

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE EDUCAÇÃO FÍSICA**

MILTON SHOITI MISUTA

**RASTREAMENTO AUTOMÁTICO
DE TRAJETÓRIAS DE
JOGADORES DE FUTEBOL POR
VIDEOGRAMETRIA: VALIDAÇÃO
DO MÉTODO E ANÁLISE DOS
RESULTADOS**

Campinas
2004

MILTON SHOITI MISUTA

**RASTREAMENTO AUTOMÁTICO
DE TRAJETÓRIAS DE
JOGADORES DE FUTEBOL POR
VIDEOGRAMETRIA: VALIDAÇÃO
DO MÉTODO E ANÁLISE DOS
RESULTADOS**

Dissertação de Mestrado apresentada à Pós-Graduação da Faculdade de Educação Física da Universidade Estadual de Campinas para obtenção do título de Mestre em Educação Física.

Orientador: prof. Dr. Ricardo Machado Leite de Barros

Campinas
2004

**FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA CENTRAL DA UNICAMP**

M691r Misuta, Milton Shoiti.
Rastreamento automático de trajetórias de jogadores de futebol por vídeogrametria: validação do método e análise dos resultados / Milton Shoiti Misuta. – Campinas, SP : [s.n.], 2004.

Orientador : Ricardo Machado Leite de Barros .
Tese (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Educação Física.

1. Futebol. 2. Rastreamento automático. 3. Biomecânica.
I. Barros, Ricardo Machado Leite de. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Educação Física.
III. Título.

MILTON SHOITI MISUTA

**RASTREAMENTO AUTOMÁTICO DE
TRAJETÓRIAS DE JOGADORES DE FUTEBOL POR
VIDEOGRAMETRIA: VALIDAÇÃO DO MÉTODO E
ANÁLISE DOS RESULTADOS**

Este exemplar corresponde à redação final da Dissertação de Mestrado defendida por Milton Shoiti Misuta e aprovada pela Comissão julgadora em: 02/02/2004

Dr. Ricardo Machado Leite de Barros
Orientador

Campinas
2004

COMISSÃO JULGADORA

Dr. Ricardo Machado Leite de Barros
Orientador

Dr. Eduardo Kokubun

Dr. Ricardo Anido

Dr. Sergio Cunha

Dedicatória

Dedico este trabalho aos meus pais e irmãos pelo apoio, amor e carinho que me possibilitaram caminhar nesta trilha

Agradecimentos

Pelo apoio, pelo convívio, pelo aprendizado, pela amizade, por termos caminhados juntos...

aos meus pais

aos meus irmãos

ao Prof. Dr. Ricardo Machado Leite de Barros

aos Prof Dr. Euclides Custódio de Lima Filho, Prof. Dr. René Brenzikofer, Prof. Dr. Sérgio Augusto Cunha

aos amigos Renato, Christiane, Fernando, Henrique, Luciana

aos colegas de laboratório e projeto do futebol Pascual, Tiago, Rafael, Clodoaldo

aos colegas de laboratório Pedro, Olival, Luciano, Luciane, Luciana, Mario, Cintia, Fernanda, Daniela, Carla, Amanda, Ligia, Karine

MISUTA, Milton Shoit. **Rastreamento Automático De Trajetórias De Jogadores De Futebol Por Videogrametria: Validação Do Método E Análise Dos Resultados.** 2004. 74f. Dissertação (Mestrado em Educação Física)-Faculdade de Educação Física. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

RESUMO

A análise objetiva da dinâmica de um jogo de futebol requer o desenvolvimento de metodologias eficientes para detectar e codificar as informações disponíveis durante a partida. Dados contínuos sobre a posição em função do tempo de cada um dos atletas possibilitam análises das distâncias percorridas por cada um, as regiões do campo em que se deslocaram, as distribuições de velocidades, além de análises táticas. Um método automático capaz de fornecer estes dados foi recentemente proposto e baseia-se no registro em vídeo do jogo por câmeras digitais e posterior rastreamento dos jogadores nas seqüências de imagens utilizando técnicas de processamento de imagens, em particular, morfologia matemática. As vantagens do método são a de fornecer dados simultâneos dos jogadores das duas equipes em uma partida sem interferir no desempenho ou significar risco ao atleta, uma vez que este não tem que se deslocar portando transmissores/receptores, como em outros métodos descritos na literatura. Este trabalho consiste na validação do método de rastreamento automático de trajetórias de jogadores de futebol por videogrametria e a aplicação do método em uma partida oficial do Campeonato Brasileiro de Futebol. Os objetivos do estudo foram: a) avaliar a acurácia do método na determinação da posição de um determinado ponto no campo; b) avaliar a acurácia do método na determinação das distâncias percorridas pelos atletas; e c) avaliar a aplicabilidade do método na análise de uma partida oficial. Os resultados da avaliação das medidas de posição do jogador no campo foram: acurácia (30,61cm), bias (30,53cm) e precisão (2,16cm). Os resultados da avaliação da distância total percorrida pelos atletas em situação controlada foram: acurácia (4,14 m), bias (3,98m) e precisão (1,15 m) em uma distância total de 2.924 metros. A análise de regressão linear mostrou que o método baseado em videogrametria forneceu medidas equivalentes aos obtidos por medição direta, R^2 (1,0000), coeficiente angular (0,9877) e intervalo de confiança (0,9868 a 0,9887), coeficiente linear (-2,2680m) e intervalo de confiança (-4,0151 m a -0,5209 m). O método foi aplicado em uma partida oficial de futebol e, embora o rastreamento não tenha sido totalmente automático, foi possível a obtenção das distâncias percorridas de todos os jogadores do time A e B (1º. e 2º. tempos) e as distribuições de velocidades para todos os jogadores do time A (1º. e 2º. tempos). O método mostrou-se confiável para a identificação das variáveis estudadas, além de não interferir no desempenho do atleta e ser aplicável em torneios oficiais.

Palavras-Chaves: futebol, rastreamento, acurácia, biomecânica

MISUTA, Milton Shoiti **Rastreamento Automático De Trajetórias De Jogadores De Futebol Por Videogrametria: Validação Do Método E Análise Dos Resultados**. 2004. 74f. Dissertação (Mestrado em Educação Física)-Faculdade de Educação Física. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

ABSTRACT

An objective analysis of the dynamic of a soccer game required the development of efficient methodologies for detection and codification about information during the match. The continuous data about the position in function of time of each players movement, make possible the analysis of covered distances, the displacement region in the field, the distribution of velocities, as well as the tactical analysis of the players movement. An automatic method capable in providing this data was recently proposed and it is based on the video register of a game by digital cameras and the tracking of the players using image processing and computer vision techniques. The advantages of this method consist in making available of simultaneous data of the players of both teams, without interfering in the performance or causing risk to the players, since they don't need to carry any device as it is used by other methods found in the literature. This work consists in validation of method for automatic tracking of players based on videogrammetry. The method was applied in a official match of the national soccer championship. The objective of this study was a) evaluate the accuracy of the method in the determination of the position of the points in the field; b) evaluate the accuracy of the method in the determination of the distance covered by the players; c) evaluate the applicability of the method in a official soccer game. The result of the evaluation of the measured player position was: accuracy (30,61cm), bias (30,53cm), precision (2,16cm). The result of evaluation of the total distance covered by a subject in the experimental test was: observed value (2.884,67 m). The difference found between the expected value (2.924 m) and the observed value was 40,19 m and this result represents a relative error of 1,37%. The analysis of linear regression showed that the method based on videogrammetry supplied a measurement equivalent to the values obtained by direct measurement: R^2 (1,00), angular coefficient (0,9877) with confidence interval (0,9868 m to 0,9887 m), linear coefficient (-2,2680 m) with confidence interval (-4,0151 m to -0,5209 m). The method was applied in a official soccer match, and although the tracking was not totally automatic, it was possible to analyze the distance covered by all players and their velocities of both team during the first and the second half of the match. The method showed to be confident for the identification of the studied variables, besides not interfering in the performance of the player and can be used during the official matches.

Keywords: *soccer, tracking, accuracy, biomechanics*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Imagens das quatro câmeras posicionadas no ponto mais alto da arquibancada no Estádio do Guarani F.C.	17
Figura 2: Interface do sistema Dvideow para realizar a segmentação. O bloco destacado com uma circunferência refere-se ao algoritmo para transformar uma imagem colorida em uma imagem em escala de cinza.	19
Figura 3: (a) Imagem dos jogadores no campo. (b) Imagem de fundo. (c) Imagem após a remoção de fundo. (d) Imagem com os contornos relativos aos jogadores.	21
Figura 4: Sequência de imagens do jogo	24
Figura 5: Obtenção dos <i>blobs</i> correspondentes aos jogadores	24
Figura 6: Representação do grafo construído a partir dos <i>blobs</i> da figura 5	24
Figura 7: Etapa de separação dos <i>blobs</i>	24
Figura 8: Etapa de identificação do time a que pertence cada jogador	24
Figura 9: Representação do grafo construído a partir dos <i>blobs</i> da figura 8.....	24
Figura 10: Descrição da posição, $p(x, y)$, do jogador feita a partir da localização de um único ponto (projeção do jogador sobre um plano).....	26
Figura 11: Descrição da posição $p_i(x_i, y_i)$ de um jogador e o vetor associado a este ponto no quadro i	28
Figura 12: Esquema do campo com os 6 pontos $P_k(k=1,...,6)$ com as coordenadas conhecidas. Os pontos $C_h(h=1,...,6)$ são os pontos utilizados para a calibração. Sendo C_1 a origem do sistema de referência.	33
Figura 13: Esquema do campo com o percurso e as subdivisões nos seguintes trechos: A(74,99 m), B(54,88 m), C(107,54 m), D(54,99 m). A distância total é de 292,4 metros.....	35
Figura 14: Análise de resíduos dos valores da coordenada X. A linha contínua indica a média e a linha tracejada indica o desvio padrão.....	38
Figura 15: Análise de resíduos dos valores da coordenada Y. A linha contínua indica a média e a linha tracejada indica o desvio padrão.....	38
Figura 16: Regressão linear entre os valores esperados (medida direta) e os valores observados (medição automática). O valor de $R^2=1,0000$, coeficiente angular: 0,9877 (intervalo de confiança: 0,9868 e 0,9887) e coeficiente linear: -2,2680 m (intervalo de confiança: -4,0151m a -0,5209m).....	40
Figura 17: Regressão linear entre os dados da medição automática e a medição manual. O valor de $R^2=1,0000$, coeficiente angular: 0,9982 (intervalo de confiança: 0,9969 e 0,9995) e o coeficiente linear: 0.8783m (intervalo de confiança: -1,4439m e 3,2005m).....	42
Figura 18: Trajetórias realizadas pelo lateral esquerdo (LE) e lateral direito (LD) do time A durante o 1º. tempo. As distâncias percorridas correspondem respectivamente a $5.694,7 \pm 78,02$ m e $5.203,6 \pm 71,29$ m.	44
Figura 19: Distâncias percorridas durante a partida (distância \pm erro relativo) pelos atletas em um jogo do Campeonato Brasileiro de futebol. O erro relativo foi de 1,37 %. Identificação de cada jogador em função da posição: GO: goleiro; VO: volante; LD: lat. Direito; AT: atacante; ZA: zagueiro; LE: lat. Esquerdo; ME: meia; JU: juiz.....	46

Figura 20: Gráfico de distância percorrida no primeiro tempo pelos jogadores do time A.	48
Figura 21: Gráfico de distância percorrida no primeiro tempo pelos jogadores do time B.	48
Figura 22: Distribuição das distâncias percorridas pelos jogadores do time A e do time B realizadas a cada 5 minutos.	51
Figura 23: Curva de velocidades de um jogador do time A no primeiro tempo.	52
Figura 24: Detalhamento da curva de velocidades apresentada na figura 27 no intervalo de 8,5 a 10,5 minutos do primeiro tempo.	53
Figura 25: Representação do tempo de permanência em cada faixa de velocidades dos 11 jogadores do time A. Para a coluna dos jogadores GO e AT(2), foi feita o somatório dos tempos dos jogadores que atuaram durante o segundo tempo. Identificação de cada jogador em função da posição: GO: goleiro; ZA: zagueiro; VO: volante; LE: lateral esquerdo; LD: lateral direito; ME: meia; AT: atacante.	54
Figura 26: Distribuição de velocidades para o 1º. tempo (figura da esquerda) e 2º. tempo de jogo (figura da direita) do time A e B.	57
Figura 27: Tempo de permanência na faixa de velocidades de 6-10 m/s para o 1º. tempo de jogo (figura da esquerda) e 2º. tempo de jogo (figura da direita) do time A e B.	57

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Síntese dos Trabalhos Relativos aos Métodos Baseados em Estimativa Visual.....	12
Quadro 2: Síntese dos Trabalhos Relativos aos Métodos Baseados em Sensores-Transmissores.....	12
Quadro 3: Síntese dos Trabalhos Relativos aos Métodos Baseados em Imagens.....	13
Quadro 4: Mostra a faixa de velocidade e o trecho correspondente no qual o voluntário percorreu as 10 voltas da trajetória.....	36
Quadro 5: Tempo de permanência (médio) em cada faixa de velocidades.....	55
Quadro 6: Valores médios de distância percorrida apresentada por diferentes métodos.....	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Percentual de distância percorrida e o percentual de tempo em cada faixa de velocidade durante um jogo (número de jogadores = 4).	8
Tabela 2: Apresenta a identificação da câmera, o ponto utilizado, a coordenada (x e y) com relação ao valor esperado e o ponto médio (\bar{x} e \bar{y}) com relação ao valor observado. A coluna (p) corresponde à precisão e a coluna (b) ao valor de bias.	34
Tabela 3: Valores médios de distância percorrida, percentual de distância percorrida e percentual de tempo em cada faixa de velocidades para time A (1º. e 2º. tempos). Número de jogadores (n=7).	59
Tabela 4: Valores médios de distância percorrida, percentual de distância percorrida e percentual de tempo em cada faixa de velocidades para time B (1º. e 2º. tempos). Número de jogadores (n=7).	60

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	OBJETIVOS	3
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
3.1	MÉTODO BASEADO EM ESTIMATIVA VISUAL	5
3.2	MÉTODOS BASEADOS EM SENSORES-TRANSMISSORES.....	7
3.3	MÉTODOS BASEADOS EM IMAGENS	8
4	METODOLOGIA.....	15
4.1	SISTEMA DVIDEOW	15
4.1.1	Aquisição	16
4.1.2	Medição	18
4.1.2.1	Medição Automática	18
4.1.2.2	Segmentação.....	18
4.1.2.3	Rastreamento	22
4.1.3	Medição Manual.....	26
4.1.4	Calibração e Reconstrução 2D	26
4.2	VARIÁVEIS EXPERIMENTAIS.....	27
4.3	TRATAMENTO DOS DADOS.....	29
4.4	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	29
5	EXPERIMENTO EM AMBIENTE CONTROLADO.....	31
5.1	TESTE ESTÁTICO.....	32
5.2	TESTE DINÂMICO.....	35
5.2.1	Determinação dos Parâmetros do Filtro ButterWorth	37
5.2.2	Avaliação do Modo de Medição Automática.....	39
5.2.3	Avaliação do Modo de Medição Manual	41
6	ANÁLISE DE UMA PARTIDA DE FUTEBOL	43
6.1	EXEMPLOS DE MOVIMENTAÇÕES REALIZADAS POR DOIS JOGADORES ..	43
6.2	ANÁLISE DAS DISTÂNCIAS PERCORRIDAS PELOS JOGADORES	45
6.3	ANÁLISE DA DISTRIBUIÇÃO DAS DISTÂNCIAS PERCORRIDAS PELOS JOGADORES.....	50
6.4	EXEMPLO DE UMA CURVA DE VELOCIDADES	52
6.5	ANÁLISE DAS DISTRIBUIÇÕES DE VELOCIDADES.....	54
7	DISCUSSÃO	61
	CONCLUSÕES.....	65
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	67
	ANEXOS	69

1 Introdução

A análise objetiva da dinâmica de um jogo de futebol requer o desenvolvimento de metodologias eficientes para detectar e codificar o maior número de informações a respeito de uma partida. Dados sobre a posição em função do tempo de cada atleta possibilitam análises das variáveis cinemáticas derivadas, tais como, distância total percorrida, distribuição de velocidades, entre outras variáveis importantes. Assim, a quantificação dessas variáveis permite análises do desempenho físico, análise técnica e tática, para um jogador ou de toda a equipe.

O tratamento do futebol como objeto de investigação científica aponta para o desenvolvimento de métodos para registro, tratamento, análise e interpretação das informações referentes ao jogo. Com relação à obtenção de dados sobre as posições dos atletas em função do tempo e suas variáveis derivadas, diversas metodologias têm sido propostas na literatura. Os princípios básicos de aquisição de dados são de três tipos: a) estimativa visual e registro por um operador das posições dos jogadores; b) o uso de dispositivos sensores/transmissores a serem transportados pelos atletas que permitam a sua localização no campo; c) aqueles que usam técnicas de videogrametria.

As técnicas baseadas em estimativa visual são bastante imprecisas, além de muito trabalhosas. As técnicas baseadas em sensoriamento eletrônico (rádio, GPS, ultra-som etc) implicam no transporte pelo atleta dos sensores/transmissores, o que nem sempre é possível por razões de segurança, da regra do esporte ou de constrangimento ao atleta.

Metodologias baseadas em videogrametria possibilitam a obtenção simultânea da trajetória de todos os jogadores, não causam qualquer tipo de constrangimento ao atleta, são aplicáveis à análise das duas equipes simultaneamente e permitem a associação das trajetórias com dados de eventos/fundamentos do jogo. Contudo, a grande quantidade de dados a serem processados exige a automatização do rastreamento. Esta automatização é difícil devido aos seguintes fatores: a) a impossibilidade do enquadramento com uma única câmera de todo o campo com a resolução espacial adequada, o que obriga a utilização de até seis câmeras aumentando a quantidade de dados a serem processados; b) a existência de múltiplos alvos a serem rastreados simultaneamente; c) a dificuldade no acompanhamento de cada jogador devido à complexidade das situações como em oclusões de muitos jogadores e ações realizados por dois

ou mais jogadores quando estão muito próximos; d) a variabilidade dos elementos da imagem em função das mudanças na iluminação e perdas nos processos de registro; e) alto custo computacional de armazenamento e processamento das imagens.

Um sistema capaz de realizar o rastreamento automático de trajetórias de jogadores de futebol foi desenvolvido no Laboratório de Instrumentação para Biomecânica da Faculdade de Educação Física em cooperação com o Instituto de Computação da Unicamp (BARROS et al. 2001). Contudo, não se conhece com que acurácia as variáveis de interesse são obtidas, portanto, faz-se necessária a validação do método. Desta forma, deseja-se avaliar os erros na obtenção das variáveis experimentais e verificar a aplicabilidade do mesmo em um campeonato oficial.

A estrutura de apresentação deste texto está no seguinte formato:

- Introdução
- Objetivo
- Revisão bibliográfica sobre rastreamento automático de jogadores de futebol
- Caracterização do sistema Dvideow para realizar o rastreamento automático de jogadores de futebol
- Experimento em ambiente controlado
- Análise de um jogo do campeonato brasileiro de futebol
- Discussão
- Conclusão

2 Objetivos

Este trabalho consistiu na validação e análise dos resultados de um método de rastreamento automático de trajetórias de jogadores de futebol por videogrametria.

Os objetivos específicos para a validação do método são:

- avaliar a acurácia do método na determinação de uma posição (coordenadas x e y) no campo.
- avaliar a acurácia do método na determinação da distância total percorrida pelo jogador.
- Avaliar se os valores observados de distância percorrida usando o modo de medição manual podem ser usados para representar os valores obtidos no modo de medição automático.

Os objetivos específicos na análise da movimentação dos jogadores de futebol em uma partida oficial:

- Análise das distâncias percorridas pelos jogadores
- Análise da distribuição de velocidades dos jogadores

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A descrição e análise das trajetórias de atletas durante um jogo e outras variáveis cinemáticas derivadas têm sido objeto de pesquisas na área de Biomecânica do futebol e outras afins. Esta revisão bibliográfica foi baseada nos trabalhos sobre metodologias para obtenção das trajetórias dos jogadores de futebol, bem como da análise dessas trajetórias e da distribuição do tempo de permanência de um jogador em faixas de velocidades pré-determinadas. Os artigos publicados em revistas e anais dos congressos nacionais e internacionais que foram consultados abrangem o período de 1976 a 2003. As bibliotecas eletrônicas consultadas foram Pubmed e Probe com as palavras chave: *tracking players, soccer, game analysis, motion analysis, global positional systems (GPS), soccer actions, quantification of games, movement speeds and distances covered.*

3.1 MÉTODO BASEADO EM ESTIMATIVA VISUAL

Reilly e Thomas (1976) realizaram a análise de padrões de movimentos dos jogadores da 1ª divisão do campeonato inglês. Para isto, determinou-se o comprimento médio de uma passada do atleta a ser analisado nas seguintes situações andar, andar de costas, trotar, correr e “sprint”. Uma vez determinado, estas medidas foram utilizadas para estimar a distância percorrida por este jogador durante todo o jogo. Um observador posicionado no setor da arquibancada próximo ao meio do campo utilizou a anotação manual e o uso de um gravador de fita k-7 para registrar as ações (saltos, cabeceios, chutes, passes, entre outros) e os tipos de movimentos. Foram acompanhados mais de 50 jogos para obter as informações dos jogadores goleiro (n=1), defensor (n=7), lateral (n=8), meio de campo (n=11) e atacante (n=14). Os valores médios de distância total percorrida foram: a) goleiro: 3.972m; b) defensor: 7.759m ± 521m; c) lateral: 8.245m ± 816m; d) meio de campo: 9.805m ± 787m; e) atacante: 8.397m ± 710m. A distância total percorrida pelos jogadores (defensor, lateral, meio de campo e atacante) variou de 7.069m a 10.921m (média de 8.680m e desvio padrão de 1.011m). Sendo que 36,8% foi realizado em trote, 24,8% (andar), 20,5% (correr), 11,2% (sprint) e 6,7% (andar para trás). O número

médio de tipos de movimentos calculado durante a competição foi: trotar (239), correr (114), “sprints” (62), andar (308) e andar para trás (120).

Withers et al. (1982) realizaram a análise de padrões de movimentos dos jogadores da 1ª divisão do campeonato australiano. Para isto, determinou-se o comprimento médio de uma passada do atleta a ser analisado nas seguintes situações caminhar, trotar, correr, “sprint”, movimento lateral, andar para trás e trotar para trás. Uma vez determinado, estas medidas foram utilizadas para estimar a distância percorrida por este jogador durante todo o jogo. A filmagem foi feita acompanhando a movimentação de um jogador durante toda a partida. Os jogadores analisados foram: defensor (5), lateral (5), meio de campo (5) e atacante (5). Os valores médios de distância total percorrida foram: a) defensor: 10.169 m \pm 1.460 m; b) lateral: 11.980 m \pm 1.873 m; c) meio de campo: 12.194 m \pm 2.366 m; d) atacante: 11.766 m \pm 949 m.

Erdman (1991) realizou o rastreamento da trajetória de um jogador de uma partida da terceira divisão do futebol polonês. A partida foi filmada com uma câmera posicionada no último degrau da arquibancada do setor próximo do meio do campo e de forma que o campo inteiro fosse enquadrado. Após a filmagem, utilizou-se um aparelho de vídeo-cassete para reprodução quadro a quadro, uma folha quadriculada adaptada ao monitor de TV e uma folha quadriculada maior na qual eram transcritos os pontos de correspondência relacionados a um determinado jogador(es). As informações foram anotadas a cada segundo durante 5 minutos. A partir dos dados sobre a posição do jogador em função do tempo, obtiveram-se os dados sobre a velocidade e a aceleração. Segundo o autor, em 5 minutos de jogo, um jogador “lateral”, percorreu 741 m com velocidade média de 2,5 m/s e apresentou velocidade máxima de 7,8 m/s. Neste intervalo, a distância média percorrida pelos jogadores do time A foi de 404 m e pelo time B de 426 m. A velocidade média para o time A foi de 1,3 m/s e 1,4 m/s para o time B. Sendo que a máxima velocidade foi, respectivamente, de 3,5 e 4,2 m/s.

3.2 MÉTODOS BASEADOS EM SENSORES-TRANSMISSORES

Hennig e Sterzing (1999) realizaram o rastreamento da trajetória de voluntários percorrendo uma pista de atletismo utilizando o Sistema Global de Posicionamento (GPS) e o método de GPS diferencial (DGPS). O GPS é uma tecnologia que permite a localização de um sujeito no espaço utilizando satélites que captam sinais emitidos por um transmissor localizado na superfície da Terra. Este método possibilita, assim, realizar o rastreamento das trajetórias para várias modalidades esportivas como o ciclismo, a maratona, o futebol entre outros e obter a posição, velocidade e o tempo de um determinado atleta. O aparelho utilizado para o primeiro experimento foi o GARMIN 12XL GPS com 250 g e a frequência de aquisição de 0.5 Hz. Em uma pista de atletismo (400 m) dentro de um estádio, 6 voluntários foram orientados a realizar caminhadas, corridas e corridas em velocidade máxima (“sprint”). Cada voluntário realizou os testes carregando um transmissor preso ao corpo. Os dados correspondentes ao tempo e a posição foram enviados ao computador pelo receptor de sinais do GPS. Num segundo experimento foi utilizado o DGPS com o aparelho receptor ESYS DGPSHAND 2.1. As atividades realizadas pelos voluntários foram os mesmos do primeiro experimento. Os resultados de distância percorrida (média) e velocidade (média) para o primeiro experimento foram: a) caminhada: 450,6 m e 1,62 m/s; b) corrida: 402,6 m e 3,20 m/s; c) “sprint”: 397,6 m e 5,00 m/s. Os resultados para o segundo experimento apresentaram erros menores que 1%.

Em outro estudo, Hennig e Briehle (2000) realizaram o rastreamento automático de trajetórias para 70 jogadores de futebol de diversas categorias alemãs em 14 jogos. Uma vez que no jogo de futebol não é permitido utilizar qualquer tipo de aparelho, os estudos foram feitos nos treinos destas equipes durante 90 minutos. O aparelho utilizado foi o GARMIN 12XL GPS com 250 g. Os resultados do rastreamento automático mostraram-se eficientes para os deslocamentos em alta velocidade (erro menor que 2%), no entanto para os deslocamentos em baixa velocidade houve uma superestimativa em torno de 10%. A distância média percorrida pelos 70 jogadores durante 90 minutos foi de 10.600 m, sendo a menor medida de 8.480 m e a maior medida de 12.750 m. As distâncias percorridas apresentadas para cada jogador foram: a)

defensor: 10.100 m; b) líbero: 10.230 m; c) lateral: 11.000 m; d) atacante: 10450 m; e) meio de campo: 11.000 m.

3.3 MÉTODOS BASEADOS EM IMAGENS

Ohashi et al. (1987) realizaram o rastreamento das trajetórias de 4 jogadores que disputam a Liga Japonesa de Futebol. O rastreamento foi feito para um jogador de cada vez, na qual o mesmo é focado de maneira a ocupar a posição central da imagem em um par de câmeras de vídeo montadas sobre tripés. Os ângulos de rotação do instrumento são mensurados por goniometria e os dados são registrados por um gravador de fita k-7. A partir das informações dos ângulos e da distância entre as câmeras, a determinação da posição do atleta no campo é feita utilizando técnicas de triangulação. Obteve-se, assim a posição do jogador em função do tempo para o jogo todo e a frequência de aquisição foi de 0.5 Hz. O valor médio de distância percorrida foi de 5.373 m e 4.968 m, respectivamente para o 1º. e 2º. tempos. A tabela 1 apresenta o percentual de distância percorrida e o percentual de tempo em cada faixa de velocidade durante um jogo.

Tabela 1: Percentual de distância percorrida e o percentual de tempo em cada faixa de velocidade durante um jogo (número de jogadores = 4).

Faixas de velocidades [m/s]	% de distância percorrida	% de tempo
0-1	8.0	30.5
1-2	23.1	30.5
2-3	23.3	18.3
3-4	20.2	11.3
4-5	12.6	5.5
5-6	7.1	12.5
6-7	3.4	1.0
7-8	1.4	0.4
8-9	0.8	0.0
9-10	0.1	0.0
total	100.0	100.0

Fonte: Ohashi et al., 1987, p. 332.

D'ottavio e Tranquilli (1993) realizaram o rastreamento da trajetória de um jogador da partida entre Itália e Dinamarca pelo Campeonato Europeu de seleções. Na metodologia usada, o jogador é focado de maneira a ocupar a posição central da imagem em um

par de câmeras de vídeo montadas sobre tripés. Os ângulos de rotação do instrumento são mensurados por goniometria e os dados registrados são transferidos para um computador. Assim, usando técnicas de triangulação é possível a determinação da posição do atleta no campo. Obteve-se, assim a posição do jogador em função do tempo para o jogo todo e a frequência de aquisição foi de 10 Hz. A partir dos dados sobre a posição em função do tempo, obtiveram a distribuição das velocidades e das acelerações. A denominação da posição de atuação do jogador não está citada no artigo, no entanto pelo gráfico da movimentação do jogador analisado assemelha-se a um jogador de meio de campo.

Os resultados apresentados para este jogador são: a) distância percorrida de 12.060 m; b) corrida em baixa velocidade até 11 km/h (3,05 m/s): 31,65 minutos; c) corrida em média velocidade entre 11 km/h e 15 km/h (3,05 m/s e 4,16 m/s): 11,6 minutos; d) corrida em velocidade entre 15 km/h e 21 km/h (4,16 m/s e 5,83 m/s): 4,18 minutos; e) corrida em alta velocidade entre 21 km/h e 24 km/h (5,83 m/s e 6,66 m/s): 39 segundos; f) corrida em velocidade máxima “sprint” acima de 27 km/h (7,5 m/s): 30 segundos.

Intille e Bobick (1994) descrevem o desenvolvimento de uma metodologia para o rastreamento automático de jogadores de futebol americano a partir de uma abordagem denominada de “Closed-Worlds”. O trabalho tem por objetivo, também, realizar a detecção e a identificação de movimentos dos jogadores automaticamente. Esta pesquisa realizada no Massachusetts Institute of Technology – MIT – é denominada “Computers Watching Football” (site: www-white.media.mit.edu). A filmagem foi realizada com câmeras de vídeo com frequência de aquisição de 30 Hz. Após a filmagem, realizou-se o desentrelaçamento dos campos da imagem, ou seja, desmembrar uma imagem (quadro) para obter um quadro composto pelas linhas pares e um quadro com as linhas ímpares. Assim, a seqüência de imagens de 600 quadros utilizado no trabalho corresponde a 10 segundos a uma frequência de 60 Hz desentrelaçados e com definição da imagem de 700x240 pixels. A metodologia utilizada baseia-se: a) na filmagem com aproximação maior (“Zoom”) do jogador ou da jogada na qual a abordagem é denominada “Closed-Worlds” para obter as características da região selecionada como o número que identifica a jarda, as linhas existentes nas proximidades, o número de jogadores presentes, a função dos jogadores presentes (atacante, defensor, etc), entre outras; e b) com a movimentação da câmera que persegue o jogador ou a jogada na qual há um processamento que elimina os

efeitos da movimentação da câmera. A realização do rastreamento dos jogadores utiliza os padrões obtidos da região enquadrada ao longo da seqüência de imagens.

Choi et al. (1997) descrevem o desenvolvimento de uma metodologia para o rastreamento automático de jogadores de um jogo de futebol a partir de uma seqüência de imagens de TV a cabo. A seqüência utilizada tem 5 segundos, a freqüência de aquisição foi de 30 Hz e fez-se o desentrelaçamento para obter as linhas pares e ímpares da imagem, que resultou numa seqüência de imagens com 60 Hz. O método para o processamento da seqüência de imagens é baseado no histograma de cores (R,G,B) dos jogadores e o posicionamento dos jogadores no campo-modelo construído a partir das imagens parciais de TV obtidos (“image mosaicking”). O rastreamento automático consistiu na utilização de métodos de casamento de padrões e de predição baseado no filtro de Kalman para prever a localização do objeto no próximo quadro. Os casos de oclusão foram tratados apenas para jogadores de times diferentes na qual se utilizou o histograma de cores da região correspondente.

Needham e Boyle (2001) descrevem o desenvolvimento de uma metodologia para o rastreamento automático de jogadores de futebol de salão por meio de uma abordagem denominada de “multiple object Condensation”. A filmagem foi feita em um ginásio coberto com uma câmera de vídeo colocada atrás de um dos gols e no ponto onde se obteve a máxima altura. A freqüência de aquisição foi de 6 Hz e foi utilizado um total de 835 quadros. O método “multiple object Condensation” consiste em armazenar informações sobre os jogadores a serem rastreados. Para isto, uma estrutura composta de três níveis foi determinada: a) “identificação do jogador” possui informações relativas às coordenadas 2D, ao tamanho da região ocupada e um número identificador de um jogador, b) “trajetória do jogador” possui informações relativas á trajetória de um jogador, c) “conjunto de trajetórias” possui informações relativas às trajetórias de um grupo de jogadores. Com estas informações, o rastreamento é realizado utilizando a predição baseada no filtro de Kalman. Realizou-se, também, a medição manual do deslocamento dos jogadores, que foi assumida como a trajetória verdadeira, para fazer a comparação com o método automático. Para a determinação da posição, um erro em torno de 0,5 m foi esperado para a medição manual. Para a medição automática, um erro médio de 1,0 m comparado à medição manual realizada foi considerado aceitável pelo autor na determinação da posição. A análise comparativa entre os métodos apresentou uma diferença média de 1,16 m. Segundo o autor, 56%

da trajetória obtida na medição automática, que apresentou erro menor que 1 metro, corresponde à trajetória realizada pelo atleta.

Os quadros 1, 2 e 3 mostram uma síntese dos trabalhos apresentados na revisão bibliográfica.

Os trabalhos encontrados baseiam-se nos seguintes métodos: método baseado em estimativa visual, métodos baseados em sensores-transmissores e métodos baseados em imagens. O método baseado em estimativa visual foi um passo importante como uma forma de obtenção de trajetórias de jogadores de futebol, mas é um método impreciso e demorado. Os métodos baseados em sensores-transmissores possibilitam a obtenção da posição em função do tempo de maneira automática, mas considerando as dimensões do aparelho pode acarretar risco ao atleta, além disto, a sua aplicação nem sempre é permitida devido às restrições das regras do esporte. Dentre os métodos baseados em imagens, os estudos com a utilização de goniômetros tem obtido resultados quantitativos sobre um jogador durante uma partida completa. É uma metodologia que pode apresentar bastante precisão na obtenção da trajetória realizada pelo jogador, mas há uma limitação quanto à operacionalização para obter os dados de todos os jogadores. Outros trabalhos baseados em imagens, utilizaram uma curta seqüência de imagens para desenvolver métodos visando solucionar os problemas de oclusão mútua entre jogadores e de identificação de jogadores de times diferentes e para desenvolver técnicas de rastreamento automático utilizando principalmente o filtro de Kalman. Assim, não apresentaram resultados quantitativos com relação aos jogadores em um jogo de futebol.

Quadro 1: Síntese dos Trabalhos Relativos aos Métodos Baseados em Estimativa Visual.

MÉTODOS BASEADOS EM ESTIMATIVA VISUAL				
Título	Autor	Objetivo	Metodologia	Resultados
A Motion Analysis of Work-rate in Different Positional Roles in Professional Football Match-play	Reilly e Thomas (1976)	análise de padrões de movimentos dos jogadores	Jogos da 1ª. divisão do campeonato inglês. Estimativa da distância percorrida por um jogador durante todo o jogo conhecendo o comprimento médio de uma passada nas seguintes situações (andar, andar de costas, trotar, correr e “sprint”) do atleta a ser analisado	Obtenção da distância percorrida de um jogador para o jogo todo.
Match Analices of Australian Professional Soccer Players	Withers et al. (1982)	análise de padrões de movimentos dos jogadores	Jogos da 1ª. divisão do campeonato australiano. Estimativa da distância percorrida por um jogador durante todo o jogo conhecendo o comprimento médio de uma passada nas seguintes situações (caminhar, trotar, correr, “sprint”, movimento lateral, andar para trás e trotar para trás) do atleta a ser analisado	Obtenção da distância percorrida de um jogador para o jogo todo.
Quantification of Games – Preliminary Kinematic Investigations in Soccer	Erdmann (1991)	rastreamento da trajetória e análise de velocidade e aceleração	Jogo de futebol da terceira divisão; Utilizou um aparelho de vídeo-cassete, uma folha quadriculada adaptada ao monitor de TV e uma folha quadriculada maior na qual eram transcritos os pontos de correspondência relacionados a um determinado jogador(es).	Obtenção da distância percorrida e análise da distribuição de velocidade e aceleração para um jogador durante 5 minutos de jogo.

Quadro 2: Síntese dos Trabalhos Relativos aos Métodos Baseados em Sensores-Transmissores.

MÉTODOS BASEADOS EM SENSORES-TRANSMISSORES				
Título	Autor	Objetivo	Metodologia	Resultados
The use of global positioning systems (GPS and DGPS) for the tracking of human motion	Hennig e Sterzing (1999)	Desenvolvimento de um método para rastreamento de trajetórias	Rastreamento de 6 voluntários em uma pista de 400 m utilizando o sistema GPS. Cada voluntário foi orientado a percorrer uma volta completa nos seguintes tipos de movimentos: andar, correr e “sprint”	Os erros percentuais médios para a distância percorrida apresentaram os seguintes resultados: a) erros menores que 2%: correr e “sprint”; b) erros de 10%: andar.
Game analysis by GPS satellite tracking of soccer players	Hennig e Briehle (2000)	rastreamento automático de trajetórias	Foram analisados 70 jogadores de futebol de diversas categorias alemãs em 14 jogos; Os estudos foram feitos nos treinos destas equipes durante 90 minutos; Utilizou o GPS e um aparelho receptor GARMIN 12XL GPS.	Obteve a distância percorrida e a velocidade para 90 minutos num jogo durante o treino para um defensor, lateral, meio-campista e atacante;

Quadro 3: Síntese dos Trabalhos Relativos aos Métodos Baseados em Imagens.**MÉTODOS BASEADOS EM IMAGENS**

Título	Autor	Objetivo	Metodologia	Resultados
Measuring Movement speeds and Distances Covered During Soccer Match-Play	Ohashi et al. (1987)	rastreamento da trajetória de jogadores	Jogos da Liga Japonesa de Futebol. Obtenção da posição em função do tempo de um jogador de cada vez utilizando a técnica de triangulação para estimar a posição dos jogadores a partir de valores de ângulos obtidos por goniômetros.	Obtenção da distância percorrida e análise da distribuição de velocidades de um jogador para o jogo todo. Foram analisados 4 jogadores ao todo.
El rendimiento Del jugador de fútbol	D'Ottavio e Tranquilli (1993)	rastreamento da trajetória de jogadores de futebol e análise de velocidade e aceleração	Obtenção da posição em função do tempo de um jogador utilizando a técnica de triangulação para estimar a posição dos jogadores a partir de valores de ângulos obtidos por goniômetros.	Obtenção da distância percorrida e análise da distribuição de velocidades de um jogador para o jogo todo.
Visual tracking using closed-worlds	Intille e Bobick (1994)	Desenvolvimento de um método para rastreamento automático de trajetórias e identificação de jogadas	Jogo de futebol americano; método denominado "Closed-Worlds". Sequência de imagens com 600 quadros.	O método obteve sucesso nos casos em que não houve oclusão e correspondeu a 400 quadros.
Where are the ball and players? Soccer game analysis with color-based tracking and image mosaick	Choi et al. (1997)	Desenvolvimento de um método para rastreamento automático de trajetórias	Jogo de futebol. Sequência de imagens de TV a cabo com 5 segundos; Método denominado "analysis with color-based tracking and image mosaick". O rastreamento utiliza a predição baseada no filtro de Kalman.	Identificação dos jogadores e rastreamento nos 5 segundos nas situações sem oclusão entre jogadores.
Tracking multiple sports players through occlusion, congestion and scale	Needham e Boyle (2001)	Desenvolvimento de um método para rastreamento automático de trajetórias	Jogo de futebol de salão. Método denominado "multiple object Condensation"; Sequência de imagens com 835 quadros; Utiliza a predição baseada no filtro de Kalman para fazer o rastreamento.	Segundo o autor, 56% da trajetória obtida na medição automática corresponde à trajetória realizada pelo atleta.

4 METODOLOGIA

O projeto de rastreamento automático de trajetórias de jogadores de futebol está vinculado ao sistema para análise cinemática do movimento humano, projeto FAPESP 00/01293-1, sob responsabilidade do Prof. Dr. Ricardo Machado Leite de Barros, em desenvolvimento no Laboratório de Instrumentação para Biomecânica (LIB) da Faculdade de Educação Física da Unicamp em cooperação com o Instituto de Computação (IC) e o Departamento de Educação Física (Unesp).

Neste estudo, foi utilizado o sistema para análise cinemática (Dvideow) para a obtenção da posição dos jogadores em função do tempo e foi utilizado o ambiente Matlab para desenvolvimento de algoritmos para tratamento dos dados e análise de um jogo de futebol.

4.1 SISTEMA DVIDEOW

O sistema que será validado neste estudo foi desenvolvido no Laboratório de Instrumentação para Biomecânica da FEF-UNICAMP com a finalidade de permitir a análise cinemática de movimentos humanos. Tendo recebido posteriormente *interfaces* para análise de movimentos específicos tais como o posicionamento de jogadores de futebol (BARROS et al. (1999) e FIGUEROA et al. (2003b)). O sistema possui uma *interface* e algoritmos específicos para realizar o rastreamento de trajetórias de jogadores de futebol que estão descritos em Figueroa et al. (2003b).

A seguir serão apresentados os procedimentos para a obtenção das coordenadas 2D de cada jogador:

- Aquisição
- Medição automática
 - ✓ Segmentação
 - ✓ Rastreamento
- Medição manual
- Calibração e reconstrução 2D

4.1.1 Aquisição

A filmagem é feita com pelo menos 4 câmeras de vídeo digitais com padrão NTSC e 30 Hz (30 quadros por segundo) de frequência de aquisição. As câmeras são posicionadas no último degrau da arquibancada em posição fixa durante todo o jogo e de forma que o conjunto das câmeras cubra todo o campo, figura 1. Para cada câmera são necessárias 2 baterias com capacidade mínima para 45 minutos de gravação, 2 fitas DV de 60 minutos e um tripé.

Uma vez realizada a filmagem, a seqüência de imagens de cada câmera é transferida para o disco rígido do computador. Uma placa de transferência, que utiliza o padrão IEEE 1394, é utilizada para esta finalidade. Para realizar a análise, a frequência da seqüência de imagens é de 7,5 Hz, ou seja a cada quatro quadros um quadro é analisado. Os quadros são processados sem fazer o desentrelaçamento dos campos, assim a resolução das imagens é de 480 linhas por 720 colunas em formato AVI (Audio Video Interleaved).

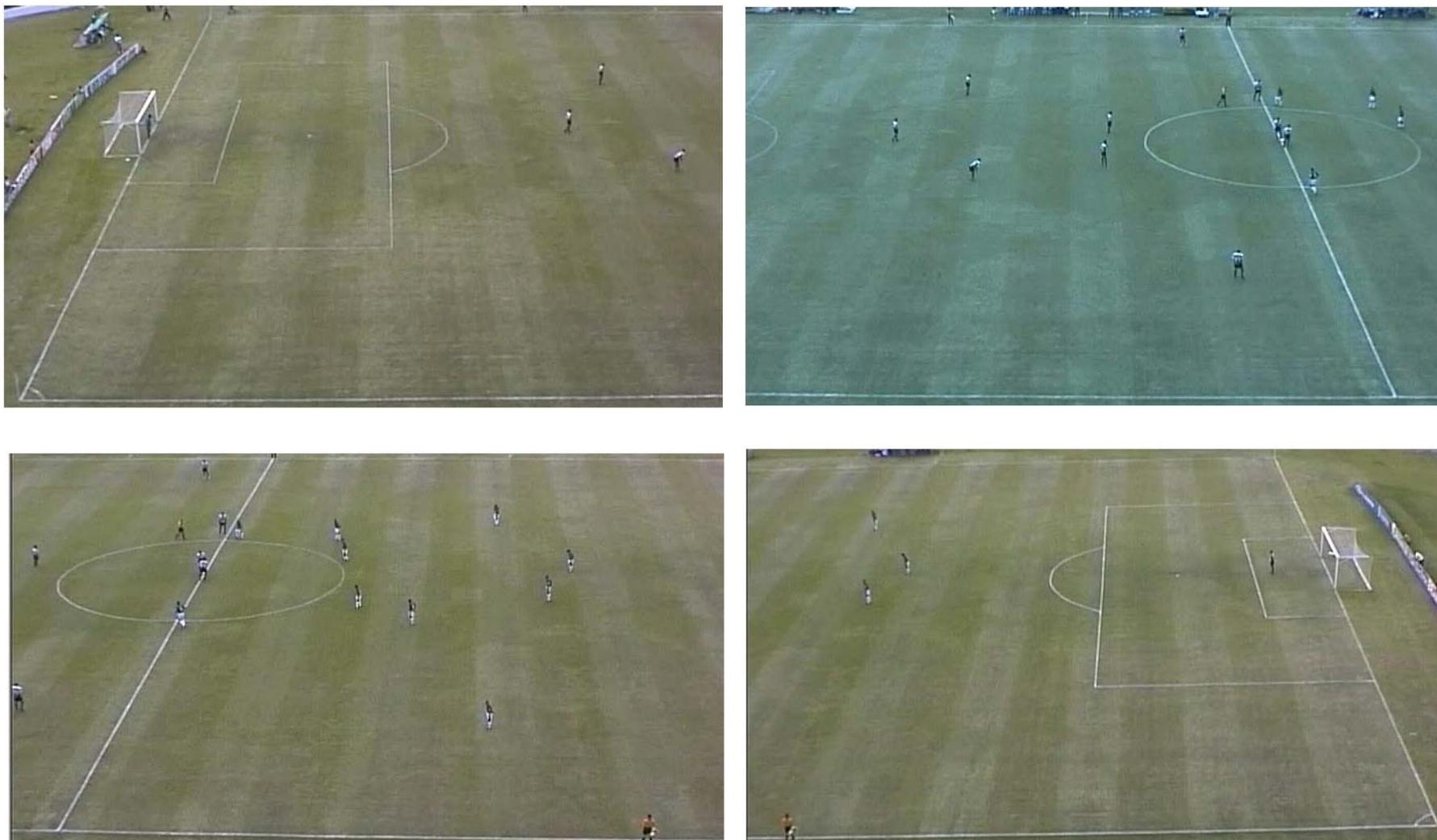


Figura 1: Imagens das quatro câmeras posicionadas no ponto mais alto da arquibancada no Estádio do Guarani F.C.

4.1.2 Medição

O processo de obtenção das coordenadas de tela relativas às posições de cada jogador nas seqüências de imagens é denominado de medição e pode ser feito no sistema Dvideow de dois modos, o primeiro designado por automático e o segundo "manual", sendo que neste último a intervenção do operador para indicar a posição do jogador é exigida em todos os quadros da seqüência de imagens.

4.1.2.1 Medição Automática

A medição automática é baseada em técnicas de processamento digital de imagens utilizando-se conceitos e operações de morfologia matemática. E os processos que envolvem são a segmentação e o rastreamento.

Cumpridas estas duas etapas, a identificação dos jogadores presentes nos quadros da seqüência de imagens e a definição da trajetória para os respectivos jogadores são realizadas sem a necessidade de intervenção do operador.

4.1.2.2 Segmentação

A finalidade da segmentação está em separar os objetos de interesse (jogadores, árbitros e bola – figura 3a) dos demais elementos da imagem (o campo, placas de propaganda etc - Figura 3b). A *interface* do sistema Dvideow para realizar a segmentação está apresentada na figura 2. Cada um dos blocos em azul corresponde a um algoritmo utilizado na segmentação. Cada bloco tem entradas (entrada=1, ..., 4), saídas (saída=1,..., 2) e menus associados para a escolha dos tipos de dados de entrada e saída. Os tipos de dados são imagens em escala de cinza ou coloridas. O bloco destacado com uma circunferência (figura 2) é um algoritmo que realiza a conversão da imagem de entrada para o nível de cinza. Neste caso, a entrada é uma imagem colorida e a saída é uma imagem em escala de cinza.

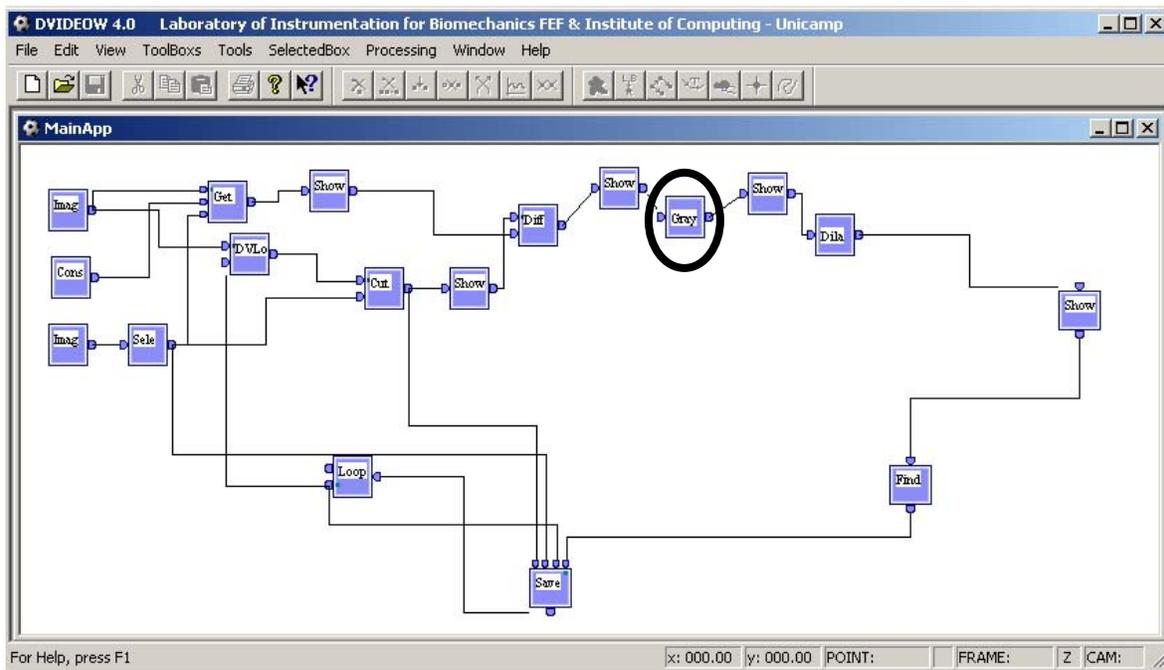


Figura 2: Interface do sistema Dvideow para realizar a segmentação. O bloco destacado com uma circunferência refere-se ao algoritmo para transformar uma imagem colorida em uma imagem em escala de cinza.

A segmentação aplicada no sistema Dvideow consiste em considerar o relevo topográfico definido pelo jogador na região de busca. O relevo topográfico é uma forma intuitiva de designar a região que pode corresponder ao jogador na imagem, pois esta região apresenta intensidades de cores diferenciadas em relação ao fundo preto (figura 3c). Este método de segmentação está descrito em Figueroa et al. (2003a) e pode ser resumido com os seguintes passos: 1- Seleção da Região de Interesse; 2- Remoção de Fundo realizado por um filtro de movimento; 3- Aumento dos picos da imagem usando operações de pré-processamento como erosão, abertura e outras; 4- Detecção dos contornos pela aplicação do gradiente; 5- Cálculo dos valores da dinâmica, dos mínimos regionais e seleção nestas regiões dos valores maiores; 6- Considerando as regiões obtidas, determinação de suas linhas divisoras de águas; 7- Eliminação de algumas regiões de acordo com parâmetros associados à estrutura morfológica dos marcadores, tais como perímetro, área e alongamento.

Após o processo que envolve a filtragem morfológica, a imagem é binarizada e as regiões conexas são rotuladas e recebem a denominação de *blobs*. Cada *blob* representado na figura 3d tem informações sobre cor, tamanho (número de pixels que representam o jogador),

perímetro e coordenadas (x e y) que representam a posição do centro do *blob* na imagem. A figura 3d mostra os resultados da segmentação.

Este processo de segmentação é feito para toda a seqüência de imagens de todas as câmeras utilizadas na filmagem de um jogo.

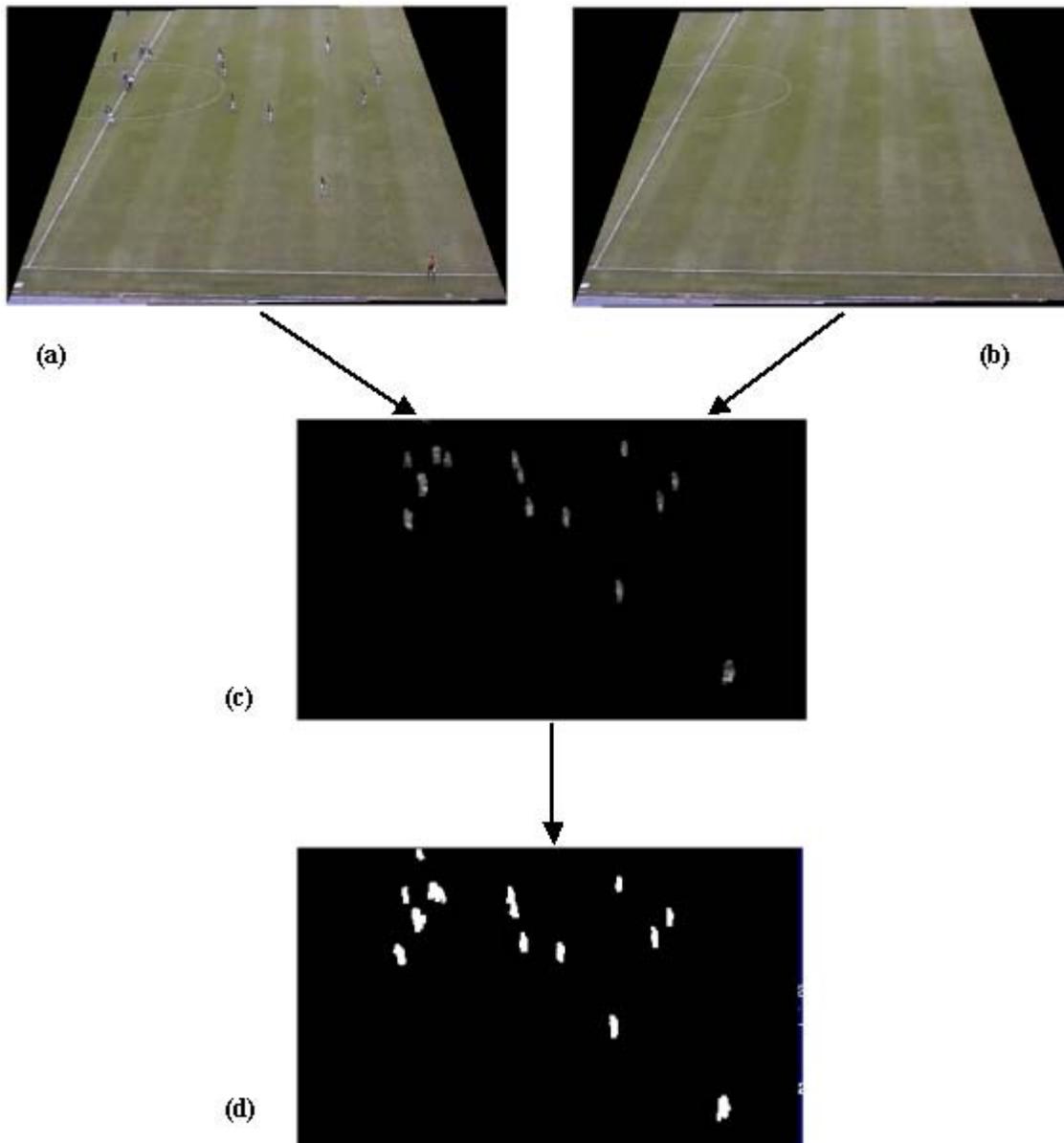


Figura 3: (a) Imagem dos jogadores no campo. (b) Imagem de fundo. (c) Imagem após a remoção de fundo. (d) Imagem com os contornos relativos aos jogadores.

4.1.2.3 Rastreamento

As informações obtidas após a segmentação correspondem a um conjunto de pontos discretos que podem corresponder às trajetórias dos jogadores presentes nas seqüências de imagens, mas ainda não estão associadas às trajetórias dos respectivos jogadores. Para tratar este problema é preciso desenvolver um algoritmo capaz de encontrar a trajetória percorrida para cada jogador em toda a seqüência de imagens. Entretanto, é importante estruturar o conjunto de dados para que o algoritmo possa ser eficiente. Dentre os métodos existentes, a teoria de grafos é uma das formas utilizadas para poder representar adequadamente este tipo de conjunto de dados. O grafo que representa o conjunto de dados deve ter, também, uma especificação simples, ou seja uma especificação que contenha um conjunto de vértices e arestas.

Um grafo $G(V,E)$ é um conjunto finito não-vazio V e um conjunto E de pares não ordenados de elementos distintos de V . Os elementos de V são os vértices e os de E são as arestas de G , respectivamente. Cada aresta $e \in E$ será denotada pelo par de vértices $e \in (v, w)$ que a forma. Nesse caso, os vértices v, w são os extremos (ou extremidades) da aresta e , sendo denominados adjacentes. A aresta e é dita incidente a ambos v, w . Duas arestas que possuem um extremo comum são chamadas de adjacentes. (SZWARCFITER , p.35, 1984)

No nosso caso, um vértice pode representar um ou mais *blobs* (figura 4) e a indicação do número de *blobs* representados está dentro de cada círculo, figura 6. A identificação do vértice é feito por $v_{i,t}$ em que i : (1, ..., número de *blobs* no quadro corrente) e t : (1, ..., número de quadros da seqüência de imagens).

A construção do grafo G para uma seqüência de imagens (figura 6 e 9) está dividida em:

Etapa 1. Esta etapa possui os seguintes passos:

- p1) criar um vértice $v_{i,t}$ para cada *blob* i encontrado no frame $t = 1$ da seqüência de imagens. Em seguida, cada vértice $v_{i,t}$ é inserido no grafo G ;
- p2) para cada *blob* i , calcular a distância $d_{i,j}$ em relação a cada *blob* j ($j: 1, \dots$, número total de *blobs*) no quadro $t+1$;
- p3) para cada vértice $v_{i,t}$, inserir a linha $_{i,j}$ que satisfaça as condições: 1) $d_{i,j} < d_{\max}$, em que d_{\max} representa uma distância máxima determinada pelo operador; 2) $d_{i,j}$ seja a menor distância encontrada entre o *blob* i do quadro t e o *blob* j do quadro $t+1$;
- p4) criar um vértice $v_{j,t+1}$ para cada *blob* j do quadro $t+1$. Em seguida, cada vértice $v_{j,t+1}$ é inserido no grafo G .
- p5) os passos p2-p4 são realizados para cada quadro e o valor de t é incrementado de 1;

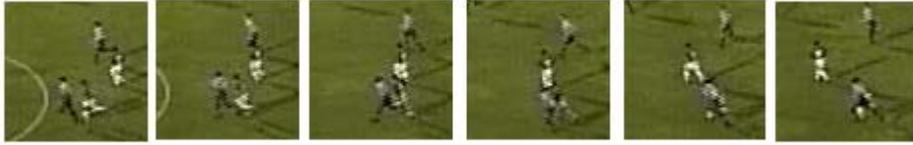


Figura 4: Seqüência de imagens do jogo

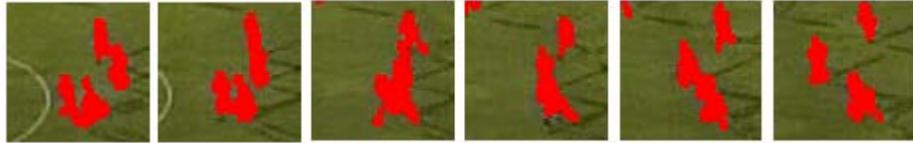


Figura 5: Obtenção dos blobs correspondentes aos jogadores

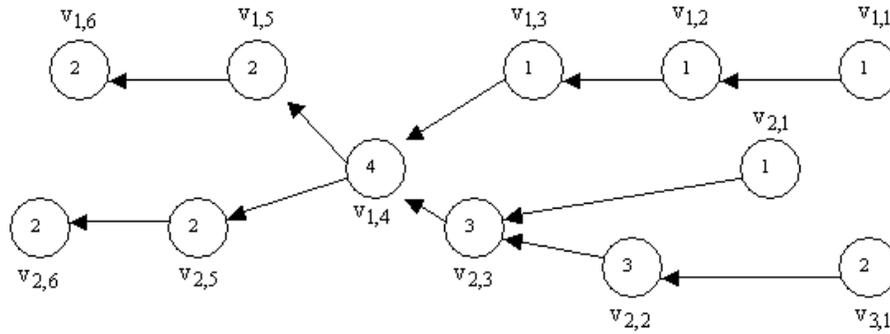


Figura 6: Representação do grafo construído a partir dos blobs da figura 5

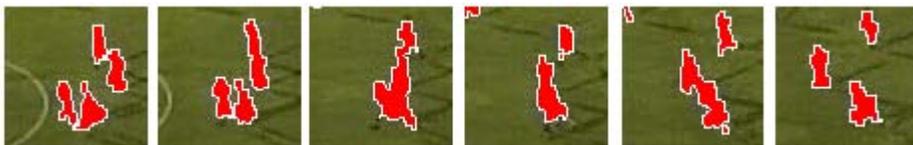


Figura 7: Etapa de separação dos blobs

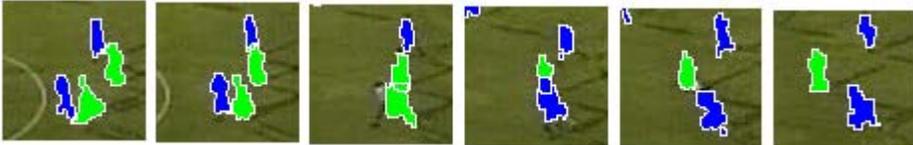


Figura 8: Etapa de identificação do time a que pertence cada jogador

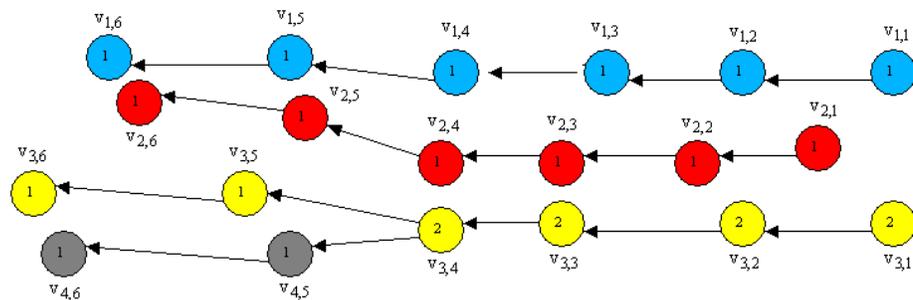


Figura 9: Representação do grafo construído a partir dos blobs da figura 8

Etapa 2. Separação dos *blobs*. Esta etapa consiste na separação do *blob* que contém mais de um jogador. A separação é feita, primeiramente, utilizando operadores morfológicos como a erosão e a dilatação. Nas situações em que a separação dos *blobs* não for possível com os operadores morfológicos, utiliza-se como modelo o jogador, cujas características estão contidas no *blob* antes da junção. Desta forma, a idéia está em encontrar na região de junção de vários jogadores aquela região que apresenta as características do modelo. O grafo da figura 6 apresenta vértices ($v_{3,1}, v_{2,2}, v_{2,3}, v_{1,4}$) que possuem mais de um *blob*. Para cada *blob* obtido pela separação é criado um novo vértice e uma nova linha que serão inseridos na estrutura do grafo G. A figura 8 mostra o resultado da separação dos *blobs*.

Etapa 3. Identificação do time a que pertence o jogador. A identificação do time a que pertence o jogador é feita considerando o histograma de cores. Com esta informação, os *blobs* que representam os jogadores de cada time recebem cores diferentes para servirem de parâmetro no momento do rastreamento (figura 8). No entanto, há momentos em que esta diferenciação é dificultada pela claridade, pela sombra causada pelo estádio ao entardecer, etc.

Uma vez construído o grafo, o rastreamento é feito para cada jogador separadamente da seguinte forma:

- p1- seleção do jogador no primeiro frame feito pelo operador;
- p2- uma vez selecionado o primeiro vértice, busca-se a informação do próximo vértice conexo e assim, consecutivamente, em toda a seqüência do grafo e constrói-se a trajetória. As seqüências de vértices nas cores azul e vermelho no grafo da figura 9 mostram o resultado de um trecho do rastreamento para dois jogadores;
- p3- no caso de haver mais de um caminho: no exemplo do vértice $v_{3,4}$, que representa mais de um *blob*, há duas possibilidades (caminhos). Nestes casos: a) utiliza-se a cor atribuída ao *blob* como critério de decisão, quando há dois caminhos. Um exemplo é mostrado na seqüência de vértices da cor amarela (figura 9); b) nos demais casos, o operador realiza a intervenção para a escolha do caminho correto.

4.1.3 Medição Manual

A interface do sistema Dvideow permite que se obtenha as coordenadas de tela da posição de um determinado jogador por intermédio de um operador. Nesta opção, o operador deve apontar na tela do computador o jogador, cuja coordenada se deseja obter com a utilização do mouse. Esta opção é utilizada nas situações em que não é possível realizar o processo automático. Esta opção pode, também ser utilizada para corrigir ou melhorar uma medição feita no modo automático.

4.1.4 Calibração e Reconstrução 2D

O movimento estudado refere-se ao deslocamento do jogador no campo em função do tempo durante toda a partida. Assim, para a descrição do movimento do jogador considera-se a projeção do jogador sobre um plano determinado no momento da definição do sistema de coordenadas associadas ao campo. Desta forma, a descrição da posição do jogador é feita a partir da localização de um único ponto, tendo como modelo de representação do jogador o modelo de ponto material (figura 10). Para isso, inicialmente cada câmera deve ser calibrada a partir de, no mínimo, quatro pontos conhecidos no sistema de coordenadas associadas ao campo e as suas correspondentes coordenadas na imagem.

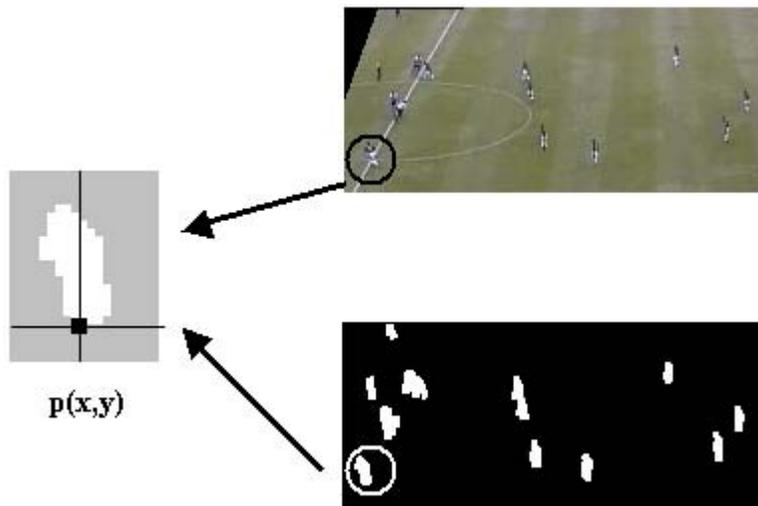


Figura 10: Descrição da posição, $p(x, y)$, do jogador feita a partir da localização de um único ponto (projeção do jogador sobre um plano).

O método de calibração e reconstrução bidimensional utilizado foi proposto por Abdel-Aziz e Karara (1971), denominado DLT (Direct Linear Transformation).

As equações básicas do método de reconstrução tridimensional de coordenadas (DLT) foram adequadas para a reconstrução 2D e são mostradas a seguir. Para obter as coordenadas 2D (X e Y) da trajetória de um jogador a partir das coordenadas (x e y) de tela é preciso encontrar os parâmetros de transformação das equações. O processo de cálculo realizado para encontrar estes parâmetros é denominado de calibração e reconstrução.

$$(n_1^k - n_3^k x_i^k) X_i + (n_4^k - n_6^k x_i^k) Y_i + n_7^k - x_i^k = 0 \quad (1)$$

$$(n_2^k - n_3^k y_i^k) X_i + (n_5^k - n_6^k y_i^k) Y_i + n_8^k - y_i^k = 0 \quad (2)$$

Este sistema de equações é aplicado duas vezes, a primeira para quantificar os parâmetros da transformação (calibração) e a segunda para efetuar a reconstrução propriamente dita. Para a calibração das câmeras temos que: x_i e y_i são as coordenadas de tela do i -ésimo ponto de um sistema de referências conhecido, para cada câmera k ; X_i e Y_i são as coordenadas no plano do i -ésimo ponto de referência e n_h^k ($h=1, \dots, 8$) são os 8 parâmetros da transformação para a k -ésima câmera, a serem determinados.

4.2 VARIÁVEIS EXPERIMENTAIS

Adotamos um sistema de coordenadas associado ao campo no qual a abscissa é dada pela linha lateral do campo, a ordenada e dada pela liha de fundo do campo e a origem está em O (figura 11). Uma vez definido o referencial, a *posição do jogador* no campo é definida por um ponto $p(x, y)$ e a este ponto é atribuído um vetor \vec{r} (segmento orientado com origem em O e extremidade em p). A cada ponto $p_i(x_i, y_i)$ ($i=1, \dots, \text{número total de quadros}(q)$), é associado um vetor \vec{r}_{p_i} de tal forma que a seqüência de vetores $\vec{r}_{p_1}, \vec{r}_{p_2}, \dots, \vec{r}_{p_q}$ descreve a trajetória do jogador no intervalo de tempo considerado.

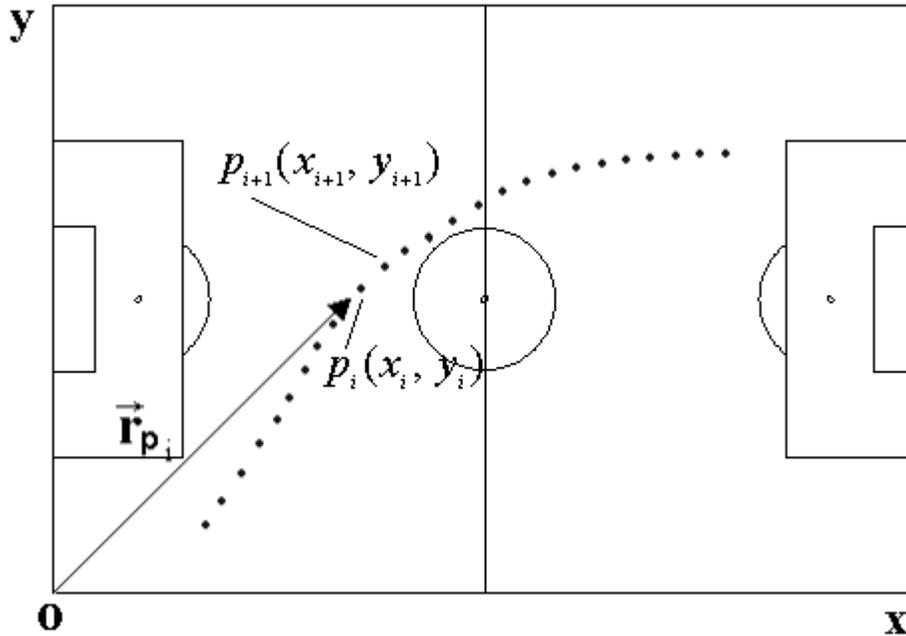


Figura 11: Descrição da posição $p_i(x_i, y_i)$ de um jogador e o vetor associado a este ponto no quadro i

A partir da trajetória obtida são utilizadas as seguintes variáveis experimentais:

a) *distância percorrida*. A distância percorrida foi calculada como o somatório dos deslocamentos realizados pelo atleta em cada intervalo correspondente a duas imagens consecutivas na seqüência de vídeo.

$$\text{distância percorrida} = \sum_{q=a}^b \sqrt{(x_{q+1} - x_q)^2 + (y_{q+1} - y_q)^2} \quad (4)$$

Em que x e y são as coordenadas do vetor \vec{r}_{p_q} da trajetória do jogador; q : (1,..., número total de quadros - 1); a, b : $(a, b) \subset q(1, \dots, \text{númeroTotalQuadros} - 1)$.

b) o módulo da *velocidade* $\vec{v}(q)$ foi obtido por derivação a partir dos dados suavizados da trajetória.

$$|\vec{v}(q)| = \frac{\sqrt{(x_{q+1} - x_{q-1})^2 + (y_{q+1} - y_{q-1})^2}}{(q+1) - (q-1)} \quad (3)$$

em que x e y são as coordenadas do vetor \vec{r}_{p_q} da trajetória do jogador; q : (1,..., número total de quadros - 1).

4.3 TRATAMENTO DOS DADOS

A trajetória de cada jogador foi filtrada utilizando o filtro digital *ButterWorth* (*Anexo A*) implementada no software Matlab. A determinação dos parâmetros (ordem do filtro e frequência de corte) foi realizada aplicando o filtro *Butterworth* variando os valores da ordem do filtro e da frequência de corte utilizando os dados experimentais obtidos no teste dinâmico e considerando a medida de distância percorrida e a existência de ruídos de alta frequência. A determinação dos parâmetros está descrita no capítulo "Experimento em Ambiente Controlado".

4.4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O desenvolvimento deste trabalho foi dividido em dois tópicos:

- a) Validação do Método. A finalidade deste tópico foi avaliar o método de rastreamento de jogadores de futebol por videogrametria. A descrição e os resultados estão no capítulo "Experimento em Ambiente Controlado".
- b) Análise de uma partida de futebol. A finalidade deste tópico consistiu em fazer a análise dos resultados para o 1º. e 2º. tempos. A descrição e os resultados estão no capítulo "Análise de Uma Partida de Futebol".

5 EXPERIMENTO EM AMBIENTE CONTROLADO

O estádio do Guarani Futebol Clube foi utilizado para realizar os seguintes experimentos:

- a) **teste estático.** Consistiu em verificar a acurácia do método para a determinação do vetor posição do jogador;
- b) **teste dinâmico.** Este teste está dividido em 3 etapas: a) determinação dos parâmetros do filtro ButterWorth; b) avaliação do modo de medição automática; c) avaliação do modo de medição manual.

Acurácia. O termo acurácia utilizado neste trabalho indica quanto o valor experimental está próximo do valor verdadeiro (valor da medida direta) e a sua determinação é feita considerando os valores de erros sistemáticos (*bias*) e aleatórios (precisão). Desta forma, quanto menor for o valor encontrado, maior será a acurácia do sistema (VUOLO, 1992). A acurácia foi calculada segundo as expressões (5, 6 e 7):

$$a^2 = b^2 + p^2 \quad (5)$$

$$b = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |\mu - m_i| \quad (6)$$

$$p = \sqrt{\left(\frac{1}{N-1}\right) \sum_{i=1}^N (m_i - \bar{m})^2} \quad (7)$$

em que **a** é acurácia (5), **b** é o bias (6), **p** é a precisão (7), m_i ($i=1,\dots,N$) = valor observado correspondente à medida obtida no experimento, \bar{m} = valor médio das N medidas, μ = valor esperado correspondente à medida obtida por medição direta, N é o número repetições do experimento.

Faixas de velocidades. Os termos utilizados para determinar o modo como o jogador se desloca num determinado trecho do campo em função da velocidade variam conforme o autor. Hennig e Sterzing (1999) utilizaram a denominação “walking”, “running” e “sprinting”. D'ottavio e

Tranquilli (1993) utilizaram a denominação junto com uma faixa de velocidades associada: “carrera lenta” (até 11 km/h), “carrera a paso largo” (de 11 km/h a 18 km/h), “carrera veloz” (de 18 km/h a 21 km/h), “sprint” (de 21 km/h a 24 km/h), “sprint maximo” (acima de 24 km/h).

Neste trabalho, adotamos cinco faixas de velocidades e as seguintes denominações associadas: a) "parado" entre 0,0 e 0,2 m/s; b) “andar” entre 0,2 e 2,0 m/s; c) “trotar” entre 2,0 e 4,0 ms; d) “correr” entre 4,0 e 6,0 ms e e) “sprint” acima de 6,0 ms. Para estabelecer a condição de "parado", verificamos algumas situações nas imagens do jogo em que se pode considerar o jogador parado. No entanto, a velocidade não é zero, assim, estabelecemos esta pequena faixa.

Análise de regressão. A análise de regressão foi utilizada para verificar se o modo de medição automática (Dvideow) é equivalente à medição direta e se o modo de medição manual é equivalente ao modo de medição automática.

5.1 TESTE ESTÁTICO

Este teste foi realizado para avaliar a acurácia na determinação de um ponto $P(x,y)$ no campo. A origem do sistema de coordenadas associadas ao campo é o ponto C_1 . Para isso, uma filmagem foi feita com duas câmeras digitais colocadas no último degrau da arquibancada e de forma que o conjunto das duas câmeras cubra uma metade do campo (figura 12). A figura 12 mostra os 6 alvos no campo, que possuem dimensão de 21 cm x 30 cm, com as medidas das coordenadas conhecidas. Cada um dos pontos identificados como P_k ($k=1,\dots,6$) corresponde ao centro deste alvo. Os pontos P_k ($k=1,2,5,6$) são vistos pela câmera 1 e os pontos P_k ($k=2,3,4,5$) são vistos pela câmera 2. A medição do ponto P_k de cada alvo foi realizada por um operador que indicava sua posição na imagem usando o *mouse* (modo manual de medição) no sistema Dvideow. As medições de cada um dos alvos ($K=8$, soma das 4 medições da câmera 1 com as 4 medições da câmera 2) foram repetidas 20 vezes ($N=20$). Após a medição, fez-se a calibração e em seguida a reconstrução 2D dos dados.

Cálculo de acurácia. Fizemos as seguintes associações com relação às variáveis das equações que definem o *bias* (6) e a precisão (7): associamos o valor da norma do ponto P_K obtido por medição direta à variável μ , associamos o valor da norma das 20 medições obtidas à

variável m_i ($i=1,\dots,20$) e \bar{m} é o valor médio das 20 medidas realizadas. E, para obter o valor de acurácia (5) considerou-se o *valor médio de bias* que corresponde ao valor médio dos valores de *bias* calculado (6) para cada ponto (P_K) e o *valor médio de precisão* que corresponde ao valor médio dos valores de precisão calculado (7) para cada ponto (P_K).

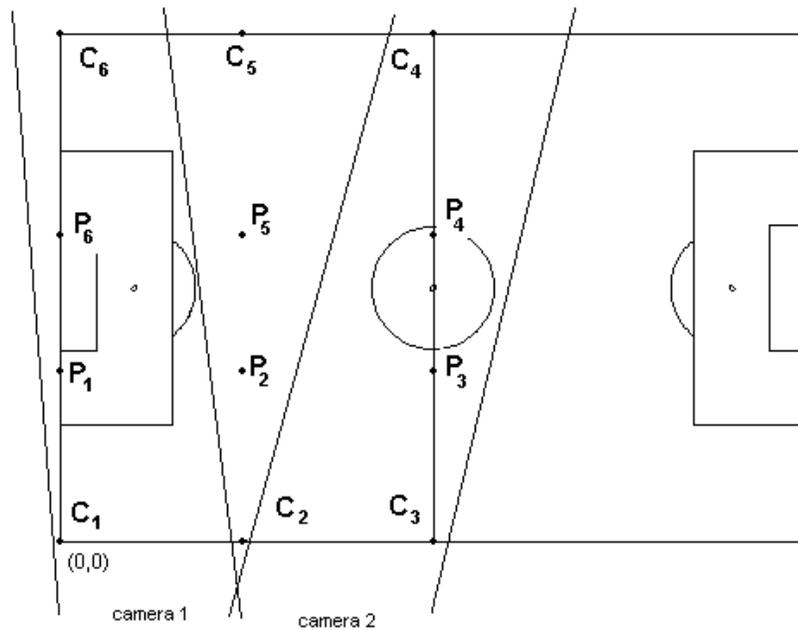


Figura 12: Esquema do campo com os 6 pontos P_k ($k=1,\dots,6$) com as coordenadas conhecidas. Os pontos C_h ($h=1,\dots,6$) são os pontos utilizados para a calibração. Sendo C_1 a origem do sistema de referência.

As coordenadas (x e y) apresentadas na coluna “valor esperado” correspondem aos pontos P_K e as coordenadas (\bar{x} e \bar{y}) apresentadas na coluna “valor observado” correspondem ao ponto médio para cada ponto P_K ($K=1,\dots,8$). A coluna (p) corresponde à precisão e a coluna (b) corresponde ao *bias* para cada uma das K medidas ($K=1,\dots,8$). A partir destes dados, a determinação da posição pelo sistema (Dvideow) teve como valor de acurácia 30,61 cm, valor de precisão 2,16 cm e valor de bias 30,53 cm (tabela 2).

Tabela 2: Apresenta a identificação da câmera, o ponto utilizado, a coordenada (x e y) com relação ao valor esperado e o ponto médio (\bar{x} e \bar{y}) com relação ao valor observado. A coluna (p) corresponde à precisão e a coluna (b) ao valor de bias.

		Valor esperado		Valor observado (médio)			
câmera	ponto	x [m]	y [m]	\bar{x} [m]	\bar{y} [m]	b [m]	p [m]
cam.1	P1	0,06	25,09	0,10	25,25	0.1747	0.0326
cam.1	P6	0,06	45,09	0,04	45,27	0.1851	0.0157
cam.1	P2	26,94	25,09	26,94	25,32	0.2394	0.0142
cam.1	P5	26,94	45,09	27,00	45,36	0.2805	0.0257
cam.2	P2	26,94	25,09	26,80	25,36	0.3070	0.0197
cam.2	P5	26,94	45,09	26,89	45,43	0.3518	0.0282
cam.2	P3	54,99	25,09	55,13	25,49	0.4320	0.0148
cam.2	P4	54,99	45,09	55,02	45,56	0.4722	0.0218
média						0.3053	0.0216

5.2 TESTE DINÂMICO

Aquisição. Um voluntário percorreu por 10 vezes o percurso composto pelos quatro trechos (A,B,C,D) identificados na figura 13, sendo que cada volta tem 292,4 metros. O voluntário foi instruído a realizar o percurso em quatro diferentes faixas de velocidades, qualitativamente definidas como andar, trotar, correr e “sprint”, segundo seqüência definida pelo experimentador. No interior de cada trecho, solicitou-se que a velocidade fosse mantida constante. Neste teste, o número e a disposição das câmeras foi o mesmo adotado no teste estático. O tempo de gravação foi de 18,26 minutos e a frequência de processamento foi de 7,5 Hz.

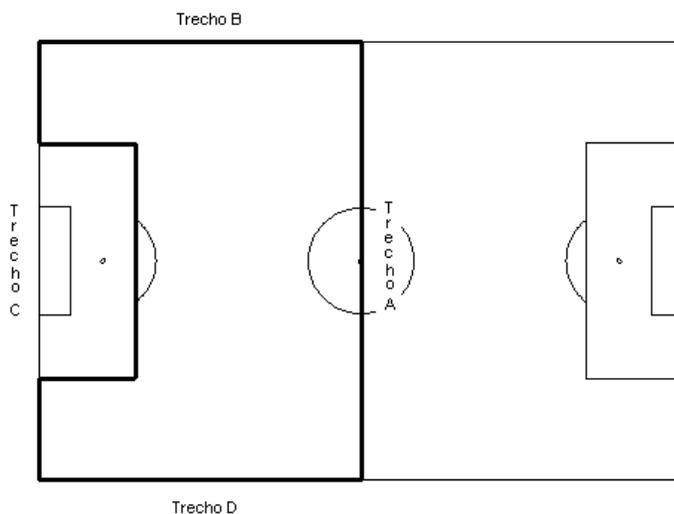


Figura 13: Esquema do campo com o percurso e as subdivisões nos seguintes trechos: A(74,99 m), B(54,88 m), C(107,54 m), D(54,99 m). A distância total é de 292,4 metros.

A faixa de velocidades em que o voluntário percorreu cada trecho está descrita no quadro 4. A seqüência (andar, trotar, correr e “sprint”) foi determinada de forma aleatória para o voluntário percorrer cada volta do percurso e de forma que em cada volta houvesse as 4 faixas de velocidades. Esta distribuição teve a finalidade de garantir que o voluntário percorresse os 4 trechos nas 4 faixas de velocidades e, também para simular as constantes mudanças de velocidades que ocorrem durante uma partida.

Quadro 4: Mostra a faixa de velocidade e o trecho correspondente no qual o voluntário percorreu as 10 voltas da trajetória.

voltas	Setor A 74.99m	Setor B 54.88 m	Setor C 107.54 m	Setor D 54.99 m
1	Andar	“sprint”	Correr	Trotar
2	Trotar	Andar	Correr	“sprint”
3	Trotar	“sprint”	Andar	Correr
4	Correr	“sprint”	Andar	Trotar
5	“sprint”	Trotar	Andar	Correr
6	Trotar	Andar	Correr	“sprint”
7	Andar	Correr	“sprint”	Trotar
8	Correr	Trotar	“sprint”	Andar
9	Andar	Correr	Trotar	“sprint”
10	“sprint”	Correr	Trotar	Andar

Medição

A medição das 10 voltas realizadas pelo voluntário foi feita nos 2 modos:

- a) *Medição automática.* O processo de medição foi totalmente automático não requerendo em nenhum momento a intervenção do operador.
- b) *Medição manual.* A medição manual foi feita por um operador utilizando a *interface* do Sistema Dvideow.

Avaliação do modo de medição automática. Realizou-se a avaliação de acurácia e a análise de regressão linear. A análise de regressão foi utilizada para verificar se os valores observados de distância percorrida (modo de medição automática) podem ser usados para representar os valores esperados (medição direta). O nível de significância adotado foi de 0,05.

Avaliação do modo de medição manual. Realizou-se a avaliação de acurácia e a análise de regressão linear. A análise de regressão foi utilizada para verificar se os valores observados de distância percorrida (modo de medição manual) podem ser usados para representar os valores esperados (modo de medição automática). O nível de significância adotado foi de 0,05.

5.2.1 Determinação dos Parâmetros do Filtro ButterWorth

A trajetória do jogador de futebol apresenta seqüências de movimentos que incluem desde movimentações com trechos curtos a trechos longos e com variações de velocidade. A trajetória utilizada em ambiente controlado considera alguns aspectos deste tipo de movimentação com a variação de velocidade. Além das características sobre a movimentação do jogador, os dados da trajetória obtida no teste dinâmico apresentam ruídos advindos do processo de rastreamento.

Estes ruídos, que não pertencem ao fenômeno, apresentam-se como ruídos de alta frequência. Em função destas características, optamos pelo filtro *butterworth*. Para encontrar o parâmetro adequado para a suavização dos dados, considerou-se a medida de distância percorrida após a suavização em relação à medida total conhecida e a curva de velocidade obtida a partir da trajetória suavizada tendo como parâmetro as informações das faixas de velocidades previamente determinadas para cada trecho.

Com relação à coordenada X, observa-se pela figura 14 que os resíduos estão distribuídos em torno de zero, tendo como valor da média igual a zero (linha contínua) e o desvio padrão encontrado de 8,03 cm (linha tracejada). Com relação à coordenada Y, observa-se pela figura 15 que os resíduos estão distribuídos em torno de zero, tendo como valor da média igual a zero (linha contínua) e o desvio padrão encontrado de 8,56 cm (linha tracejada). Em ambos os gráficos verificam-se pontos bastante afastados da linha central.

Uma possível explicação para este fato decorre do experimento realizado. O percurso utilizado possui 4 trechos (A, B, C e D) conforme mostrado na figura 13, sendo que na região de transição de um trecho para outro trecho e as linhas que compõe a grande área formam ângulos retos. Observando-se o movimento nas seqüências de imagens, verificou-se que as linhas demarcatórias nesses ângulos retos não eram exatamente acompanhadas pelo atleta. Assim, os pontos afastados mostrados nos gráficos de resíduos correspondem a estes trechos.

Tendo como informações a medida de distância percorrida e a informação qualitativa das faixas de velocidades em cada trecho do percurso utilizado para a validação do método em ambiente controlado e o valor de desvio padrão encontrado para os resíduos ser aceitável, considerando a dimensão do campo de futebol, adotamos o filtro digital “passa baixa” ButterWorth de 3ª. ordem e frequência de corte de 0,375 Hz para filtrar dos dados.

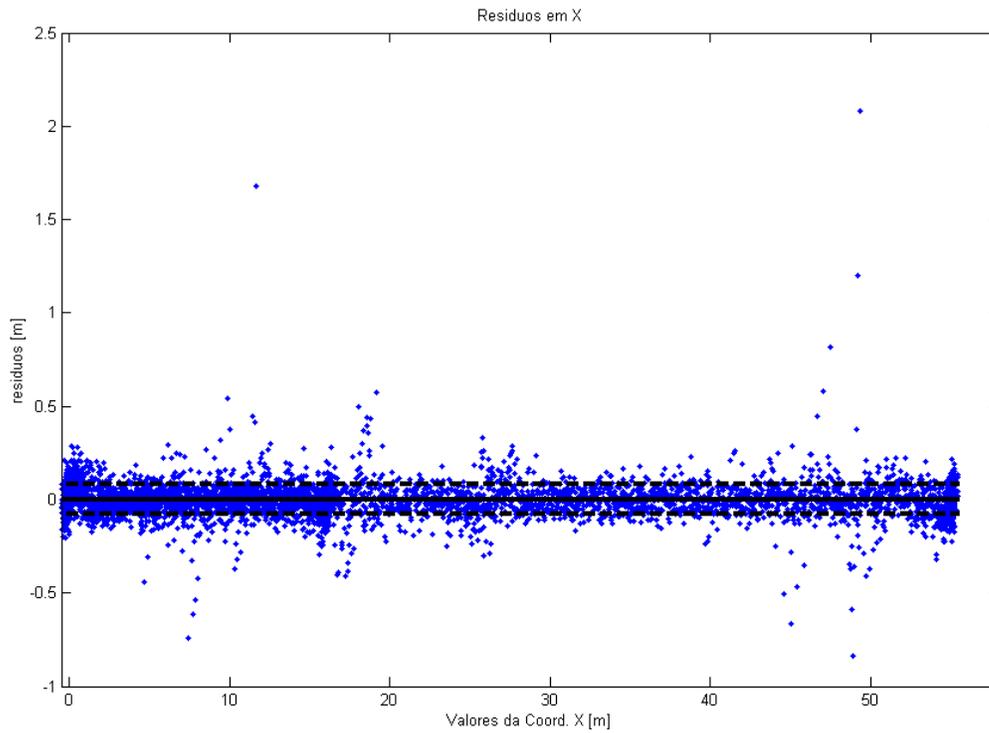


Figura 14: Análise de resíduos dos valores da coordenada X. A linha contínua indica a média e a linha tracejada indica o desvio padrão.

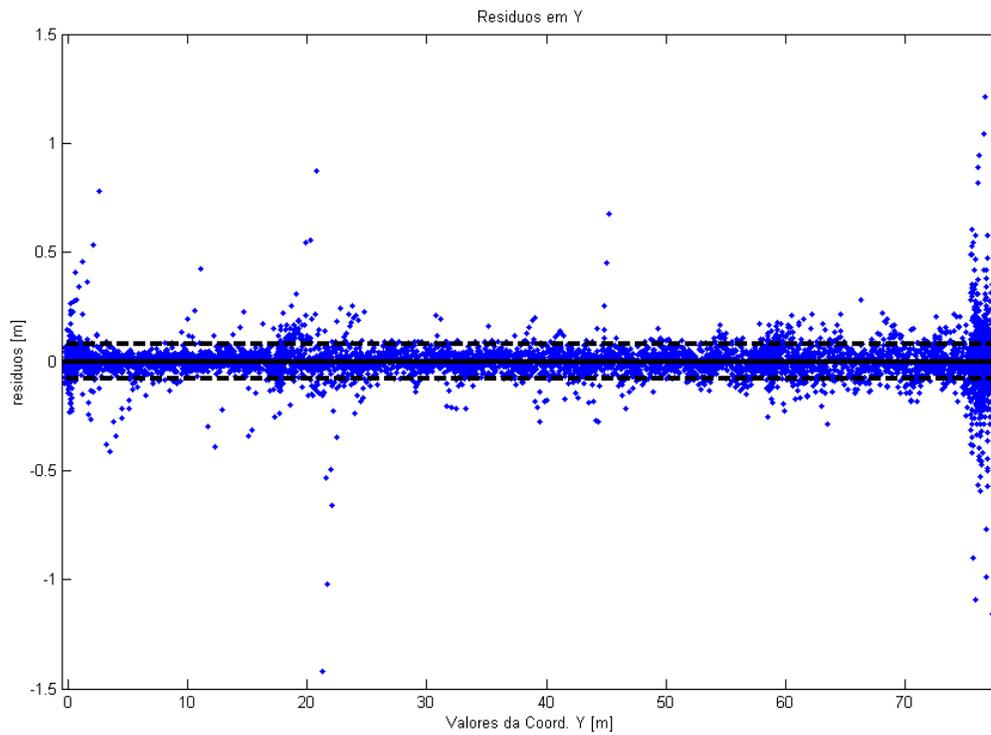


Figura 15: Análise de resíduos dos valores da coordenada Y. A linha contínua indica a média e a linha tracejada indica o desvio padrão.

5.2.2 Avaliação do Modo de Medição Automática

1 – Avaliação de acurácia.

A distância percorrida pelo voluntário medida pelo sistema Dvideow nas 10 voltas foi de 2.884,67 m (valor observado). Como o valor esperado (medição direta) era de 2.924 m, esta diferença de 40,19 m representou um erro relativo de 1,37% em relação ao valor verdadeiro.

Cálculo de acurácia. Fizemos as seguintes associações com relação às variáveis das equações que definem o *bias* (6) e a precisão (7): associamos o valor de uma volta (292,4 m) obtido por medição direta à variável μ , associamos as 10 medidas de distância percorrida obtidas à variável m_i ($i=1,\dots,10$) e \bar{m} é o valor médio das 10 medidas realizadas. O valor de acurácia calculado foi de 4,14 m o que representou um erro relativo de 1,4%. E teve como valor de *bias* de 3,98 m e precisão de 1,15 m.

O erro percentual médio observado na determinação de distância percorrida, quando se considerou separadamente cada faixa de velocidades, foi: a) andar: 0,02 %; b) trotar: 0,46%; c) correr: 1,48%; d) “sprint”: 1,68%.

O efeito de redução da distância percorrida acentuou-se quando o atleta deslocou-se com maior velocidade, que pode ter sido ocasionado em decorrência do experimento realizado, conforme explicado no tópico "5.2.1 Determinação dos Parâmetros do Filtro Butterworth".

2 – Análise de regressão.

A análise de regressão comparando o método em análise e os valores esperados obtidos por medição direta estão representados na figura 16. O valor do coeficiente de determinação R^2 obtido igual a 1,0000 mostra que o modelo linear ajusta-se adequadamente aos dados experimentais. O valor do coeficiente angular (β) obtido foi de 0,9877 com intervalo de confiança de [0,9868 0,9887] e o valor do coeficiente linear (α) foi de -2,2680m com intervalo

de confiança de $[-4,0151 \quad -0,5209]$ metros. A partir destes valores, a equação da reta da regressão linear pode ser escrita da seguinte forma $Y_i = -2,2680 + 0,9877X_i$.

O coeficiente angular (β) está próximo de 1,0000 e o coeficiente linear (α) está próximo de zero considerando as dimensões do campo. Assim, os resultados validam o modo de medição automática (Sistema Dvideow) para a obtenção da distância percorrida pelos atletas, considerando, também, a acurácia descrita para o sistema.

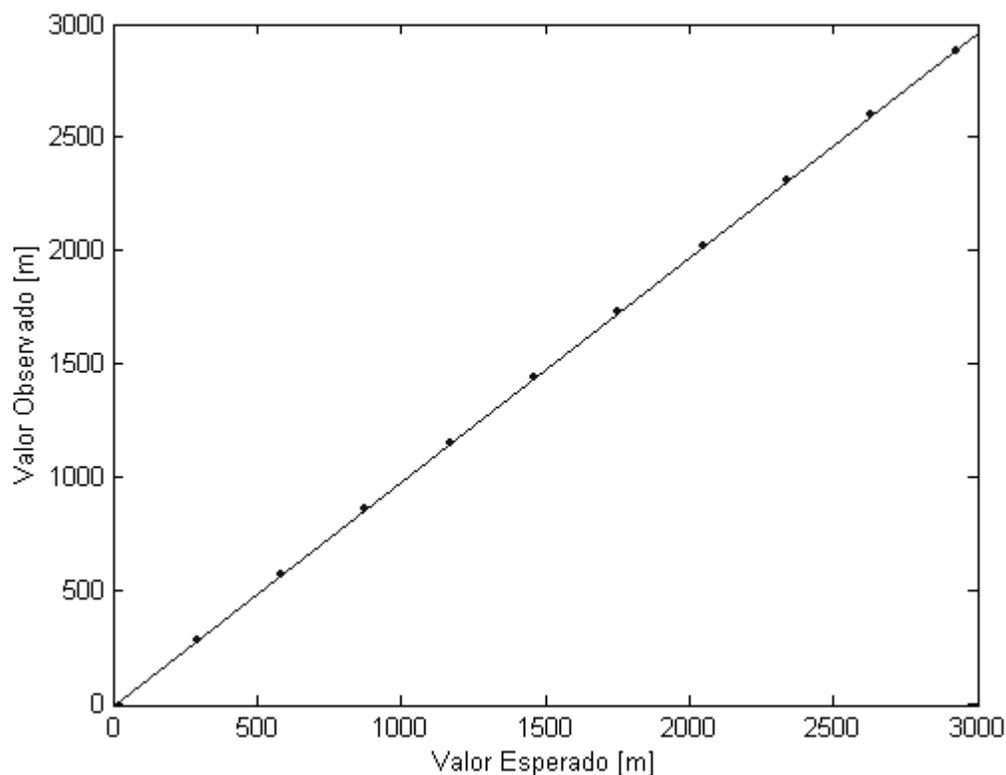


Figura 16: Regressão linear entre os valores esperados (medida direta) e os valores observados (medição automática). O valor de $R^2=1,0000$, coeficiente angular: 0,9877 (intervalo de confiança: 0,9868 e 0,9887) e coeficiente linear: -2,2680 m (intervalo de confiança: -4,0151m a -0,5209m).

5.2.3 Avaliação do Modo de Medição Manual

1 – Avaliação de acurácia.

A distância total percorrida foi de 2.884,67 m (medição automática - Dvideow). As medições parciais (volta a volta) apresentaram valores de distância percorrida que variaram de 286,86m (valor mínimo) a 290,19m (valor máximo). A distância total percorrida foi de 2.889,58 m (medição manual). As medições parciais (volta a volta) apresentaram valores de distância percorrida que variaram de 287,63m (valor mínimo) a 290,81m (valor máximo). A diferença no valor de distância percorrida entre a medição manual e a medição automática foi de 4,91 m (0,16 %).

2 - Análise de regressão.

A análise de regressão comparando o método em análise e os valores esperados obtidos pela medição automática estão representados na figura 17. O valor do coeficiente de determinação R^2 obtido igual a 1,0000 mostra que o modelo linear ajusta-se adequadamente aos dados experimentais. O valor do coeficiente angular (β) obtido foi de 0,9982 com intervalo de confiança de [0,9969 0,9995] e o valor do coeficiente linear (α) foi de 0,8783 m com intervalo de confiança de [-1,4439m 3,2005] metros. A partir destes valores, a equação da reta da regressão linear pode ser escrita da seguinte forma $Y_i = 0,8783 + 0,9982X_i$.

O coeficiente angular (β) está próximo de 1,0000 e o coeficiente linear (α) está próximo de zero considerando as dimensões do campo e o valor zero está contido no intervalo de confiança. Assim, os resultados validam o modo de medição manual (Sistema Dvideow) para a obtenção da distância percorrida pelos atletas, considerando, também, a acurácia descrita para o sistema.

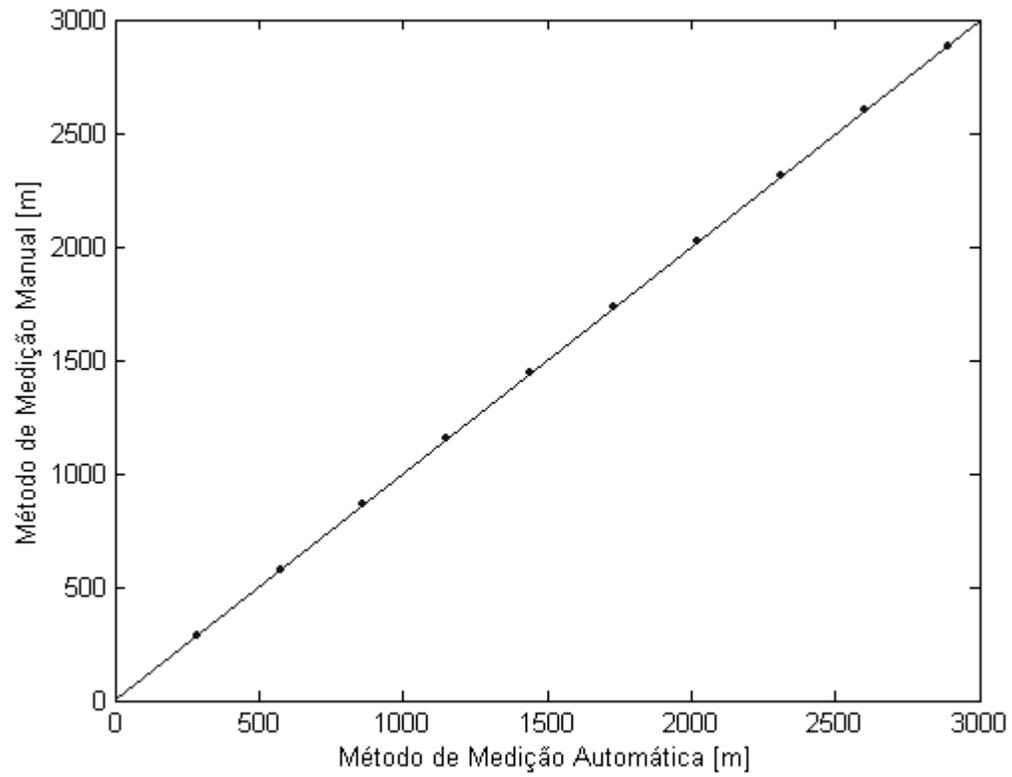


Figura 17: Regressão linear entre os dados da medição automática e a medição manual. O valor de $R^2=1,0000$, coeficiente angular: 0,9982 (intervalo de confiança: 0,9969 e 0,9995) e o coeficiente linear: 0,8783m (intervalo de confiança: -1,4439m e 3,2005m)

6 ANÁLISE DE UMA PARTIDA DE FUTEBOL

Um jogo do Campeonato Brasileiro de Futebol de 2001 entre as equipes do Guarani e Santa Cruz foi filmado para realizar a análise da movimentação de todos os jogadores. O jogo ocorreu no dia 02/12/2001 (domingo) às 16:00 hs no estádio do Guarani.

A filmagem foi feita com 4 câmeras digitais colocadas no último degrau da arquibancada. O tempo de gravação foi para o 1º. e 2º. tempos de jogo e o processamento foi feito na frequência de 7,5 Hz. A distância entre a câmera e o campo e o enquadramento utilizado foram os mesmos adotados para as filmagens no teste de acurácia.

O algoritmo utilizado para o rastreamento de jogadores de futebol foi o mesmo utilizado para o teste dinâmico e está descrito em Figueroa et al. (2003b). Neste caso, o processo de medição foi semi-automático, pois houve a intervenção do operador em alguns momentos.

O mesmo parâmetro de suavização aplicado no teste dinâmico foi aplicado nos dados referentes à trajetória dos jogadores.

As seguintes análises foram feitas: a) análise da distância percorrida pelos jogadores; b) análise da distribuição das distâncias percorridas pelos jogadores; c) análise das distribuições de velocidades.

6.1 EXEMPLOS DE MOVIMENTAÇÕES REALIZADAS POR DOIS JOGADORES

A informação da trajetória realizada por um jogador possibilita análises sobre a característica de movimentação, a ocupação espacial, a análise comparativa com outros jogadores, entre outros. Bem como, a partir dos dados da trajetória é possível obter informações relativas à distância percorrida, que será discutida no próximo item.

A figura 18 mostra exemplos de trajetórias realizadas por dois jogadores, lateral-esquerdo (LE) e lateral-direito (LD), do time A. Estas trajetórias representam toda a movimentação realizada no 1º. tempo da partida. A distância percorrida corresponde respectivamente a $5.694,7 \text{ m} \pm 78,02 \text{ m}$ e $5.203,6 \text{ m} \pm 71,29 \text{ m}$.

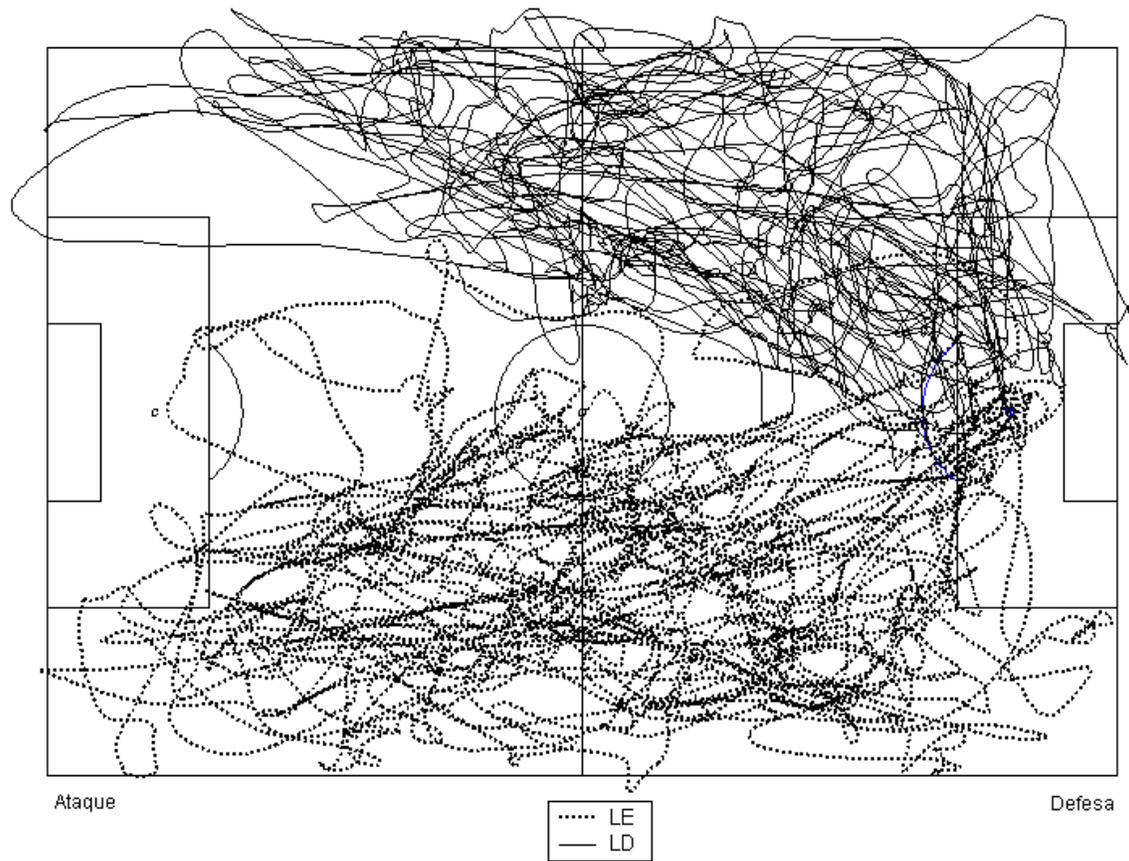


Figura 18: Trajetórias realizadas pelo lateral esquerdo (LE) e lateral direito (LD) do time A durante o 1º tempo. As distâncias percorridas correspondem respectivamente a $5.694,7 \pm 78,02$ m e $5.203,6 \pm 71,29$ m.

6.2 ANÁLISE DAS DISTÂNCIAS PERCORRIDAS PELOS JOGADORES

A partir das informações das trajetórias de cada atleta, duas formas de análise foram realizadas, a análise de distância total percorrida por jogador e a análise da distância percorrida em função do tempo.

a) Análise de distância total percorrida por jogador.

Esta forma de análise permite analisar a distância percorrida por cada jogador, comparar o aumento ou a diminuição da distância percorrida entre o 1º. e 2º. tempos, comparar as distâncias percorridas por jogadores das diferentes posições (goleiro, defesa, lateral, meio, ataque), comparar as distâncias percorridas entre jogadores das mesmas posições, bem como analisar e fazer comparações com os jogadores da equipe adversária.

A figura 19 apresenta a distância total percorrida por todos os jogadores do time A (Guarani) e B (Santa Cruz), 1º. e 2º. tempos. A coluna (distância percorrida) em azul escuro corresponde ao 1º. tempo, a coluna em azul claro ao 2º. tempo, a coluna em vermelho corresponde ao reserva que entrou no 2º. tempo e a barra acima de cada coluna corresponde ao valor de erro relativo de 1,37% obtido no teste dinâmico. A tabela do Apêndice A apresenta os valores de distância percorrida de todos os jogadores.

Neste jogo a equipe do Santa Cruz (time B) venceu a equipe do Guarani (time A) por 2 a 1. Luizinho Vieira, ME(1) - Santa Cruz, marcou aos 10 minutos do 1º. tempo, Batata, VO(3) - Santa Cruz, marcou aos 13 minutos do 2º. tempo e Sinval, AT(1) – Guarani, marcou aos 26 minutos do 2º. tempo de pênalti. O time A foi constituído pelos seguintes jogadores (por posição) GO, ZA(1), ZA(2), VO(1), VO(2), LE, LD, ME(1), ME(2), AT(1) E AT(2). O time B foi constituído pelos jogadores (por posição) GO, ZA(1), ZA(2), VO(1), VO(2), VO(3), LE, LD, ME(1), AT(1) E AT(2). Em que GO: goleiro; VO: volante; LD: lateral Direito; AT: atacante; ZA: zagueiro; LE: lateral Esquerdo; ME: meia.

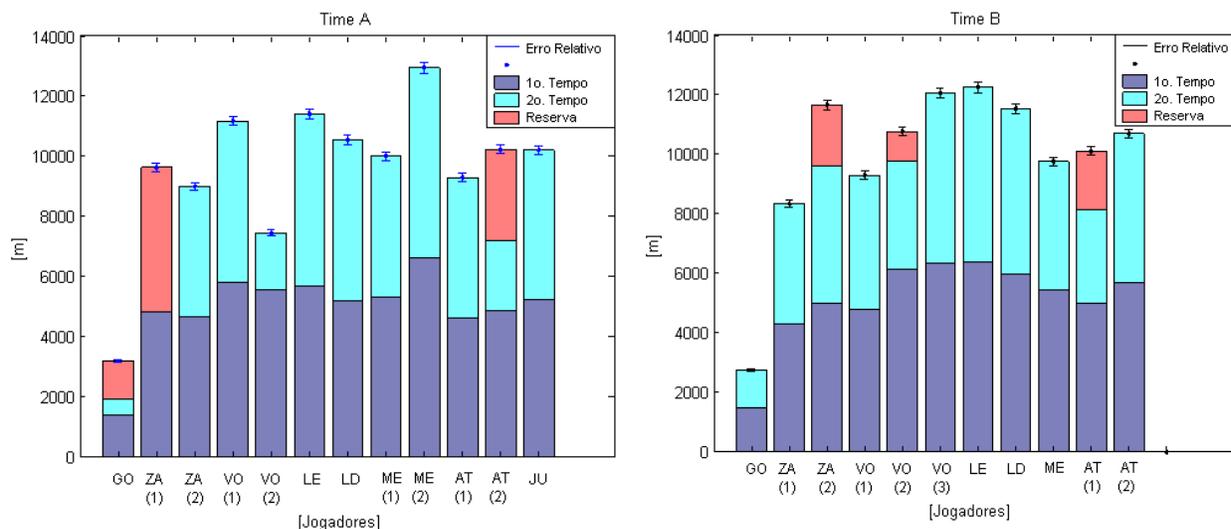


Figura 19: Distâncias percorridas durante a partida (distância \pm erro relativo) pelos atletas em um jogo do Campeonato Brasileiro de futebol. O erro relativo foi de 1,37 %. Identificação de cada jogador em função da posição: GO: goleiro; VO: volante; LD: lat. Direito; AT: atacante; ZA: zagueiro; LE: lat. Esquerdo; ME: meia; JU: juiz.

As substituições e a expulsão ocorreram no segundo tempo da partida para ambas as equipes.

No time A, as seguintes substituições foram realizadas: a) o zagueiro(1) foi substituído pelo zagueiro(3); b) o atacante(2) foi substituído pelo atacante(3); c) o volante(2) foi substituído pelo goleiro(2) em função da expulsão do goleiro(1).

Os jogadores de meio de campo e laterais apresentaram, predominantemente, valores maiores de distância percorrida em relação os jogadores de defesa e de ataque. Os jogadores que tiveram os maiores valores de distância percorrida foram um jogador de meio de campo(2) com 12.949 m e um lateral esquerdo com 11.420 m.

No time B, as seguintes substituições foram realizadas: a) o meia(1) foi substituído pelo zagueiro(3); b) o volante(2) foi substituído pelo meia(2); c) o atacante(1) foi substituído pelo atacante(3).

Os jogadores de meio de campo e laterais apresentaram, predominantemente, valores maiores de distância percorrida em relação os jogadores de defesa e de ataque. Os jogadores que tiveram os maiores valores de distância percorrida foram o lateral esquerdo com 12.256 m e o volante(3) com 12.055 m.

Os goleiros apresentaram, respectivamente para o time A e B, valores de 1.930 m e 2.750 m. O goleiro do time A apresentou menor distância percorrida devido à sua expulsão no 2º. tempo. A distância total percorrida pelo juiz foi de 10.211,49 m (5.238,74 m e 4.972,75 m, respectivamente para o 1º. e 2º. tempos).

b) análise da distância percorrida em função do tempo.

Esta forma de representação mostra a progressão da distância percorrida por um jogador em função do tempo. Permite, assim, analisar os intervalos de tempo em que um determinado jogador tem aumento ou queda no rendimento em termos de distância percorrida, fazer a comparação do desempenho entre os jogadores, fazer a avaliação sobre a diminuição ou o aumento no rendimento em função dos treinamentos realizados, entre outros.

A figura 20 apresenta a distância percorrida pelos jogadores do time A: goleiro(1), zagueiro(1), volante(1), lateral(LE), meia(2) e atacante(2). E a figura 21 apresenta a distância percorrida pelos jogadores do time B: goleiro(1), zagueiro(1), volante(3), lateral(LE), meia(1) e atacante(2).

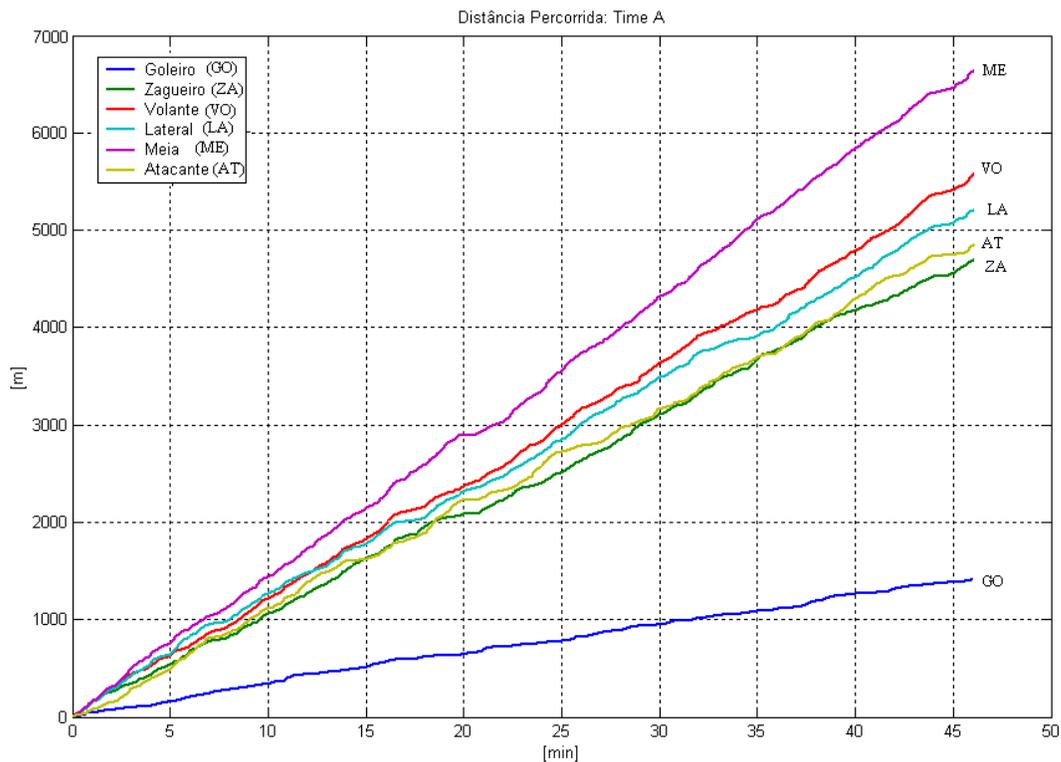


Figura 20: Gráfico de distância percorrida no primeiro tempo pelos jogadores do time A.

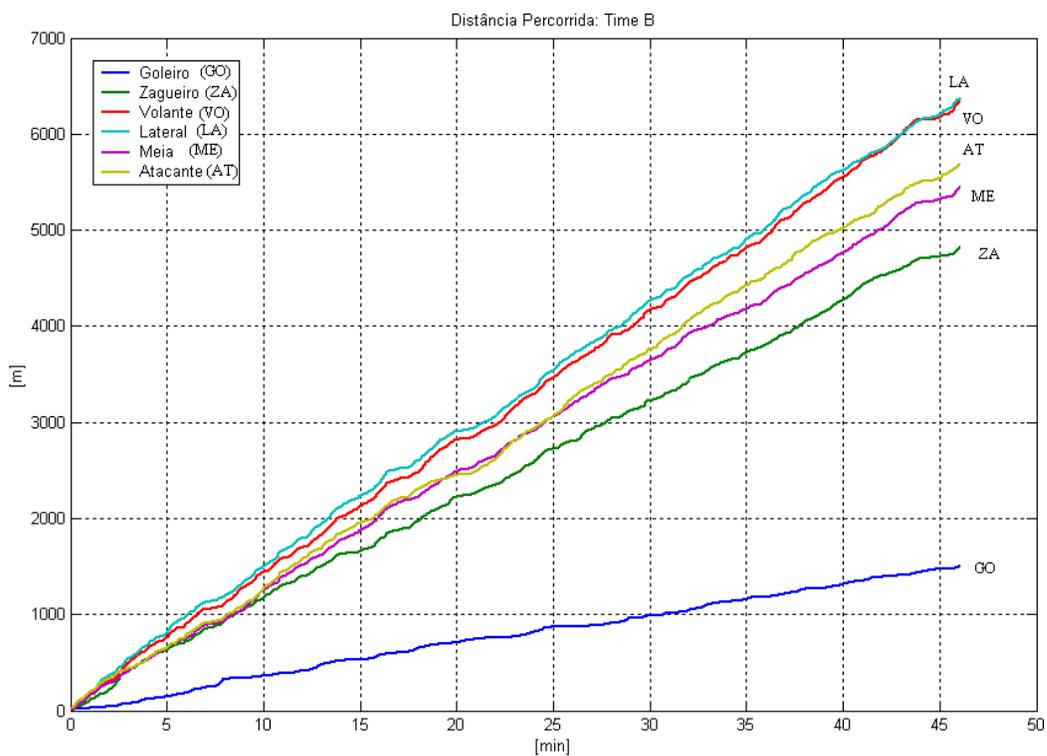


Figura 21: Gráfico de distância percorrida no primeiro tempo pelos jogadores do time B.

Com relação à distância percorrida pelos jogadores do time A:

- pela característica da posição em que ocupa, o goleiro apresentou o menor valor de 1.411 m;
- o atacante(2) e o zagueiro(1) apresentaram, respectivamente, valores de 4.862 m e 4832 m. Para o atacante(2), o valor de distância percorrida apresentou maior oscilação durante o 1º. tempo em relação ao zagueiro(1). Sendo que dos 40 minutos de jogo até o final do jogo, o atacante(2) teve melhor desempenho em relação ao zagueiro(1) em termos de distância percorrida;
- o lateral(LE) e o volante(1) apresentaram, respectivamente, valores de 5.694 m e 5.820 m. Ambos os jogadores tiveram desempenhos parecidos até os 15 minutos do 1º. tempo em termos de distância percorrida. Depois disto, o volante(1) apresentou melhor desempenho em relação ao lateral(LE) até o final do jogo;
- o meia(2) apresentou o maior valor, 6.635 m. Sendo que apresentou desde o início do jogo o melhor desempenho em termos de distância percorrida em relação aos demais jogadores.

Com relação à distância percorrida pelos jogadores do time B:

- pela característica da posição em que ocupa, o goleiro apresentou o menor valor de 1.507 m;
- o zagueiro(1) apresentou valor abaixo dos demais jogadores analisados, de 4.322 m;
- o meia(1) e o atacante(2) apresentaram, respectivamente, valores de 5.457 m e 5.685 m. Ambos os jogadores tiveram desempenhos parecidos até os 25 minutos do 1º. tempo em termos de distância percorrida. Depois disto, o atacante(2) apresentou melhor desempenho em relação ao meia(1) até o final do jogo ;
- o lateral(LE) e o volante(3) apresentaram, respectivamente, valores de 6.378 m e 6.342 m. O lateral(LE) apresentou maior valor de distância percorrida até os 40 minutos do 1º. tempo em relação ao volante(3). Mas, apresentou uma queda no desempenho, enquanto o volante(3) melhorou o seu desempenho. Assim, ambos os jogadores apresentaram desempenhos parecidos em termos de distância percorrida ao final do 1º. tempo.

6.3 ANÁLISE DA DISTRIBUIÇÃO DAS DISTÂNCIAS PERCORRIDAS PELOS JOGADORES

As informações relativas à distribuição das distâncias percorridas a partir da trajetória dos jogadores do time A e B possibilitam análises sobre o desempenho das duas equipes em cada período de jogo e a comparação entre as equipes.

Nesta forma de análise, o cálculo da distribuição das distâncias percorridas pelos jogadores de cada time foi feito a cada 5 minutos de jogo para verificar possíveis padrões em termos de distância percorrida. Assim, fez-se o cálculo com os atletas que atuaram pelo menos 45 minutos do 1º ou 2º tempo (time A e time B). Desta forma, os jogadores que entraram durante o segundo tempo e os goleiros foram excluídos da análise.

A figura 22 mostra a distribuição das distâncias percorridas pelos jogadores a cada 5 minutos para o time A (*boxplot* em preto) e para o time B (*boxplot* em azul). O aumento ou a diminuição significativa de distância percorrida entre os jogadores das duas equipes ocorrerá quando não houver intersecção dos intervalos de confiança (descrição do *boxplot* - Anexo B).

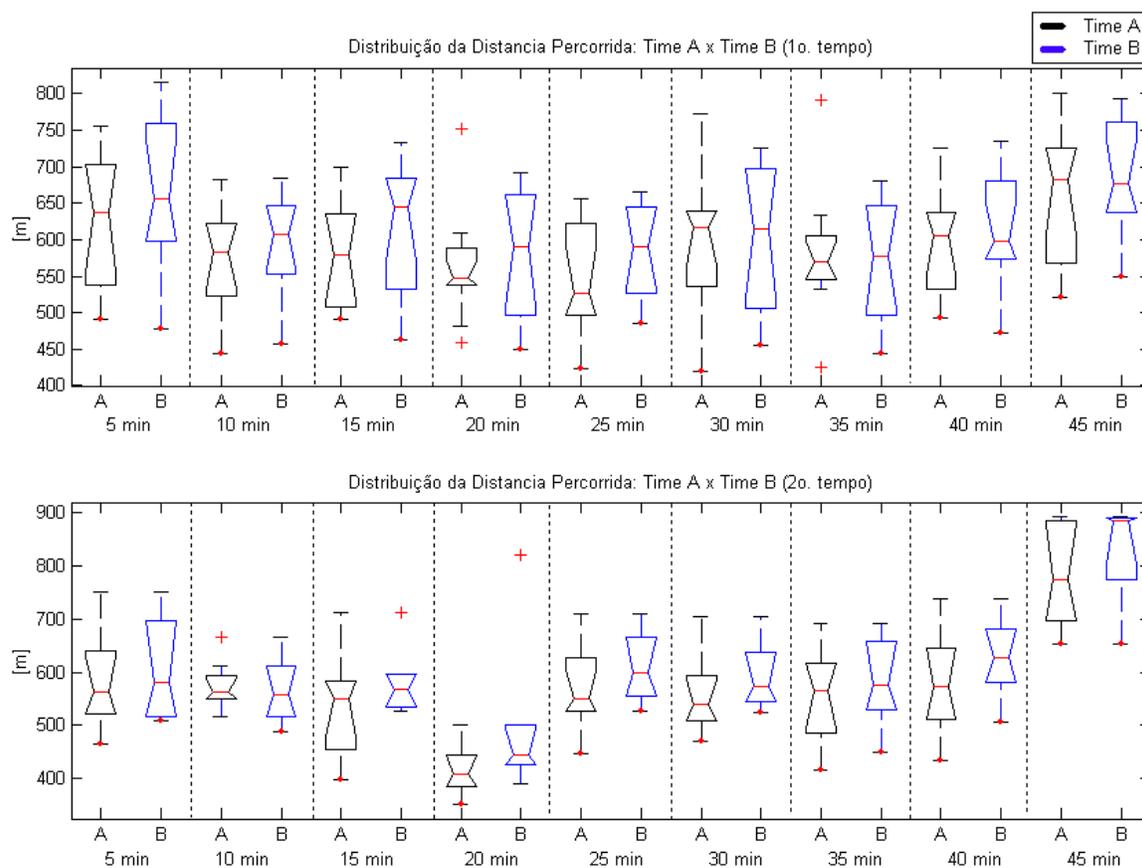


Figura 22: Distribuição das distâncias percorridas pelos jogadores do time A e do time B realizadas a cada 5 minutos.

A distribuição das distâncias percorridas ao longo do tempo indica que não houve diferença significativa entre as duas equipes em nenhum dos intervalos considerados. Isto mostra que as duas equipes apresentam comportamentos semelhantes quanto ao aumento ou diminuição de distância percorrida em um dado intervalo durante todo o jogo.

No início e no final de cada tempo de jogo, ambas as equipes apresentam valores maiores de distância percorrida. Dentre os intervalos analisados do segundo tempo, os valores de distância percorrida nos últimos 5 minutos apresentam-se significativamente maiores. Ainda no segundo tempo, o intervalo do 20^o. minuto, ambas as equipes apresentam uma diminuição significativa devido a uma paralisação muito longa do jogo em virtude de uma “falta”.

6.4 EXEMPLO DE UMA CURVA DE VELOCIDADES

A figura 23 mostra a curva de velocidades com informações de aproximadamente 20.000 quadros de um jogador de meio de campo(2) do time A no 1º. tempo de jogo. As linhas horizontais tracejadas indicam as faixas de velocidades de 0-2 m/s, 2-4 m/s, 4-6 m/s e 6-10 m/s.

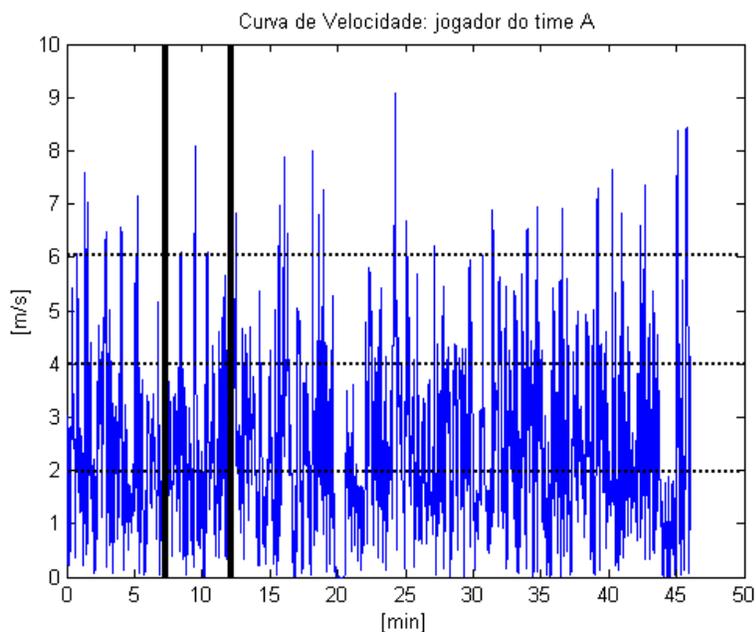


Figura 23: Curva de velocidades de um jogador do time A no primeiro tempo.

As linhas verticais em destaque (figura 23) delimitam o trecho da curva que está apresentada na figura 24 em detalhes (intervalo de 8,5 a 10,5 minutos). Ao observar a curva de velocidades, pode-se verificar a distribuição de velocidades, os momentos em que o atleta atinge os picos de velocidades, os momentos em que o atleta permanece numa faixa intermediária de velocidades e os momentos em que permanece numa faixa de velocidades com baixa intensidade.

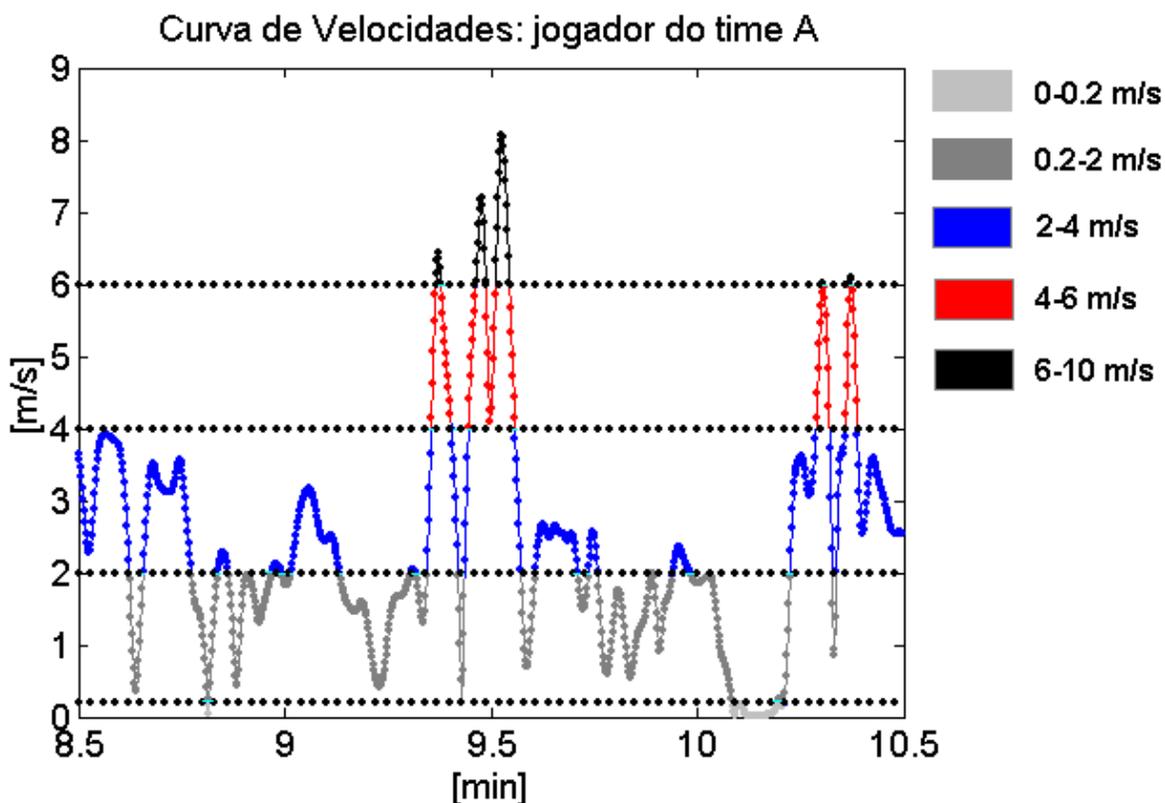


Figura 24: Detalhamento da curva de velocidades apresentada na figura 27 no intervalo de 8,5 a 10,5 minutos do primeiro tempo.

Tempo de permanência em cada faixa de velocidades. É o somatório de todos os instantes em que a curva de velocidade esteve contida numa determinada faixa de velocidades. No caso apresentado na figura 24, o tempo de permanência em cada faixa de velocidades corresponde ao somatório de todos os instantes representados pelas seguintes cores: a) parado: curva de velocidades representadas pela cor cinza clara; b) andar: curva de velocidades representadas pela cor cinza escura; c) trotar: curva de velocidades representadas pela cor azul; d) correr: curva de velocidades representadas pela cor vermelha; e) “sprint”: curva de velocidades representadas pela cor preta.

A partir dos dados de tempo de permanência em cada faixa de velocidades é feita a análise de distribuição de velocidades.

6.5 ANÁLISE DAS DISTRIBUIÇÕES DE VELOCIDADES

A partir das informações de velocidade de cada atleta, duas formas de análises foram realizadas, a análise da distribuição de velocidades por jogador e a análise da distribuição das velocidades por equipe.

a) Análise da distribuição de velocidades por jogador.

A informação da distribuição de velocidades mostra a característica com relação ao tempo de permanência em cada faixa de velocidades dos jogadores em cada posição em que atuam (goleiro, defesa, lateral, volante, meia, ataque).

Para realizar a análise, calculou-se o tempo de permanência em cada faixa de velocidades para cada jogador do time A (1^o. e o 2^o. tempos), figura 25.

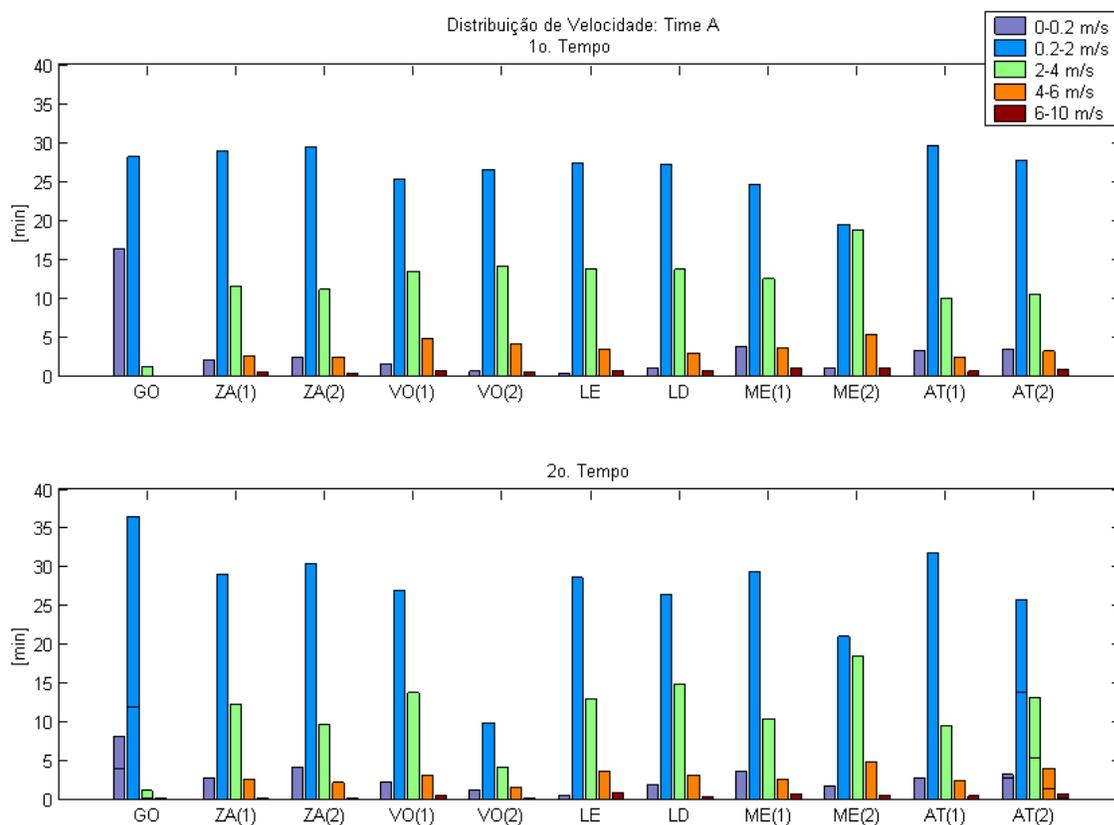


Figura 25: Representação do tempo de permanência em cada faixa de velocidades dos 11 jogadores do time A. Para a coluna dos jogadores GO e AT(2), foi feita o somatório dos tempos dos jogadores que atuaram durante o segundo tempo. Identificação de cada jogador em função da posição: GO: goleiro; ZA: zagueiro; VO: volante; LE: lateral esquerdo; LD: lateral direito; ME: meia; AT: atacante.

O tempo de permanência em cada faixa de velocidades do meia(2) foi, respectivamente, para o 1º. e 2º. tempos: a) 0-0,2 m/s: 1,18 e 1,8 minuto; b) 0,2 a 2 m/s: 19,4 e 21 minutos; c) 2 a 4 m/s: 18,8 e 18,5 minutos; d) 4 a 6 m/s: 5,4 e 4,8 minutos; e) 6 a 10 m/s: 68 e 40 segundos.:

Os demais jogadores de linha (zagueiro, lateral, volante, meia e atacante) apresentaram o tempo de permanência (médio) em cada faixa de velocidades, respectivamente, para o 1º. e 2º. tempos de: a) 0-0,2 m/s: 1,9 e 2,5 minutos; a) 0 a 2 m/s: 27,7 e 26,5 minutos; b) 2 a 4 m/s: 12,3 e 11,2 minutos; c) 4 a 6 m/s: 3,3 e 2,8 minutos; d) 6 a 10 m/s: 43 e 30 segundos. O jogador VO(2) no segundo tempo apresenta valores menores em relação aos demais jogadores em função da substituição.

Com relação ao tempo de permanência (valor médio) em cada faixa de velocidades no 1º. tempo (quadro 5):

- os zagueiros e os atacantes permaneceram mais tempo nas faixas de velocidades entre parado e andar em relação aos laterais e volantes. Os atacantes permaneceram mais tempo na faixa “sprint” em relação aos jogadores das demais posições;
- os laterais e os volantes permaneceram menos tempo nas faixas de velocidades parado e andar em relação aos atacantes e zagueiros e permaneceram mais tempo nas faixas de velocidades trotar e correr.

As semelhanças encontradas entre os jogadores (zagueiros/atacantes e laterais/volantes) foram observadas, também, com relação aos valores de distância percorrida.

Quadro 5: Tempo de permanência (médio) em cada faixa de velocidades.

	0-0.2 m/s [min]	0.2-2 m/s [min]	2-4 m/s [min]	4-6 m/s [min]	6-10 m/s [seg]
zagueiro	2,33	29,26	11,41	2,56	30,9
lateral	0,81	27,37	13,77	3,3	49,6
volante	1,14	25,94	13,81	4,55	37,9
atacante	3,42	28,62	10,29	2,88	51,5

b) Análise da distribuição das velocidades por equipe.

Esta forma de análise utiliza o *boxplot* como um modo de verificar o comportamento de uma equipe em termos de distribuição de velocidades, bem como é possível verificar a variabilidade que cada equipe apresenta com relação ao tempo de permanência em cada faixa de velocidades. Para isto, as informações sobre o tempo de permanência em cada faixa de velocidades de cada jogador dos times A e B são agrupados. Definimos algumas restrições para excluirmos alguns jogadores da análise, assim não consideramos os dados dos jogadores que participaram somente do 1º. tempo ou entraram durante o 2º. tempo e dos goleiros. Desta forma, somente os dados dos atletas que atuaram no 1º. e 2º. tempos foram considerados.

O resultado mostrado na figura 26 a seguir mostra a análise para o time A e B (1º. e 2º. tempos). O tempo de permanência na faixa de velocidades de 6-10 m/s da figura 26 está mostrado em detalhe na figura 27. O Apêndice B apresenta a tabela com o tempo médio de permanência considerando as faixas de velocidades de [0-0.2, 0.2-2, 2-4, 4-6, 6-10] m/s.

Para cada faixa de velocidades, o *boxplot* correspondente a cada time está identificado pelas letras A e B. O aumento ou a diminuição significativo do tempo de permanência em cada faixa de velocidades entre as duas equipes ocorrerá quando não houver intersecção dos intervalos de confiança (descrição do *boxplot* - Anexo B).

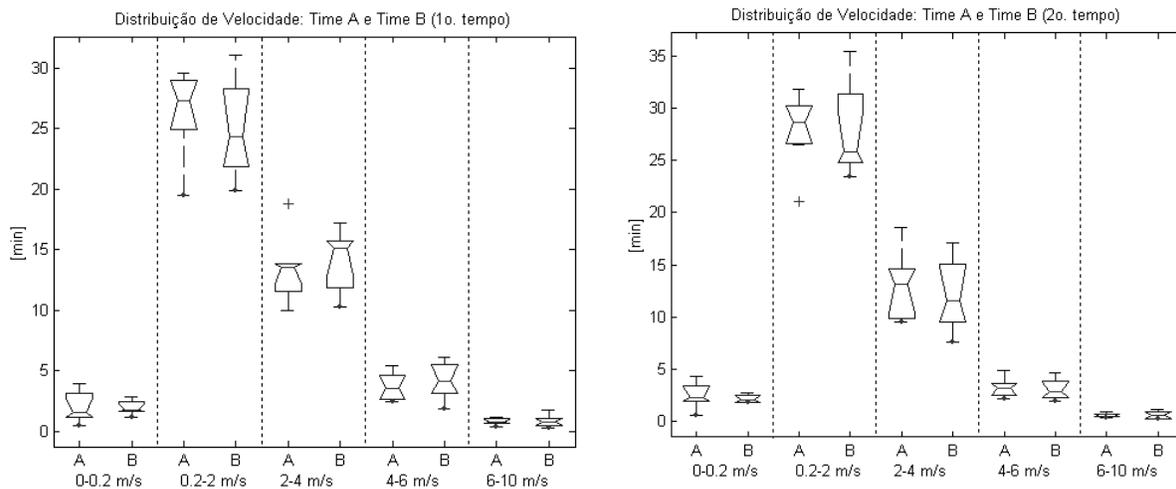


Figura 26: Distribuição de velocidades para o 1º. tempo (figura da esquerda) e 2º. tempo de jogo (figura da direita) do time A e B.

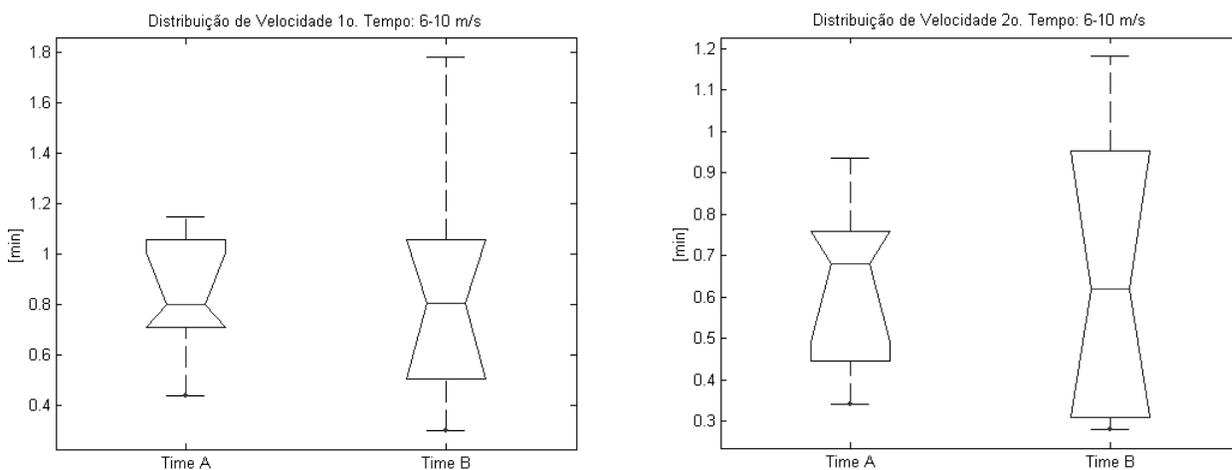


Figura 27: Tempo de permanência na faixa de velocidades de 6-10 m/s para o 1º. tempo de jogo (figura da esquerda) e 2º. tempo de jogo (figura da direita) do time A e B.

Com relação à distribuição de velocidades, os resultados mostram que:

- não há diferença significativa entre o 1º. e 2º. tempo de jogo tanto para a equipe A quanto para a equipe B;
- não há diferença significativa entre as duas equipes considerando cada faixa de velocidades.
- com exceção da situação "parado", há diferença significativa na distribuição de velocidades de cada faixa de velocidades em relação às demais faixas de velocidades tanto no 1º. tempo quanto no 2º. tempo (time A e B);

d) com exceção do 1º. tempo para o time B, não há diferença significativa entre a situação "parado" e a faixa de velocidades de 4-6 m/s tanto no 1º. tempo quanto no 2º. tempo (time A e B).

Os valores médios de distância percorrida, percentual de distância percorrida e percentual de tempo de permanência para o time A, considerando as faixas de velocidades [0-0.2, 0.2-1, 1-2, 2-3, 3-4, 4-5, 5-6, 6-7, 7-8, 8-9, 9-10] m/s estão na tabela 3. Observa-se que o percentual de distância percorrida é maior nas faixas de velocidades de 1-2, 2-3, 3-4 m/s, sendo que estas três faixas correspondem a 69,28% e 71,71%, respectivamente, para o 1º. e 2º. tempos de jogo. Conseqüentemente com este aumento percentual, verifica-se a diminuição do valor de distância percorrida de 5.430 m (1º. tempo) para 5.207 m (2º. tempo). O percentual de tempo de permanência é maior na faixa de velocidades de 1-2 m/s, que corresponde, respectivamente para o 1º. e 2º. tempos, a 37,47% e 37,42%. Sendo que as faixas de velocidades de [0-0.2, 0.2-1 e 1-2] m/s correspondem a 61,19% e 65,57%, respectivamente, para o 1º. e 2º. tempos de jogo.

Tabela 3: Valores médios de distância percorrida, percentual de distância percorrida e percentual de tempo em cada faixa de velocidades para time A (1º. e 2º. tempos). Número de jogadores (n=7).

Faixas de Velocidades [m/s]	Time A			
	Distância Percorrida (1o. tempo) [m]	Distância Percorrida (2o. tempo) [m]	% tempo (1o. tempo)	% tempo (2o. tempo)
0-0,2	***	***	6,14	7,08
0,2-1	308 (5,68 %)	331 (6,37 %)	17,58	21,10
1-2	1.495 (27,59 %)	1.558 (29,99 %)	37,47	37,42
2-3	1.114 (20,56 %)	1.095 (21,08 %)	16,70	15,30
3-4	1.145 (21,13 %)	1.072 (20,64 %)	12,31	11,00
4-5	646 (11,92 %)	595 (11,45 %)	5,41	4,77
5-6	375 (6,92 %)	292 (5,62 %)	2,56	1,92
6-7	205 (3,78 %)	165 (3,18 %)	1,19	0,85
7-8	100 (1,85 %)	61 (1,17 %)	0,50	0,35
8-9	26 (0,48 %)	20 (0,38 %)	0,12	0,14
9-10	5 (0,09 %)	6 (0,12 %)	0,02	0,07
total	5.419 (100 %)	5.207 (100 %)	100,0	100,0

Os valores médios de distância percorrida, percentual de distância percorrida e percentual de tempo de permanência para o time B, considerando as faixas de velocidades [0-0.2, 0.2-1, 1-2, 2-3, 3-4, 4-5, 5-6, 6-7, 7-8, 8-9, 9-10] m/s estão na tabela 4. Observa-se que o percentual de distância percorrida é maior nas faixas de velocidades de 1-2, 2-3, 3-4 m/s, sendo que estas três faixas correspondem a 66,97% e 70,17%, respectivamente, para o 1º. e 2º. tempos de jogo. Conseqüentemente com este aumento percentual, verifica-se a diminuição do valor de distância percorrida de 5.579 m (1º. tempo) para 5.005 m (2º. tempo). O percentual de tempo de permanência é maior na faixa de velocidades de 1-2 m/s, que corresponde, respectivamente para o 1º. e 2º. tempos, a 34,14% e 37,40%. Sendo que as faixas de velocidades de [0-0.2, 0.2-1 e 1-2] m/s correspondem a 58,75% e 65,57%, respectivamente, para o 1º. e 2º. tempos de jogo.

Tabela 4: Valores médios de distância percorrida, percentual de distância percorrida e percentual de tempo em cada faixa de velocidades para time B (1º. e 2º. tempos). Número de jogadores (n=7).

Faixas de Velocidades	Time B			
	Distância Percorrida (1º. tempo) [m]	Distância Percorrida (2º. tempo) [m]	% tempo (1º. tempo)	% tempo (2º. tempo)
0-0,2	***	***	6,28	7,07
0,2-1	320 (5,76 %)	366 (7,33 %)	18,32	21,09
1-2	1358 (24,45 %)	1457 (29,19 %)	34,14	37,40
2-3	1142 (20,56 %)	1026 (20,56 %)	17,12	15,30
3-4	1220 (21,96 %)	1019 (20,42 %)	13,05	11,00
4-5	768 (13,83 %)	571 (11,44 %)	6,41	4,78
5-6	404 (7,27 %)	282 (5,65 %)	2,77	1,92
6-7	216 (3,89 %)	151 (3,03 %)	1,25	0,86
7-8	92 (1,66 %)	73 (1,46 %)	0,47	0,37
8-9	27 (0,49 %)	30 (0,60 %)	0,12	0,14
9-10	8 (0,14 %)	16 (0,32 %)	0,07	0,07
total	5.567 (100,0 %)	5.004 (100,0 %)	100,0	100,0

O percentual de distância percorrida apresentadas pelas duas equipes mostram-se semelhantes e refletem uma diminuição do desempenho em termos de distância percorrida em relação ao 1º. tempo do jogo.

7 DISCUSSÃO

O sistema Dvideow possibilitou a obtenção dos dados referentes à posição em função do tempo de todos os jogadores de ambas as equipes. A forma de medição foi semi-automática pois houve momentos em que a intervenção do operador foi necessária. Limitações relacionadas à impossibilidade de rastreamento simultâneo de todos os jogadores (REILLY e THOMAS (1976), WITHERS et al. (1982), D'OTTAVIO e TRANQUILLI (1993)), precisão dos dados obtidos (REILLY e THOMAS (1976), WITHERS et al. (1982)), a dificuldade no acompanhamento de cada jogador devido à complexidade das situações como em oclusões mútuas dos jogadores e ações realizados por dois ou mais jogadores quando estão muito próximos (INTILLE e BOBICK (1994), CHOI et al. (1997), TAKI et al. (1996)) foram superados.

Assim, a partir das informações sobre a posição em função do tempo houve a possibilidade de análise de variáveis cinemáticas derivadas sobre distância total percorrida e distribuição de velocidades. A partir da validação do método conhecemos a acurácia com que as variáveis são obtidas e os resultados mostraram que o método é confiável para a identificação das variáveis estudadas.

Avaliação de acurácia no teste estático.

A acurácia na determinação de uma posição no campo, considerando o enquadramento utilizado, foi de 30,61 cm. O sistema apresentou boa reprodutibilidade ao apresentar o valor de precisão de 2,16 cm. E a maior influência sobre o valor de acurácia foi dada pelo erro sistemático (bias) ao apresentar o valor de 30,53 cm. Esta metodologia não é adequada para a análise de problemas como a comparação da posição relativa entre atletas quando a distância entre eles estiver dentro da margem de erro do método. No entanto, os resultados validam o método para a determinação da posição pelo sistema (Dvideow), e os valores obtidos são aceitáveis ao considerarmos as dimensões do campo de futebol.

Avaliação do modo de medição automática.

O modo de medição automática mostrou-se válido e bastante acurado para a determinação da distância percorrida, pois: a) na determinação da distância percorrida, o erro

relativo foi de 1,37% em relação ao valor verdadeiro. E na determinação das distâncias percorridas considerando separadamente as 4 faixas de velocidades (andar, trotar, correr e “sprint”), os erros encontrados foram menores que 2%. Assim, o método tratado mostrou-se mais preciso quando comparado ao método proposto por Hennig e Briehle (2000), que apresentaram erros de 10% para o andar e erros menores que 2% para a corrida e o “sprint”; b) na análise de regressão, o fato do coeficiente angular (β) estar próximo de 1,0000, mas o valor um não estar contido no intervalo de confiança e o coeficiente linear (α) estar próximo de zero considerando as dimensões do campo, mas o valor zero não estar contido no intervalo de confiança indica uma diferença pequena e sistemática, que pode ter sido ocasionado em decorrência do experimento realizado, conforme explicado no item "4.2.1 Determinação dos Parâmetros do Filtro Butterworth". No entanto, o modelo linear ajusta-se adequadamente aos dados experimentais e os resultados validam o modo de medição automática (Sistema Dvideow) para a obtenção da distância percorrida pelos atletas, considerando, também, a acurácia descrita para o sistema.

Avaliação do modo de medição manual

O modo de medição manual mostrou-se equivalente ao modo de medição automática, sendo assim válido e bastante acurado para a determinação da distância percorrida. Com isto, o método de rastreamento que possui o modo de medição automático e manual mostrou-se confiável. A opção do modo manual pode, também ser utilizada para corrigir ou melhorar uma medição feita no modo automático.

Aplicação do Método em Situação Real

O método proposto foi aplicado para todos os jogadores do time A e B (1º. e 2º. tempos) de uma partida do campeonato brasileiro de futebol e possibilitou a determinação da distância percorrida e a obtenção da distribuição de velocidades.

A informação sobre a distância percorrida possibilitou a análise da atuação do jogador em cada período de jogo, a atuação do jogador no decorrer de cada tempo de jogo, a diferença na atuação de jogadores de diferentes posições e a comparação entre jogadores da mesma posição do mesmo time ou em relação aos jogadores do outro time.

Com relação aos valores de distância percorrida, os dados apresentados por Hennig e Briehle (2000) sobre os jogadores de defesa, volante, lateral, atacante e meio de campo

foram em situação de treino, mas estão de acordo com os valores de distância percorrida encontrados neste trabalho. A comparação dos valores médios de distância percorrida entre o método apresentado neste trabalho e de diferentes métodos apresentados na literatura está na quadro 6.

Quadro 6: Valores médios de distância percorrida apresentada por diferentes métodos.

	Goleiro [m]	Defensor [m]	Lateral [m]	Meio de campo [m]	Atacante [m]
Reilly e Thomas, 1976	3972	7759	8245	9805	8397
Withers et al., 1982	-----	10169	11980	12194	11766
Hennig e Brielhe, 2000	-----	10150	11020	11020	10550
este método	2972	9145	11444	11154	10083

A distribuição das distâncias percorridas possibilitou a análise da atuação das duas equipes em cada período de jogo e a comparação entre as duas equipes. A análise mostrou que as equipes apresentaram padrões semelhantes em termos de distância percorrida durante todo o jogo, não apresentando diferença significativa em nenhum intervalo do jogo analisado. Nesta forma de análise optamos pela observação de jogadores que permaneceram pelo menos um período inteiro em atividade. Excluímos, assim, os jogadores que entraram durante o 2º. tempo. E optamos por excluir o goleiro pelo fato de que este apresenta característica de movimentação que difere de todos os demais jogadores. A inclusão dos jogadores que entraram durante o 2º. tempo para verificar se houve mudança na dinâmica do jogo poderá ser feita futuramente.

A distribuição de velocidades possibilitou a análise individualizada de cada jogador com relação ao tempo de permanência em cada faixa de velocidades para o 1º. e 2º. tempos de jogo, bem como a análise das duas equipes. A forma de análise feita enfocando individualmente cada jogador mostrou as características em suas respectivas posições (goleiro, defesa, lateral, volante, meia, atacante). Um trabalho presente na literatura possibilita a comparação com relação a um jogador de meio de campo. Assim, ao fazer uma equivalência entre as faixas de velocidades utilizadas no nosso trabalho e as faixas de velocidades utilizadas por D'ottavio e Tranquilli (1993), os resultados destes jogadores relacionados à distribuição de

velocidades estão em concordância. Em outro trabalho, Ohashi et al. (1987) apresentam resultados relativos ao percentual médio de distância percorrida e percentual médio de tempo para cada faixa de velocidades (0-1, 1-2, 2-3, 3-4, 4-5, 5-6, 6-7, 7-8, 8-9, 9-10 m/s), que se referem ao resultado do jogo todo. No nosso caso, houve um acréscimo na faixa de velocidades ao considerar a situação "parado", separamos as informações para cada tempo de jogo (1º. e 2º. tempos) e adicionamos a informação sobre a distância percorrida. Mesmo com algumas alterações e considerando que são dados de diferentes jogos, os valores percentuais apresentados por Ohashi et al (1987) estão de acordo com os resultados obtidos neste trabalho. Não encontramos na literatura outros trabalhos que relatem resultados relativos aos jogadores das demais posições.

A análise feita enfocando a equipe como um todo mostrou que ambas as equipes não apresentaram diferenças significativas quanto ao tempo de permanência em cada faixa de velocidades no 1º. e 2º. tempos de jogo.

A nossa metodologia apresenta resultados confiáveis como foi mostrado na validação e os resultados estão em concordância com os dados da literatura. Além disto, há vantagens relacionadas à possibilidade de análise de todos os jogadores da partida e a frequência de amostragem adotada é maior que a amostragem utilizada em outros trabalhos relatados na literatura. Esta frequência de amostragem mostra-se adequada para a análise da velocidade dos jogadores de futebol, mas será necessária a realização da validação da velocidade. A partir destes resultados, outras possibilidades de análises que podem ser explorados são: a) realizar a análise de todos os jogadores ao longo da partida considerando o intervalo de tempo (por exemplo: 5 minutos); b) realizar a distribuição de velocidades de um conjunto de atletas de um determinado time para o 1º. e 2º. tempos. Por exemplo, analisar somente os jogadores de defesa, jogadores de meio de campo, jogadores de ataque, etc; c) realizar análises considerando vários jogos.

As formas de análises apresentadas serão enriquecidas e outras formas de análises poderão ser exploradas à medida que houver maior número de jogos. Assim, as informações detalhadas sobre a distribuição de velocidades são parâmetros úteis que em conjunto com as informações de distância percorrida podem auxiliar para aprofundar os estudos sobre esta modalidade esportiva.

Conclusões

O método de rastreamento implementado no Sistema Dvideow foi aplicado em uma partida oficial de futebol e, embora o rastreamento não tenha sido totalmente automático, mostrou-se capaz de obter informações relativas à posição em função do tempo de todos os jogadores de uma partida.

- O modelo adotado para representar o jogador foi testado em ambiente controlado e mostrou-se válido e acurado na determinação de uma posição no campo;
- Os resultados da avaliação de acurácia no teste dinâmico e da análise de regressão validam o método para a determinação da distância total percorrido pelo jogador;
- O modo de medição manual mostrou-se equivalente ao modo de medição automático;
- Os resultados de distância total percorrida de todos os jogadores de ambas as equipes possibilitaram a análise de distância total percorrida por jogador, a análise da distância percorrida em função do tempo e a análise da distribuição de distância percorrida;
- Os resultados relativos às velocidades de todos os jogadores de ambas as equipes possibilitaram a análise da distribuição de velocidades por jogador e a análise da distribuição de velocidades por equipe.

A metodologia mostrou-se, assim, confiável para a identificação das variáveis estudadas e mostrou-se aplicável em situação de competição oficial, sem necessitar de que os atletas portem qualquer tipo de dispositivo, fornecendo dados dos jogadores de ambas as equipes e do árbitro.

Referências Bibliográficas

ABDEL-AZIZ, Y. I.; KARARA, H. M. Direct linear transformation from comparator coordinates into object-space coordinates. ASP/UI SYMP. ONCLOSE-RANE PHOTOGRAMMETRY, URBANA, ILLINOIS, p. 1-18, 1971.

BARROS, R. M. L.; BRENZIKOFER, R.; LEITE, N. J.; FIGUEROA, P. J. Desenvolvimento e avaliação de um sistema para análise tridimensional de movimentos humanos. Revista Brasileira de Engenharia Biomédica, v. 15, n. 1-2, p. 79-86, 1999.

BARROS, R. M. L.; FIGUEROA, P. J.; ANIDO, R.; CUNHA, S.; MISUTA, M.; LEITE, N. J.; LIMA FILHO, E.; BRENZIKOFER, R. Automatic tracking of soccer players. In: XVIII Congress of the International society of Biomechanics, Zürich, p. 236-237, 2001.

CHOI, S.; SEO, Y.; KIM, H.; HONG, K. S. Where are the Ball and Players? Soccer game analysis with color-based tracking and image mosaick. In: International Conference of Image Analysis and Processing, p. 196-203, 1997.

D'OTTAVIO, S.; TRANQUILLI, C. El rendimiento del jugador de fútbol. Rivista di Cultura Sportiva, v. 24, 1993.

ERDMAN, W. S. Quantification of games - preliminary kinematic investigations in soccer. In: Science and football II, Great Britain, E & FN SPON, p. 174-179, 1991.

FIGUEROA, P. J.; LEITE, N. J.; BARROS, R. M. L. A flexible software for tracking of markers used in human motion analysis. Computer Methods and Programs in Biomedicine, v. 72, p. 155-165, 2003a.

FIGUEROA, P. J.; NEUCIMAR, J. L.; MISUTA, M. S.; BARROS, R. M. L. Detecção automática da posição de jogadores de futebol usando processamento de imagens. In: X Congresso Brasileiro de Biomecânica, Ouro Preto - MG, p. 189-193, 2003b.

HENNIG, E. M.; BRIEHLE, R. Game analysis by GPS satellite tracking of soccer players. In: XI Congress of the Canadian Society for Biomechanics, Montreal, p. 44, 2000.

HENNIG, E. M.; STERZING, T. F. The use of global positioning systems (GPS and DGPS) for tracking of human motion. In: Congress of the International Society of Biomechanics XVIIth, Canada, p. 193-194, 1999.

INTILLE, S.S.; BOBICK, A. F. Visual tracking using closed-worlds. Disponível em www-white.media.mit.edu, acesso em 10/06/2001, p. 1-18, 1994.

NEEDHAM, C. J.; BOYLE, R. D. Tracking multiple sports players through occlusion. In: British Machine Vision Conference, Londres, T. and Taylor, C., p. 93-102, 2001.

OHASHI, J.; TOGARI, H.; ISOKAWA, M.; SUZUKI, S. Measurement movement speeds and distances covered during soccer match-play. In: I World Congress of Science and Football, Liverpool, p. 329-333, 1987.

REILLY, T.; THOMAS, V. A motion analysis of work-rate in different positional roles in professional football match-play. Journal of Human Movement Studies, v. 2, p. 87-97, 1976.

SZWARCFITER, J. L. Grafos e algoritmos computacionais. Rio de Janeiro: Campus, 1984.

VUOLO, J. H.. Fundamentos da teoria de erros. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 1992.

WITHERS, R. T.; MARICIC, Z.; WASILEWSKI, S.; KELLY, L. Match analyses of australian professional soccer players. Journal of Human Movement Studies, v. 8, p. 159-176, 1982.

ANEXOS

ANEXO A: Filtro Digital ButterWorth.

O *Butterworth* é um filtro digital passa-baixa descrito pela equação $H(z)$ de n -ésima ordem e frequência de corte definida por valores no intervalo de $(0 < W_n < 1)$. Sendo que $W_n=1$ equivale à metade da frequência de amostragem dos dados experimentais. E retorna os coeficientes da equação nos vetores A e B com tamanho $na+1$ (com os coeficientes em ordem decrescente de valores de z).

$$Y(z) = H(z)X(z) = \frac{B(z)}{A(z)} = \frac{b_1 + b_2 z^{-1} + \dots + b_{(nb+1)} z^{-nb}}{a_1 + a_2 z^{-1} + \dots + a_{(na+1)} z^{-na}} X(z) \quad (1)$$

Uma vez obtidos os parâmetros A e B , assume-se que $a_1 = 1$ e obtém-se a equação $y(n)$ a partir da equação definida por $H(z)$:

$$y(n) = b_1 x(n) + b_2 x(n-1) + \dots + b_{(nb+1)} x(n-nb) - a_2 y(n-1) - \dots - a_{(na+1)} y(n-na) \quad (2)$$

Em que: $a_i (i = 1, \dots, na)$ e $b_i (i = 1, \dots, nb)$ são os coeficientes da equação; na e nb indicam a ordem do filtro;

Eliminação da distorção de fase. Os filtros digitais ocasionam uma distorção de fase quando são simplesmente aplicados aos dados experimentais. A figura 1 mostra um exemplo de uma determinada curva com os dados originais em linhas contínuas. A curva com linhas pontilhadas representa a curva filtrada sem a correção de fase e a curva com linhas tracejadas representa a curva filtrada com a correção de fase.

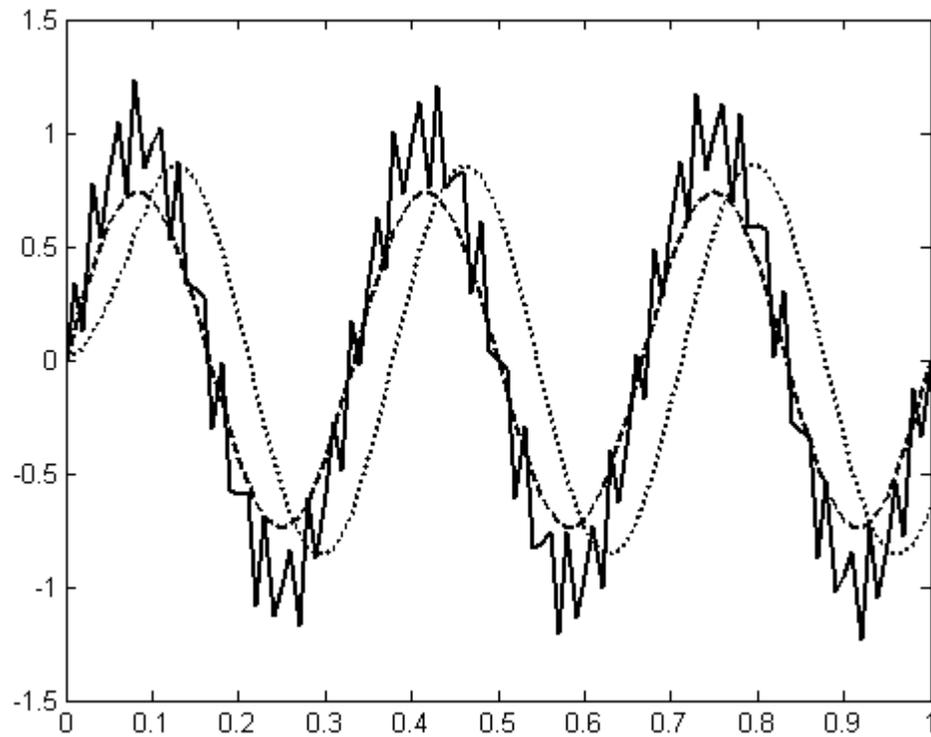


Figura 1: exemplo da curva filtrada com correção de fase (linha tracejada) e da curva filtrada sem correção de fase (linha pontilhada).

Para obter a curva filtrada com a correção de fase, o filtro é aplicado duas vezes. Assim, aos dados experimentais é aplicado o filtro definido pela equação $y(n)$, obtendo-se uma seqüência filtrada. Em seguida, à ordem reversa dos elementos desta seqüência filtrada, é aplicado o filtro, resultando nos dados experimentais filtrados.

ANEXO B: BoxPlot.

O Boxplot faz parte do pacote estatístico existente no ambiente Matlab. É uma das formas de representação gráfica baseada na análise de variância (ANOVA) na qual estão presentes informações sobre a distribuição dos dados experimentais, a mediana, o intervalo de confiança, entre outros.

A identificação de cada símbolo contido num boxplot está na figura 2.

1º. quartil: também denominado percentil 25%

3º. quartil: também denominado percentil 75%

Intervalo inter-quartil: É determinada como sendo a distância entre a linha inferior delimitada pelo percentil 25% e a linha superior delimitada pelo percentil 75%

mediana: representa a mediana dos dados amostrais

Limite superior e limite inferior: determinado como sendo 1,5 vezes o intervalo inter-quartil a partir da borda superior e inferior, respectivamente.

“Outlier”: identificado pelo sinal (+) em vermelho e representam todos os valores que estiverem fora do intervalo delimitado pelos limites superior e inferior.

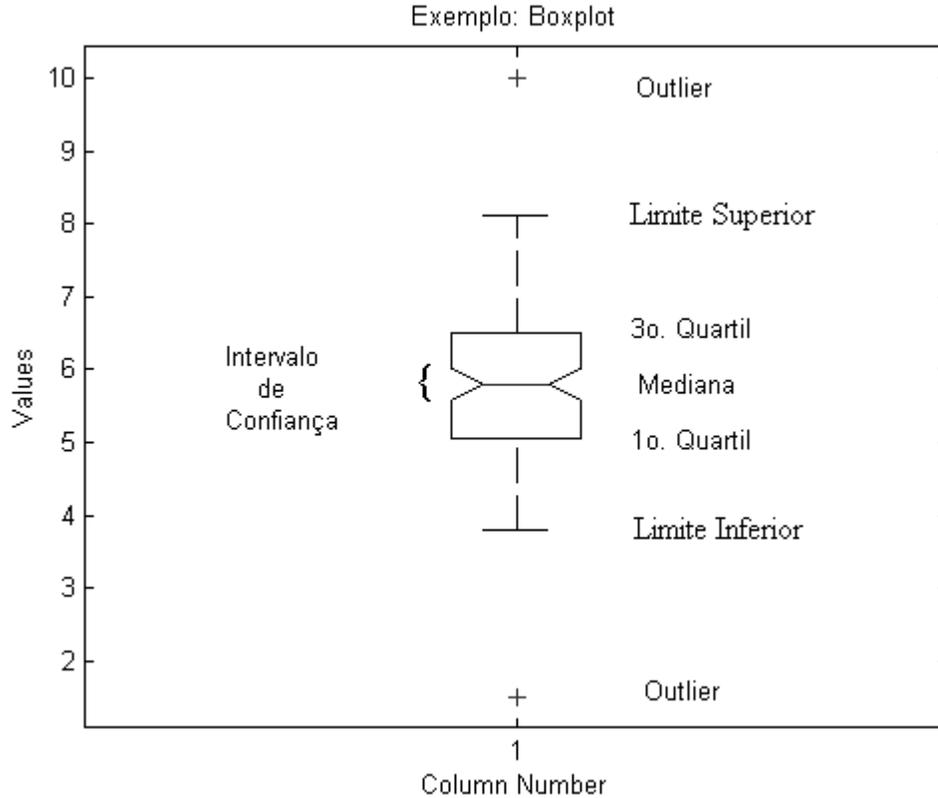


Figura 2: exemplo de um *boxplot*

Intervalo de confiança: é o intervalo de confiança sobre o valor da media. Considerando a representação gráfica, dois grupos experimentais apresentam diferença significativa quando o intervalo de confiança de um grupo experimental não apresenta intersecção com o intervalo de confiança de outro grupo experimental. Assim, no exemplo mostrado na figura 3, a coluna 1 difere significativamente das colunas 2 e 3. E a coluna 2 não difere significativamente da coluna 3.

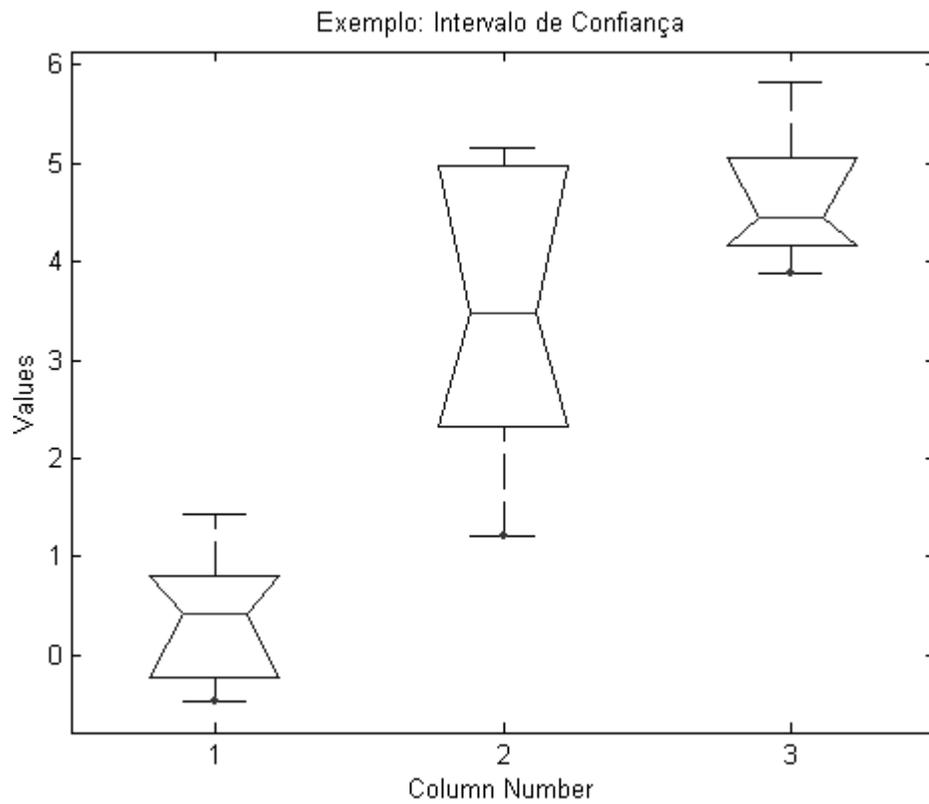


Figura 3: exemplo de um *boxplot* (Intervalo de confiança)

McGILL, R.; TUKEY, J. W.; LARSEN, W.A. Variations of box plots. The American Statistician, v. 32, n. 1, p. 12-16, 1978.

APENDICE A: Tabela de Distância Percorrida.

Tabela 1: Distâncias percorridas pelos atletas em um jogo do Campeonato Brasileiro de futebol. Distância percorrida por todos os jogadores dos times A e B (1º. e 2º. tempos). A coluna de totalização do 1º. e 2º. tempos está acompanhada com o valor de erro relativo de 1,37% obtido no teste dinâmico.

Jogador	Time A			Jogador	Time B		
	1º. Tempo [m]	2º. Tempo [m]	Distância ± Erro Relativo [m]		1º. Tempo [m]	2º. Tempo [m]	Distância ± Erro Relativo [m]
Goleiro(1)	1.411	518	1.930±26	Goleiro(1)	1.507	1.242	2.750±37
Zagueiro(1)	4.832	0	4.832±66	Zagueiro(1)	4.322	4.012	8.335±114
Zagueiro(2)	4.693	4.313	9.007±123	Zagueiro(2)	5.020	4.585	9.605±131
Volante(1)	5.820	5.362	11.183±153	Volante(1)	4.815	4.484	9.300±127
Volante(2)	5.570	1.886	7.457±102	Volante(2)	6.157	3.604	9.762±133
Lat. Esq.	5.694	5.725	11.420±156	Volante(3)	6.342	5.712	12.055±165
Lat. Dir.	5.203	5.354	10.558±144	Lat. Esq.	6.378	5.877	12.256±167
Meia(1)	5.329	4.680	10.010±137	Lat. Dir.	5.969	5.572	11.542±158
Meia(2)	6.635	6.313	12.949±177	Meia(1)	5.457	4.299	9.757±133
Atacante(1)	4.612	4.690	9.302±127	Atacante(1)	4.992	3.159	8.151±111
Atacante(2)	4.862	2.354	7.216±98	Atacante(2)	5.685	5.009	10.694±146
Goleiro(2)	0	1.265	1.265±17	Zagueiro(3)	0	2.059	2.059±28
Atacante(3)	0	3.015	3.015±41	Atacante(3)	0	1.955	1.955±26
Zagueiro(3)	0	4.802	4.802±65	Meia(2)	0	1.007	1.007±13

APENDICE A: Tabela de Tempo de Permanência em Cada Faixa de Velocidades.

Tabela 2: Tempo médio de permanência em cada faixa de velocidades (\pm std) para o 1º. e 2º. tempos do time A e B.

	Time A		Time B	
	1º. tempo (tempo médio±std)	2º. tempo (tempo médio±std)	1º. tempo (tempo médio±std)	2º. tempo (tempo médio±std)
0-0.2 m/s	2,02 min±1,27 min	2,52 min±1,21 min	1,97 min±33,6 seg	2,22 min±23,04 seg
0.2-2 m/s	26,19 min±3,49 min	27,83 min±3,51 min	25,11 min±4,07 min	27,96 min±4,44 min
2-4 m/s	13,37 min±2,79 min	12,86 min±3,28 min	13,91 min±2,55 min	12,14 min±3,51 min
4-6 m/s	3,67 min±1,14 min	3,21 min±53 seg	4,23 min±1,52 min	3,09 min±54 seg
6-10 m/s	49 seg±14 seg	37,2 seg±12 seg	51 seg±29,4 seg	37,8 seg±18 seg