseados em sensores-transmissores que, apesar do uso de aparatos tecnológico que conferiam mais precisão nos resultados, eram muito custosos e, de certa forma, invasivos (p. ex. o uso de transmissor de GPS); c) baseados em imagens, no qual se podem obter informações a respeito da dinâmica de movimentação dos jogadores fazendo a análise e processamento das imagens, através de recursos computacionais (p. ex. processamento de imagens e visão computacional).

Com relação à aplicabilidade das metodologias de rastreamento automático de jogadores, a maioria pauta-se na análise cinemática, em que as principais variáveis quantificadas são as distâncias percorridas e velocidades desempenhadas, além da obtenção de dados relativos às trajetórias realizadas pelos mesmos.

Needham e Boyle (2001) desenvolveram uma metodologia para rastreamento de jogadores de futsal com uso de apenas uma câmera posicionada num ponto alto, atrás de um dos gols. Informações de trajetórias realizadas por cada jogador foram devidamente armazenadas. Segundo os autores, o percentual de rastreamento automático foi em torno de 56%, sendo que a diferença média entre a medição automática e a manual (padrão ouro) foi de 1,0 m.

Figueroa et al. (2006a, 2006b) desenvolveram um método de rastreamento automático de jogadores de futebol a partir de câmeras devidamente calibradas e de um software específico com recursos embarcados de processamento das imagens e visão computacional. Apesar dos problemas de oclusões de jogadores e luminosidade enfrentados, as distâncias percorridas e faixas de velocidade realizadas pelos jogadores puderam ser quantificadas com taxa de automatização de 94%. A mesma técnica foi aplicada por Sarro et al. (2010) na modalidade rugby de cadeira de rodas, porém, com relação ao percentual de automatização, a metodologia se mostrou menos eficaz (cerca de 20%).

Pers e Kovacic (2000) elaboraram um método para rastrear movimentações de jogadores de handebol com uso de duas câmeras posicionadas acima da quadra, no qual a distorção radial das câmeras foi corrigida com uma calibração específica. O método foi desenvolvido com base em extração de fundo, de identificação de cor e morfologia dos jogadores. Com o resultado, as distâncias percorridas e as trajetórias realizadas por eles puderam ser devidamente visualizadas e quantificadas.

Barros et al. (2010) propuseram um método para rastreamento de jogadores de handebol usando o algoritmo *AdaBoost*, no qual se compara certa região retangular com o objeto de interesse (no caso, os jogadores), fazendo-se uso de várias câmeras devidamente calibradas, de forma a cobrir toda a quadra de jogo. Como resultados, as distâncias percorridas de cada jogador foram quantificadas com erro médio de 0,2 m e com percentual de automatização de 67%.

## 1.2 Metodologias de análise cinemática automática aplicada ao tênis de campo.

Mais especificamente ao rastreamento aplicado ao tênis de campo, alguns estudos recentes foram feitos, usando-se métodos baseados em imagens, porém tiveram suas aplicações mais voltadas ao rastreamento da bola e aos aspectos técnicos dos jogadores (p. ex. formas ideais de saque, de rebatidas, etc.).

Os métodos baseados no rastreamento de bolas de tênis, no geral, tiveram um avanço considerável em termos de desenvolvimento de soluções. Alguns sistemas especialistas, tais como o *Hawk-eye*®, baseiam-se em uma série de câmeras de alta frequência instaladas em vários pontos da quadra de tênis. No caso, as câmeras são controladas por um software altamente específico, nos quais conseguem obter a reconstrução 3D da bola de tênis em um dado momento, de forma praticamente instantânea. Informações tais como, trajetória e velocidade da bola de tênis são obtidas com menos de 5 segundos de *delay*, além de ter erro médio menor que 3,6 mm na determinação da posição da bola na quadra de tênis.

Com o intuito de fazer mensurações da velocidade da bola de tênis e da distância percorrida dos jogadores, Pingali, Jean e Carlbom (1998) desenvolveram um algoritmo de rastreamento em tempo real da bola de tênis de campo e dos jogadores em vídeos de partidas oficiais, usando trechos de vídeos de partidas transmitidas em TV (cerca de 300 segundos). Como resultado ele obteve tanto o posicionamento da bola quanto dos jogadores. Porém, não houve um aprofundamento na abordagem a ponto de quantificar o posicionamento da bola de tênis e das posições dos jogadores, através do cálculo de distâncias percorrida e velocidades ao longo do tempo.

A partir também de imagens televisivas, Yan, Christmas e Kittler (2005) elaboraram um método para rastreamento de bolas de tênis a partir de técnicas complexas de segmentação. Para isso, eles tomaram como base pequenos trechos de vídeo relativo aos *rallies*, fato esse que inviabilizou a quantificação de dados cinemáticos da bola de tênis ao longo do tempo, ou seja, a trajetória das bolas somente foi aferida com simples inspeção visual.

Bloom & Bradley (2003) propuseram um método de rastreamento de jogadores de tênis de campo, no qual se procurava reconhecer não somente os deslocamentos dos jogadores, mas sim reconhecer o momento em que se realizavam os golpes dados pela raquete, dando ênfase ao aspecto técnico no rastreamento. Porém, tal método não visava

analisar a movimentação do jogador ao longo de uma partida. Para isso foram utilizadas técnicas de visão computacional para identificação do jogador e reconhecimento de plano de fundo.

Dang et al. (2010) desenvolveram um método para rastreamento de jogadores de tênis de campo através da identificação das linhas da quadra e dos jogadores de tênis através do padrão de intensidade e textura contidas nas imagens em vídeos televisivos. Os parâmetros das linhas da quadra serviram de parâmetros para calibração das câmeras e para um rastreamento preciso. O índice de acerto na detecção dos jogadores foi por volta de 87%.

Conforme anteriormente explicados, a maioria dos estudos feitos para rastreamento no tênis de campo não tiveram a preocupação em quantificar, ao longo do tempo, os movimentos dos jogadores em termos de distância percorrida e velocidade, ou seja, os mesmos se limitavam em detectar e descrever a trajetória tanto da bola quanto dos jogadores.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Geral**

Propor e validar um método de análise de movimentação por rastreamento automático de jogadores de tênis de campo.

### **2.2 Específicos**

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Adaptar os algoritmos de tratamento de dados referentes às variáveis cinemáticas utilizados no futebol para que os mesmos possam ser usados na análise de uma partida de tênis de campo.
- Aplicar o método de modo a obter e quantificar as trajetórias dos jogadores e distâncias percorridas ao longo do tempo, visando caracterizar as movimentações dos mesmos durante a partida.

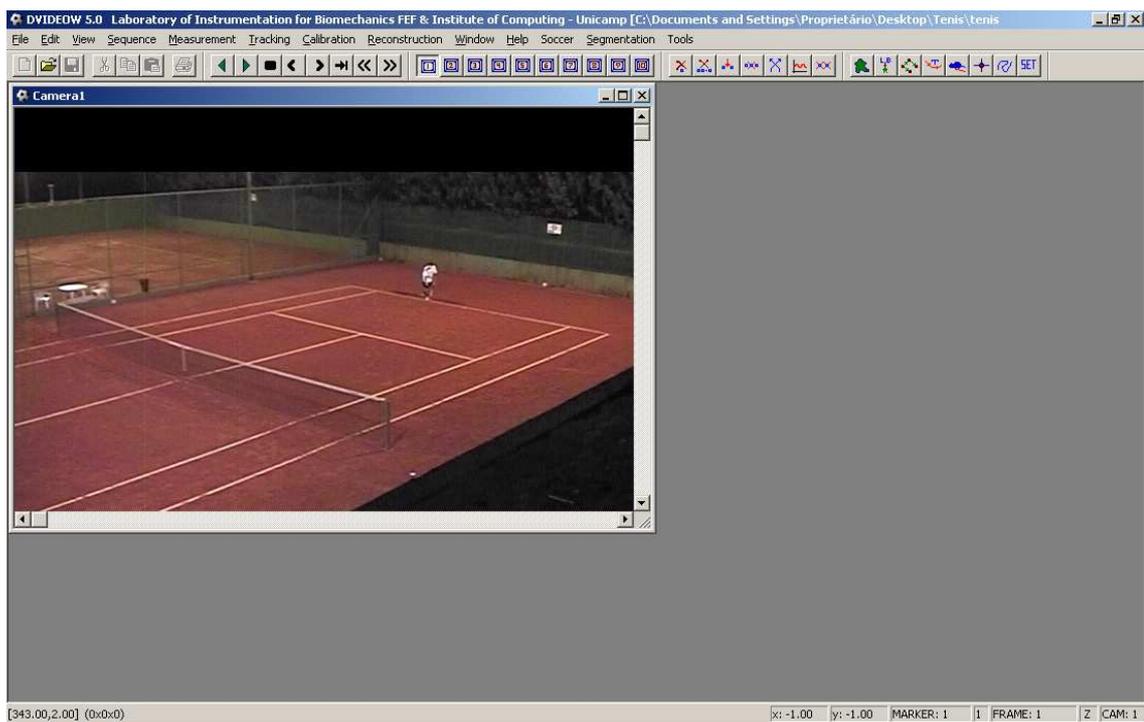
## **3 METODOLOGIA**

### **3.1 Local de filmagem**

Foi realizada a filmagem de um set, totalizando nove games, de um jogo-treino de tênis amador realizada numa quadra de saibro da Associação Atlética Banco do Brasil (AABB), na cidade de Campinas-SP. No total, duas câmeras foram para enquadrar toda a quadra.

### **3.2 Materiais e sistemas utilizados**

Para o rastreamento automático dos movimentos dos atletas foi utilizado o Sistema Dvideo, que foi desenvolvido em Visual C++ no Laboratório de Instrumentação para Biomecânica da Unicamp. O sistema conta com componentes complementares, tais como computadores, filmadoras utilizadas na coleta de dados, placas de captura de vídeo, que serão essenciais para posteriores processos de segmentação e rastreamento dos jogadores a partir das imagens obtidas (Fig. 1).



**Figura 1 - O Sistema Dvideo que foi usado para fazer a segmentação e o rastreamento automático dos jogadores.**

### 3.3 Descrição do método

O método proposto e validado neste trabalho foi baseado em um sistema que foi desenvolvido inicialmente para rastrear jogadores de futebol DVideo, descrito e aplicado por Figueroa et al. (2006a, 2006b). O sistema utilizado consiste em um software de interface flexível composto por algoritmos de calibração de câmeras, pré-processamento de imagens, segmentação, filtragem, rastreamento dentre outros recursos advindos de técnicas de processamento de imagens e visão computacional. A partir da necessidade específica do rastreamento de jogadores de tênis de campo, um algoritmo pode ser esquematizado e aplicado. As principais etapas utilizadas neste trabalho para a realização do rastreamento foram: aquisição de dados, transferência das imagens, transformação 2D imagem-objeto, segmentação e, enfim, o rastreamento dos jogadores. A esquematização das principais etapas do método utilizado encontra-se na Figura 2.

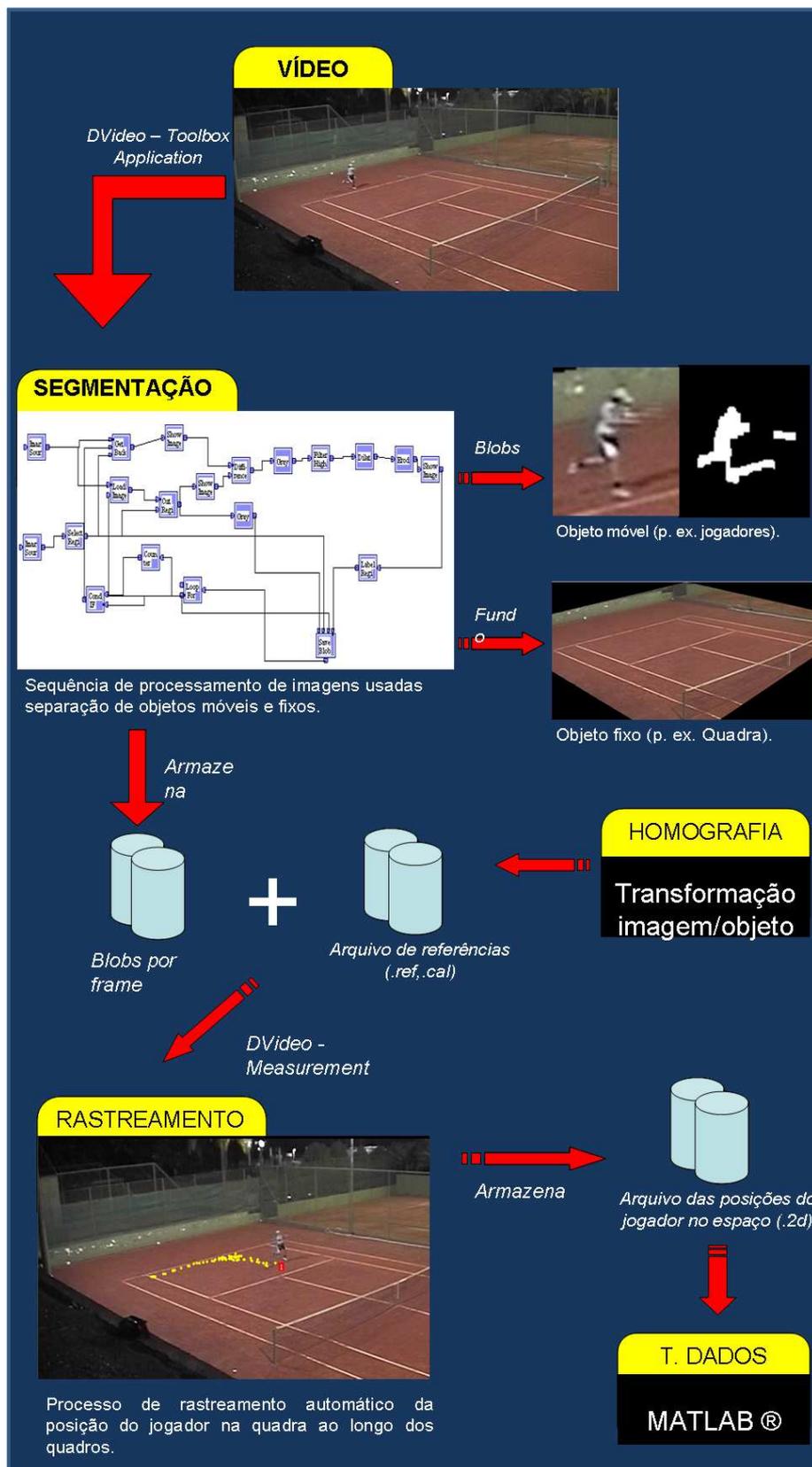
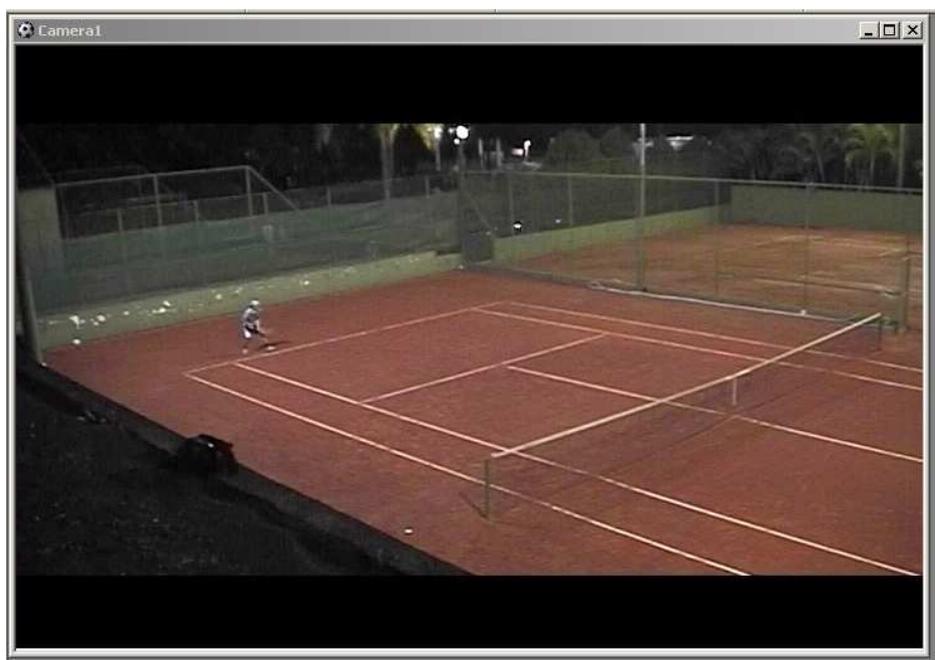


Figura 2 - Etapas do método utilizado para a realização do rastreamento dos jogadores de tênis

### 3.3.1 Aquisição de dados e transformação 2D imagem-objeto

Conforme descrito anteriormente, foram utilizadas duas câmeras filmadoras digitais (JVC GR-DVL 9500, 640x480 pixels, 30 Hz) fixadas por tripés específicos no ponto mais alto da arquibancada. Com relação disposição das câmeras, seguiu-se o seguinte protocolo: a quadra de tênis foi dividida em duas partes, onde cada câmera enquadrava a parte da quadra oposta à sua disposição de origem. (Fig. 3).

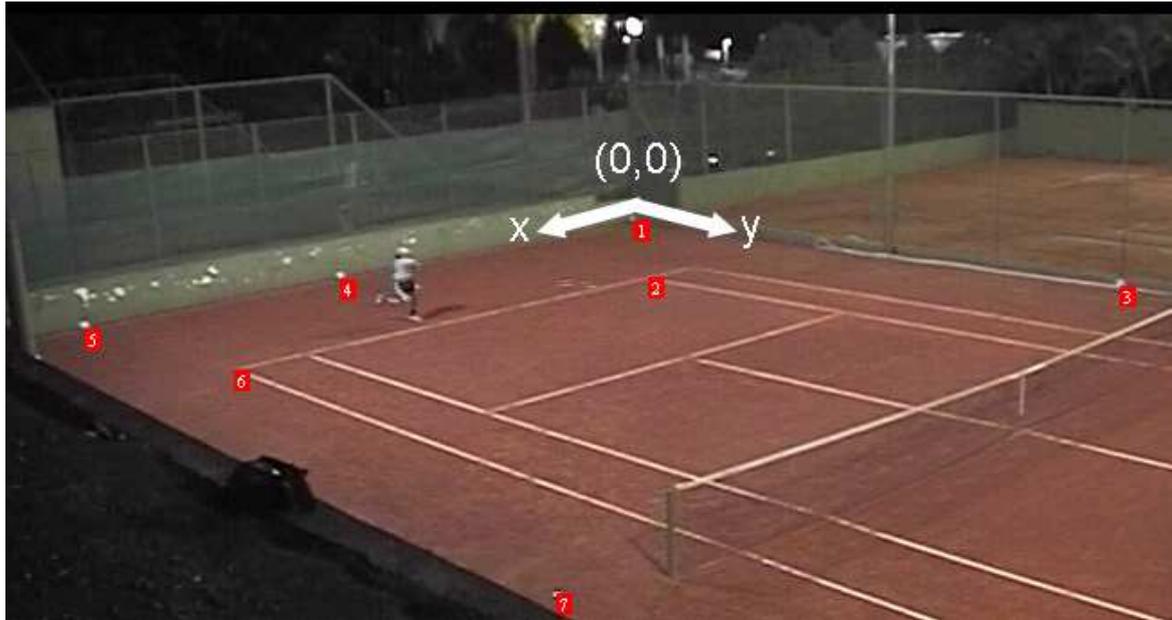


**Figura 3 - Enquadramento utilizado para filmagem em um dos lados da quadra**

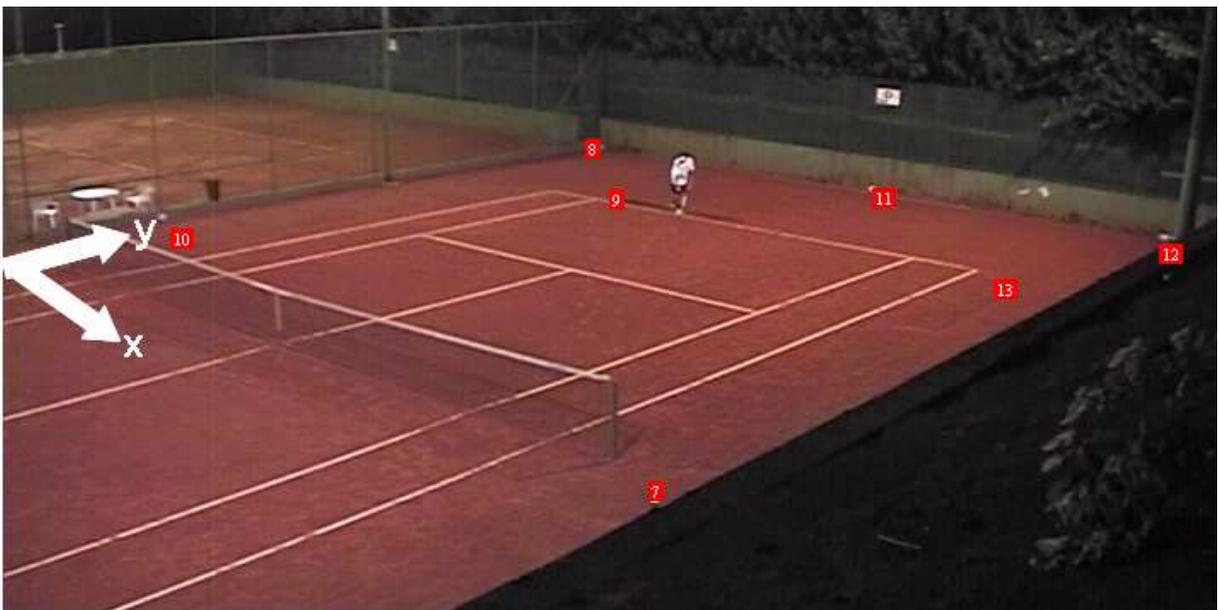
A técnica de homografia foi utilizada para calcular a transformação de coordenadas 2D da imagem (vídeo) para coordenadas 2D do objeto (posições reais). A partir da determinação dos pontos a serem usados para a transformação 2D, os parâmetros homográficos podem ser calculados através do uso adaptado do método DLT (Direct Linear Transformation) proposto por Abdel-Aziz and Karara (1971), no qual informações relativas ao eixo z são substituídas por valor zero.

Para obter os parâmetros homográficos, foram utilizadas marcadores em formatos de disco com diâmetro aproximado de 15 cm nas áreas externas à quadra de tênis, além de pontos referentes às intersecções das linhas da quadra de tênis, totalizando 13 pontos. As distâncias de cada ponto à origem do sistema de coordenadas da quadra, que são usadas

como referência, foram medidas por fita métrica. Os pontos usados para homografia, bem como o sistema de coordenadas estão mostrados nas Figuras 4a e 4b. A origem  $(0,0)$  do sistema de coordenada é o ponto 1, conforme mostrado na figura 4a.



(a)



(b)

**Figura 4 - Marcações e sistema de coordenadas utilizados para a transformação 2D imagem-objeto da câmera 1 (a) e da câmera 2 (b).**

### 3.3.2 Transferência das Imagens

As imagens das câmeras foram transferidas para o computador por placas específicas de transferência de imagens, cujo padrão é o IEEE1394. As imagens foram armazenadas em formato de vídeo AVI (*Áudio Vídeo Interleaved*), com uma frequência de 15Hz, ou 15 quadros por segundo.

### 3.3.3 Segmentação dos jogadores

A etapa de segmentação refere ao momento em que há basicamente a separação do objeto de interesse (no caso, os jogadores) da imagem de fundo (a quadra). Para a realização da segmentação, as seguintes operações propostas por Figueroa et al. (2006a) são realizadas:

- Delimitação da área de interesse a ser utilizada no quadro corrente (Figura 5a).
- Extração de fundo pelo uso de filtro de movimento (Figura 5b).
- Realização da operação de diferença entre o frame corrente (Figura 5a) e a imagem com a extração de fundo (Figura 5b).
- “Binarização” da imagem através do uso dos filtros passa-alta (Figura 5c).
- Rotulação dos pixels conectados e definição dos *blobs*<sup>1</sup> correspondentes (Figura 5d).

---

<sup>1</sup> *Blobs*, segundo Barros et al. (2007), são relevos topográficos altamente específicos obtidos através de operadores morfológicos matemáticos. No caso, os *blobs* referem-se aos objetos móveis da imagem que, no caso deste trabalho, são os jogadores de tênis.



(a)



(b)



(c)



(d)

**Figura 5 –** Imagens referentes à área de interesse do quadro corrente (a), à extração de fundo (b), à binarização obtidas com filtros passa-alta e/ou passa-baixa específicos (c) e a rotulação dos blobs ao jogador correspondente (d).

### 3.3.4 Rastreamento dos jogadores

O rastreamento do jogador é feito através da relação temporal entre os *blobs* em quadros subsequentes, fazendo-se uso da estrutura de grafos (FIGUEROA, 2006a).

As informações relativas ao *blob* que foram obtidas na etapa de segmentação são usadas para construir o grafo, que são constituídos basicamente de arestas e vértices. Enquanto as arestas armazenam informações específicas dos *blobs*, os vértices contêm as informações ponderadas de dependência entre os mesmos, definindo todos os possíveis trajetos do jogador no grafo. A ponderação dos valores dos vértices depende de inúmeras características, tais como velocidade, orientação e cores dos *blobs*. A estrutura de um grafo relativa a um dado trajeto de um jogador é mostrada na Figura 6.

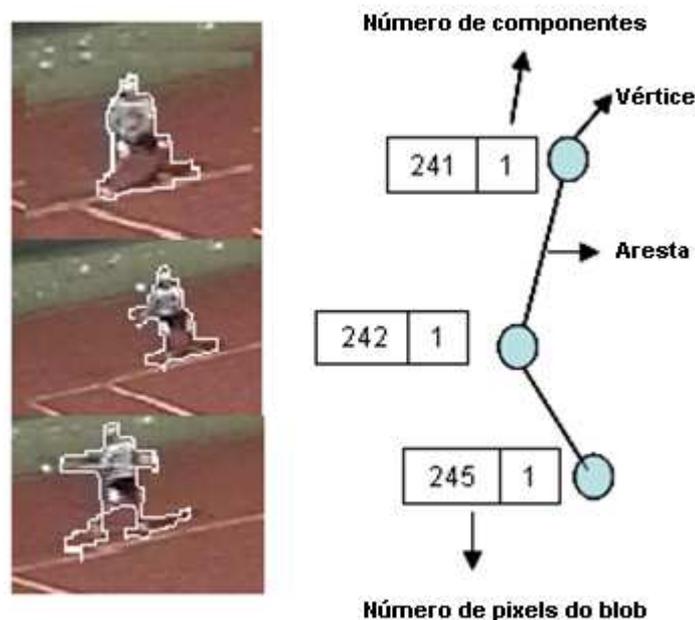


Figura 6 – Grafo construído a partir do blobs do jogador gerados em quadros subsequentes.

Para a construção do grafo, são seguidas as seguintes operações computacionais descritas por Figueroa et al. (2006a) .

- (1) Criação de um nó  $n(t)$  para cada *blob*  $i$  no primeiro quadro ( $t=1$ ) e posterior inserção deste nó no grafo  $G$ .
- (2) Criação de outro nó  $n(t+1)$  para cada *blob*  $j$  no quadro subsequente ( $t+1$ ) e posterior inserção no grafo  $G$ .

- (3) Cálculo da distância  $d_{i,j}$  entre os nós  $n_i(t)$  e  $n_i(t+1)$ .
- (4) Criação de uma aresta  $e_{ij}$  que satisfaça a condição  $d_{i,j} < d_{max}$ , onde  $d_{max}$  representa a máxima distância entre os nós.
- (5) Repetição das etapas 2,3 e 4 até que faça em todos os quadros do vídeo.

Seguindo os passos acima, o rastreamento do jogador pode ser obtido através do menor caminho possível entre os nós de um grafo.

### 3.4 Validação do método

A validação do método foi realizada de duas formas: a) através da validação da reconstrução 2D de pontos escolhidos arbitrariamente pertencentes a quadra de tênis e; b) através da validação das medições da distância percorrida pelos jogadores ao longo do tempo.

#### 3.4.1 Reconstrução 2D de pontos arbitrários

Este tipo de validação visa estimar as incertezas na determinação das coordenadas bidimensionais de pontos localizados dentro da quadra de tênis. Para isso, foram escolhidos mais 10 (dez) pontos escolhidos arbitrariamente, sendo estes pertencentes à quadra de tênis (Figura 7). A validação foi realizada a partir das medições dos 13 (treze) pontos utilizados na reconstrução 2D (homografia) da quadra, conforme explicado anteriormente no item 3.3.1. O processo de medição foi repetido 5 (cinco) vezes para cada avaliador. Portanto, para cada um dos 10 pontos aleatórios de reconstrução 2D escolhidos, foram realizadas 25 medições (5 avaliadores x 5 repetições/ponto = 25 medições/ponto). A distância entre as posições esperadas (reais) e as observadas (medidas) para cada um dos 10 pontos arbitrários (25 medições) foi usada como uma variável de mensuração de confiabilidade.

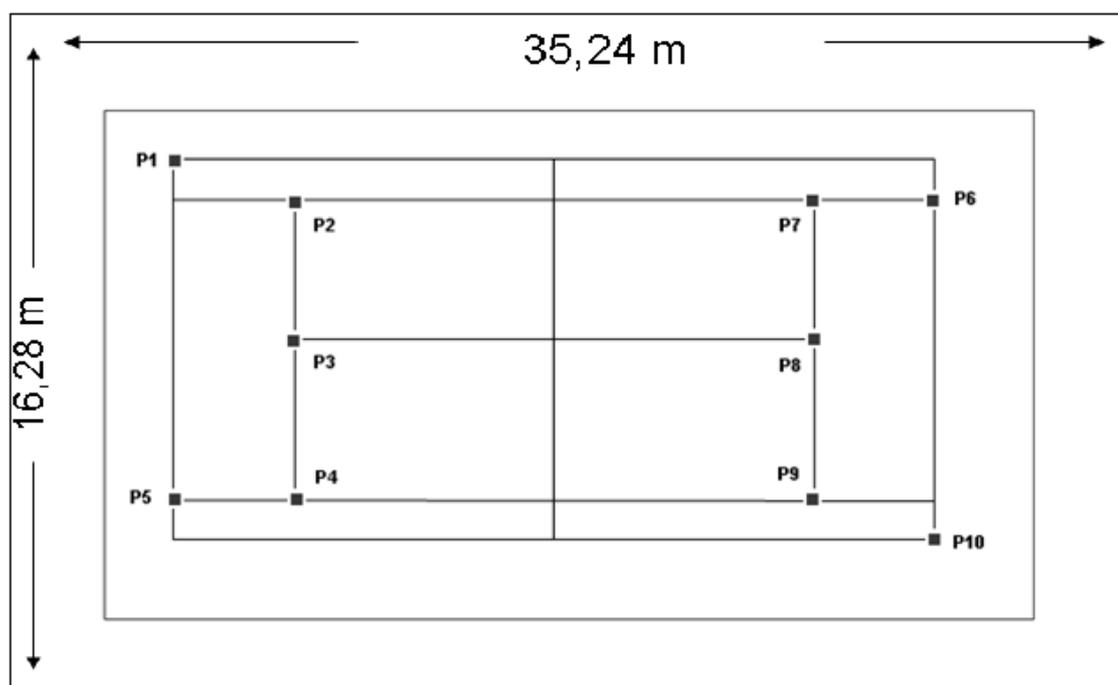
Para a determinação da confiabilidade do método proposto neste trabalho foi utilizado o coeficiente de correlação intraclasse (ICC) e o erro padrão da média (SEM). Ao

contrário do ICC, que é uma medida relativa de confiabilidade, o SEM determina o índice absoluto de confiabilidade. Além disso, o SEM possui a mesma unidade da medida de interesse, enquanto que o ICC não possui unidade de medida (WEIR, 2005). Portanto, os dois tipos de índice de confiabilidade foram calculados.

Os valores de SEM intra (replicabilidade) e inter (reprodutibilidade) avaliadores foram calculados pela razão entre o desvio padrão pela raiz do tamanho da amostra. Os conceitos de reprodutibilidade e replicabilidade foram pautados segundo Barry e Chris (1994). O cálculo do ICC usado foi proposto por McGraw e Wong (1996), no qual foi medida de duas formas: em termos de consistência ( $ICC_c$ ) e em termos de nível de concordância absoluta ( $ICC_a$ ) entre as medições.

No caso, a classificação de ICC adotada foi a seguinte: a) Concordância pobre ( $ICC < 0,4$ ); b) Concordância satisfatória ( $0,4 \leq ICC \leq 0,75$ ) e; c) Concordância excelente ( $ICC > 0,75$ ).

Além disso, foi feito o teste de sensibilidade do método através do cálculo da razão entre o maior erro de (replicabilidade ou reprodutibilidade) e as dimensões das dimensões da quadra de tênis (comprimento = 35,24 m e largura = 16,28 m).



**Figura 7 – Pontos arbitrários usados para validação de reconstrução 2D dos pontos pertencentes à quadra de tênis**

### 3.4.2 Medições da distância percorrida pelos jogadores ao longo do tempo

A validação das medições das distâncias percorridas pelos jogadores foi realizada de duas formas: a) validação do rastreamento manual x automático e; b) percentual de rastreamento automático.

#### 3.4.2.1 Rastreamento manual x automático

A validação das medidas obtidas por rastreamento manual e automático foi feita a partir de uma amostra de vídeo com cerca cinco minutos de duração (1500 frames) nos quais um dos jogadores corre por cima das linhas da quadra de tênis. A posição (x,y) do jogador ao longo do tempo foi determinado pelos procedimentos manual e automático de rastreamento.

Assim sendo, ambos os procedimentos foram comparados através do uso análise de regressão linear ( $p < 0.05$ ) das coordenadas 2D obtidas por meio manual e automático. O rastreamento manual foi considerado o procedimento “Padrão Ouro” nesta validação.

#### 3.4.2.2 Porcentagem de rastreamento automático

A porcentagem de rastreamento automático foi feita a partir de um set de uma partida de tênis. O percentual de rastreamento automático ( $P_{auto}$ ) é calculado a partir da razão entre número de quadros rastreados automaticamente (n) pelo número total de quadros a serem processados (N) no vídeo. Portanto, o cálculo do percentual de rastreamento automático é dado por:

$$P_{auto}(\%) = \left( \frac{n}{N} \right) * 100 \quad (1)$$

### **3.4 Aplicação do método de rastreamento automático**

A aplicação do método proposto foi realizada em um jogo-treino, conforme descrito anteriormente. As trajetórias 2D dos jogadores foram obtidas e exibidas de modo a mostrar a movimentação dos mesmos na quadra de tênis, durante um set inteiro. Além disso, as distâncias percorridas pelos jogadores em cada game, bem como as distâncias percorridas acumuladas foram calculadas.

## 4 RESULTADOS

A seguir, serão apresentados resultados referentes à validação do método proposto para rastreamento, bem como exemplos de aplicação dos métodos tanto em termos de determinação de trajetórias de jogadores quanto em distâncias percorridas pelos mesmos.

### 4.1 Reconstrução 2D de pontos arbitrários

A Figura 8 mostra os resultados da média  $\pm$  desvio padrão das distâncias entre as posições esperadas (reais) e as observadas (medidas) na quadra de tênis. O erro médio na determinação da posição dos pontos foi de 0,0571 m. Já a diferença máxima encontrada na determinação da posição dos pontos foi de 0,1 m.

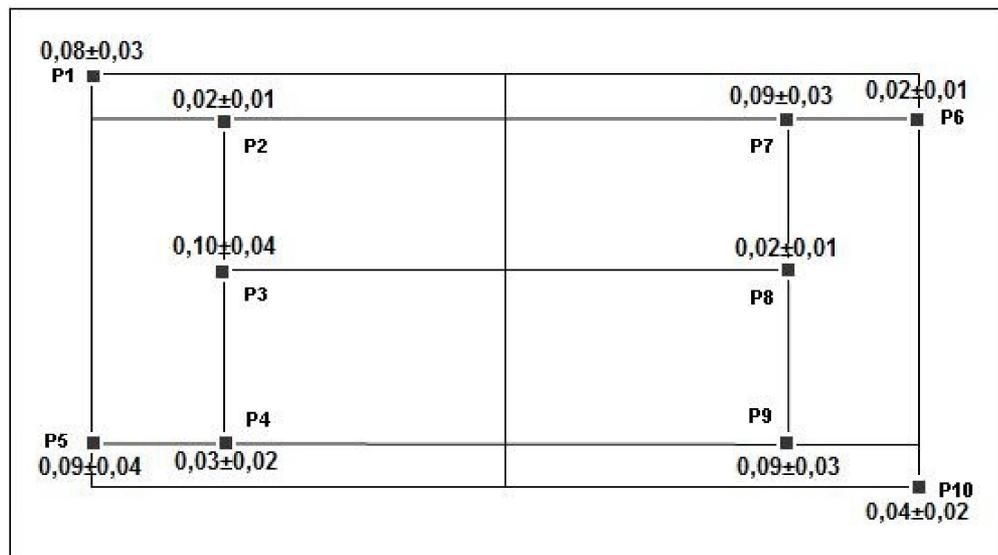


Figura 8 – Representação dos erros de medição (média  $\pm$  desvio padrão) em cada um dos 10 pontos arbitrários (25 medições por ponto) usados na validação. Os valores estão em metros.

## 4.2 Reprodutibilidade, replicabilidade, sensibilidade e ICC

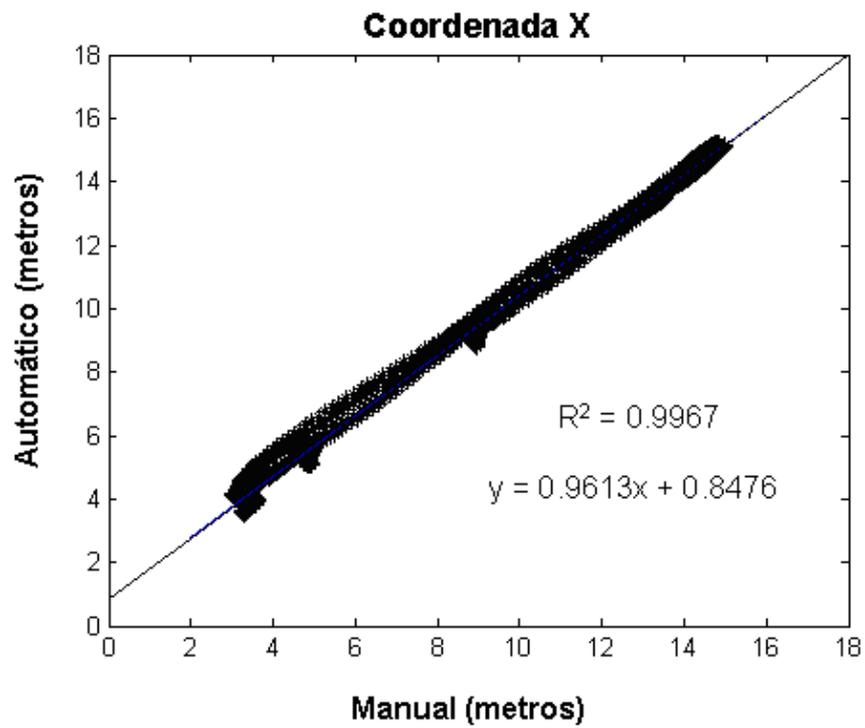
Os valores de reprodutibilidade, replicabilidade, sensibilidade e o coeficiente de correlação intraclassa (consistência( $ICC_c$ ) e grau de concordância absoluta( $ICC_a$ )) são mostrados na Tabela 1.

**Tabela 1 - Validação de reconstrução 2D dos dez pontos arbitrários da quadra de tênis**

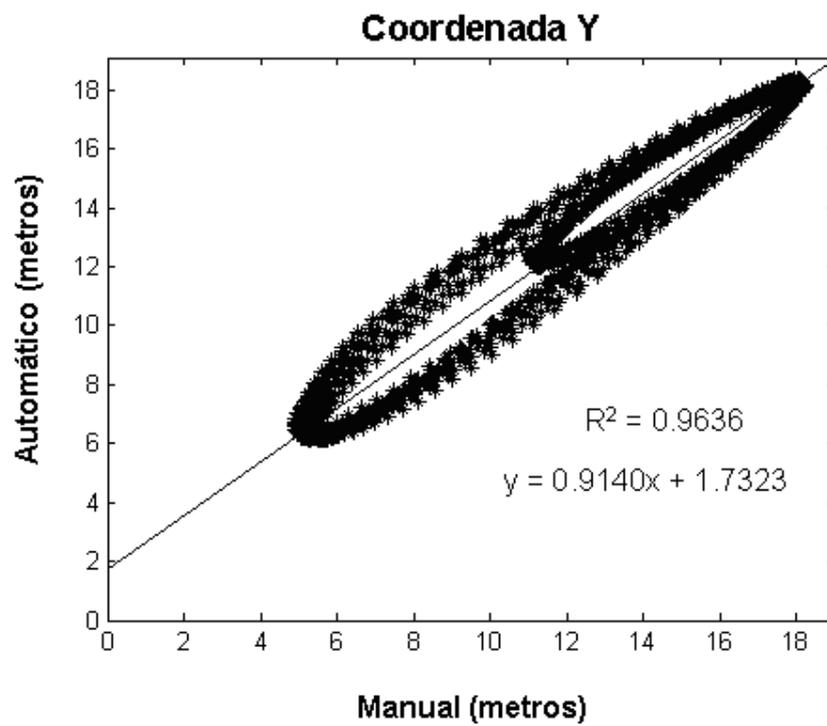
reprodutibilidade (m)	0,0091
replicabilidade (m)	0,0066
sensibilidade (%)	0.03 (comprimento) and 0.06 (largura)
$ICC_C$	0,88; $p=0,00$
$ICC_A$	0,89; $p=0,00$

## 4.3 Rastreamento manual x automático

As Figuras 9 e 10 mostram a análise de regressão feita para as coordenadas x e y entre o procedimento automático contra o procedimento manual (padrão ouro).



**Figura 9 – Análise de regressão linear realizada com as posições dos jogadores na coordenada x obtidas pelo procedimento de rastreamento manual e automático**



**Figura 10 – Análise de regressão linear realizada com as posições dos jogadores na coordenada y obtidas pelo procedimento de rastreamento manual e automático**

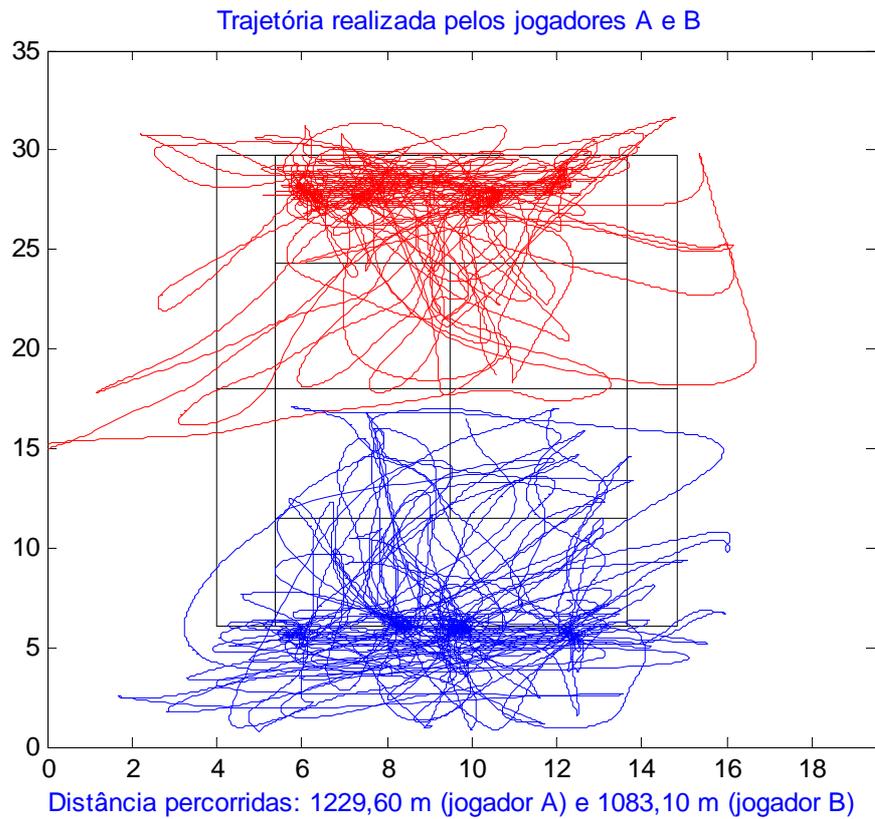
Nota-se que para ambas as coordenadas (x,y) houve uma regressão linear significativa ( $p < 0,05$ ) das posições obtidas pelos procedimentos de rastreamento manual (referência) e automático. Para a coordenada x, o valor de  $R^2$  foi de 0,9967 enquanto que para a coordenada y o valor foi de 0,9636. Tais representações mostram que os dados experimentais se ajustam ao modelo linear e confirma a hipótese de alta correlação entre os valores medidos pelos procedimentos de rastreamento manual e automático.

#### **4.4 Percentual de rastreamento automático**

Do total de 22.000 quadros processados (cerca de 25 minutos), 21.995 quadros foram rastreamento automaticamente (99,98%). No caso, somente houve a necessidade de uma intervenção do operador para a correção de cinco quadros consecutivos. A sequência de imagens utilizada na validação da posição dos jogadores obteve 100% de rastreamento automático.

#### **4.6 Exemplos de aplicação do método**

As trajetórias realizadas pelos jogadores ao longo de um set são mostradas na Figura 11. A distância percorrida média por cada jogador durante um set foi de 1229,60 m para o jogador A e 1083,10 m para o jogador B.



**Figura 11 – Trajetórias realizadas por ambos os jogadores durante um set**

A Tabela 2 mostra a distância percorrida por game e a distância percorrida acumulada por jogador. No caso, a distância percorrida média por game foi de 136,63 m para o jogador A e 120,34 m para o jogador B.

**Tabela 2 – Distância percorrida acumulada por cada jogador por game**

<b>Game</b>	<b>Jogador A (m)</b>	<b>Jogador B (m)</b>	<b>Duração (s)</b>
1	96,24	70,47	100,00
2	132,67	130,42	180,00
3	119,32	119,69	137,00
4	161,42	130,94	209,00
5	96,96	94,18	120,00
6	169,70	204,37	245,00
7	222,75	161,51	221,00
8	119,44	102,89	153,00
9	111,09	68,59	102,00
<b>Distância acumulada</b>	<b>1229,60</b>	<b>1083,10</b>	<b>1467,00</b>

## 5 DISCUSSÃO

Neste trabalho, um método de rastreamento automático de jogadores de tênis de campo foi proposto e validado. O método exige somente o uso de duas câmeras fixas e um software composto por algoritmos específicos, conforme descrito nas seções anteriores. O principal resultado foi a obtenção simultânea das trajetórias realizadas por ambos os jogadores de uma forma automática e confiável.

Os resultados mostraram que o método proposto neste trabalho é replicável para valores acima de 0.0066 m e reprodutíveis para valores acima de 0.0091 m. O erro máximo foi menor que 0,06% da largura e 0,03% do comprimento da área de medição deste estudo. Os resultados obtidos de ICC se mostraram consistentes e com excelente concordância.

Estes valores foram menores que os encontrados Alcock, Hunter e Brown (2009), com erro máximo de 1,5% para o comprimento e 2,5% para a largura de um campo de futebol. Tais valores podem ser comparados também com o erro encontrado por Ângulo e Dapena (1992) que reconstruiu as coordenadas dentro de um volume de 8 m usando um quadro especialmente calibrado e pontos de controle localizados com um erro máximo de  $\pm 1,5$  mm em qualquer direção. Em Barros et al. (2010) os erros encontrados na determinação de posições da quadra de handebol foi aproximadamente 0,20 m representando 0,1% de erro relativo. De acordo com o fabricante de sistemas especializados em rastreamento de bolas (Hawk-Eye®), os erros médios gerados pelo sistema são 3,6 mm, sendo este melhor aos apresentados neste trabalho.

O procedimento de rastreamento automático mostrou ser válido se comparado ao procedimento de rastreamento manual (padrão ouro) demonstrando altos coeficientes de determinação ( $R^2 = 0,9967$  para a coordenada x e  $R^2 = 0,9636$  para a coordenada y). Isso confirma a alta similaridade entre as medidas obtidas pelos procedimentos de rastreamento manual e automático.

Com relação ao percentual de rastreamento automático do método proposto, o valor alcançado (99,98%) é maior que os 95% encontrados em partidas de futebol (FIGUEROA et al., 2006; BARROS et al., 2007), 67% alcançados em partidas de handebol (BARROS et al., 2010) e 20% alcançados no rugby em cadeira de rodas (SARRO et al., 2010). O percentual de rastreamento automático de jogadores no método proposto neste trabalho é maior que alguns métodos de rastreamento aplicado ao tênis de campo (DANG et al., 2010)

que obteve cerca 87% de automatização. O alto grau de automatização do método proposto pode ser explicado pelo número reduzido de jogadores em partidas de tênis de campo comparados a outros esportes coletivos (p. ex. futebol, handebol, etc.), evitando oclusões e congestões de jogadores durante o processamento das imagens.

As trajetórias, distâncias percorridas e outras variáveis secundárias obtidas neste trabalho mostraram ser de grande interesse para a melhor compreensão das demandas físicas e táticas de jogadores de tênis de campo durante uma partida. Entretanto, o método proposto pode ser considerado muito promissor. Seu uso deve ser testado em partidas de alto nível futuramente, sob diferentes condições de iluminação e outras situações que poderiam afetar o desempenho ou aplicabilidade do método proposto.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O método proposto para rastreamento de jogadores de tênis de campo se mostrou pouco custoso de termos de tempo de processamento, pois foram realizados vários processos complexos de mensuração e de rastreamento num curto espaço de tempo, sem muitos problemas para o aprendizado da ferramenta software de análise e processamento de imagens (DVideo), bem como dos scripts adaptados em Matlab® exibição dos resultados do rastreamento. Os algoritmos de tratamento de dados adaptados e desenvolvidos em ambiente Matlab® se mostraram adequados e de fácil manuseio, de forma com que se pode, de forma flexível, apresentar os resultados tanto na forma gráfica quanto na forma de tabelas.

Além disso, o método proposto neste trabalho revelou ser efetivo para rastrear jogadores de tênis de campo. Com relação à confiabilidade do método, os testes experimentais mostraram que o mesmo é válido, consistente e com percentual alto de automatização.

## 7 REFERÊNCIAS

ABDEL-AZIZ Y.I.; KARARA H. M., 1971, Falls Church. **Direct linear transformation from comparator coordinates into object-space coordinates**. Falls Church: American Society Of Photogrammetry, 1971. 18 p.

ALCOCK, A.; HUNTER, A.; BROWN, N.. Determination of football pitch locations from video footage and official pitch markings. **Sports Biomechanics**, Lismore, v. 2, n. 8, p.129-140, 01 jun. 2009.

ANGULO, R. M.; DAPENA, J.. Determination of football pitch locations from video footage and official pitch markings. **International Journal Of Sport Biomechanics**, v. 8, n. 2, p.145-151, 01 jun. 1992

BARROS, R. M. L.; MISUTA, M. S.; MENEZES, R. P.; FIGUEROA, P. J.; MOURA, F. A.; CUNHA, S. A.; ANIDO, R.; LEITE, N. J. Analysis of the distances covered by first division Brazilian soccer players obtained with an automatic tracking method. **Journal Of Sports Science And Medicine**, Campinas, v. 6, n. 2, p.233-242, 01 jun. 2007.

BARROS, R. M. L.; MENEZES, R. P.; RUSSOMANO, T. G.; MISUTA, M. S.; BRANDÃO, B. C.; FIGUEROA, P. J.; LEITE, N. J; GOLDENSTEIN, S K. Measuring handball players trajectories using an automatically trained boosting algorithm. **Computer Methods In Biomechanics And Biomedical Engineering**, Campinas, v. 5, n. 13, p.1-11, 01 jun. 2010.

BARRY, N. T.; CHRIS, E. K.. **Guidelines for Evaluating and Expressing the Uncertainty of NIST Measurement Results**. Gaithersburg: Supersedes Nist Technical Note, 1994.

BLOOM T.; BRADLEY A. P, 2003, Sidney. **Player Tracking and Stroke Recognition in Tennis Video**. Sidney: B. Lovell And A. Maeder, 2003. 4 p.

DANG B., TRAN A., DINH T., DINH T., 2010, Berlin. **A Real Time Player Tracking System for Broadcast Tennis Video**. Berlin: Aciids'10, 2010. 8 p.

FIGUEROA, P. J.; LEITE, N. J.; BARROS, R. M. L.. Tracking soccer players aiming their kinematical motion analysis. **Computer Vision And Image Understanding**, Campinas, v. 2, n. 101, p.122-135, 01 jan. 2006a.

FIGUEROA, P. J.; LEITE, N. J.; BARROS, R. M. L.. Background recovering in outdoor image sequences: An example of soccer players segmentation. **Image And Vision Computing**, Campinas, v. 4, n. 24, p.363-374, 01 jan. 2006b.

JACQUES, S. M.. **Bioestatística: Princípios e Aplicações**. Porto Alegre: Artmed, 2006. 255 p.

MCGRAW, O. K.; WONG, S. P.. Forming Inferences About Some Intraclass Correlation Coefficients. **Psychological Methods**, v. 1, n. 1, p.30-46, 1 mar. 1996.

MISUTA, Milton Shoiti. **Rastreamento Automático de Trajetórias de Jogadores de Futebol por Videogrametria: Validação do Método e Análise dos Resultados**. 2004. 74 f. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Faculdade de Educação Física, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2004.

OWENS, N.; HARRIS, C.; STENNET, C.. Hawk-Eye tennis system. **Visual Information Engeneering**, Stevenage, v. 5, n. 1, p.182-185, 2003.

PERS, J.; KOVACIC, S.; STENNET, C.. A System for Tracking Players in Sports Games by Computer Vision. **Electrotechnical Review**, Ljubljana, v. 5, n. 67, p.281-288, 2000.

PINGALI, G. S.; JEAN, Y.; CARLBOM, I.. Real Time Tracking for Enhanced Tennis Broadcasts. **Computer Vision And Pattern Recognition**, Santa Barbara, n. , p.260-265, 25 jun. 1998.

SARRO, K. J et al. Tracking of wheelchair rugby players in the 2008 Demolition Derby final. **Journal Of Sports Sciences**, v. 2, n. 28, p.193-200, 2010.

THOMAS, J. R.; NELSON, J. K.. **Métodos de Pesquisa em Atividade Física**. 5. ed. Champaign: Human Kinetics, 1990. 396 p.

WEIR, P. R.. Quantifying test-retest reliability using the intraclass correlation coefficient and the SEM. **J. Strength Cond. Res.**, v. 1, n. 19, p.231-240, 2005.

YAN F., CHRISTMAS W., KITTLER J., 2005, Londres. **A tennis ball tracking algorithm for automatic annotation of tennis match**. Londres: Bmvc, 2005.

ZHU G., XU C., HUANG O., GAO W., XING L., 2006, Chicago. **Action recognition in broadcast tennis video with applications to semantic analysis of sports games.**, Na, 2006. 4 p.