



UNIVERSIDADE DE ÉVORA

**Validação de metodologia de reconstrução de coordenadas
para monitorização dos movimentos de jogadores de Futebol
através do sistema de posicionamento global diferencial**

João Manuel Pereira Ramalho Serrano

*Dissertação apresentada à Universidade de Évora para
obtenção do Grau de Mestre em Treino Desportivo*

**Orientador da Tese:
Prof. Doutor Pablo Carús**

**ÉVORA
2010**



UNIVERSIDADE DE ÉVORA

**Validação de metodologia de reconstrução de coordenadas
para monitorização dos movimentos de jogadores de Futebol
através do sistema de posicionamento global diferencial**

João Manuel Pereira Ramalho Serrano

*Dissertação apresentada à Universidade de Évora para
obtenção do Grau de Mestre em Treino Desportivo*

**Orientador da Tese:
Prof. Doutor Pablo Carús**

187410

**ÉVORA
2010**

*À memória do meu Pai, à minha Mãe, aos meus irmãos, à Helena,
à Maria, ao João e ao Afonso,...a todos aqueles que sempre acreditaram neste meu sonho!*

AGRADECIMENTOS

A realização de uma tese de mestrado exige o envolvimento de muitas pessoas e, por vezes, como foi o caso, instituições, por isso, a todos os que de alguma forma tornaram possível esta dissertação, o meu muito obrigado.

Pela relevância do contributo prestado, gostaria de agradecer:

-À Universidade de Évora, como instituição de acolhimento, em especial ao Proto-Departamento de Desporto e Saúde da Escola de Ciências e Tecnologia (ECT) da Universidade de Évora (UE), na pessoa do seu responsável, Prof. Armando Raimundo, pela possibilidade que me concedeu de realizar este trabalho.

-Ao Prof. Pablo Carús, director do mestrado em Treino Desportivo da UE, por ter aceite orientar esta tese, pelas sugestões apresentadas na leitura final deste documento e pela disponibilidade que sempre mostrou para o esclarecimento de dúvidas.

-Ao Mestre Orlando Fernandes, do Proto-Departamento de Desporto e Saúde da ECT da UE, um reconhecimento muito especial, pela sugestão do tema, pela disponibilidade para sacrificar grande parte das suas férias empenhando-se no apoio ao tratamento dos dados, pelos comentários apresentados, pela amizade no relacionamento, aspectos decisivos para a concretização deste documento.

-Ao Prof. Mário de Carvalho, do Departamento de Fitotecnia da ECT da UE, pelo tempo e apoio que me concedeu na análise estatística dos resultados.

-Ao Prof. José Rafael Silva, do Departamento de Engenharia Rural da ECT da UE, pela motivação que sempre me dispensou, pela disponibilidade para participar nos ensaios de campo e pela cedência do equipamento dGPS-RTK utilizado neste trabalho.

-Ao Prof. Jaime Sampaio, da Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, pela sua disponibilidade em termos de acesso a elementos bibliográficos e pelos esclarecimentos na área da análise estatística dos dados.

-A todos os docentes envolvidos na leccionação das aulas das unidades curriculares deste mestrado e a todos os colegas, pelos ensinamentos, pelas discussões proporcionadas e pela sensibilidade demonstrada, sem os quais não teria sido possível chegar até aqui.

-Ao amigo Eduardo Marreiros, funcionário da Câmara Municipal do Redondo, pelas facilidades concedidas na instalação e realização dos ensaios de campo.

-Aos alunos do curso de Educação Física e Desporto da UE que se disponibilizaram para participar nos ensaios de campo e na digitalização das imagens de vídeo.

RESUMO

O objectivo principal deste trabalho consistiu na utilização de um sistema de posicionamento global com correcção diferencial em tempo real (dGPS-RTK) e de células fotoelétricas para avaliar a validade e a consistência da metodologia de obtenção de parâmetros biomecânicos no Futebol, a partir da digitalização de imagens de vídeo recolhidas por uma câmara de filmar fixa. A digitalização foi realizada pelo *software* “TACTO” e a reconstrução de coordenadas virtuais em coordenadas reais, por transformação directa linear a 2D (“2D-DLT”), foi realizada com algoritmos desenvolvidos em rotinas criadas em ambiente “MATLAB”. A validade do sistema de digitalização ficou demonstrada por todos os parâmetros estatísticos utilizados, desde a análise de regressão, passando pela correlação e pela determinação do erro. A análise da consistência, intra-operador e inter-operadores, também revelou indicadores estatísticos (coeficiente de correlação de Pearson, erro técnico relativo de medida ou coeficiente de correlação intra-classe) que demonstram a fiabilidade da técnica utilizada.

Palavras-chave: *TACTO; GPS; Validade; Consistência; Futebol.*

Validation of a methodology for coordinate reconstruction in monitorization of Football player movements using differential global positioning system

ABSTRACT

The main objective of this study was to use a global positioning system, with real-time differential correction (GPS-RTK) and photocells to evaluate the validity and the reliability of a methodology for obtaining Football biomechanical parameters from digitalized video images obtained by a fixed video camera. "TACTO" software was used for digitalization and the reconstruction of virtual coordinates into real ones using 2D direct linear transformation ("2D-DLT"), was carried out with algorithms developed in "MATLAB" software routines. The validity of the methodology was demonstrated by all the statistical parameters used, including regression analysis, correlation and error of determination. The intraoperator and interoperators reliability analysis of the digitalization process also revealed statistical parameters (correlation coefficient of Pearson, relative technical error of measurement or the intraclass correlation coefficient) that demonstrate the reliability of the methodology used.

Keywords: *TACTO; GPS; Validity; Reliability; Football.*

ÍNDICE GERAL

	Página
Agradecimentos.....	iii
RESUMO.....	iv
ABSTRACT.....	v
Índice geral.....	vi
Índice de quadros.....	viii
Índice de figuras.....	x
1.INTRODUÇÃO.....	1
1.1.Pertinência e objectivos do estudo.....	1
2. REVISÃO DO ESTADO ACTUAL DOS CONHECIMENTOS.....	3
2.1.Utilização de imagens de vídeo na monitorização de jogadores de Futebol.....	3
2.2.Tratamento das imagens de vídeo.....	6
2.2.1.A reconstrução de coordenadas a três dimensões (3D).....	6
2.2.2.A reconstrução de coordenadas a duas dimensões (2D).....	8
2.3.Validação da metodologia de reconstrução de coordenadas.....	11
2.4.Sistema de posicionamento global diferencial.....	12
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	16
3.1.Instrumentos de avaliação.....	16
3.2.Amostra.....	16
3.3.Procedimento experimental.....	17
3.3.1.Fases de recolha de dados.....	17
3.3.2.Concepção e estabelecimento do circuito a realizar pelo atleta.....	18
3.3.3.Sequência de recolha de dados de campo.....	21
3.3.4.Tratamento dos dados.....	24
3.3.4.1.Tratamento das coordenadas obtidas pelo receptor dGPK-RTK.....	24
3.3.4.2.Tratamento das coordenadas obtidas por digitalização de imagens.....	25
3.3.4.2.1.Digitalização de imagens.....	25
3.3.4.2.2.Calibração.....	26
3.3.4.2.3.Minimização do erro.....	28
3.3.4.3.Sincronização das coordenadas.....	30
3.3.4.4.Obtenção dos parâmetros biomecânicos.....	30
3.3.4.5.Análise estatística.....	31
3.3.4.5.1.Confirmação da precisão do sistema dGPS-RTK na medição de distâncias e velocidades.....	31
3.3.4.5.2.Análise da validade do procedimento de digitalização e tratamento de imagens vídeo.....	34
3.3.4.5.3.Análise da consistência do procedimento de digitalização e tratamento de imagens vídeo.....	36

ÍNDICE GERAL (continuação)

	Página
4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	39
4.1.Confirmação da validade do sistema dGPS-RTK na medição de coordenadas, distâncias e velocidades.....	39
4.2.Análise da validade do procedimento de digitalização e tratamento de imagens vídeo.....	41
4.2.1.Transformação de coordenadas dGPS-RTK em coordenadas relativas ao referencial do campo do “Redondense Futebol Clube”.....	41
4.2.2.Comparação entre tratamentos nas situações de sprint, com ou sem mudanças bruscas de direcção.....	41
4.2.3.Comparação entre tratamentos na realização do circuito representativo dos deslocamentos de um jogador de Futebol.....	44
4.2.4.Avaliação da consistência intra-operador e inter-operadores do processo de digitalização de imagens vídeo.....	52
4.3.Limitações do estudo desenvolvido.....	58
5. CONCLUSÃO	59
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	61
7. ANEXOS	65
ANEXO 1- Rotinas “MATLAB”.....	66
ANEXO 2- Coordenadas rectangulares de pontos de referência no campo obtidos pelo receptor dGPS-RTK na primeira sessão.....	71
ANEXO 3- Quadros resumo das análises de variância, ANOVA, realizadas na validação da metodologia “TACTO-MATLAB”.....	73
ANEXO 4- Quadros resumo das análises de variância, ANOVA, realizadas na avaliação da consistência da metodologia “TACTO-MATLAB”.....	75
ANEXO 5- Quadros resumo dos coeficientes de correlação de Pearson na avaliação da consistência da metodologia “TACTO-MATLAB”.....	79
ANEXO 6- Quadros resumo dos erros técnicos relativos de medida na avaliação da consistência da metodologia “TACTO-MATLAB”.....	86

ÍNDICE DE QUADROS

	Página
3. MATERIAL E MÉTODOS	
Quadro 3.1 - Calendário de digitalizações pré-estabelecido em comum para os seis operadores.....	26
Quadro 3.2 - Coordenadas reais dos pontos de referência do campo do “Redondense Futebol Clube”.....	28
Quadro 3.3 - Parâmetros de transformação (PDLT) resultantes da comparação entre as coordenadas reais e as coordenadas virtuais do campo do “Redondense Futebol Clube” considerando doze pontos de calibração.....	29
4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	
Quadro 4.1 - Comparação das distâncias medidas com fita métrica e as obtidas a partir das coordenadas recolhidas pelo receptor dGPS-RTK.....	40
Quadro 4.2 - Comparação das velocidades médias registadas em dois percursos (“25m a andar” e “18,54m em sprint”), obtidas por células fotoeléctricas e através do receptor dGPS-RTK.....	40
Quadro 4.3 - Comparação entre distâncias e velocidades obtidas por digitalização de imagens vídeo e distâncias medidas com fita métrica e tempo medido por células fotoeléctricas, em três exercícios de sprint.....	42
Quadro 4.4 - Resumo das médias das coordenadas (“x” e “y”, em m) obtidas no método LSD de separação de médias e respectivo coeficiente de variação (CV).....	45
Quadro 4.5 - Resumo da análise de regressão entre as coordenadas obtidas pelo receptor dGPS e as coordenadas obtidas pelo processo de digitalização com três velocidades de processamento do filme.....	47
Quadro 4.6 - Indicadores de dispersão entre as coordenadas obtidas por digitalização de imagens a três velocidades e as coordenadas obtidas pelo receptor dGPS-RTK.....	47
Quadro 4.7 - Relação entre tempo total do filme e tempo de digitalização, para diferentes velocidades de processamento do filme.....	51
Quadro 4.8 - Quadro resumo sobre os coeficientes de correlação de Pearson entre todas as digitalizações de cada operador.....	54
Quadro 4.9 - Coeficiente de correlação intra-classe (ICC) para as coordenadas “x” e “y”, no conjunto das treze digitalizações realizadas pelos seis operadores.....	54
7. ANEXOS	
Quadro A2.1 - Coordenadas de vinte e quatro pontos referenciados, obtidas na primeira sessão de recolha de dados pelo receptor dGPS-RTK.....	72
Quadro A3.1 - Resumo da análise de variância da variável “x” para os quatro métodos de obtenção de coordenadas (dGPS-RTK e digitalização com três velocidades de processamento de imagens).....	74
Quadro A3.2 - Resumo da análise de variância da variável “y” para os quatro métodos de obtenção de coordenadas (dGPS-RTK e digitalização com três velocidades de processamento de imagens).....	74
Quadro A4.1 - Resumo de análise de variância da coordenada “x” (CV = 0,91%) para o conjunto de resultados obtidos pelos seis operadores, em treze digitalizações, nas primeiras setenta e oito repetições.....	76
Quadro A4.2 - Resumo de análise de variância da coordenada “y” (CV = 0,82%) para o conjunto de resultados obtidos pelos seis operadores, em treze digitalizações, nas primeiras setenta e oito repetições.....	76

ÍNDICE DE QUADROS (continuação)

	Página
Quadro A4.3 - Resumo de análise de variância da coordenada “x” (CV = 1,39%) para o conjunto de resultados obtidos pelos seis operadores, em treze digitalizações, nas restantes setenta e oito repetições.....	76
Quadro A4.4 - Resumo de análise de variância da coordenada “y” (CV = 0,97%) para o conjunto de resultados obtidos pelos seis operadores, em treze digitalizações, nas restantes setenta e oito repetições.....	76
Quadro A4.5 - Resumo da análise de variância intra-operador referente à coordenada “x”.....	77
Quadro A4.6 - Resumo da análise de variância intra-operador referente à coordenada “y”.....	77
Quadro A4.7 - Resumo das médias da coordenada “x” (em m) obtidas no método LSD de separação de médias.....	78
Quadro A4.8 - Resumo das médias da coordenada “y” (em m) obtidas no método LSD de separação de médias.....	78
Quadro A5.1 - Coeficientes de correlação de Pearson referentes às treze digitalizações do operador “1” para a coordenada “x”.....	80
Quadro A5.2 - Coeficientes de correlação de Pearson referentes às treze digitalizações do operador “1” para a coordenada “y”.....	80
Quadro A5.3 - Coeficientes de correlação de Pearson referentes às treze digitalizações do operador “2” para a coordenada “x”.....	81
Quadro A5.4 - Coeficientes de correlação de Pearson referentes às treze digitalizações do operador “2” para a coordenada “y”.....	81
Quadro A5.5 - Coeficientes de correlação de Pearson referentes às treze digitalizações do operador “3” para a coordenada “x”.....	82
Quadro A5.6 - Coeficientes de correlação de Pearson referentes às treze digitalizações do operador “3” para a coordenada “y”.....	82
Quadro A5.7 - Coeficientes de correlação de Pearson referentes às treze digitalizações do operador “4” para a coordenada “x”.....	83
Quadro A5.8 - Coeficientes de correlação de Pearson referentes às treze digitalizações do operador “4” para a coordenada “y”.....	83
Quadro A5.9 - Coeficientes de correlação de Pearson referentes às treze digitalizações do operador “5” para a coordenada “x”.....	84
Quadro A5.10 - Coeficientes de correlação de Pearson referentes às treze digitalizações do operador “5” para a coordenada “y”.....	84
Quadro A5.11 - Coeficientes de correlação de Pearson referentes às treze digitalizações do operador “6” para a coordenada “x”.....	85
Quadro A5.12 - Coeficientes de correlação de Pearson referentes às treze digitalizações do operador “6” para a coordenada “y”.....	85
Quadro A6.1 - Erro técnico relativo de medida (ETM, em %) para a coordenada “x”: comparação entre as coordenadas obtidas na primeira digitalização e as coordenadas obtidas nas digitalizações subsequentes.....	87
Quadro A6.2 - Erro técnico relativo de medida (ETM, em %) para a coordenada “y”: comparação entre as coordenadas obtidas na primeira digitalização e as coordenadas obtidas nas digitalizações subsequentes.....	87
Quadro A6.3 - Distâncias totais (acumuladas, em m) em cada digitalização e ETM (em %).	88

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
3. MATERIAL E MÉTODOS	
Figura 3.1 - Circuito percorrido pelo atleta na primeira sessão de recolha de dados (Fevereiro de 2010).....	18
Figura 3.2 - Plano geral do circuito e dos deslocamentos padrão utilizados	19
Figura 3.3 - Plano de pormenor das estações que constituíram o circuito.....	20
Figura 3.4 - Instalação das células fotoeléctricas numa das estações do circuito ...	22
Figura 3.5 - Instalação da estação de correcção diferencial dGPS-RTK, junto ao campo de Futebol	23
Figura 3.6 - Atleta, equipado com o receptor dGPS-RTK, em condução de bola num dos exercícios do circuito.....	23
Figura 3.7 - Pontos de calibração considerados no campo do “Redondense Futebol Clube”.....	27
Figura 3.8 - Metodologia utilizada no processo de validação do software “TACTO”.....	32
Figura 3.9 - Metodologia complementar utilizada no processo de validação do software “TACTO” para deslocamentos em sprint, com mudança de direcção.....	32
Figura 3.10 - Metodologia utilizada no processo de avaliação da consistência do software “TACTO”.....	33
Figura 3.11 - Diagrama resumo, ilustrativo das diferentes etapas do procedimento utilizado neste trabalho para reconstrução de coordenadas por transformação directa linear a 2D	38
4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	
Figura 4.1 - Coordenadas das posições do atleta obtidas pelo receptor dGPS-RTK durante a realização da primeira volta ao circuito: antes (à esquerda) e depois (à direita) da transformação de coordenadas	41
Figura 4.2 - ETM na comparação das distâncias e das velocidades medidas pelo sistema de digitalização de imagens vídeo com a medição de distâncias com fita métrica e de tempo com células fotoeléctricas, em três exercícios de sprint (10m, 30m e 30m com mudanças bruscas de direcção, “30m sprint m/d”).....	43
Figura 4.3 - Coordenadas reais recolhidas pelo receptor dGPS-RTK e por digitalização de imagens, durante a primeira volta ao circuito realizada pelo atleta.	44
Figura 4.4 - Equações de regressão entre as coordenadas “x”, obtidas pelo receptor dGPS-RTK e as coordenadas “x” obtidas por digitalização, com diferentes velocidades de processamento do filme.....	46
Figura 4.5 - Equações de regressão entre as coordenadas “y”, obtidas pelo receptor dGPS-RTK e as coordenadas “y” obtidas por digitalização, com diferentes velocidades de processamento do filme	46
Figura 4.6 - Desvio (em %) nas distâncias acumuladas medidas pelo processo de digitalização, relativamente às distâncias acumuladas medidas pelo receptor dGPS-RTK	48

ÍNDICE DE FIGURAS (continuação)

	Página
Figura 4.7 - Coordenadas (“x” no gráfico de cima; “y” no gráfico de baixo) das posições do atleta nas três voltas completas realizadas ao circuito, obtidas pelo receptor dGPS-RTK (“GPS”) e resultantes do processo de digitalização de imagens vídeo (“dig(300)”).....	50
Figura 4.8 - Desvio entre trajectórias resultantes dos dois métodos de obtenção de coordenadas, dGPS-RTK e digitalização de imagens vídeo (“dig300”).....	50
Figura 4.9 - Coeficientes de correlação de Pearson para a coordenada “x”, no conjunto das setenta e oito digitalizações.....	53
Figura 4.10 - Coeficientes de correlação de Pearson para a coordenada “y”, no conjunto das setenta e oito digitalizações	53
Figura 4.11 - Comportamento do ETM para a coordenada “x”, para cada operador, nas três séries de digitalizações consideradas	57
Figura 4.12 - Comportamento do ETM para a coordenada “y”, para cada operador, nas três séries de digitalizações consideradas	57

1. INTRODUÇÃO

O Futebol desperta o interesse crescente da comunidade científica internacional, como comprovam os inúmeros trabalhos de investigação publicados em diversas revistas da área do desporto ou da medicina, utilizados no capítulo da revisão do estado actual dos conhecimentos para enquadrar o tema em estudo.

A análise do treino e do jogo, nas suas vertentes técnica, tática, física e psicológica é um imperativo do Futebol moderno, altamente profissionalizado e competitivo e onde os pormenores decidem resultados, campeonatos, carreiras de treinadores ou de jogadores. As equipas de topo, nacionais e internacionais, dispõem de *software* e de tecnologia que lhes permitem uma documentação minuciosa das variáveis fundamentais no apoio à tomada de decisão. O acesso a estas tecnologias é condicionado pelo seu custo de aquisição, pelo que equipas de menor capacidade financeira recorrem a meios menos onerosos e, muitas vezes, insuficientes na perspectiva dos treinadores.

Neste enquadramento surge a justificação para este trabalho, com o qual se pretende efectuar a validação de um *software* (“TACTO”), acessível a todos e assente em técnicas de transformação linear directa a duas dimensões (“2D-DLT”), baseadas em algoritmos desenvolvidos em rotinas criadas em ambiente “MATLAB” para diferentes aplicações, entre elas a monitorização do padrão de deslocamentos dos jogadores de Futebol. A validação é o processo chave de aceitação de qualquer ferramenta nova, a qual requer, neste caso, por um lado, a comparação das coordenadas reconstruídas a partir da digitalização das imagens vídeo captadas por uma câmara de filmar fixa com as coordenadas reais, sendo utilizadas, neste estudo, como referência as coordenadas obtidas por um receptor GPS de alta precisão (dGPS-RTK) e, por outro, a avaliação da consistência das medições realizadas pelo mesmo operador ao longo do tempo e por diferentes operadores (respectivamente, consistência intra-operador e inter-operadores).

1.1. Pertinência e objectivos do estudo

A pertinência deste estudo é fundamentada pelas referências na literatura (Dobson e Keogh, 2007; Carling *et al.*, 2008) às reservas relativas à validação científica da precisão e da fiabilidade dos diferentes sistemas de obtenção de coordenadas por digitalização de imagens de

vídeo, apesar da evolução tecnológica verificada na última década ao nível dos meios de apoio ao tratamento de imagens.

A metodologia “TACTO-MATLAB” para obtenção de parâmetros biomecânicos enquadra-se no conjunto de sistemas que carecem de validação científica. Este estudo tem como objectivo principal validar a metodologia “TACTO-MATLAB” na monitorização dos padrões de deslocamento de jogadores de Futebol utilizando para o efeito um sistema de posicionamento global com correcção diferencial em tempo real (dGPS-RTK) e células fotoeléctricas. A confirmação da validade do próprio sistema dGPS-RTK com distâncias medidas com fita métrica e com o tempo medido por células fotoeléctricas pode considerar-se um objectivo secundário deste trabalho.

2. REVISÃO DO ESTADO ACTUAL DOS CONHECIMENTOS

2.1. Utilização de imagens de vídeo na monitorização de jogadores de Futebol

Partindo do princípio que as incidências dos jogos desportivos colectivos obedecem a uma lógica interna particular (sistemas dinâmicos auto-organizados), vários autores têm procurado perceber os padrões de coordenação espaciais e temporais, entre equipas e entre jogadores da mesma equipa e os constrangimentos que os caracterizam no sentido de modelar um quadro de exigências que se constitua como referência fundamental na estruturação da especificidade do treino (Dobson e Keogh, 2007; Petersen *et al.*, 2009) e na avaliação do desempenho dos atletas (Barros *et al.*, 2007), que permita correlacionar a intensidade do treino com o risco de incidência de lesões ou de danos para a saúde dos atletas (Carling *et al.* 2008; MacLeod *et al.*, 2009), que permita melhorar os critérios de detecção e selecção de talentos (Barbero-Alvarez *et al.*, 2009), que suporte o estabelecimento de protocolos de projectos laboratoriais de simulação das características específicas do Futebol (ao nível da carga de treino, de estratégias nutricionais, de temperatura, etc.) e que sustente a avaliação do grau com que as solicitações físicas do jogo são adequadamente replicadas no treino (Carling *et al.*, 2008). O conhecimento das variáveis que caracterizam o comportamento dos atletas em jogo pode ser utilizado pelos treinadores com o objectivo de apoio à tomada de decisão, especialmente ao nível da preparação dos jogos (Carling *et al.*, 2008). O estudo do jogo a partir da observação dos jogadores e das equipas emergiu com os imperativos da especialização, no âmbito da prestação desportiva, a qual é considerada uma das variáveis que mais afectam a aprendizagem e a eficácia da acção desportiva. Este conhecimento tem-se revelado fundamental para avaliar a congruência da sua prestação em relação aos modelos de jogo e de treino preconizados.

Diversos foram os investigadores que se debruçaram sobre os padrões típicos dos deslocamentos dos jogadores de Futebol, os quais podem ser influenciados por vários factores, desde a posição no campo, o escalão etário, o género, o nível competitivo, etc. (Dobson e Keogh, 2007; Carling *et al.*, 2008). Desde os estudos pioneiros de Reilly e Thomas (1976) na monitorização dos deslocamentos dos jogadores de Futebol (Vuckovic *et al.*, 2010), o crescente interesse e a actualidade deste tema podem ser comprovados pelos trabalhos de investigação desenvolvidos na última década por várias equipas em todo o mundo. Reilly e Gilbourne (2003) reforçam o interesse da análise do jogo, em particular do Futebol, pela apresentação do número de publicações em revistas internacionais. São exemplo os trabalhos de Pers *et al.* (2002), Reilly e Gilbourne (2003), Terrier e Schutz (2005), Edgecomb e Norton (2006), Roberts *et al.* (2006),

Barros *et al.* (2007), Carling *et al.* (2008), Barbero-Alvarez *et al.* (2008), MacLeod *et al.* (2009), Hill-Haas *et al.* (2009), Brewer *et al.* (2010). No âmbito dos estudos de análise de parâmetros biomecânicos que regem o Futebol, devem destacar-se os trabalhos de investigação de Kuhtanen (1999), dirigidos à determinação dos movimentos básicos que se realizam durante o jogo. Este tema atrai investigadores das áreas do desporto, da medicina e das ciências da computação (Pers *et al.*, 2002). A pertinência destes estudos encontra fundamentação na informação que disponibiliza, a qual poderá ser útil para compreensão das exigências fisiológicas e biomecânicas específicas, permitindo a adequação da metodologia de treino e a análise técnico-táctica do jogo.

Os dois principais sistemas utilizados para a análise do jogo, nas diversas modalidades desportivas, são os sistemas baseados na análise das imagens de vídeo e os sistemas que utilizam tecnologia GPS (“*Global Positioning System*”) (Dobson e Keogh, 2007; Petersen *et al.*, 2009). MacLeod *et al.* (2009) consideraram muito valiosa a informação detalhada que a análise de vídeo permite, apesar de reconhecerem as exigências de tempo. Roberts *et al.* (2006) referiram o carácter restritivo do método de digitalização em termos de informação de retorno (*feedback*) quando comparado com o método de registo manual, exigindo cerca de 8h para obter os dados de um só jogador ao longo de um jogo, embora concluam que este é o melhor método para analisar as exigências físicas dos atletas em desportos de equipa. Pers *et al.* (2002) consideraram, como ponto de partida, o interesse em sacrificar alguma precisão espacial e resolução temporal (que nalguns casos chega a 100 Hz ou mais) que estariam associadas a sistemas de medição biomecânicos (que normalmente exigem a colocação de marcadores no corpo dos atletas e que, por isso, não são aceitáveis em competição em desportos colectivos), para obter dados (posição e velocidade) dos deslocamentos humanos correspondentes a grandes áreas e longos intervalos de tempo através de técnicas de vídeo. Estas técnicas podem, também, ser complementadas com a recolha de parâmetros fisiológicos (como a frequência cardíaca), permitindo análises integradas (Dobson e Keogh, 2007). Randers *et al.* (2010) compararam vários meios tecnológicos na monitorização de jogos de Futebol, entre eles, a digitalização de imagens vídeo e a utilização de receptores GPS. Edgecomb e Norton (2006) depois de identificarem diversos métodos para monitorizarem os deslocamentos dos atletas, reconheceram que a análise em vídeo, apesar de exigente em tempo, é o mais apropriado para estimar as distâncias percorridas pelos atletas, embora refiram como desvantagens o facto de não permitirem a obtenção de informação em tempo real e a ocorrência de erros mais importantes na monitorização de deslocamentos realizados com variações bruscas de velocidade. Estes autores analisaram a validade e a fiabilidade de um sistema computadorizado de monitorização de

imagens de vídeo, comparando-o com o sistema de posicionamento global não diferencial (GPS) para medição das distâncias percorridas, da velocidade de deslocamento e do tempo despendido em determinadas categorias de velocidade de deslocamento de jogadores de Futebol. O termo validade (comparação) traduz a capacidade de uma determinada ferramenta medir o que se pretende efectivamente medir, enquanto fiabilidade corresponde à consistência das medições, à dimensão do erro aceitável para a utilização prática da ferramenta de medição, podendo encontrar-se com o mesmo significado designações como estabilidade, repetibilidade, reprodutibilidade ou concordância (Atkinson e Nevill, 1998). Para Hopkins (2000) validade e repetibilidade são os dois aspectos mais importantes da medição do erro. O estudo referido atrás de Edgecomb e Norton (2006) não apresentou, contudo, dados relativos à fiabilidade dos sistemas em movimentos realizados com elevadas intensidades, os quais tendem a ser sobrestimados. De acordo com Dobson e Keogh (2007) a avaliação da fiabilidade é vital, caso contrário os resultados devem ser utilizados com precaução. Segundo estes autores, o estudo de Duthie *et al.* (2003) seria um dos poucos trabalhos publicados dedicado exclusivamente à avaliação da fiabilidade dos sistemas de monitorização dos deslocamentos dos atletas.

A análise do jogo baseia-se na identificação de categorias de intensidade de deslocamento dos atletas, cuja definição varia de estudo para estudo. Misuta (2004), com o objectivo de simular situações típicas de um jogo de Futebol, concebeu um percurso com 292,4 m de extensão, onde incluiu, para além da situação em que o atleta se imobiliza em determinados pontos (0 a 0,2 m s⁻¹), 4 ritmos de deslocamento: 1) andar (0,2 a 2 m s⁻¹); 2) trote (corrida lenta; 2 a 4 m s⁻¹); 3) corrida moderada (4 a 6 m s⁻¹); e 4) sprint (6 a 10 m s⁻¹). Para Reilly e Thomas (1976), Reilly e Gilbourne (2003) e Carling *et al.* (2008) o Futebol é caracterizado por deslocamentos dos atletas a diferentes velocidades, desde deslocamentos a passo até deslocamentos em corrida à intensidade máxima (sprint), predominantemente sem bola, para a frente ou à retaguarda, incluindo frequentes mudanças de direcção, acelerações e desacelerações. Carling *et al.* (2008) referem mesmo que, na maioria do tempo total de um jogo, os jogadores de Futebol realizam movimentos de baixa intensidade (parados, a passo ou em corrida lenta), enquanto os deslocamentos em sprint constituem apenas cerca de 10% da distância total percorrida, sendo que a extensão dos sprints no Futebol raramente ultrapassa os 20 m e tem duração inferior a 4 s. Estes autores referiram a velocidade como uma variável com influência na precisão do processo de digitalização de imagens de vídeo para monitorização do deslocamento dos atletas. Roberts *et al.* (2006) também avaliaram a influência da velocidade dos deslocamentos dos atletas na precisão da informação recolhida por digitalização de imagens, tendo utilizado os seguintes intervalos de velocidades para os diferentes tipos de movimentos: 0 a 0,5 m s⁻¹ (parado ou em

deslocamentos quase imperceptíveis); 0,5 a 1,7 m s⁻¹ (deslocamentos a passo); 1,7 a 3,6 m s⁻¹ (corrida lenta); 3,6 a 5,0 m s⁻¹ (corrida de intensidade moderada); 5,0 a 6,7 m s⁻¹ (corrida de intensidade elevada); maior do que 6,7 m s⁻¹ (“sprint”). Outros autores (Barros *et al.*, 2007; Di Salvo *et al.*, 2007; Rampinini *et al.*, 2007) utilizaram diferentes intervalos de velocidades: 0 a 1,1 m s⁻¹ (parado ou com pequenos deslocamentos); 1,1 a 1,9 m s⁻¹ (corrida lenta); 2,0 a 3,5 m s⁻¹ (corrida moderada); 3,6 a 4,9 m s⁻¹ (corrida em alta intensidade); e maior do que 5,0 m s⁻¹ (sprint).

No sentido de permitir análises comparativas entre diversos trabalhos, Dobson e Keogh (2007) sugeriram, para o desporto em geral, cinco tipos de deslocamento que consideraram universais: parado (estacionário), a andar, em corrida lenta, em corrida moderada e em sprint, embora admitam ritmos ou estilos de deslocamentos diferentes, específicos de cada modalidade, sendo referidas para o Futebol, por exemplo, a corrida lateral e a corrida à retaguarda.

2.2. Tratamento das imagens de vídeo

A análise do movimento foi uma das disciplinas do desporto que apresentou maior desenvolvimento nos últimos anos, nomeadamente, no apoio à análise sistemática e na optimização do gesto técnico. A descrição cinemática do movimento a partir da utilização das técnicas da cinematria tem sido, como ficou patente no ponto anterior, a estratégia metodológica mais utilizada na análise dos parâmetros biomecânicos do Futebol. A cinematria corresponde à medição do movimento ou análise de parâmetros cinemáticos tendo por base a recolha de imagens do movimento em estudo, cujo método mais frequente é a videografia, e sua posterior análise. Assumindo as vantagens da utilização de imagens de vídeo para monitorizar os jogadores durante um jogo de Futebol, as técnicas de tratamento subsequente da informação recolhida podem assentar na aplicação de algoritmos matemáticos, baseados em trigonometria complexa (Carling *et al.*, 2008).

2.2.1. A reconstrução de coordenadas a três dimensões (3D)

Barros *et al.* (1999) efectuaram o desenvolvimento e avaliação de um sistema para análise cinemática tridimensional de movimentos humanos, baseados em registos estereoscópicos de vídeo. Os sistemas capazes de realizar a análise cinemática de movimentos humanos diferem nos graus de automatização dos procedimentos, nas restrições que impõem à situação experimental e na sofisticação e nos custos dos equipamentos que utilizam. A principal

diferença entre equipamentos para registo dos movimentos é a utilização de câmaras de infravermelhos ou de vídeo. Nos sistemas mais caros, que utilizam câmaras de infravermelhos, marcadores activos ou passivos (LED's), fixos ao corpo do sujeito, emitem ou reflectem, respectivamente, luz infravermelha a qual é registada pelas câmaras. Estes sistemas têm a vantagem de operar com maior resolução espacial e temporal nos registos, além de que a identificação automática (por *software*) dos marcadores é facilitada, uma vez que esses marcadores se destacam fortemente dos restantes elementos presentes nas imagens. Em contrapartida, a utilização de câmaras de vídeo permite maior flexibilidade na selecção dos movimentos a serem estudados, diminui as restrições ao ambiente de recolha e permite a maior difusão deste tipo de análise, dado que os custos são menores. Contudo, a medição automática das projecções dos pontos de interesse nas sequências de imagens é dificultada pela complexidade das imagens, dado o menor contraste entre os marcadores e os demais elementos na imagem. O problema do seguimento automático (“*automatic tracking*”) de movimentos humanos em sequências de imagens digitais é formulado usando morfologia matemática (segmentação), a qual simplifica as imagens, mantendo as principais características dos seus elementos e, baseando-se em conceitos de processamento digital, à base de algoritmos, permite determinar trajectórias numa sequência de imagens, envolvendo ainda a calibração de câmaras de filmar e a reconstrução de coordenadas (Misuta, 2004).

A posição de um objecto no espaço, relativa a um referencial (reconstrução tridimensional de coordenadas), é definida com a ajuda de três coordenadas independentes, por exemplo, as coordenadas cartesianas. Em relação ao parâmetro tempo (t), temos: $X = X(t)$; $Y = Y(t)$; $Z = Z(t)$, que são as equações paramétricas da trajectória.

Os procedimentos de calibração de câmaras e reconstrução tridimensional de coordenadas foram inicialmente propostos por Abdel-Aziz e Karara (1971) e são conhecidos como DLT (Transformação linear directa ou “*Direct Linear Transformation*”), derivados do princípio de colinearidade, baseados num sistema de duas equações polinomiais complexas (eq.s 2.1 e 2.2), com onze parâmetros de transformação e com parâmetros de escala diferenciados para os eixos “x” e “y”:

$$(n_1^k - n_3^k x_i^k)X_i + (n_4^k - n_6^k x_i^k)Y_i + (n_7^k - n_9^k x_i^k)Z_i + n_{10}^k - x_i^k = 0 \quad (2.1)$$

$$(n_2^k - n_3^k y_i^k)X_i + (n_5^k - n_6^k y_i^k)Y_i + (n_8^k - n_9^k y_i^k)Z_i + n_{11}^k - y_i^k = 0 \quad (2.2)$$

Onde: “ x^k ” e “ y^k ” são as coordenadas do i -ésimo ponto de um sistema de referência conhecido, para cada câmara k ; X , Y e Z são as coordenadas espaciais do i -ésimo ponto de referência; e n_h^k ($h=1, \dots, 11$) são os 11 parâmetros da transformação para a k -ésima câmara, a serem determinados.

O número mínimo de pontos de referência com coordenadas conhecidas é seis e o número mínimo de câmaras é de dois. Tanto no caso da calibração de cada câmara como na reconstrução de coordenadas, o sistema de equações apresentado é sempre super dimensionado, apresentando, conseqüentemente, mais do que uma solução para o problema. Efectua-se então, uma optimização por quadrados mínimos das soluções possíveis. Nos trabalhos a três dimensões, a questão da sincronização entre câmaras é fundamental. Esta consiste em colocá-las na mesma frequência e com a aquisição da imagem no mesmo instante. Para os casos em que a sincronização electrónica das câmaras de vídeo não é possível, a determinação dos parâmetros de sincronização pode ser feita pela adição de um sinal simultâneo aos registos das câmaras ou pode incorporar-se no sistema um conjunto de procedimentos que permitem a sincronização dos registos, por meio de métodos de optimização no próprio *software*. Estes procedimentos consistem em: a) determinar os parâmetros de sincronização das câmaras, o desfasamento inicial em tempo e a diferença na frequência de aquisição; e b) corrigir os efeitos do desfasamento temporal em cada câmara (Barros *et al.*, 1999).

2.2.2. A reconstrução de coordenadas a duas dimensões (2D)

A vídeografia bidimensional pode ser usada quando o movimento de interesse ocorre fundamentalmente num único plano ou quando interessa apenas analisar o que ocorre em determinado plano. A posição de um objecto no plano, relativa a um referencial (reconstrução bidimensional de coordenadas), é definida com a ajuda de duas coordenadas independentes, por exemplo, as coordenadas rectangulares relativas ao parâmetro tempo (t): $X = X(t)$; $Y = Y(t)$. A reconstrução de coordenadas a 2D, é um processo muito utilizado na análise do jogo, com características mais simples do que o método tridimensional, não necessitando de definir o volume de calibração mas sim a área do plano de calibração. Pode basear-se na recolha de imagens utilizando apenas uma câmara de filmar (enquanto a reconstrução tridimensional, por exigir mais uma coordenada, exige também uma segunda câmara), necessariamente de base fixa. Esta abordagem a duas dimensões permite uma simplificação das equações paramétricas propostas por Abdel-Aziz e Karara (1971), exigindo apenas oito parâmetros de transformação (eq.s 2.3 e 2.4) e dispensando, naturalmente, a sincronização das câmaras (Misuta, 2004):

$$(n_1^k - n_3^k x_i^k)X_i + (n_4^k - n_6^k x_i^k)Y_i + n_7^k - x_i^k = 0 \quad (2.3)$$

$$(n_2^k - n_3^k y_i^k)X_i + (n_5^k - n_6^k y_i^k)Y_i + n_8^k - y_i^k = 0 \quad (2.4)$$

Onde: “ x^k ” e “ y^k ” são as coordenadas do plano do i -ésimo ponto de um sistema de referência conhecido, para cada câmara k ; X e Y são as coordenadas do 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 câmara, a serem determinados.

Este método visa a transformação de imagens para obtenção de coordenadas espaciais a duas dimensões (reconstrução do espaço bidimensional- “2D-DLT”), seguida de processamento e filtragem das imagens. Para obter as coordenadas 2D da trajectória de um jogador a partir das coordenadas virtuais é preciso determinar os parâmetros de transformação das equações, o que se consegue através de calibração e reconstrução. Este sistema de equações é aplicado duas vezes, a primeira para quantificar os parâmetros de transformação (calibração) e a segunda para efectuar a reconstrução propriamente dita (Misuta, 2004). A reconstrução é necessária uma vez que as coordenadas obtidas se encontram deformadas em resultado da perspectiva (Barbero-Alvarez *et al.*, 2008).

Os movimentos individuais podem ser seguidos no vídeo por *software* adequado, de forma manual ou automática (Carling *et al.*, 2008). Avanços recentes na tecnologia associada ao processamento de imagens e ao cálculo computacional permitiu a realização de trabalhos em vários desportos (Basquetebol, Futebol, Andebol e Voleibol) assentes no seguimento automático dos deslocamentos dos atletas (Vuckovic *et al.*, 2010). Misuta (2004) utilizou técnicas de morfologia matemática (segmentação e rastreamento) para seguimento automático dos movimentos dos atletas. Barbero-Alvarez *et al.* (2008) utilizaram um sistema vídeo para monitorizarem os deslocamentos de jogadores de Futsal e perceberem as exigências fisiológicas dos atletas, em termos de distâncias e velocidades, que permitiram caracterizar o esforço durante o jogo. Estes autores seguiram seis etapas: 1) filmagem; 2) digitalização; 3) reconstrução; 4) sincronização; 5) suavização; e 6) cálculos, e utilizaram o *software* “*Runner v. 1.0*” na reconstrução de coordenadas, tendo justificado a sua necessidade uma vez que a perspectiva da filmagem, a sincronização entre as câmaras e a imprecisão na digitalização causam erros que importa minimizar. Misuta (2004) utilizou o *software* “*Dvideow*” para análise cinemática de imagens vídeo e obtenção da posição dos jogadores de Futebol em função do tempo, com o desenvolvimento de algoritmos em ambiente “MATLAB”. Também Vuckovic *et al.* (2010) desenvolveram *software* (“SAGIT/Squash”) para monitorização automática dos movimentos de atletas de *Squash*.

Comercialmente podem encontrar-se no mercado alguns sistemas para recolha e tratamento de informação em desportos colectivos, nomeadamente o “AMISCO Pro[®]” e o “ProZone[®]”, sistemas que, em tempo real, permitem a análise de imagens do jogo e a monitorização dos deslocamentos de todos os atletas e da bola em simultâneo (Carling *et al.*, 2008), sendo utilizado por diversas equipas de Futebol a nível internacional e, segundo Di Salvo *et al.* (2006) e Vuckovic *et al.* (2010), apresentando excelentes correlações com a realidade em termos de velocidade de deslocamento dos atletas. Estes sistemas procedem à reconstrução de coordenadas, a duas dimensões, das posições de todos os atletas, através de trigonometria complexa, algoritmos matemáticos tendo por base procedimento “DLT”, facultando uma representação gráfica animada e interactiva de todas as acções dos jogadores. Na mesma linha destes, baseando-se em técnicas de processamento de imagens de múltiplas câmaras, encontram-se os sistemas comerciais mais recentes “DataTraX[®]” e “TRACAB[®]” (Carling *et al.*, 2008). Todavia, a exigência em termos de colocação permanente de diversas câmaras no estádio em posições fixas, previamente estudadas (com pontos de calibração conhecidos em termos de altura, comprimento e largura) e o elevado custo condiciona a sua aquisição e abre perspectivas para sistemas alternativos, de custo significativamente inferior. O programa “TACTO” (“*Tool for Applied and Contextual Time-series Observation*”), utilitário para análise de posições desenvolvido em linguagem de programação Visual Basic- versão 7.0 por Fernandes (2008), exige o seguimento manual durante a digitalização, com o cursor do rato e com o maior rigor possível, das movimentações de cada um dos atletas. Após a digitalização, uma sequência de rotinas programadas em ambiente “MATLAB” permite a minimização do erro associado e a reconstrução de coordenadas reais a partir de coordenadas virtuais.

Em resumo, qualquer sistema de monitorização dos padrões dos movimentos dos atletas baseado na análise de imagens de vídeo apresenta a vantagem de não exigir a colocação de transmissores electrónicos nos atletas. As principais limitações dos sistemas de digitalização manual já foram apontadas e prendem-se com o tempo que o procedimento demora na captura e tratamento de dados e com o facto destes não estarem disponíveis em tempo real. Em geral, estes sistemas carecem de avaliação da validade e da fiabilidade do procedimento (Carling *et al.*, 2008). A validação dos sistemas é fundamental para a sua aceitação na determinação de parâmetros biomecânicos cinemáticos (especialmente distâncias e velocidades), tarefa destinada aos investigadores da comunidade académica (Carling *et al.*, 2008).

2.3. Validação da metodologia de reconstrução de coordenadas

A inexistência de um protocolo de teste considerado standard para avaliação da validade e da fiabilidade da metodologia utilizada na monitorização dos atletas pode ser uma das principais razões que justificam o número relativamente reduzido de estudos divulgados com este propósito (Carling *et al.*, 2008). Também contribuem para este facto algumas limitações impostas por questões logísticas (acessibilidades nos estádios, impedimento dos atletas utilizarem equipamentos electrónicos em competição, etc.). Di Salvo *et al.* (2006) apresentaram um exemplo de protocolo de validação para o sistema “ProZone®” assente na comparação das medições realizadas por este sistema com a medição do tempo em determinadas estações, correspondentes a diferentes velocidades e diferentes percursos. Estes autores puderam confirmar a fiabilidade do sistema para monitorizar jogadores de Futebol através de análise de regressão.

Segundo Carling *et al.* (2008) um protocolo de validação de sistemas de monitorização de imagens de vídeo para avaliar distâncias e velocidades de deslocamento baseado na realização de um circuito deve assegurar que neste são incluídos todos os tipos de deslocamentos previamente identificados. Segundo os mesmos autores, é importante avaliar a fiabilidade intra-operador e inter-operadores do sistema de análise de imagens de vídeo em cada tipo de exercício, em termos de intensidade de deslocamento.

Roberts *et al.* (2006) testaram a validade e a fiabilidade do software “Peak Motus” como sistema de análise de desportos baseado na digitalização de imagens de vídeo. Por um lado, compararam as distâncias medidas no campo e o tempo medido por células fotoeléctricas com as distâncias e as velocidades calculadas por este *software* (validade). Por outro lado, avaliaram a fiabilidade do método intra-operador e inter-operadores. A fiabilidade intra-operador consiste na análise da mesma sequência de imagens vídeo pelo mesmo operador, em diferentes momentos (Carling *et al.*, 2008). A fiabilidade inter-operadores consiste na análise da mesma sequência de imagens vídeo, por diferentes operadores.

Pers *et al.* (2002) e MacLeod *et al.* (2009) são exemplo de outras equipas que utilizaram e avaliaram sistemas de digitalização e tratamento de imagens para monitorizar os deslocamentos dos atletas.

2.4. Sistema de posicionamento global diferencial

O sistema de posicionamento global (GPS), desenvolvido nos anos setenta do século passado pelo Departamento Americano da Defesa para navegação com fins militares, é actualmente uma ferramenta com enorme potencial de aplicação ao nível do desporto (Larsson, 2003; Terrier e Schutz, 2005; Edgecomb e Norton, 2006; Carling *et al.*, 2008). Inclui vinte e quatro satélites em permanência em órbita em volta da Terra, a uma altitude de 20 200 km, completando uma volta completa à Terra em cerca de 12 h. Os satélites são equipados com relógios atómicos, extremamente precisos e que emitem informações que incluem a sua exacta posição e a hora da emissão do sinal. O receptor GPS mede a hora de chegada do sinal e, através de conceitos de trigonometria (triangulação e trilateração) e do conhecimento da velocidade de propagação do sinal na atmosfera (aproximadamente a velocidade da luz), transforma o diferencial de tempo em distância. O conhecimento da distância a quatro satélites permite o cálculo da posição, da altitude e da velocidade do receptor (Larsson, 2003; Edgecomb e Norton, 2006; Townshend *et al.*, 2008). Este processo tem associado um conjunto de fontes de erro resultantes da imprecisão do relógio do receptor, dos desvios das órbitas dos satélites, da variação da velocidade de propagação do sinal nas diferentes camadas da atmosfera e do efeito multi-trajecto (resultante da proximidade de árvores ou edifícios). Na prática, a imprecisão na determinação das coordenadas pode atingir valores da ordem de grandeza do metro (Duncan *et al.*, 2009), consoante o tipo de receptor, o número e a geometria dos satélites disponíveis, entre diversos factores. A geometria dos satélites é quantificada num parâmetro conhecido como factor geométrico de diluição da precisão (GDOP, “*Geometric Dilution of Precision*”), que é inversamente proporcional ao volume do tetraedro definido pela posição dos satélites e do receptor. Quanto menor for o GDOP, maior é o volume do tetraedro e, conseqüentemente, maior é a precisão. A disposição e o número dos satélites relativos a um determinado receptor variam com o tempo (Witte e Wilson, 2004). Em relação a esta questão, apesar de MacLeod *et al.* (2009) terem realizado ensaios para avaliação da precisão do sistema GPS em três momentos do dia (9 h, 13 h e 16 h) e não terem encontrado diferenças significativas nas distâncias e nas velocidades medidas pelo sistema GPS nos diferentes horários, facto também comprovado por Petersen *et al.* (2009), Terrier e Schutz (2005) referem que a constelação óptima de satélites para recolha de coordenadas com GPS apenas ocorre durante o dia numa janela de duas a três horas, pelo que este aspecto deverá ser tido em conta na realização de ensaios com a utilização desta tecnologia.

Segundo Carling *et al.* (2008) a tecnologia GPS produziu um grande impacto na análise do desempenho no Futebol profissional, embora apenas ao nível do conhecimento das exigências do treino, uma vez que não é permitida a utilização de receptores electrónicos em competições oficiais.

Vários trabalhos têm sido desenvolvidos para testar a validade de receptores GPS comerciais para caracterizar os tipos de deslocamentos realizados pelos atletas no Futebol (Coutts *et al.*, 2010; Wisbey *et al.*, 2010; Brewer *et al.*, 2010; Randers *et al.*, 2010) ou noutros desportos que envolvam esforços intermitentes, com a realização de sprints repetidos (Witte e Wilson, 2004; Reid *et al.*, 2008; MacLeod *et al.*, 2009; Barbero-Álvarez *et al.*, 2010; Castellano e Casamichana, 2010). MacLeod *et al.* (2009), com a intenção de avaliarem a validade do sistema GPS para monitorizar os padrões de movimentos no hóquei em patins, conceberam um circuito que incluía uma sequência de diferentes exercícios representativos. Coutts e Duffield (2010), também com o objectivo de avaliarem a validade e a fiabilidade do sistema GPS estabeleceram um circuito que pretendeu reflectir os tipos de movimentos que um atleta realiza em desportos de equipa que envolvem ritmos intermitentes. MacLeod *et al.* (2009) concluíram que o GPS é uma ferramenta válida na medição da velocidade e da distância em hóquei em patins. Duffield *et al.* (2010) e Coutts e Duffield (2010) concluíram, no entanto, que este sistema pode não ser suficientemente preciso em situações que envolvam velocidades elevadas ou frequentes mudanças de velocidade ou de direcção. De acordo com Dobson e Keogh (2007) e Carling *et al.* (2008), os primeiros receptores GPS recolhiam informação com uma frequência de 1Hz, insuficiente para medir variações bruscas da velocidade e da direcção, o que poderia levar a subestimativas das distâncias totais realizadas pelos atletas em desportos caracterizados por mudanças bruscas de direcção, como é o caso do Futebol. Receptores mais recentes permitem frequências de recolha até 50 Hz.

Com o objectivo de reduzir o erro sistemático associado à utilização do sistema GPS simples, foram desenvolvidos sistemas de correcção diferencial (GPS Differential, dGPS), os quais incluem três componentes: o receptor móvel (*rover*, que pode, por exemplo, ser transportado pelo operador numa mochila) do qual se pretendem conhecer as coordenadas; um receptor fixo (estação base), estacionado num ponto de coordenadas conhecidas na mesma área do *rover* (com um raio de acção até 50 km e com, pelo menos, quatro satélites em comum); e um meio de comunicação entre ambos. O conhecimento das coordenadas permite à estação de referência (fixa) o cálculo do erro na medição e a transmissão das correcções identificadas em tempo real ("*Real Time Kinematics*", RTK), via rádio ou via telemóvel, para receptores que se encontrem

próximos (dentro de um raio de 10 km). Outra possibilidade, designada “*pós-processamento*”, consiste no armazenamento dos dados e na posterior correcção (Witte e Wilson, 2004). A tecnologia dGPS-RTK é relativamente cara e utilizada especialmente em trabalhos de Topografia, permitindo precisões na ordem do centímetro na determinação da posição (Morales e Tsubouchi, 2007). As estações de referência são elementos de custo muito elevado, surgindo como alternativa os sistemas de acesso a sinais de correcção diferencial transmitidos por satélites geoestacionários (caso do sistema americano “*Wide Angle Augmentation System*”, WAAS ou do sistema europeu “*European Geostationary Navigation Overlay Service*”, EGNOS), cujo acesso pode ser de custo significativamente inferior. Witte e Wilson (2005) demonstraram as vantagens dos receptores GPS que utilizam tecnologia “WAAS/EGNOS” relativamente aos receptores GPS sem acesso a esta tecnologia.

O potencial de utilização do sistema GPS em geral e no desporto em particular tende a aumentar nos próximos anos em face do projecto para lançamento da rede de satélites europeia (“GALILEO”), apesar das limitações resultantes da indisponibilidade dentro de edifícios (por inacessibilidade de recepção dos sinais dos satélites) (Dobson e Keogh, 2007), o que impede a sua utilização na monitorização dos atletas em desportos de pavilhão (Vuckovic *et al.*, 2010) e a não permissão para os atletas transportarem componentes electrónicos (receptor) durante a competição (Terrier e Schutz, 2005; Dobson e Keogh, 2007; MacLeod *et al.*, 2009; Petersen *et al.*, 2009).

No sistema dGPS com correcção em tempo real (dGPS-RTK), a massa do receptor (antena e rádio) ultrapassa geralmente os 2 kg e dificulta o desenvolvimento de estudos relacionado com a locomoção de atletas (Witte e Wilson, 2004). Apesar de tudo, a sua utilização para validação de outros sistemas de monitorização mostra-se adequada face ao grau de precisão das medições que permite, podendo o erro na determinação da posição ser inferior a 2 cm no plano e a 3 cm em altitude (Terrier e Schutz, 2005). Os mesmos autores admitem precisões milimétricas para este sistema, especialmente em aplicações estáticas que implicam o posicionamento preciso num ponto fixo à superfície da terra (determinação das coordenadas geográficas), obtendo-se a posição média de medições repetidas. Segundo Leick (1995, cit. por Witte e Wilson, 2004) o sistema dGPS permite obter precisões sub-centimétricas. Perrin *et al.* (2000) confirmaram que o dGPS pode ser utilizado para medição da velocidade de deslocamento em situações de “*outdoor*”, abrindo novas perspectivas no campo da biomecânica. MacLeod *et al.* (2009) mostraram que as distâncias medidas pelo dGPS estão altamente correlacionadas com as distâncias reais. Barbero-Álvarez *et al.*, (2010) comprovaram a validade e a fiabilidade do GPS

comercial (GPSports System, Canberra, Australia), a funcionar com uma frequência de recolha de 1Hz, para medir a velocidade de atletas em desportos colectivos. Estes autores sugeriram a necessidade de realizar mais estudos que permitam avaliar a validade e a fiabilidade do sistema GPS para medir as distâncias e as velocidades associadas a deslocamentos de atletas correspondentes a distâncias mais curtas e não lineares, de acordo com os padrões típicos em jogos desportivos colectivos.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Instrumentos de avaliação

Foram utilizados os seguintes equipamentos e *software* na aquisição e tratamento de dados:

- “dGPS Trimble 4700, RTK” (estação de correcção diferencial em tempo real; e receptor móvel com 9 kg de massa e frequência de 1Hz);
- Células fotoelétricas “*Speed Trap II, Browser Timing System*” (3 pares);
- Câmara de filmar “Sony DCR-TRV310E PAL”;
- Cronómetro digital “CASIO HS-70W-1DF” ;
- Fita métrica metálica “TOPGIM DIVE113” (com 30 m de extensão);
- “TACTO, *Tool for Applied and Contextual Time-series Observation*” versão 7.0, aplicação desenvolvida para digitalização de coordenadas;
- “MATLAB[®] R2007a, versão 7.0.0.19920 (R14), ambiente de programação interativo para desenvolvimento de algoritmos;
- “Microsoft EXCEL[®]”;
- “MSTAT-C[®]”, *software* de análise estatística.

3.2. Amostra

A amostra deste estudo foi constituída por uma série temporal de coordenadas, representativas de exercícios tipo do padrão de deslocamentos de jogadores de Futebol (diferentes velocidades de deslocamento, com e sem bola) obtidas por digitalização de imagens de vídeo e por um receptor dGPS-RTK.

Dado que se pretendeu avaliar a metodologia de obtenção de parâmetros biomecânicos, a única exigência que se colocou na selecção do atleta que iria reproduzir os movimentos tipo característicos do Futebol foi que se tratasse de um atleta sénior, federado e em actividade, garantindo assim, como critério de inclusão, as intensidades específicas do jogo. Por este motivo, os percursos e exercícios no campo de Futebol foram realizados por um voluntário, atleta, do sexo masculino, com vinte anos de idade, aluno da Licenciatura em Educação Física e Desporto da Universidade de Évora. A digitalização das imagens vídeo foi realizada por seis operadores, também alunos do referido curso.

Foi enfatizado o carácter voluntário da participação e a garantia da confidencialidade de toda a informação recolhida para que os dados possam posteriormente ser publicados ou cientificamente avaliados. Os participantes (o atleta para realização do circuito no campo e os operadores no processo de digitalização) declararam o seu consentimento à participação na investigação e o estudo foi aprovado pelo Comité de Ética da Universidade de Évora.

3.3. Procedimento experimental

3.3.1. Fases de recolha de dados

Foram realizadas duas sessões para recolha de dados no mesmo local, o campo de Futebol de relva sintética do “Redondense Futebol Clube”. Na primeira sessão, realizada em Fevereiro de 2010, procurou-se identificar a melhor localização para a câmara de filmar e para a instalação dos exercícios do circuito a percorrer pelo atleta, em face, não só do campo de visão da câmara, mas também da disponibilidade de recepção de sinal dGPS pela antena transportada pelo atleta. A consulta do site “<http://www.trimble.com/planningsoftware.shtml>” indicou o período entre as 11 h e as 12 h 30 como o mais adequado (em termos de configuração dos satélites com vista à obtenção de informação com maior rigor) para utilização do GPS na região do país onde se efectuou a recolha de dados (Redondo, a cerca de 40 km de Évora), pelo que foi este o horário da recolha de dados de ambas as sessões. Foi ponderado como critério de decisão o factor geométrico de diluição da precisão (GDOP), tendo em conta que valores mais baixos de GDOP correspondem também a uma geometria mais adequada dos satélites rastreados e, por isso, a um erro inferior.

Ainda na primeira sessão, foi possível avaliar e confirmar a precisão do sistema dGPS-RTK na medição de distâncias, por comparação com valores medidos com fita métrica metálica num circuito constituído por vinte e quatro pontos referenciados no campo, e na medição da velocidade, por comparação com a medição efectuada com células fotoeléctricas em dois exercícios: “25 m a andar” (entre os pontos 6 e 7, figura 3.1) e “18,54 m em sprint” (entre os pontos 7 e 8, figura 3.1).

Com base nas informações obtidas na primeira sessão, a recolha de dados da segunda sessão, realizada em Março de 2010 foi concentrada no meio campo situado à esquerda na figura 3.1.

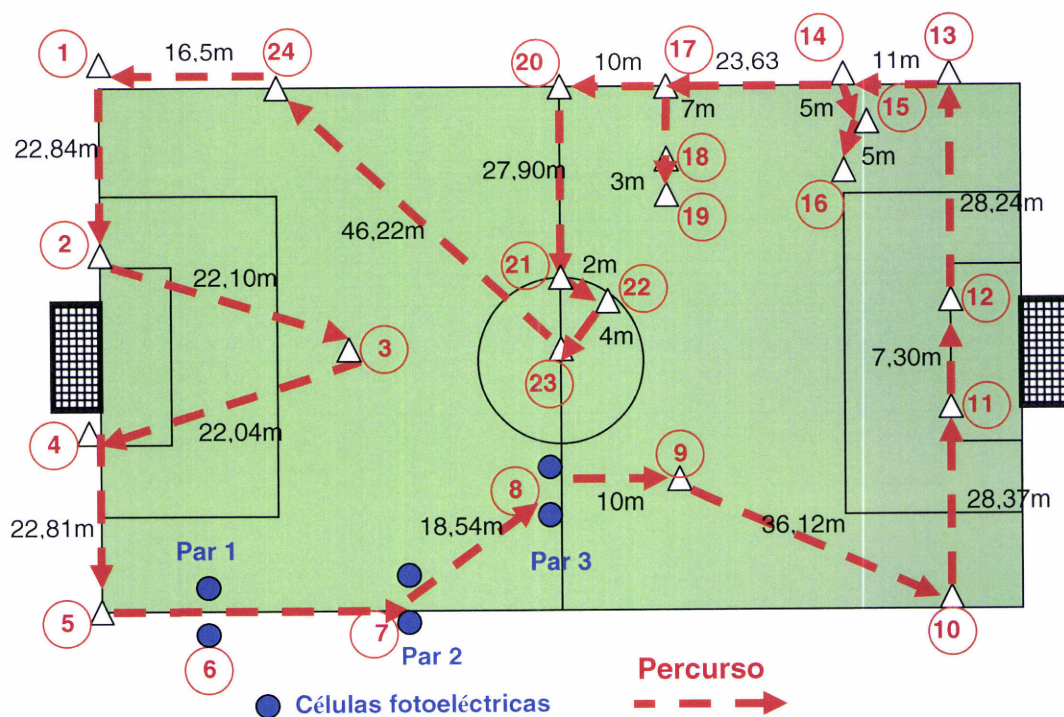


Figura 3.1- Circuito percorrido pelo atleta na primeira sessão de recolha de dados (Fevereiro de 2010)

3.3.2. Conceção e estabelecimento do circuito a realizar pelo atleta

O jogo, a competição real, será sempre a situação mais ecológica para reproduzir os tipos e intensidades de movimentos que um jogador de Futebol realiza. Todavia, não é autorizado em competição o transporte pelos atletas do receptor dGPS-RTK (*rover*), para além de que, neste caso concreto a estrutura a transportar tem de massa cerca de 9 kg, o que não lhe permitiria desenvolver um elevado ritmo de deslocamento (*sprint*), nem manter-se em competição durante o tempo regulamentar. Acresce o facto do equipamento referido, propriedade do Departamento de Engenharia Rural da Universidade de Évora, ser de custo muito elevado, utilizado em aulas de Topografia e em trabalhos de investigação que exigem elevada precisão, havendo necessidade de garantir a integridade do mesmo.

Em face dos condicionalismos expostos, foi concebido um circuito (figura 3.2), o qual foi instalado em apenas metade do campo de Futebol, área coberta pela câmara de filmar fixa colocada numa das torres de iluminação do estádio. Neste foram consideradas sete estações, três em que o atleta realizou movimentos com bola (condução, passe e remate) e quatro sem bola, com ritmos alternados que, tendo em conta os trabalhos publicados, pretenderam

representar o padrão de deslocamentos e de gestos técnicos realizados pelos jogadores de Futebol. Foram considerados os seguintes tipos de movimentos: imobilização do atleta no início e no final de cada estação (durante 4-5 s), para recolha de coordenadas GPS; deslocamentos a passo entre estações; deslocamentos em corrida lenta (nas estações E3, E4 e E7) ou rápida (nas estações E1, E2, E5 e E6). Dentro destas categorias incluem-se ainda deslocamentos laterais e deslocamentos à retaguarda, ambos com mudanças bruscas de direcção. A figura 3.3 ilustra um plano de pormenor das sete estações consideradas. A extensão dos diferentes percursos do circuito foi medida com fita métrica metálica.

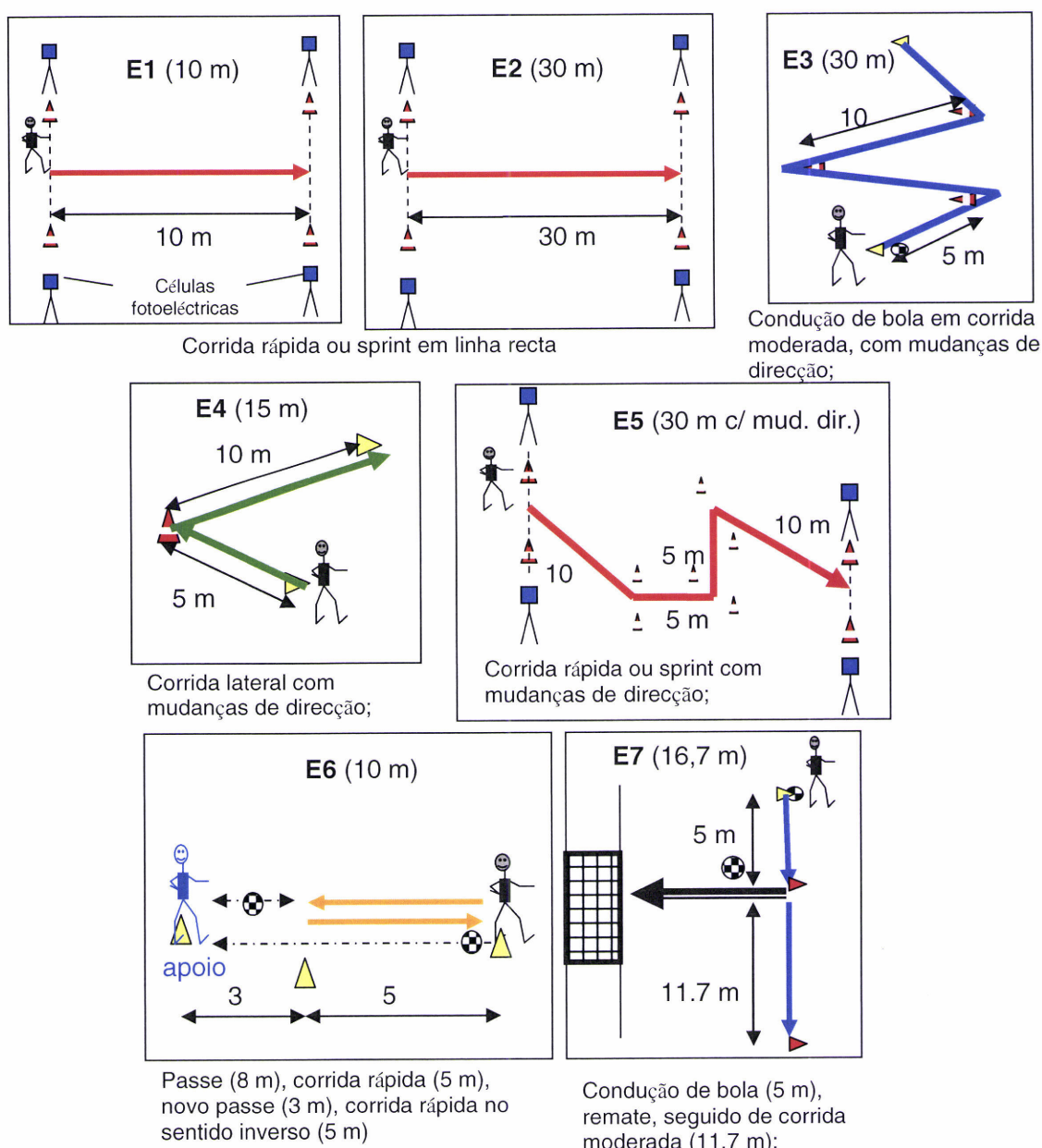


Figura 3.3 - Plano de pormenor das estações que constituíram o circuito.

Ainda tendo em consideração os condicionalismos referidos, o circuito foi realizado em duas etapas. Na primeira, o atleta realizou três repetições de apenas três das estações do circuito em sprint lançado (E1 = 10 m em linha recta e E2 = 30 m em linha recta; e E5 = 30 m com mudanças de direcção), sem acessórios (sem receptor dGPS-RTK). A determinação do tempo que o atleta demorou a percorrer cada estação foi, neste caso, realizada por dois pares de células fotoelétricas. Este primeiro conjunto de ensaios visou avaliar o procedimento de digitalização e tratamento de imagens de vídeo em situações de velocidades de deslocamento elevadas (sprint) ou com deslocamentos que incluem mudanças de direcção bruscas. A validação da metodologia de obtenção de coordenadas por digitalização de imagens vídeo foi completada numa segunda etapa, realizada pelo atleta com receptor dGPS-RTK e na qual percorreu três voltas completas ao circuito da figura 3.2 nos ritmos de deslocamento anteriormente referidos (parado, a passo, em corrida lenta e em corrida rápida).

Para assegurar que os exercícios seriam realizados pelo atleta de acordo com o plano elaborado, foi efectuada uma demonstração prévia para exemplificação dos ritmos de deslocamento pretendidos e dos gestos técnicos envolvidos em cada estação do circuito. Ainda com o mesmo propósito, um elemento de apoio, portador da descrição do circuito, acompanhou de perto o atleta em todos os percursos.

3.3.3. Sequência de recolha de dados de campo

O procedimento experimental na segunda sessão (de recolha efectiva de dados) em campo teve o seguinte desenvolvimento sequencial:

- a) Posicionamento da câmara de filmar numa das torres de iluminação do estádio (oposta ao meio campo onde se viria a instalar o circuito), cerca de 30 m acima do nível do relvado e filmagem de todos os percursos realizados pelo atleta;
- b) Instalação do circuito a percorrer pelo atleta: medição de distâncias entre e dentro de cada estação, conforme plano prévio; colocação de sinalizadores e bolas;
- c) Instalação de dois pares de células fotoelétricas (figura 3.4) no início e no final de três estações (E1, E2 e E5), de forma consecutiva (depois de concluída a realização das três repetições da estação 1, E1, as células foram transportadas e instaladas na estação 2 e depois de terminadas as três repetições da estação 2, E2, as células foram transportadas e instaladas na estação 5, E5), correspondentes a deslocamentos a realizar pelo atleta em sprint;



Figura 3.4 -Instalação das células fotoelétricas numa das estações do circuito.

d) Realização pelo atleta de três repetições de cada uma das três estações de sprint (com pausas completas definidas pelo próprio atleta, entre repetições e entre estações) e registo do tempo medido pelas células fotoelétricas;

e) Instalação de um par de células fotoelétricas no início/final do circuito;

f) Instalação da estação fixa dGPS-RTK, de referência para correcção diferencial em tempo real, num local com coordenadas conhecidas, junto ao campo de Futebol (figura 3.5) e inicialização da estação (período em que o receptor gradualmente adquire sinal de um número mínimo de quatro satélites que permita a obtenção do posicionamento);

g) Realização de um percurso exploratório pelo atleta para compreensão dos exercícios do circuito e dos respectivos ritmos de deslocamento;

h) Instalação da mochila de transporte do receptor dGPS-RTK móvel (“rover”) pelo atleta;

i) Realização pelo atleta (figura 3.6) de três repetições do circuito completo, com pausas completas definidas pelo próprio atleta; registo do tempo medido pelas células fotoelétricas e registo e armazenamento informático das coordenadas e do tempo recolhidos pelo receptor dGPS-RTK.



Figura 3.5 - Instalação da estação de correcção diferencial dGPS-RTK, junto ao campo de Futebol.



Figura 3.6 -Atleta, equipado com o receptor dGPS-RTK, em condução de bola num dos exercícios do circuito.

3.3.4. Tratamento dos dados

3.3.4.1. Tratamento das coordenadas obtidas pelo receptor dGPS-RTK

Os dados dos receptores dGPS-RTK (estação de correcção diferencial e *rover*), com frequência de amostragem de 1Hz (frequência máxima permitida neste receptor) foram analisados pelo *software* “Trimble”, conduzindo à obtenção das coordenadas e do tempo correspondente aos percursos realizados pelo atleta nas três voltas completas ao circuito.

A informação das coordenadas recolhidas pelo receptor dGPS-RTK são disponibilizadas em termos de latitude, longitude e altitude tendo como referência o elipsóide de representação aproximada da Terra, do Sistema Geodésico Mundial (WGS84, “*World Geodetic System*”, definido em 1984). A aplicação desta informação é pouco prática, sendo possível, para cada região do globo, obter as coordenadas segundo um referencial Cartesiano “x-y”. Neste estudo, as coordenadas foram disponibilizadas tendo como referência o “*Datum Militar*” (DM), o qual tem como origem para o referencial ortogonal um ponto fictício localizado a Sudoeste do Cabo de S. Vicente, 300 000 m a Sul e 200 000 m a Oeste do marco geodésico da Melriça, centro geodésico de Portugal Continental. Esta origem das coordenadas não coincide, naturalmente, com a origem a considerar na obtenção de coordenadas a partir do processo de digitalização das imagens vídeo. Para transformação das coordenadas dGPS-RTK (C_{DM}) em coordenadas relativas ao referencial do campo do “Redondense Futebol Clube” (C_{RC}) foi calculada e aplicada a matriz de rotação respectiva ([R]), de acordo com a equação 3.1. Nesta transformação foi utilizado um ângulo de rotação (θ) de 21,5885° e considerada a origem no vértice inferior esquerdo do campo (ponto “5”, figura 3.1), com as seguintes coordenadas rectangulares: Este=250702,371 m e Norte=186737,879 m. As coordenadas resultantes foram assumidas como as correspondentes à trajectória verdadeira ou de referência do atleta.

$$[C_{RC}] = [C_{DM}] [R] \quad (3.1)$$

A distância percorrida (d) num determinado intervalo de tempo (t) é o somatório dos deslocamentos realizados pelo atleta em cada intervalo correspondente a duas posições consecutivas na sequência de recolha (equação 3.2). A distância total (ou acumulada) realizada é obtida pelo somatório das distâncias entre coordenadas consecutivas.

$$d = \sum_{i=1}^n \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2} \quad (3.2)$$

Onde: d - é a distância percorrida pelo atleta num determinado intervalo de tempo; “ x ” e “ y ”- são as coordenadas do vector da trajectória do jogador; “ i ”-número de posições GPS recolhidas (entre os instantes “1” e “ n ”).

3.3.4.2. Tratamento das coordenadas obtidas por digitalização de imagens

As imagens captadas pela câmara de filmar foram armazenadas em suporte informático gravado em formato AVI (“*Audio Video Interleaved*”).

3.3.4.2.1. Digitalização de imagens

O processo de digitalização de imagens tem como objectivo a recolha de coordenadas correspondentes às posições do atleta nos diferentes percursos realizados. A digitalização do filme foi realizada no *software* “TACTO” com uma frequência de amostragem de 25 Hz.

Com o objectivo de validar a metodologia de obtenção de parâmetros biomecânicos a partir da digitalização de imagens de vídeo, um operador (operador “6”) procedeu à digitalização de todos os percursos realizados pelo atleta com dGPS-RTK. O operador acompanhou com o rato do computador (“tracking”) o ponto de contacto dos pés do atleta com o solo, como se fosse uma projecção do seu centro de gravidade no plano. Obtiveram-se, através deste procedimento, as coordenadas virtuais dos percursos realizados pelo atleta em três voltas completas ao circuito. O operador repetiu o procedimento três vezes, cada uma delas com diferentes programações ao nível da velocidade de processamento do filme: “intervalo de relógio 300” (velocidade mais lenta), “intervalo de relógio 100” (velocidade intermédia) e “intervalo de relógio 50” (maior velocidade).

O mesmo operador procedeu também à digitalização das imagens captadas durante a execução pelo atleta de três repetições de cada um dos exercícios de sprint das estações 1, 2 e 5 realizadas sem receptor dGPS-RTK. Obtiveram-se, através deste procedimento, as coordenadas virtuais dos percursos realizados pelo atleta nas três estações referidas. O operador repetiu o procedimento três vezes, sempre com a mesma programação ao nível da velocidade de processamento do filme (“intervalo de relógio 300”).

Com o objectivo de avaliar a fidelidade intra-pessoal e inter-pessoal, a digitalização do percurso realizado na estação 5 (E5), sem receptor dGPS-RTK, foi efectuada por seis operadores de acordo com o calendário apresentado no quadro 3.1. Aos operadores foi previamente explicado o procedimento comum a aplicar, nomeadamente a programação ao nível da velocidade de processamento do filme (“intervalo de relógio 300”), tendo sido também solicitado que garantissem um intervalo mínimo de uma hora entre sessões de digitalização consecutivas, realizadas no mesmo dia. A escolha da estação 5 (E5) para este efeito ficou a dever-se ao facto desta reunir deslocamentos considerados geralmente na literatura como críticos: em sprint e com mudanças bruscas de direcção.

Quadro 3.1 - Calendário de digitalizações pré-estabelecido em comum para os seis operadores.

Dia	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	Total
Número de digitalizações	3	1	2	1	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	3	13

Para reconstrução do espaço bidimensional foi utilizado o método “2D-DLT” em ambiente MATLAB, o qual permitiu reconstruir as coordenadas reais dos pontos localizados sobre um plano, através das coordenadas digitalizadas de imagens desses mesmos pontos (coordenadas virtuais) e do conjunto de pontos de referência (pontos de calibração) cuja localização real sobre o plano é conhecida.

3.3.4.2.2. Calibração

A recolha das coordenadas virtuais requer um processo paralelo de calibração da câmara de filmar, no qual são recolhidas, num procedimento semelhante ao referido para as movimentações dos atletas ou da bola, as coordenadas virtuais de um conjunto de pontos de referência na superfície de jogo, correspondentes a pontos cujas coordenadas reais são conhecidas.

Apesar de quatro ser o número mínimo de pontos de calibração não colineares para representar o plano do campo (a 2D) (Misuta, 2004), Roberts *et al.* (2006) concluíram que a reconstrução de coordenadas pode ser otimizada utilizando mais pontos de calibração. Os estudos realizados por Fernandes (2008) mostram que sete é o número de pontos de calibração aconselhável utilizar uma vez que estabelece o compromisso entre o grau de complexidade associado e o acréscimo de precisão que se pode obter. Estes pontos devem ficar distribuídos de forma

equilibrada, homogénea, pela zona do campo onde se desenvolve a acção a filmar. Em todo o caso, devem evitar-se situações de “excessiva” colinearidade. Segundo Gourgoulis *et al.* (2008), o número e a localização dos pontos de calibração afecta a precisão da reconstrução de coordenadas. Neste trabalho foram considerados doze pontos de calibração (figura 3.7) no meio campo onde decorreram as filmagens, cujas coordenadas foram previamente obtidas com fita métrica metálica. A recolha de doze pontos de calibração teve por objectivo permitir, em estudo paralelo a este, avaliar o efeito do número (4, 7 ou 12) e da localização de pontos de calibração sobre a precisão da metodologia de reconstrução de coordenadas.

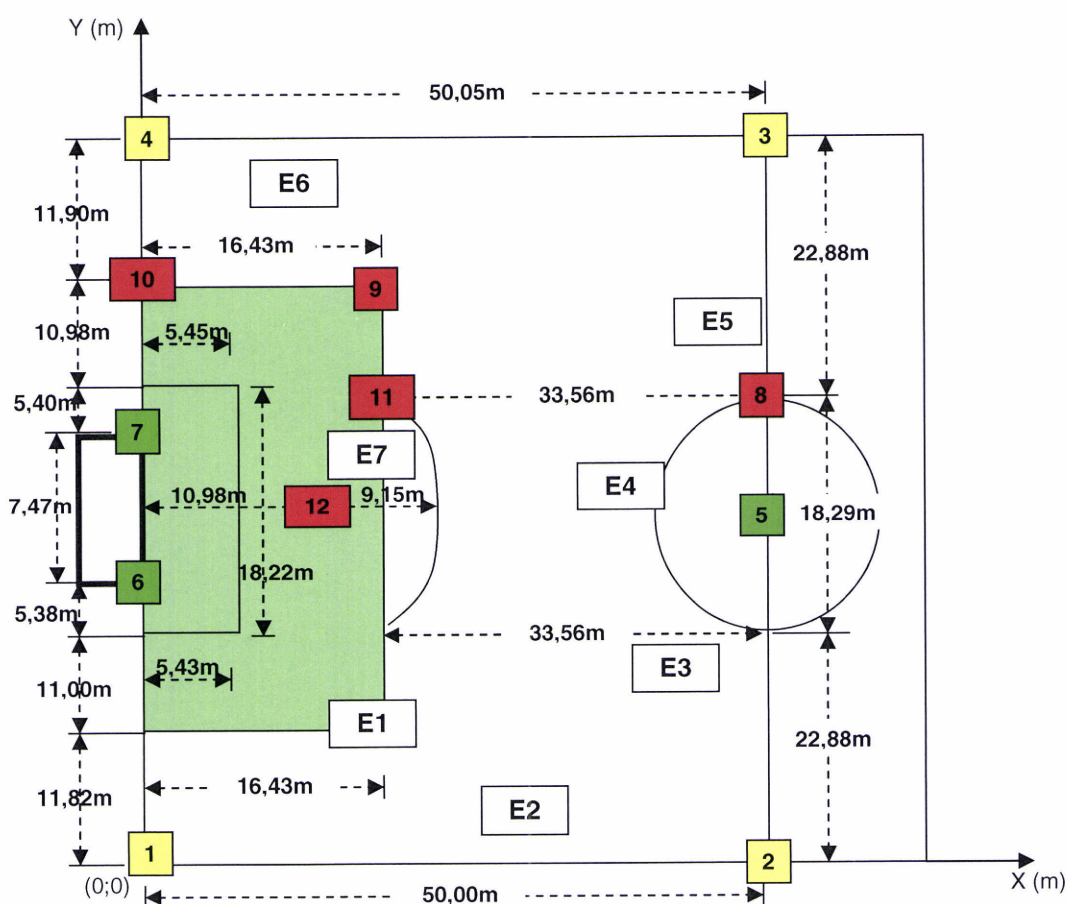


Figura 3.7 - Pontos de calibração considerados no campo do “Redondense Futebol Clube”.

Foi considerada como origem (ponto “0;0” na figura 3.7) do referencial ortogonal do sistema de coordenadas cartesianas o ponto de intersecção entre as linhas de fundo e lateral, situado no canto Sudoeste do campo do “Redondense Futebol Clube”, ponto de calibração “1” (figura 3.7). Assim, a abcissa é dada pela linha lateral do campo e a ordenada é dada pela linha de fundo. No quadro 3.2 são apresentadas as coordenadas reais dos pontos de calibração considerados.

Quadro 3.2 - Coordenadas reais dos pontos de referência do campo do “Redondense Futebol Clube”.

Ponto referência	Coordenada “x” (m)	Coordenada “y” (m)
1	0,00	0,00
2	50,00	0,00
3	50,00	60,05
4	0,00	63,95
5	50,00	32,03
6	0,00	28,20
7	0,00	35,67
8	50,00	41,18
9	16,43	52,05
10	0,00	52,05
11	16,43	41,18
12	10,98	32,03

O processo de calibração foi realizado por todos os operadores, previamente aos sucessivos procedimentos de digitalização de imagens. O ficheiro com as coordenadas de cada um dos doze pontos de calibração foi utilizado em ambiente “MATLAB” para transformar as coordenadas virtuais obtidas por cada operador nas respectivas coordenadas reais. As coordenadas reais (após transformação directa linear das coordenadas virtuais) dos doze pontos de calibração recolhidas pelo operador “6” foram não só utilizadas na calibração e transformação das coordenadas do percurso realizado pelo atleta para efeitos da avaliação da consistência intra-operador e inter-operadores, mas também dos percursos realizados pelo atleta durante as voltas completas ao circuito e ainda nos três exercícios que visaram testar a validade do sistema em situações de sprint e em trajectos com mudanças bruscas de direcção.

3.3.4.2.3. Minimização do erro

O processo de recolha de informação tem associado um conjunto de erros, de imprecisões (ruído), ligados à instrumentação (à precisão da câmara de filmar, à deformação da lente, à qualidade das imagens, etc.) ou aos procedimentos utilizados (à recolha de imagens, à colocação da câmara, à correcta identificação dos pontos de calibração, à oscilação que ocorre na recolha das coordenadas da trajectória dos jogadores por digitalização, à escolha dos filtros, às opções de modelação seguidas, etc.), pelo que há necessidade de proceder à minimização do erro com a simultânea optimização do tempo de processamento de dados. Pretende-se, desta forma passar

do “mundo virtual” (que se vê no monitor do computador) para dados do “mundo real”, sem acrescentar ou ampliar o erro (Fernandes, 2008). Para este efeito utilizou-se o *software* “MATLAB” versão 7.0.0.19920 (R14). Foram criadas rotinas de programação (ver exemplo no anexo 1) baseadas em transformação directa linear 2D (“2D-DLT”), procedimento padronizado e amplamente utilizado pela comunidade científica internacional, que permitiram, numa primeira fase, a comparação entre os ficheiros de coordenadas reais (medidas com fita métrica) e virtuais (obtidas por digitalização de imagens) do campo e a dedução da matriz com os oito parâmetros de transformação respectivos (PDLT, quadro 3.3).

Quadro 3.3 - Parâmetros de transformação (PDLT) resultantes da comparação entre as coordenadas reais e as coordenadas virtuais do campo do “Redondense Futebol Clube” considerando doze pontos de calibração.

Parâmetros	PDLT
1	0,3635
2	78,9740
3	226,8370
4	-31,9010
5	19,2800
6	1702,5890
7	-0,0087
8	0,0043

As coordenadas virtuais obtidas por cada operador foram posteriormente transformadas (reconstruídas) nas respectivas coordenadas reais pela aplicação do procedimento “2D-DLT” referido, tendo por base as coordenadas virtuais de calibração de cada operador e após aplicação de um filtro digital *ButterWorth* de segunda ordem, com frequência de corte de 6Hz, cujo objectivo foi minimizar (suavizar) as imprecisões e oscilações associadas com a recolha de coordenadas virtuais durante o processo de digitalização (Winter, 2004).

O processo de modelação e programação de dados em ambiente “MATLAB” inclui ainda a definição das dimensões exteriores do campo, permitindo que o filme final seja processado sobre este fundo.

O sistema de equações de transformação, utilizado para calibrar, ou seja, quantificar os parâmetros da transformação (PDLT), é utilizado uma segunda vez para efectuar a reconstrução bidimensional das coordenadas (reconstrução de coordenadas reais filtradas a partir de

coordenadas virtuais). É a partir destes ficheiros de coordenadas que o *software* “MATLAB” procede à reconstrução do filme, a 2D (sucessão de fotogramas com coordenadas reais).

3.3.4.3. Sincronização das coordenadas

A filmagem do ecrã do receptor dGPS-RTK no final do processo de recolha permitiu estabelecer a correspondência temporal (sincronização) entre a medição do tempo lido pelo receptor dGPS-RTK e o tempo medido pela câmara de filmar, tornando comparáveis (na mesma base de tempo) as coordenadas obtidas pelos dois métodos (dGPS-RTK e digitalização). Este aspecto é fundamental uma vez que, para além de serem diferentes as frequências de amostragem de ambos os sistemas (1 Hz no receptor dGPS-RTK e 25 Hz no processo de digitalização das imagens vídeo), há a juntar a irregularidade da captação de sinal do receptor dGPS-RTK. No conjunto das três voltas realizadas pelo atleta ao circuito, foram recolhidos pares de coordenadas GPS (345), sendo estas utilizadas na comparação estatística (validação) com os correspondentes pares de coordenadas obtidas por digitalização das imagens vídeo.

Por outro lado, no processo de digitalização de imagens referente à amostra utilizada para avaliação da consistência ou fiabilidade intra-operador e inter-operadores (E5, sem receptor GPS), realizado pelos seis operadores, verificou-se também a necessidade de sincronização dado que o número de pares de coordenadas recolhidas não foi uniforme, quer entre operadores, quer ainda entre digitalizações. Neste caso e uma vez que cada ficheiro (“operador/digitalização”) obtido no *software* “TACTO” comporta, para além do par de coordenadas (“x” e “y”), o número da imagem, foi criada uma rotina em “MATLAB” que permitiu identificar o intervalo de imagens (156) comuns a todas as digitalizações realizadas pelo conjunto de seis operadores (entre a imagem número 16 e a imagem número 172).

3.3.4.4. Obtenção dos parâmetros biomecânicos

Depois de estabelecido o referencial ortogonal, a posição do atleta no campo em cada instante é definida por um par de coordenadas (“x”; “y”) e a este ponto (“p”) é atribuído um vector, segmento orientado com origem em “0; 0” e extremidade em “p”. A cada ponto é associado um vector de tal forma que a sequência de vectores descreve a trajectória do jogador no intervalo de tempo considerado (Misuta, 2004).

Concluída a metodologia de tratamento e reconstrução de coordenadas com minimização do erro por processos de filtragem realizados por rotinas criadas em ambiente “MATLAB”, foi possível a determinação de parâmetros biomecânicos, abrindo-se, a partir daqui, perspectivas para utilização destes conceitos da cinemática na análise quantitativa e qualitativa do jogo. A distância percorrida (d) num determinado intervalo de tempo (t) é o somatório dos deslocamentos realizados pelo atleta em cada intervalo correspondente a duas imagens consecutivas na sequência de vídeo (equação 3.2). A distância total realizada é obtida pelo somatório das distâncias entre coordenadas consecutivas.

As figuras 3.8 a 3.10 resumem e ilustram, esquematicamente, o procedimento atrás descrito, utilizado neste trabalho para validação da metodologia “TACTO-MATLAB”.

3.3.4.5. Análise estatística

3.3.4.5.1. Confirmação da precisão do sistema dGPS-RTK na medição de distâncias e velocidades

Numa folha de cálculo “EXCEL” foi medido o coeficiente de correlação de Pearson (r) entre as distâncias medidas a partir das coordenadas de 24 pontos referenciados no terreno, obtidas pelo receptor dGPS-RTK e as distâncias reais medidas com fita métrica metálica. Foi também medido o erro técnico relativo de medida (“ETM- *Relative Technical Error of Measurement*”, em %) entre as mesmas distâncias, calculado de acordo com a equação 3.3 (Hopkins, 2000). Em termos práticos traduz o coeficiente de variação (CV, em %) da variável uma vez que é o desvio padrão das medições repetidas (numerador na equação), expresso em percentagem do valor da média de referência (denominador na equação).

$$ETM(\%) = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_{ref})^2}{n-1}}}{x_{ref}} \times 100 \quad (3.3)$$

Onde: n é o número de medições realizadas; x_i é o valor da distância medida a partir das coordenadas obtidas pelo receptor dGPS-RTK; x_{ref} é o valor da distância medida com fita métrica metálica; x_{ref} é a média dos valores das distâncias medidas com fita métrica metálica.

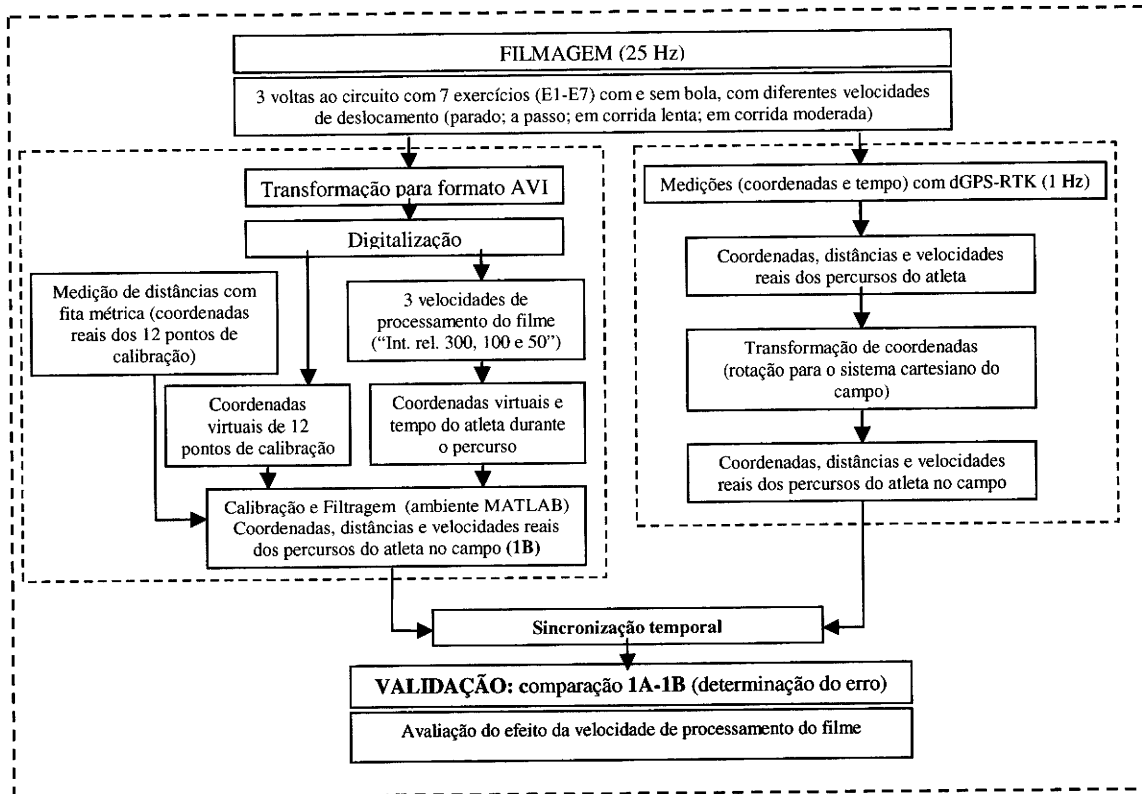


Figura 3.8 - Metodologia utilizada no processo de validação do software “TACTO”.

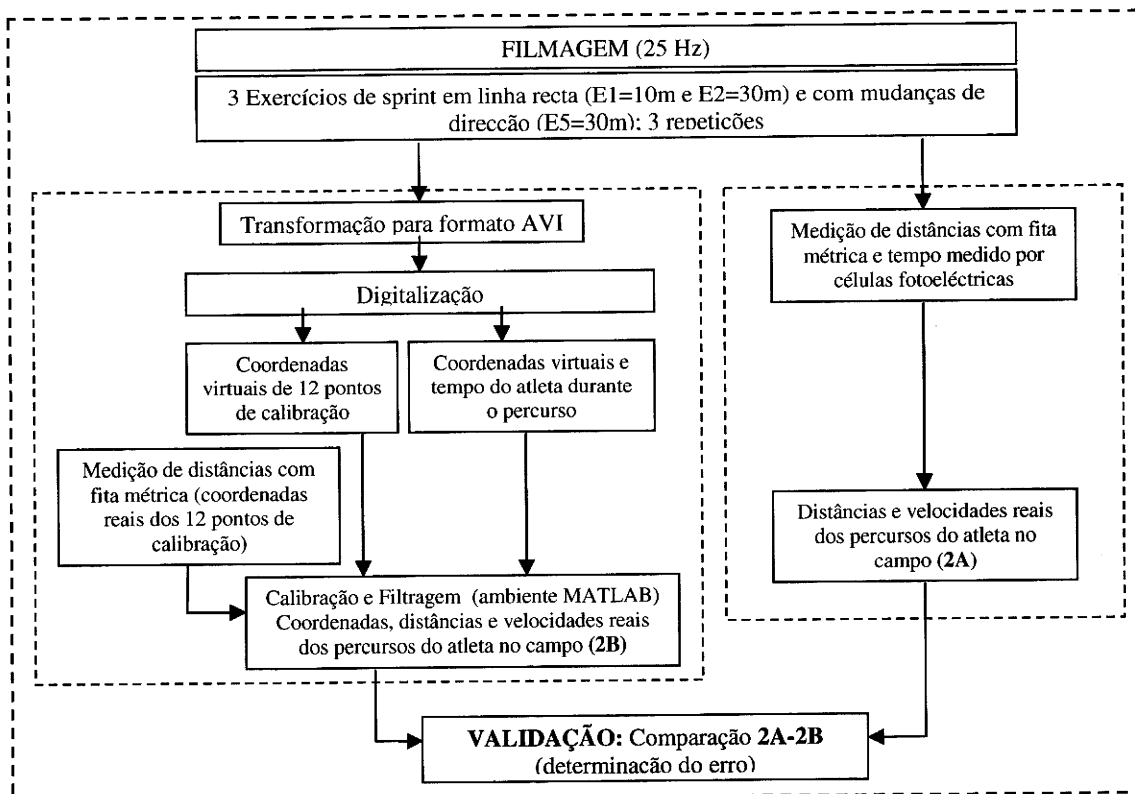


Figura 3.9 - Metodologia complementar utilizada no processo de validação do software “TACTO” para deslocamentos em sprint, com mudança de direcção.

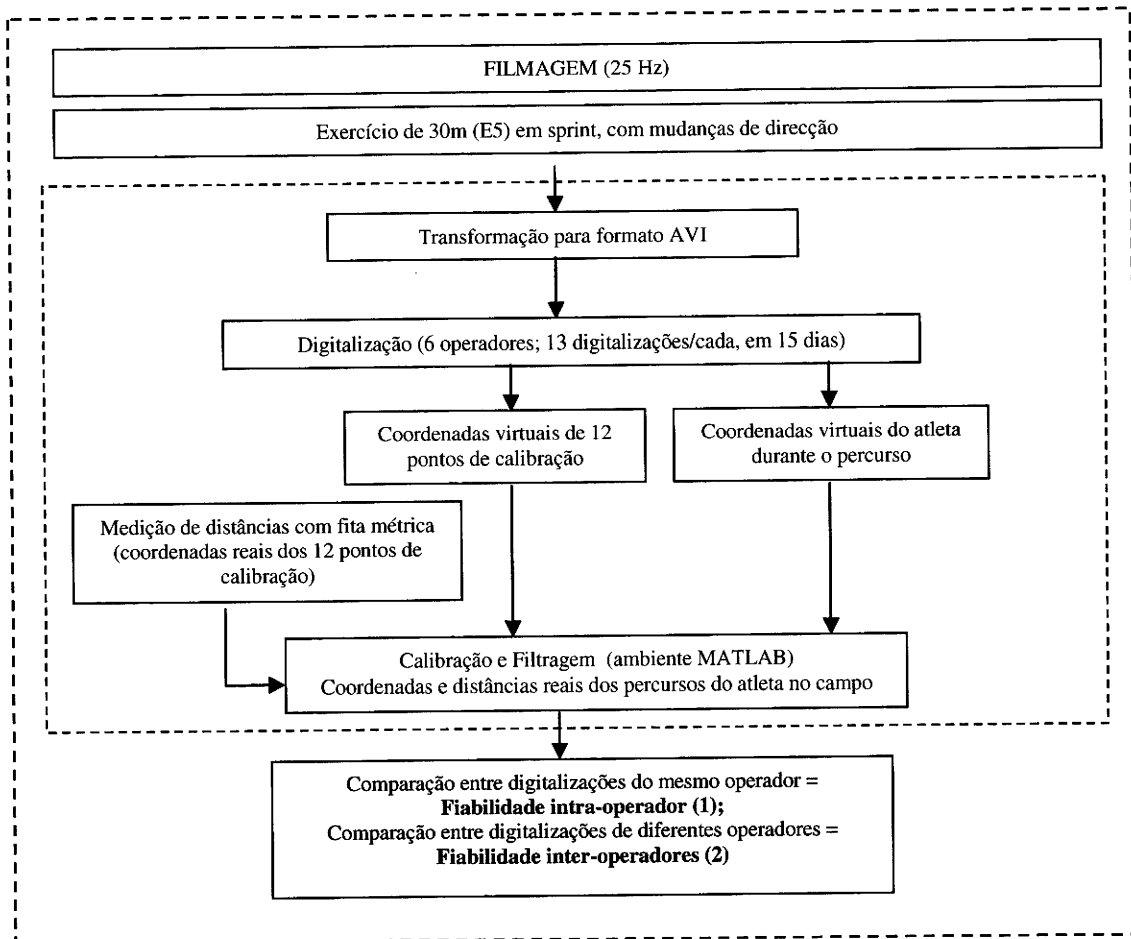


Figura 3.10 - Metodologia utilizada no processo de avaliação da consistência do software “TACTO”.

O mesmo procedimento foi utilizado na comparação entre a velocidade medida pelo receptor dGPS-RTK e a medição efectuada com células fotoeléctricas em dois exercícios: “25 m a andar” e “18,54 m em sprint”.

Foram utilizadas como referência as indicações de McInnes *et al.* (1995), que consideraram as seguintes classes para o ETM (%): bom se menor que 5%; moderado se compreendido entre 5 e 10%; pobre se maior que 10%.

Dado que todo o processo aqui descrito visa, em primeira instância, minimizar o erro na determinação de coordenadas rectangulares, faz todo o sentido confirmar se o mesmo correu de forma aceitável, sendo submetido a validação. A validação da metodologia consistiu em duas etapas: avaliação da validade e avaliação da fiabilidade dos resultados.

3.3.4.5.2. Análise da validade do procedimento de digitalização e tratamento de imagens vídeo

Foi utilizado o *software* “MSTAT-C” para realizar a análise de variância (ANOVA) entre os métodos (dGPS-RTK e digitalização de imagens vídeo) utilizados para obtenção de coordenadas dos percursos realizados pelo atleta. Utilizou-se um grau de significância de 95% ($p < 0,05$). Nas situações em que se verificaram diferenças significativas utilizou-se o teste LSD (“*Fisher’s Least Significant Difference*”) para separação de médias.

No *software* “EXCEL” foi estabelecida a análise de regressão linear para mostrar a relação entre as coordenadas obtidas pelo receptor dGPS-RTK e as coordenadas obtidas por digitalização de imagens vídeo, em cada uma das velocidades de processamento do filme. Foram calculados o coeficiente de correlação de Pearson entre medições e, como indicadores de dispersão entre coordenadas: o ETM (em %), equação 3.3 (pela comparação das coordenadas obtidas por digitalização com as coordenadas de referência obtidas pelo receptor dGPS-RTK), e o erro quadrado médio (“SEM” ou “MSE- Mean Square Error”), de acordo com as equações 3.4 e 3.5 (Serra e Bottura, 2007).

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - x_{ref})^2 \quad (3.4)$$

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - y_{ref})^2 \quad (3.5)$$

Onde: n é o número de medições realizadas; x_i e y_i são os valores das coordenadas obtidas no processo de digitalização de imagens; x_{ref} e y_{ref} são os valores das coordenadas obtidas pelo receptor dGPS-RTK.

Segundo Carling *et al.* (2008), o erro de reconstrução é definido pela média da distância entre as posições reais medidas no campo e as respectivas posições reconstruídas. Foi, por isso, determinado o desvio entre a trajectória prevista pelo receptor dGPS-RTK e a trajectória determinada pelo processo de digitalização de imagens vídeo, segundo cada um dos eixos (E_x e E_y , em m) e ainda o desvio médio resultante (E_r , em m) ou erro de posição, de acordo com as equações 3.6 a 3.8, apresentadas por Gourgoulis *et al.* (2008) e Vuckovic *et al.* (2010).

$$E_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_{ref})^2}{n}} \quad (3.6)$$

$$E_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - y_{ref})^2}{n}} \quad (3.7)$$

$$E_r = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - x_{ref})^2 + (y_i - y_{ref})^2]}{n}} \quad (3.8)$$

Onde: n é o número de medições realizadas; x_i e y_i são os valores das coordenadas obtidas no processo de digitalização de imagens; x_{ref} e y_{ref} são os valores das coordenadas obtidas pelo receptor dGPS-RTK.

A utilização do parâmetro VAF (“*Variance Accounted For*”, em %), equação 3.9 (Serra e Bottura, 2007; Moorhouse e Granata, 2007), traduz o erro normalizado entre os valores das coordenadas de referência (a_{ref} , obtidos pelo receptor dGPS-RTK) e os valores das coordenadas obtidas por digitalização de imagens vídeo e reconstrução de coordenadas pelo procedimento “2D-DLT” (a). Pode também definir-se como a variância sistemática em percentagem da variância total, sendo outro critério de validação utilizado frequentemente nas áreas científicas das ciências do desporto e da medicina e aplicado à análise dos dados deste trabalho. Na prática, quanto mais elevado for este valor, menor é o desvio entre os dois métodos de obtenção de coordenadas.

$$VAF = 100 \left(\frac{1 - \frac{\sum_{i=1}^n (a - a_{ref})^2}{\sum_{i=1}^n (a)^2}}{\sum_{i=1}^n (a)^2} \right) \quad (3.9)$$

Por fim, foi calculado o desvio (em %) entre as distâncias acumuladas percorridas pelo atleta nas três voltas completas realizadas ao circuito, medidas pelo receptor dGPS-RTK e as distâncias acumuladas medidas pelo processo de digitalização de imagens, com diferentes velocidades de processamento do filme.

Para completar a validação do procedimento de digitalização e tratamento de imagens vídeo em situações de velocidades de deslocamento elevadas (sprint) ou com deslocamentos que incluem mudanças de direcção bruscas, foi determinado o ETM (%) relativamente às distâncias e às

velocidades, tendo como referência as distâncias medidas com fita métrica e o tempo medido por células fotoelétricas.

3.3.4.5.3. Análise da consistência do procedimento de digitalização e tratamento de imagens vídeo

A outra etapa do processo de validação consiste na avaliação da consistência ou da fiabilidade dos dados obtidos. Na prática traduz-se na comparação de resultados entre medições da mesma realidade repetidas por operadores diferentes (consistência inter-operadores) ou na comparação de resultados da mesma realidade obtidos pelo mesmo operador em determinações repetidas no tempo (conhecido como “*test-retest*”, ou avaliação da consistência intra-operador) (Hopkins, 2000). Pretende-se, com esta componente da avaliação do erro e no caso em estudo neste trabalho, perceber se a ferramenta disponibilizada aos agentes desportivos para avaliação de parâmetros de desempenho dos atletas a partir da digitalização e tratamento de imagens gravadas em vídeo é fiável em qualquer circunstância, independentemente do operador e da experiência de digitalização.

Foi utilizado o *software* “MSTAT-C” para realizar a análise de variância (ANOVA) factorial das coordenadas (“x” e “y”) obtidas no conjunto de todas as digitalizações (13) realizadas por todos os operadores (6) relativamente à amostra constituída pela sequência de imagens correspondente à realização da estação 5 (E5). Uma vez que o *software* utilizado não permitia a análise de todos os dados em simultâneo (6 operadores x 13 digitalizações x 156 repetições), a análise de variância foi realizada em duas fases, considerando em cada uma delas metade do percurso da E5, ou seja, metade das repetições (respectivamente, [1-79] e [79-156]). Utilizou-se um grau de significância de 95% ($p < 0,05$). Nas situações em que se verificaram diferenças significativas, utilizou-se o teste de separação múltipla de médias de “DUNCAN”. Os valores do quadrado médio entre operadores (“SMS- *Subjects Mean Square*”), do quadrado médio entre digitalizações (“RMS- *Raters Mean Square*”) e do quadrado médio do erro (“EMS- *Error Mean Square*”) registados nos quadros resumo da ANOVA foram utilizados para calcular os coeficientes de correlação intra-classe (“ICC – *Intraclass correlation coefficients*”) de acordo com a equação 3.10 (Collins e De Luca, 1993; Chiari *et al.*, 2000). Este parâmetro é de utilização muito habitual na determinação do grau de concordância entre medidas repetidas e indicador preferencial da consistência (Hopkins, 2000; Roberts *et al.*, 2006). Foram consideradas como referências para a consistência intra-operador e inter-operadores as indicações de Collins e De Luca (1993) e Chiari *et al.* (2000) que estabeleceram as seguintes

classes em função dos valores de ICC: ICC <0,40 – fraca consistência; 0,40 ≤ ICC <0,75 – razoável a boa consistência; ICC ≥ 0,75 – excelente consistência.

$$ICC = \frac{n \cdot (SMS - EMS)}{n \cdot SMS + k \cdot RMS + (n \cdot k - n - k) \cdot EMS} \quad (3.10)$$

Onde: n é o número de sujeitos (operadores) e k é o número de medições repetidas por sujeito (digitalizações).

Foi também efectuada a ANOVA entre digitalizações do mesmo operador (consistência intra-operador). Nas situações em que se verificaram diferenças significativas utilizou-se o teste LSD (“Fisher’s Least Significant Difference”) para separação de médias.

De acordo com Atkinson e Nevill (1998), o coeficiente de correlação de Pearson é a técnica estatística mais comum utilizada em estudos de análise da consistência relativa. Em ambiente “MATLAB” calculou-se a matriz com todos os coeficientes de correlação de Pearson entre coordenadas (“x” e “y”) obtidas no conjunto de todas as digitalizações (13) realizadas por todos os operadores (6). Neste ambiente calculou-se também, para cada operador e para cada coordenada (“x” e “y”) a matriz com os coeficientes de correlação de Pearson inter-digitalizações (consistência intra-operador). Foram consideradas como orientação para avaliação da consistência intra-operador e inter-operadores as indicações de Hopkins (2000) de que são aceitáveis correlações com um coeficientes acima de 0,75, embora referindo que será desejável que estes valores sejam superiores a 0,90, valor também referido por Collins e De Luca (1993), por McInnes *et al.* (1995), por Atkinson e Nevill (1998) e por Chiari *et al.* (2000).

Concluiu-se em “EXCEL” a análise estatística dos resultados da consistência intra-operador tendo como referência as coordenadas obtidas na primeira digitalização de cada operador e procedendo à determinação do ETM (em %), pela comparação das coordenadas de referência com as coordenadas obtidas nas sucessivas digitalizações. De acordo com Hopkins (2000), o ETM é o melhor indicador de consistência intra-operador, já que, ao contrário, por exemplo dos limites de aceitabilidade, não depende da dimensão da amostra. Segundo o mesmo autor, dada a relação entre ambos os indicadores referidos, a apresentação de ambos seria inapropriada.

A figura 3.11 resume em termos genéricos, os procedimentos que foram implementados neste trabalho para obtenção de parâmetros biomecânicos cinemáticos a partir da reconstrução de coordenadas por transformação directa linear a 2D dos jogadores de Futebol durante um jogo.

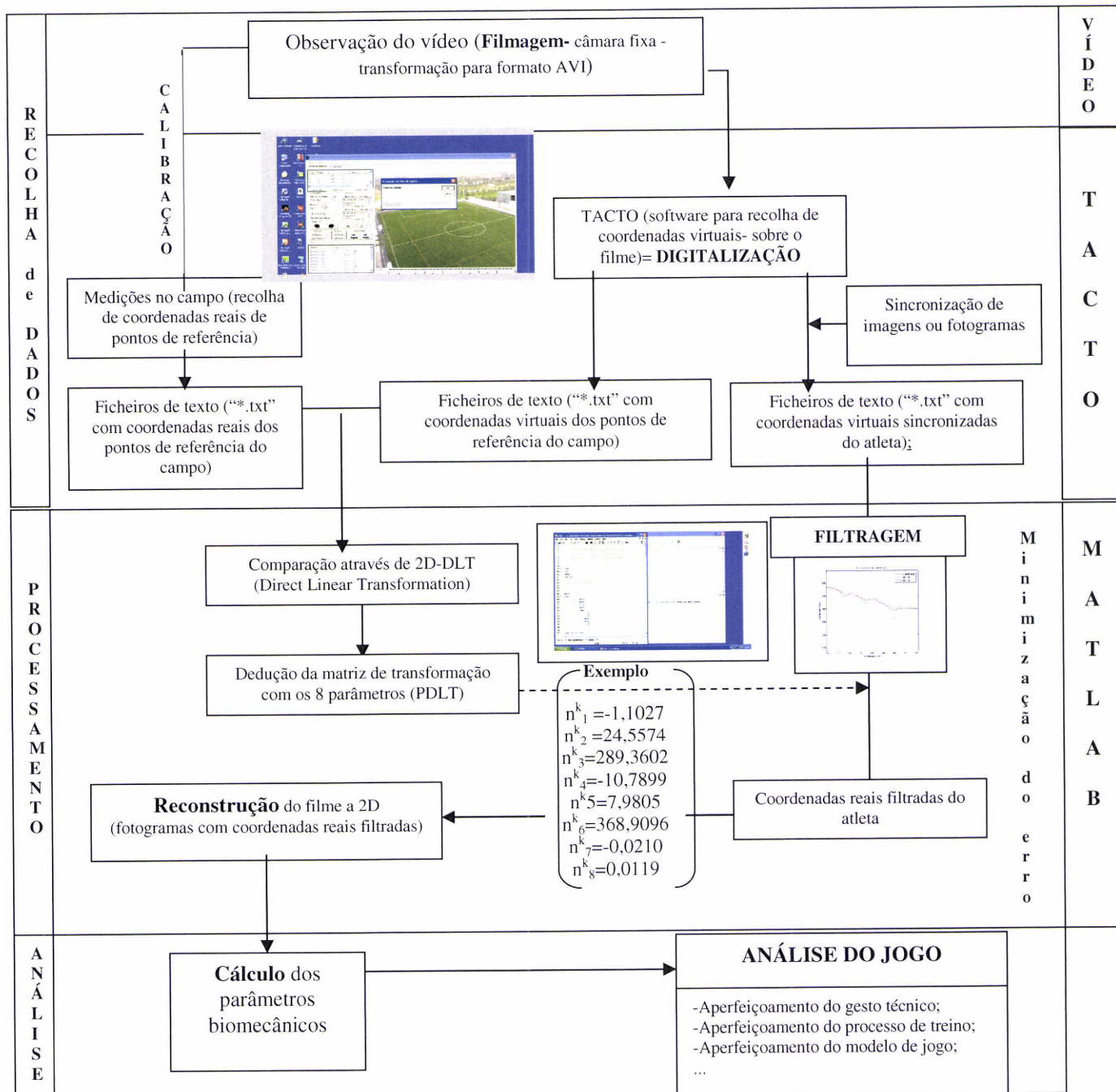


Figura 3.11 - Diagrama resumo, ilustrativo das diferentes etapas do procedimento utilizado neste trabalho para reconstrução de coordenadas por transformação directa linear a 2D.

4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1. Confirmação da validade do sistema dGPS-RTK na medição de coordenadas, distâncias e velocidades

As coordenadas cartográficas de vinte e quatro pontos referenciados no campo do “Redondense Futebol Clube” (anexo 2, quadro A2.1), obtidas na primeira sessão de recolha de dados pelo receptor dGPS-RTK tendo como referência o “Datum Militar” permitiram a obtenção das distâncias parciais e da distância total do percurso realizado pelo atleta e a comparação com as medições realizadas com fita métrica metálica (quadro 4.1). Estes resultados revelaram uma correlação significativa a 95%, com um coeficiente de correlação de Pearson de 0,999. O desvio médio entre medições foi de $0,06 \pm 0,21$ m (intervalo entre - 0,54 m e 0,56 m), com um erro técnico relativo de medida (ETM) de 1,24% e com um desvio de apenas 0,3% relativamente às distâncias acumuladas. O valor é claramente inferior aos 4,8% de ETM apresentados por Carling *et al.* (2008) para a distância total acumulada medida por um receptor GPS sem correcção diferencial.

O quadro 4.2 permite a comparação dos resultados relativos às velocidades médias registadas em dois percursos (“25 m a andar” e “18,54 m em sprint”), obtidas por células fotoeléctricas e através do receptor dGPS-RTK. Os resultados revelaram correlações significativas a 95%, com coeficientes de correlação de Pearson de 0,836 e 0,929, respectivamente, no exercício de “25 m a andar” e no exercício de “18,54 m em sprint”. Para a mesma sequência de exercícios, o desvio médio entre medições foi de $0,00 \pm 0,03$ m e de $0,00 \pm 0,06$ m, enquanto o ETM foi de 2,44% e 1,05%, respectivamente.

Estes resultados demonstram a validade do sistema dGPS-RTK na medição de coordenadas, distâncias e velocidades, confirmando as citações efectuadas por diversos autores à sua precisão (Terrier e Schutz, 2005; Morales e Tsubouchi, 2007; MacLeod *et al.*, 2009), podendo utilizar-se como referência na validação do sistema de digitalização e reconstrução de coordenadas por transformação directa linear “2D-DLT”.

Quadro 4.1 - Comparação das distâncias medidas com fita métrica e as obtidas a partir das coordenadas recolhidas pelo receptor dGPS-RTK.

Percurso	Distâncias parciais (m)		Diferença (m)	Desvio (%)
	Fita métrica	dGPS		
1-2	22,84	23,04	0,20	0,9
2-3	22,10	22,22	0,12	0,5
3-4	22,04	22,28	0,24	1,1
4-5	22,81	23,09	0,28	1,2
5-6	10,00	10,11	0,11	1,1
6-7	25,00	24,95	-0,05	-0,2
7-8	18,54	18,58	0,04	0,2
8-9	10,00	10,20	0,20	2,0
9-10	36,12	36,68	0,56	1,6
10-11	28,37	28,55	0,18	0,6
11-12	7,30	7,44	0,14	2,0
12-13	28,24	28,26	0,02	0,1
13-14	11,00	10,96	-0,04	-0,4
14-15	5,00	4,93	-0,07	-1,4
15-16	5,00	4,91	-0,09	-1,8
14-17	23,63	23,34	-0,29	-1,2
17-18	7,00	6,89	-0,11	-1,6
18-19	3,00	2,96	-0,04	-1,5
17-20	10,00	10,19	0,19	1,9
20-21	27,90	27,36	-0,54	-1,9
21-22	2,00	2,01	0,01	0,7
22-23	4,00	4,03	0,03	0,7
23-24	46,22	46,26	0,04	0,1
24-1	16,50	16,79	0,29	1,8
Percurso Completo*	434,61	435,73	1,12	0,3

* Inclui a dupla realização dos percursos: “14-15”, “15-16”, “17-18” e “18-19”

Quadro 4.2 - Comparação das velocidades médias registadas em dois percursos (“25 m a andar” e “18,54 m em sprint”), obtidas por células fotoelétricas e através do receptor dGPS-RTK.

Percurso (repetição)	Velocidade (m s ⁻¹)		Desvio (%)
	Células fotoelétricas	dGPS	
“25 m a andar”			
1	1,29	1,33	3,1
2	1,43	1,44	0,7
3	1,40	1,36	-2,9
4	1,39	1,38	-0,7
Média±DP	1,38 ± 0,06	1,38 ± 0,05	0,06 ± 2,50
“18,54 m em sprint”			
1	5,37	5,44	1,3
2	5,58	5,60	0,4
3	5,69	5,64	-0,9
4	5,55	5,50	-0,9
Média±DP	5,55 ± 0,13	5,55 ± 0,09	-0,03 ± 1,07

DP- Desvio padrão.

4.2. Análise da validade do procedimento de digitalização e tratamento de imagens vídeo

4.2.1. Transformação de coordenadas dGPS-RTK em coordenadas relativas ao referencial do campo do “Redondense Futebol Clube”

A figura 4.1 ilustra, tomando como exemplo a primeira das três voltas completas realizadas pelo atleta ao circuito, as posições obtidas pelo receptor dGPS-RTK, respectivamente, antes (à esquerda) e depois (à direita) da aplicação da matriz de rotação que permitiu enquadrar as coordenadas obtidas no campo do “Redondense Futebol Clube”.

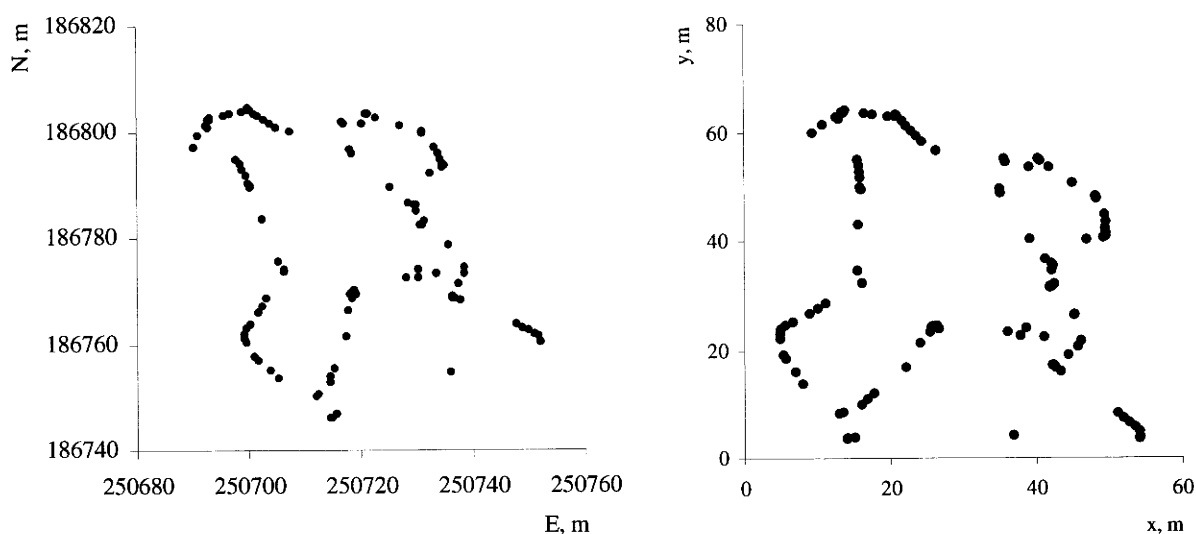


Figura 4.1 - Coordenadas das posições do atleta obtidas pelo receptor dGPS-RTK durante a realização da primeira volta ao circuito: antes (à esquerda) e depois (à direita) da transformação de coordenadas.

4.2.2. Comparação entre tratamentos nas situações de sprint, com ou sem mudanças bruscas de direcção

Como referido no capítulo “Materiais e Métodos”, o receptor dGPS-RTK procede à recolha de coordenadas com uma frequência máxima de 1Hz. Todavia, quando as vibrações transmitidas ao receptor pelas oscilações do portador (atleta) são importantes, não permitindo a estabilização da medição das coordenadas e da cota ou quando o número de satélites rastreados é baixo (inferior a quatro), verificam-se falhas de registo. Este facto, associado com a importante massa do receptor (“*rover*”) que o atleta tem que transportar, inviabiliza a utilização deste sistema na validação do sistema de digitalização em deslocamentos com elevada intensidade ou com mudanças bruscas de direcção. Por esta razão, foram realizados ensaios em três exercícios de

sprint (10 m, 30 m e 30 m, com mudanças de direcção) realizados pelo atleta sem receptor dGPS-RTK, em que se utilizaram como referência as distâncias efectivas medidas com fita métrica metálica e o tempo registado por células fotoeléctricas, as quais foram comparadas com as distâncias e as velocidades obtidas pelo sistema de digitalização de imagens vídeo (quadro 4.3).

Quadro 4.3 - Comparação entre distâncias e velocidades obtidas por digitalização de imagens vídeo e distâncias medidas com fita métrica e tempo medido por células fotoeléctricas, em três exercícios de sprint.

Exercício (repetição)	Distância obtida por digitalização (m)	Velocidade obtida por digitalização ($m s^{-1}$)	Velocidade referência ($m s^{-1}$)
"10 m em sprint lançado"			
1	10,02	7,15	7,14
	9,62	6,87	
	9,86	7,04	
2	9,40	6,71	6,99
	10,12	7,23	
	9,88	7,06	
3	9,99	6,94	6,94
	10,11	7,02	
	10,40	7,23	
Média±DP	9,93 ± 0,29	7,03 ± 0,17	7,02 ± 0,09
"30 m em sprint lançado"			
1	30,03	7,51	7,11
	30,43	7,61	
	29,18	7,30	
2	28,88	7,01	6,93
	30,03	7,29	
	29,57	7,18	
3	30,21	7,19	6,90
	30,01	7,15	
	30,98	7,38	
Média±DP	29,92 ± 0,64	7,29 ± 0,19	6,98 ± 0,10
"30 m em sprint, com mudança de direcção"			
1	30,05	4,57	4,47
	30,29	4,61	
	31,55	4,88	
2	32,00	4,81	4,38
	31,42	4,72	
	32,93	4,96	
3	31,33	4,79	4,46
	32,20	4,82	
	31,43	4,87	
Média±DP	31,47 ± 0,89	4,78 ± 0,13	4,44 ± 0,04

Dp-Desvio padrão.

A figura 4.2 ilustra o comportamento do ETM (%) no que se refere às distâncias e às velocidades medidas pelo sistema de digitalização de imagens vídeo em nove repetições (três percursos realizados pelo atleta e três digitalizações por cada percurso), tendo como referência as distâncias medidas com fita métrica e o tempo medido por células fotoelétricas. Apesar deste parâmetro apresentar valores aceitáveis em qualquer das situações (máximo 3,32%), da ordem de grandeza dos valores obtidos por Roberts *et al.* (2006) no processo de digitalização de imagens de vídeo para determinação da distância e da velocidade, verifica-se uma tendência para uma menor precisão das determinações em deslocamentos curtos (“10 m sprint”) e, especialmente, em deslocamentos com mudanças bruscas de direcção (“30 m sprint m/d), o que se justifica, no primeiro caso porque, sendo as distâncias mais curtas, qualquer desvio assume uma maior dimensão relativa (ou percentual) e, no segundo caso, porque, por um lado, na prática o atleta por ter que contornar os pinos marcadores no solo realizará sempre maior distância do que aquela que corresponde às distâncias parciais medidas no solo (facto que os resultados do quadro 4.3 comprovam de forma sistemática para esta estação), por outro, as mudanças de direcção bruscas exigem um maior cuidado e concentração da parte do operador.

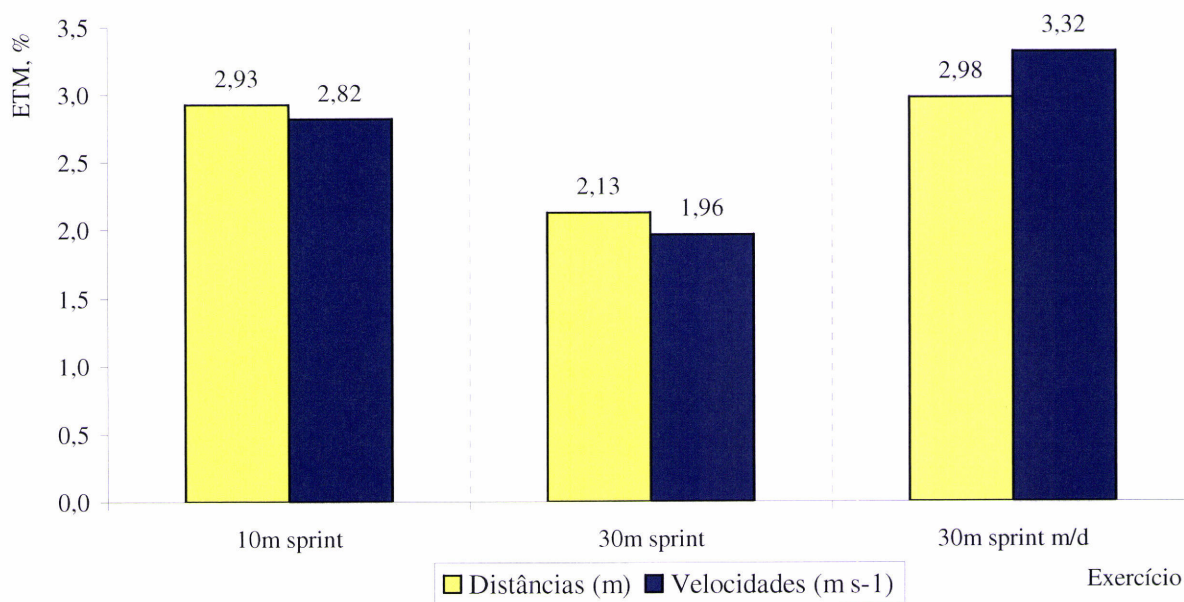


Figura 4.2 - ETM na comparação das distâncias e das velocidades medidas pelo sistema de digitalização de imagens vídeo com a medição de distâncias com fita métrica e de tempo com células fotoelétricas, em três exercícios de sprint (10 m, 30 m e 30 m com mudanças bruscas de direcção, “30 m sprint m/d”).

4.2.3. Comparação entre tratamentos na realização do circuito representativo dos deslocamentos de um jogador de Futebol

Para os restantes ritmos de deslocamento realizados pelo atleta com o receptor dGPS-RTK (incluídos no circuito representativo dos deslocamentos de um jogador de Futebol), solicitou-se que o atleta se imobilizasse durante 4 a 5 segundos na primeira volta (e 2 a 3 segundos nas restantes duas voltas) no início e no final de cada estação (exercício), procurando assim estabilizar o receptor dGPS-RTK, permitindo a recolha das coordenadas respectivas. Nas três voltas realizadas ao circuito durante a segunda sessão de recolha de dados, a taxa de cobertura (recepção) de sinal dGPS-RTK com recolha de coordenadas foi de 43,0% (133 registos em 309 segundos da primeira volta), 31,6% (83 registos em 263 segundos da segunda volta) e 47,1% (129 registos em 274 segundos da terceira volta), respectivamente, num total de 345 registos (considerados repetições em termos de análise estatística).

A figura 4.3 ilustra as coordenadas do percurso realizado pelo atleta durante a primeira volta ao circuito, obtidas pelo receptor dGPS-RTK e transformadas para o campo de Futebol e as coordenadas reais obtidas por digitalização de imagens de vídeo numa determinada regulação da velocidade de processamento do filme (“dig300”) e após aplicação da técnica “2D-DLT”.

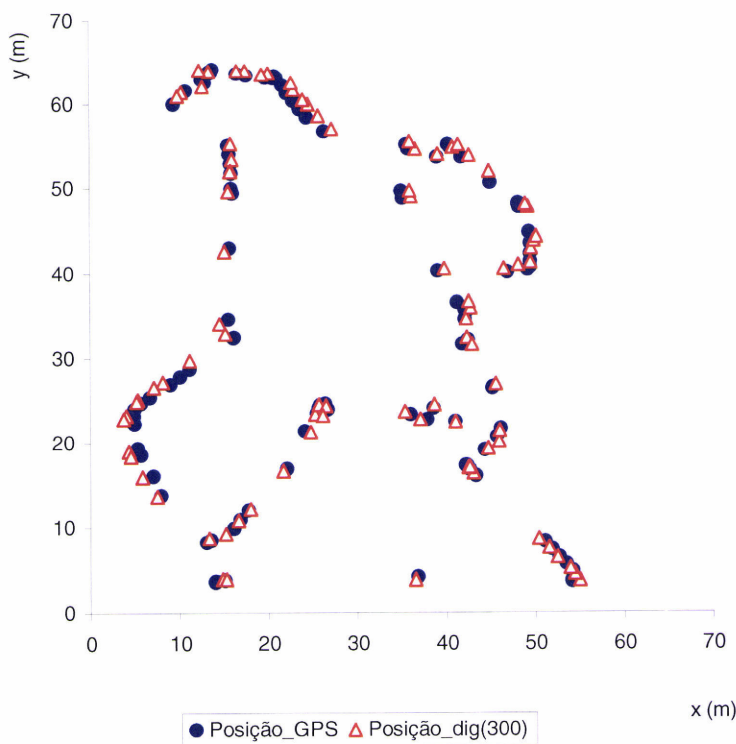


Figura 4.3 - Coordenadas reais recolhidas pelo receptor dGPS-RTK e por digitalização de imagens, durante a primeira volta ao circuito realizada pelo atleta.

Os quadros do anexo 3 (quadros A3.1 e A3.2) apresentam o resumo da análise de variância realizada no *software* “MSTAT-C”, com um grau de significância de 95% entre os métodos (tratamentos: dGPS-RTK e digitalização de imagens vídeo com três velocidades de processamento do filme) utilizados para obtenção de coordenadas dos percursos realizados pelo atleta, respectivamente, para as coordenadas “x” e “y”. Estes resultados mostram que, para a coordenada “x”, não existem diferenças significativas entre métodos (tratamentos), enquanto para a coordenada “y” se verifica a existência de diferenças significativas entre métodos ($p = 0,000$), embora tal não aconteça entre diferentes velocidades de processamento do filme, como demonstram os dados do quadro 4.4 obtidos na separação de médias pelo método LSD. É também evidente neste quadro de médias que as diferenças no caso da coordenada “x” acontecem ao nível dos centímetros, enquanto na coordenada “y” essas diferenças acontecem ao nível dos décimos, valores de ordem de grandeza aceitável para os propósitos de monitorização do padrão de movimentos de um jogador de Futebol. O coeficiente de variação (CV) é, em ambas as coordenadas, inferior a 2%. Segundo Atkinson e Nevill (1998), são considerados, como critério estatístico, valores aceitáveis do CV <10%.

Quadro 4.4 -Resumo das médias das coordenadas (“x” e “y”, em m) obtidas no método LSD de separação de médias e respectivo coeficiente de variação (CV).

Coordenada (m)	Método de obtenção			
	dGPS	Dig300	Dig100	Dig50
x (CV= 1,59%)	28,57	28,53	28,52	28,57
y*(CV= 1,07%)	32,47b	32,57a	32,61a	32,62a

*Diferenças Significativas ($p < 0,05$)

A análise de regressão linear entre os métodos de obtenção de coordenadas encontra-se representada nas figuras 4.4 e 4.5, respectivamente, para a coordenada “x” e para a coordenada “y”. São apresentadas as respectivas equações de regressão entre as coordenadas obtidas pelo receptor dGPS-RTK e as coordenadas obtidas por digitalização de imagens vídeo, em cada uma das velocidades de processamento do filme utilizadas. Os valores dos coeficientes de determinação (R^2), muito próximos de “1”, mostram que o modelo linear se ajusta adequadamente aos dados experimentais obtidos.

O quadro 4.5 complementa a informação apresentada nas figuras 4.4 e 4.5 e resume o resultado da análise de regressão estatística processada em “EXCEL”, para “x” e para “y”, entre as coordenadas obtidas pelo receptor dGPS-RTK e as coordenadas obtidas pelos três métodos de digitalização utilizados.

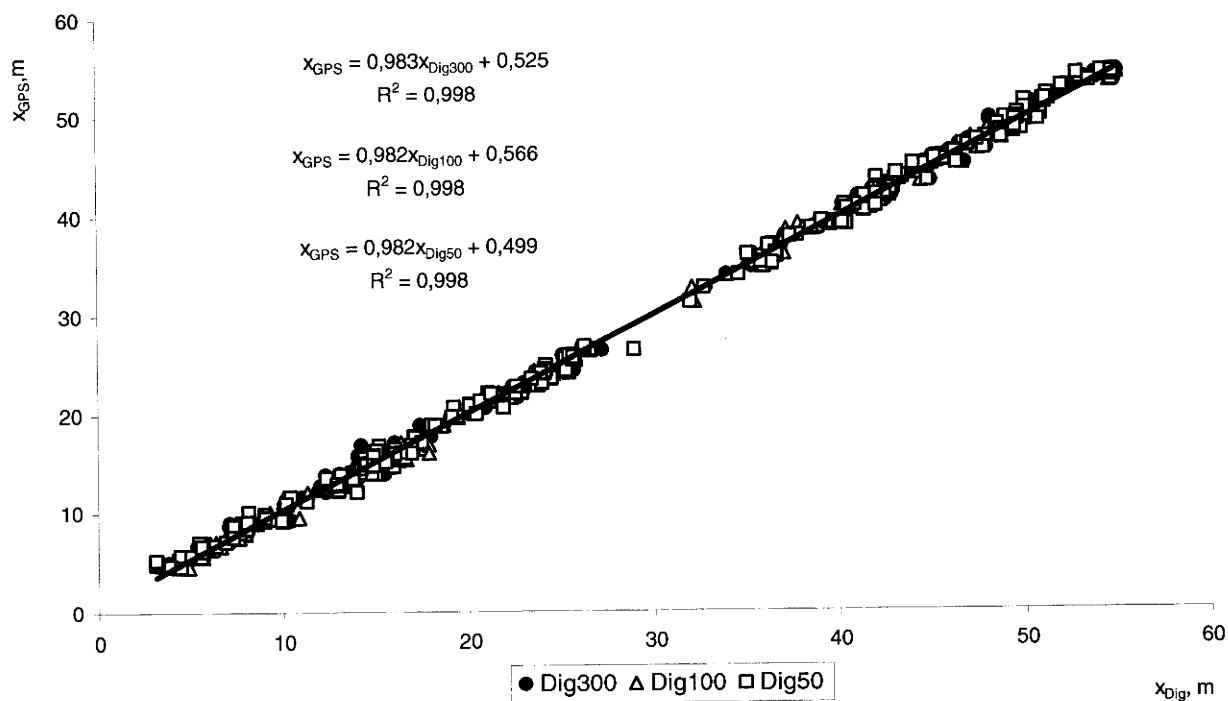


Figura 4.4 - Equações de regressão entre as coordenadas “x”, obtidas pelo receptor dGPS-RTK e as coordenadas “x” obtidas por digitalização, com diferentes velocidades de processamento do filme.

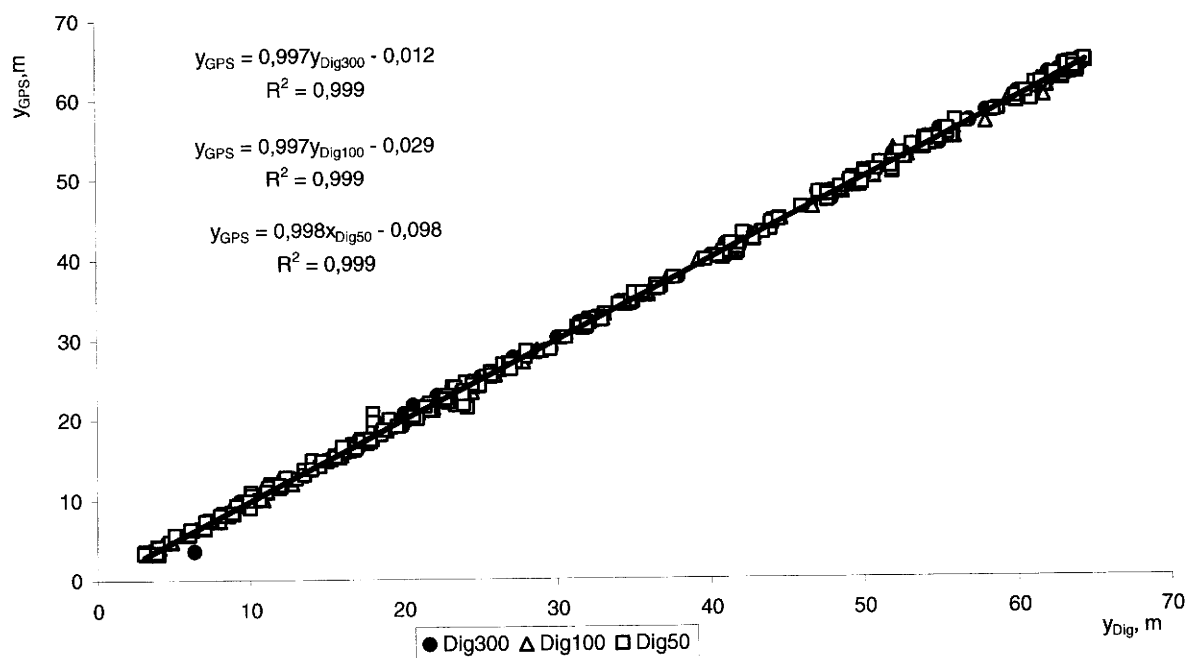


Figura 4.5 - Equações de regressão entre as coordenadas “y”, obtidas pelo receptor dGPS-RTK e as coordenadas “y” obtidas por digitalização, com diferentes velocidades de processamento do filme.

Quadro 4.5- Resumo da análise de regressão entre as coordenadas obtidas pelo receptor dGPS e as coordenadas obtidas pelo processo de digitalização com três velocidades de processamento do filme.

Coordenada	Método	α	β	R^2	F _[1,343]	p
x	Dig ₃₀₀	0,525±0,070	0,983±0,002	0,998	211376,5	0,000
	Dig ₁₀₀	0,566±0,067	0,983±0,002	0,998	228036,8	0,000
	Dig ₅₀	0,499±0,071	0,982±0,002	0,998	202391,2	0,000
y	Dig ₃₀₀	-0,012±0,049	0,997±0,001	0,999	594406,2	0,000
	Dig ₁₀₀	-0,029±0,049	0,997±0,001	0,999	609447,4	0,000
	Dig ₅₀	-0,098±0,051	0,998±0,001	0,999	550025,2	0,000

O coeficiente angular ou inclinação da recta (β) próximo de “1” e o coeficiente linear (α) ou valor da ordenada na origem próximo de “0” validam o sistema de digitalização na obtenção das coordenadas (“x” e “y”) na reprodução das posições efectivamente percorridas pelo atleta e obtidas através do receptor dGPS-RTK.

O quadro 4.6 resume os valores de um conjunto de indicadores de dispersão calculados entre as coordenadas obtidas por digitalização de imagens a três velocidades e as coordenadas obtidas pelo receptor dGPS-RTK, em cada uma das voltas realizadas pelo atleta e para cada uma das coordenadas (“x” e “y”).

Quadro 4.6 - Indicadores de dispersão entre as coordenadas obtidas por digitalização de imagens a três velocidades e as coordenadas obtidas pelo receptor dGPS-RTK.

Parâmetro estatístico	Volta 1			Volta 2			Volta 3		
	Dig ₃₀₀	Dig ₁₀₀	Dig ₅₀	Dig ₃₀₀	Dig ₁₀₀	Dig ₅₀	Dig ₃₀₀	Dig ₁₀₀	Dig ₅₀
r_x	99,91	99,93	99,93	99,93	99,92	99,91	99,93	99,92	99,91
r_y	99,98	99,97	99,97	99,95	99,97	99,98	99,97	99,97	99,96
VAF _x (%)	99,95	99,96	99,95	99,96	99,96	99,96	99,95	99,94	99,94
VAF _y (%)	99,99	99,98	99,98	99,96	99,98	99,98	99,98	99,98	99,97
ETM _x (%)	2,53	2,28	2,40	2,01	2,03	2,14	2,46	2,71	2,73
ETM _y (%)	1,09	1,42	1,42	2,08	1,54	1,44	1,41	1,43	1,61
MSE _x (m)	0,55	0,44	0,49	0,41	0,40	0,48	0,45	0,51	0,51
MSE _y (m)	0,15	0,25	0,24	0,39	0,23	0,18	0,23	0,24	0,34
E _x (m)	0,74	0,66	0,70	0,64	0,63	0,70	0,67	0,71	0,71
E _y (m)	0,38	0,50	0,49	0,62	0,47	0,43	0,48	0,49	0,55
E _r (m)	0,83	0,83	0,85	0,89	0,79	0,82	0,82	0,87	0,92

r-coeficiente de correlação de Pearson ($\times 100$); VAF- “Variance Accounted For”; ETM- Erro técnico relativo de medida (m); MSE- Erro quadrado médio (m); E- desvio médio entre trajectórias, segundo o eixo das abcissas ou segundo o eixo das ordenadas (m); E_r- desvio médio resultante entre trajectórias (m);

Os valores do E_r , desvio ou erro de posição, parâmetro equivalente à raiz do quadrado médio do erro (“REMS- root-mean squared error”) são ligeiramente superiores ao valor máximo de 0,50m registado por Vuckovic *et al.* (2010) na digitalização dos padrões de deslocamento típicos do *Squash*, o que se justifica neste caso pelo posicionamento da câmara de filmar a uma distância muito menor dos atletas. Os valores do coeficiente de correlação (próximos de “1”) mostram que as distâncias obtidas por digitalização das imagens vídeo estão altamente correlacionadas com as distâncias reais, medidas pelo dGPS-RTK, sugerindo a validade da técnica descrita para obtenção e reconstrução de coordenadas.

A figura 4.6 resume os desvios (%) nas distâncias acumuladas medidas pelo processo de digitalização com três diferentes velocidades de processamento do filme (“Dig300”, “Dig100” e “Dig50”), relativamente às distâncias acumuladas percorridas pelo atleta nas três voltas completas realizadas ao circuito (V1, V2 e V3) e medidas pelo receptor dGPS-RTK.

Admitindo valores de referência de distâncias acumuladas percorridas por jogadores de Futebol profissionais durante um jogo da ordem de grandeza dos 10 000 m (Carling *et al.*, 2008), um erro de 1-2% corresponde a 100 a 200 m de diferença, o que é perfeitamente aceitável para efeitos de análise das prestações dos atletas, normalmente avaliada pela capacidade de trabalho realizada durante um jogo (Carling *et al.*, 2008).

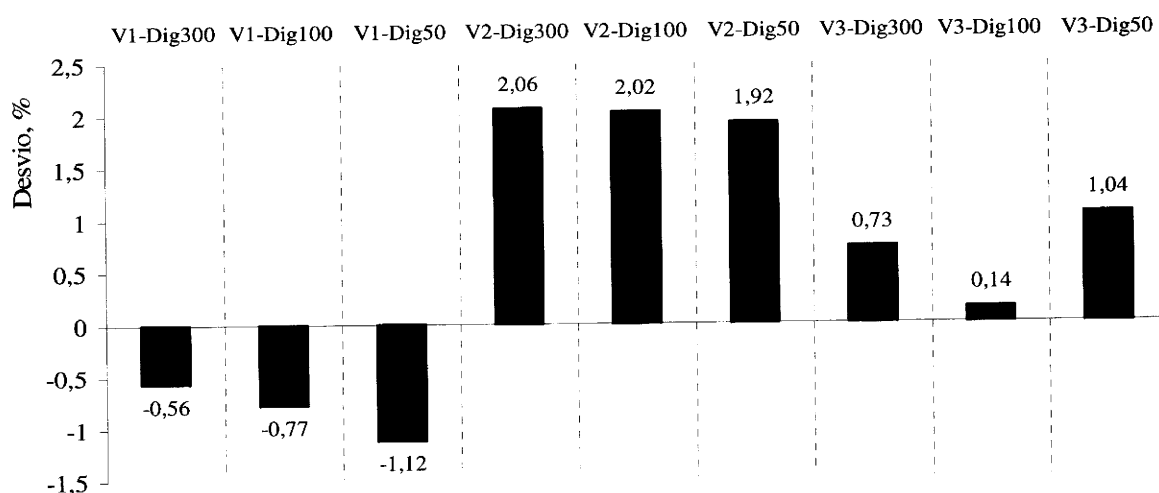


Figura 4.6- Desvio (em %) nas distâncias acumuladas medidas pelo processo de digitalização, relativamente às distâncias acumuladas medidas pelo receptor dGPS-RTK.

A título exemplificativo, a figura 4.7 ilustra o comportamento das coordenadas “x” e “y”, medidas pelo receptor dGPS-RTK e calculadas a partir da digitalização de imagens vídeo (no caso para a velocidade de processamento do filme “dig300”) e da reconstrução de coordenadas

por transformação directa linear, durante as três voltas completas realizadas pelo atleta ao circuito de estações, representativo do padrão de deslocamentos de um jogador de Futebol.

A figura 4.8 ilustra o valor dos desvios (distância em m) entre trajectórias resultantes dos dois métodos de obtenção coordenadas, dGPS-RTK e digitalização (neste caso tomando como exemplo uma velocidade de processamento de imagens correspondente ao “intervalo de relógio” = 300), no conjunto dos 345 pares de valores.

Tendo presente que o número de pontos recolhidos em cada uma das três voltas foi, respectivamente, 133, 83 e 129, a figura anterior revela que não se verifica nenhuma tendência para os maiores desvios aparecerem em determinada zona do campo (no conjunto das três voltas que o atleta realizou ao circuito), ao contrário do que seria expectável, especialmente em termos de influência da distância a que a câmara de filmar se encontra ou do tipo e ritmo de deslocamento. Os valores máximos dos desvios (da ordem dos 2,7 m) são pontuais e surgem apenas em duas ocasiões: no terço inicial da segunda volta (pontos 155-157) e no terço final da terceira volta (ponto 306). A amplitude média dos desvios, no conjunto de todas as medições efectuadas foi de $0,70 \pm 0,29$ m. Parte deste pequeno desvio pode justificar-se pelo facto do receptor dGPS-RTK ser instalado numa mochila transportada às costas pelo atleta que, em corrida, não mantém, necessariamente, uma postura perfeitamente erecta, o que desloca o centro de massa do receptor e a posição do mesmo, relativamente aos pés do atleta, referência utilizada na digitalização das imagens vídeo. Por outro lado, existe um erro (erro de paralaxe) que resulta do facto do atleta durante o seu deslocamento no campo, perante uma câmara fixa, não se encontrar sempre na perpendicular da câmara de filmar. Também se pode atribuir parte do desvio entre sistemas de medição aos pequenos deslocamentos laterais do cursor do rato do computador que ocorrem durante o processo de digitalização das imagens vídeo e que, segundo Edegomb e Norton (2006) são particularmente notórios em percursos realizados a baixas velocidades, que são a grande maioria dos percursos que constituem o circuito e que representam o padrão de deslocamentos realizados por um jogador de Futebol durante um jogo.

A apreciação do conjunto de indicadores estatísticos utilizados nesta análise, em face do grau de aproximação com as coordenadas medidas pelo receptor dGPS-RTK num circuito representativo dos padrões e ritmos de deslocamento de jogadores de Futebol (desporto intermitente), permite concluir sobre a validade do sistema de digitalização de imagens vídeo utilizado neste trabalho com o propósito de avaliar a capacidade de trabalho dos jogadores durante a competição. Conclusão semelhante à apresentada, por exemplo, por Roberts *et al.*

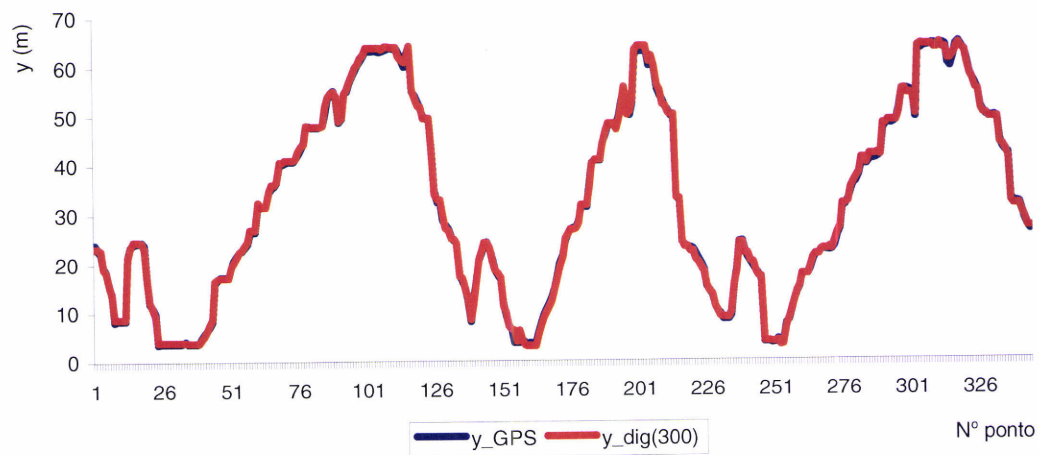
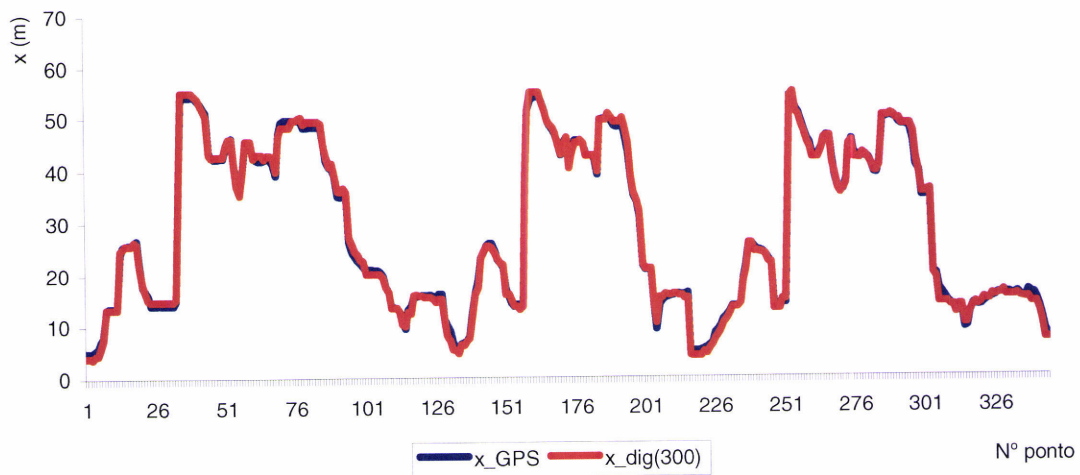


Figura 4.7 - Coordenadas (“x” no gráfico de cima; “y” no gráfico de baixo) das posições do atleta nas três voltas completas realizadas ao circuito, obtidas pelo receptor dGPS-RTK (“GPS”) e resultantes do processo de digitalização de imagens vídeo (“dig(300)”).

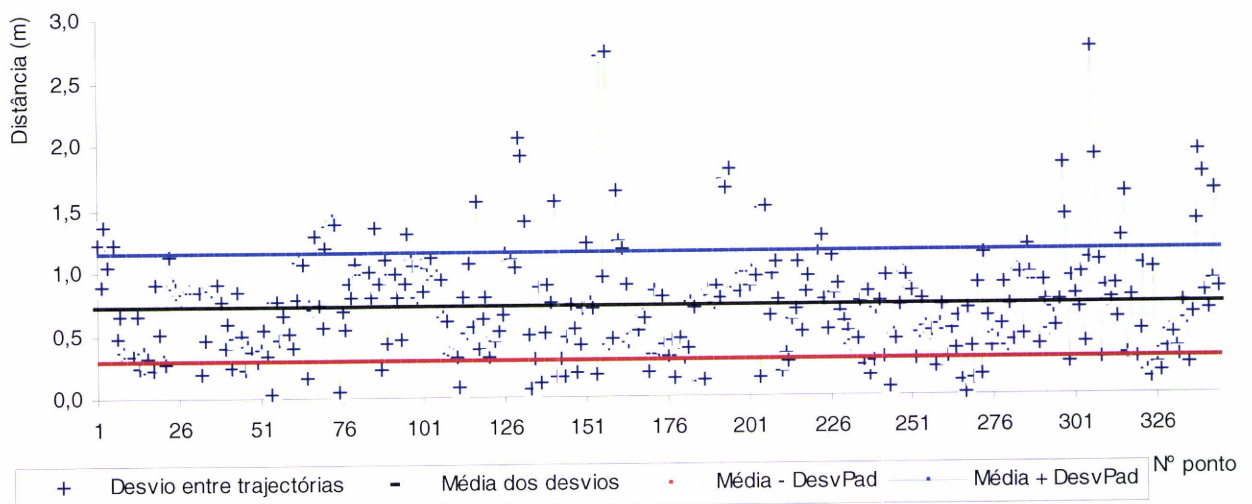


Figura 4.8 - Desvio entre trajectórias resultantes dos dois métodos de obtenção de coordenadas, dGPS-RTK e digitalização de imagens vídeo (“dig300”).

(2006) na validação de um sistema de digitalização de imagens de vídeo. Os valores do ETM obtidos neste trabalho, inferiores a 3% em ambas as coordenadas (“x” e “y”), mostram um grau de aproximação aos valores da trajectória real superior ao determinado por Edgecomb e Norton (2006), com ETM da ordem dos 5 a 6% na utilização de um sistema computadorizado de digitalização de imagens de vídeo para monitorização de jogadores de Futebol australiano.

Os resultados apresentados também permitem verificar que o operador do processo de digitalização pode utilizar a regulação da velocidade de processamento do filme sem reduzir a precisão das medições realizadas. Cada operador deverá considerar que, no processo de tomada de decisão quanto a esta regulação, por um lado, a utilização de velocidades mais lentas de processamento do filme durante a digitalização permite atenuar a dificuldade de acompanhamento do atleta que poderá estar associada a deslocamentos em sprint ou com mudanças bruscas de direcção (Edgecomb e Norton, 2006; Carling *et al.*, 2008). Por outro lado, a possibilidade de utilizar velocidades de processamento do filme mais elevadas permite reduzir substancialmente o tempo envolvido no seguimento do atleta. O quadro 4.7 traduz, para cada volta completa realizada pelo atleta ao circuito, a relação entre o tempo total de filme e o tempo necessário de digitalização em função do ajustamento da velocidade de processamento do filme.

Quadro 4.7 - Relação entre tempo total do filme e tempo de digitalização, para diferentes velocidades de processamento do filme.

Volta	Tempo de filme (min.:seg.)*	Tempo de digitalização (min.)		
		Dig300	Dig100	Dig50
1	5:14	≈60	≈30	≈22
2	4:19	≈45	≈24	≈17
3	4:30	≈50	≈25	≈19

* min.- minutos; seg.- segundos;

Pode confirmar-se, por exemplo, que enquanto a opção “Dig300”, que corresponde à menor velocidade de processamento do filme (maior intervalo de relógio), apresenta um factor de ampliação do tempo com um rácio (tempo de digitalização/tempo de filme) de cerca de 11, a opção “Dig50”, que corresponde à maior velocidade de processamento do filme utilizada neste trabalho (menor intervalo de relógio), traduz-se num rácio de cerca de 4, ou seja, praticamente um terço do tempo envolvido no processo de digitalização. Este aspecto ganha importância se tivermos presente que uma das limitações que se apontam (Roberts *et al.*, 2006; Carling *et al.*, 2008; MacLeod *et al.*, 2009) aos sistemas de digitalização manual se relaciona com as exigências de tempo (e, necessariamente, de concentração) neste processo de monitorização.

4.2.4. Avaliação da consistência intra-operador e inter-operadores do processo de digitalização de imagens vídeo

Como refere Hopkins (2000) a análise da dimensão do erro só pode considerar-se completa se for realizada a avaliação da consistência de medições repetidas.

Os quadros A4.1 e A4.2 (anexo 4) resumem os resultados da análise de variância factorial (com dois factores: seis operadores e treze digitalizações realizadas por cada operador), com um grau de significância de 95%, dos primeiros setenta e oito (dos 156) pares de coordenadas (“x” e “y”). Os quadros A4.3 e A4.4 (anexo 4) reproduzem idêntica informação estatística mas referente aos pares de coordenadas do intervalo de repetições [79-156]. Os resultados mostram a existência de diferenças significativas ($p < 0,05$) entre operadores, entre digitalizações e entre interacções.

O CV em qualquer dos casos é inferior a 1,6%, indicador de uma excelente consistência absoluta (Atkinson e Nevill, 1998).

Os quadros A4.5 e A4.6 (anexo 4) apresentam o resumo da análise de variância realizada para cada operador (consistência intra-operador), respectivamente, para a coordenada “x” e para a coordenada “y”, comparando as treze digitalizações realizadas. Estes resultados mostram que apenas o operador “4” apresentou diferenças significativas ($p < 0,05$) ao nível da coordenada “x”, enquanto na coordenada “y” apresentaram diferenças significativas ($p < 0,05$) entre digitalizações os operadores “2 a 5”. Os quadros A4.7 e A4.8 (anexo 4) resumem as médias das coordenadas “x” e “y”, respectivamente, calculadas para as treze digitalizações de cada um dos seis operadores a partir do método LSD de separação de médias.

Dada a dimensão do ficheiro resultante, não é apresentada a matriz de setenta e oito colunas por setenta e oito linhas, com todos os coeficientes de correlação de Pearson (r) entre coordenadas (“x” e “y”) obtida em ambiente “MATLAB” no conjunto de todas as digitalizações (13) realizadas por todos os operadores (6). Em alternativa, é apresentada de forma gráfica (figuras 4.9 e 4.10) a mesma informação, correspondente à correlação múltipla entre as setenta e oito digitalizações para as coordenadas “x” e “y”. A correlação entre digitalizações foi significativa e o valor médio do coeficiente de correlação de Pearson (r) para estas correlações intra-operador e inter-operadores para a coordenada “x” foi de $0,994 \pm 0,005$ e para a coordenada “y” foi de $0,948 \pm 0,047$. Apesar da elevada correlação que estes coeficientes revelam, podem estar envolvidos pequenos erros sistemáticos que são introduzidos pelas diferentes técnicas utilizadas

pelos operadores, ao nível, por exemplo, da coordenação olhos-mão, da acuidade visual e dos padrões de concentração (Edgecomb e Norton, 2006).

No anexo 5 (quadros A5.1 a A5.12) são apresentadas as matrizes dos coeficientes de correlação de Pearson referentes às treze digitalizações de cada operador (consistência intra-operador), para as coordenadas “x” e “y”. O quadro 4.8 resume a informação mais relevante destas matrizes.

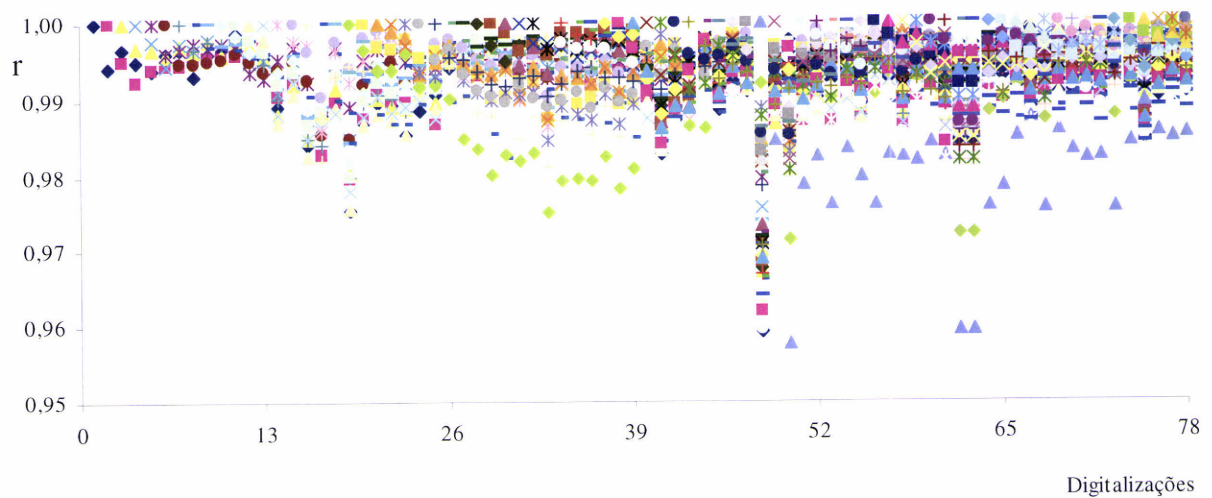


Figura 4.9 - Coeficientes de correlação de Pearson para a coordenada “x”, no conjunto das setenta e oito digitalizações.

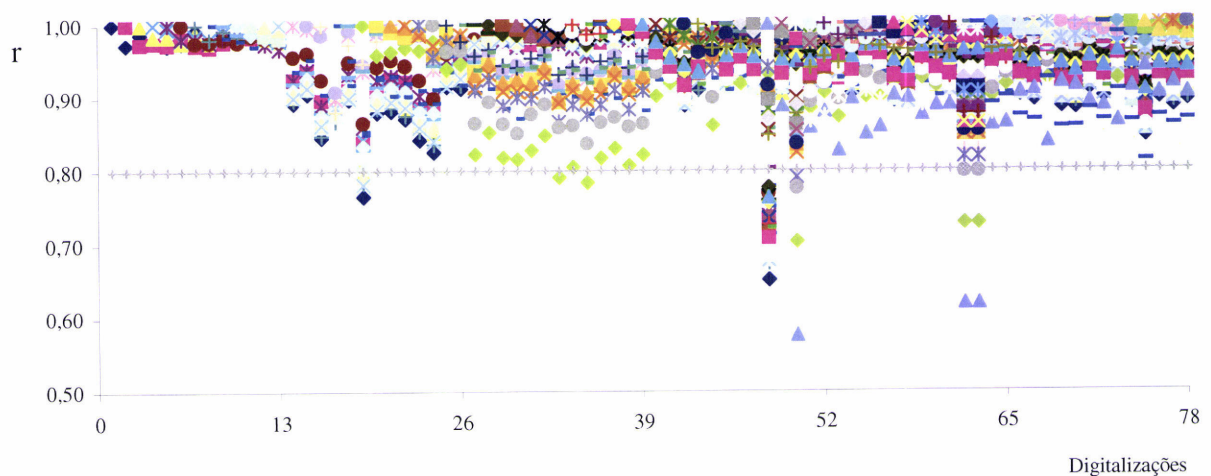


Figura 4.10 - Coeficientes de correlação de Pearson para a coordenada “y”, no conjunto das setenta e oito digitalizações.

Quadro 4.8 - Quadro resumo sobre os coeficientes de correlação de Pearson entre todas as digitalizações de cada operador.

Operador	Coordenada “x”		Coordenada “y”	
	Média ± DP	Intervalo de variação	Média ± DP	Intervalo de variação
1	0,997 ± 0,002	[0,992-1]	0,984 ± 0,009	[0,966-1]
2	0,995 ± 0,004	[0,982-1]	0,969 ± 0,031	[0,852-1]
3	0,998 ± 0,001	[0,993-1]	0,989 ± 0,007	[0,971-1]
4	0,993 ± 0,007	[0,958-1]	0,952 ± 0,064	[0,576-1]
5	0,995 ± 0,004	[0,984-1]	0,965 ± 0,043	[0,863-1]
6	0,998 ± 0,001	[0,994-1]	0,991 ± 0,007	[0,962-1]

DP- Desvio padrão;

Os valores dos coeficientes de correlação reforçam as indicações resultantes da análise de variância: a coordenada “x” apresenta valores de “r” mais elevados (sempre superiores a 0,950 e, em média superiores a 0,993) do que a coordenada “y” (em média entre 0,952 e 0,991, com um caso pontual abaixo de 0,8 no operador “4” e alguns casos abaixo de 0,9 nos operadores “2” e “5”). Este é um excelente indicador da consistência intra-operador, enquadrando-se quase na generalidade nos valores de referência para boa consistência (> 0,900) citados por Collins e De Luca (1993), por McInnes *et al.* (1995), por Hopkins (2000), por Chiari *et al.* (2000) e por Carling *et al.* (2008).

Outro indicador que reforça a excelente consistência verificada neste processo de obtenção de coordenadas por digitalização de imagens vídeo é apresentado no quadro 4.9. O ICC (equação 3.10) baseia-se num conjunto de parâmetros estatísticos (SMS, RMS e EMS) que resultam de cálculos produzidos no processo de análise de variância (ANOVA). Os valores obtidos (entre 0,974 e 0,986) correspondem à classificação “excelente consistência” apresentada por Collins e De Luca (1993) e Chiari *et al.* (2000).

Quadro 4.9 - Coeficiente de correlação intra-classe (ICC) para as coordenadas “x” e “y”, no conjunto das treze digitalizações realizadas pelos seis operadores.

Amostra	N	k	SMS	RMS	EMS	ICC
X ₁₋₇₈	6	13	1430,218	17,059	0,130	0,974
Y ₁₋₇₈	6	13	712,030	4,415	0,193	0,984
X ₇₉₋₁₅₆	6	13	1374,467	8,241	0,206	0,986
Y ₇₉₋₁₅₆	6	13	870,576	4,959	0,252	0,985

n- número de operadores; k- número de digitalizações; SMS-quadrado médio entre operadores; RMS-quadrado médio entre digitalizações; EMS-quadrado médio do erro;

Os quadros do anexo 6 (quadros A6.1 e A6.2) apresentam a dimensão do ETM (em %) para as coordenadas “x” e “y”, respectivamente, por comparação das coordenadas obtidas nas

sucessivas digitalizações realizadas por cada operador, tomando como referência as coordenadas obtidas na primeira digitalização. Os valores obtidos (em média entre 1,0 e 1,7% para a coordenada “x” e entre 0,5 e 1,0% para a coordenada “y”) são claramente inferiores aos 5% definidos por McInnes *et al.* (1995) e utilizados por MacLeod *et al.* (2009) como o limite abaixo do qual se deve considerar “boa” consistência de resultados, sendo também inferiores aos 2,4-3,3% obtidos por Edgecomb e Norton (2006) na avaliação da consistência intra-operador. Estes resultados evidenciam a excelente consistência intra-operador, já identificada por outros indicadores estatísticos e demonstram a fiabilidade do procedimento e da tecnologia em estudo para medições repetidas. A menor expressão do erro no caso da coordenada “y”, justifica a maior probabilidade de obtenção de diferenças significativas na análise de variância ao nível desta coordenada, quando comparada com a coordenada “x”: em termos genéricos, quanto menor for o erro, menor terá que ser o desvio para assumir significância. Estes resultados também confirmam o operador “4” como aquele que tem maior erro de digitalização associado, aspecto evidenciado noutros parâmetros, nomeadamente o menor coeficiente de correlação de Pearson que tem associado. Pode considerar-se, por isso, que apesar da expressão do erro relativo ser aceitável em qualquer dos casos, é importante, na perspectiva da sua minimização, que o operador tenha interesse e empenho em todo o processo, já que aspectos intrínsecos relacionados com a acuidade visual e com a própria capacidade de concentração de cada indivíduo (Edgecomb e Norton, 2006) podem ser, só por si, responsáveis por diferenças na digitalização de imagens e na respectiva obtenção de coordenadas. O operador “4”, cujos resultados são menos fiáveis, atingiu, apesar de tudo, valores médios das coordenadas que se enquadram nos valores obtidos pelos restantes operadores, tendo ainda obtido ETM mínimos relativos à primeira digitalização inferiores a 1% para a coordenada “x” e inferiores a 0,5% para a coordenada “y”.

O quadro A6.3 (anexo 6) exhibe as distâncias totais (acumuladas, em m) calculadas em cada digitalização realizada por cada operador a partir das respectivas coordenadas rectangulares (“x” e “y”), reconstruídas a partir das coordenadas virtuais obtidas por digitalização das imagens vídeo. É apresentado também o ETM (em %) de cada operador (consistência intra-operador) obtido por comparação das distâncias calculadas nas treze digitalizações realizadas com a distância conhecida do percurso realizado pelo atleta no exercício respectivo (E5: 30 m em sprint, com mudanças bruscas de direcção). O ETM dos seis operadores variou entre 2,85% e 4,38% e, o ETM global, para o conjunto de todas as digitalizações realizadas por todos os operadores (num total de setenta e oito), foi de 5,55% (consistência intra-operador e inter-operadores), valor semelhante ao apresentado por Edgecomb e Norton (2006). Os valores

obtidos são da ordem de grandeza ou inferiores aos obtidos por Roberts *et al.* (2006) na avaliação da consistência intra-operador (até 3,4%) e inter-operadores (até 6,0%), para as variáveis distância total percorrida e velocidade, ou os 5% com que Carling *et al.* (2008) consideraram demonstrada a precisão e a consistência inter-operadores para as distâncias totais percorridas por um jogador de Futebol, a partir da digitalização de imagens vídeo realizada por três operadores. A apresentação destes resultados deve ser enquadrada nas características do exercício cuja filmagem serviu de amostra para efeitos de digitalização de imagens e que conjuga dois factores que tendem a aumentar a expressão do erro: velocidade elevada e as mudanças bruscas de direcção (E5, exercício realizado em sprint, com três mudanças bruscas de direcção).

Tendo presente o calendário de digitalizações, para simplificar a análise de estabilidade temporal podem subdividir-se os quinze dias que demorou este processo em três períodos: o primeiro correspondente aos quatro primeiros dias do calendário, que envolveu sete digitalizações (série 1); o segundo envolveu três digitalizações (série 2), realizadas num só dia (o sétimo dia) após dois dias de pausa; o terceiro teve lugar após sete dias de pausa e envolveu três digitalizações (série 3) realizadas no último dia do calendário programado. As figuras 4.11 e 4.12 ilustram o comportamento médio do ETM (em %) nestas três séries, respectivamente para a coordenada “x” e para a coordenada “y”. Estas figuras não revelam qualquer tendência sistemática deste indicador ao longo do processo de digitalização e que poderiam, eventualmente, admitir-se à partida. Assim, não se verificou a ocorrência sistemática de maiores valores de ETM nas primeiras sessões de digitalização. Também as três últimas digitalizações de cada operador, realizadas depois de uma semana de pausa, não revelaram uma tendência sistemática no que se refere ao ETM, factos que indiciam não ter sido relevante o processo de adaptação e aprendizagem do procedimento. Importa, contudo, referir que o operador “6”, que procedeu às digitalizações de imagens captadas na filmagem referente à realização pelo atleta das voltas completas ao circuito, processo prévio que lhe terá conferido uma experiência adicional de digitalização de imagens, foi aquele que melhores indicadores estatísticos apresentou, nomeadamente, menor CV e menor ETM. Desta observação resulta o interesse em aprofundar em estudos posteriores, simultaneamente, a influência da experiência dos operadores na técnica de digitalização e o compromisso ou equilíbrio que será necessário estabelecer entre a experiência a conceder e o grau de saturação que pode atingir-se na execução de tarefas repetitivas, muito exigentes em concentração.

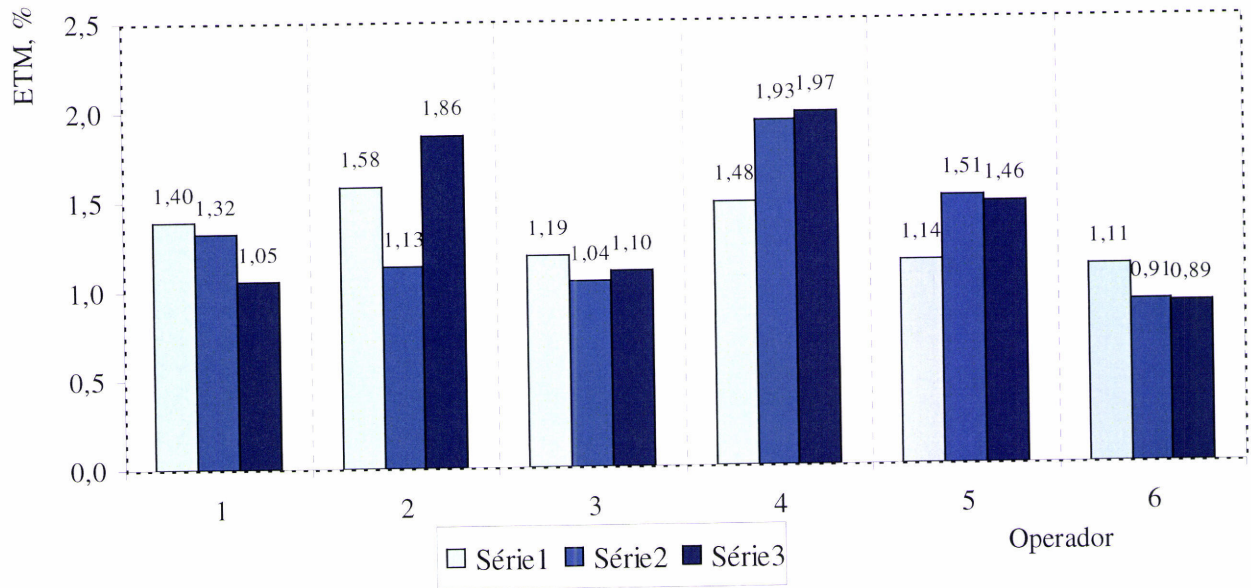


Figura 4.11 - Comportamento do ETM para a coordenada “x”, para cada operador, nas três séries de digitalizações consideradas.

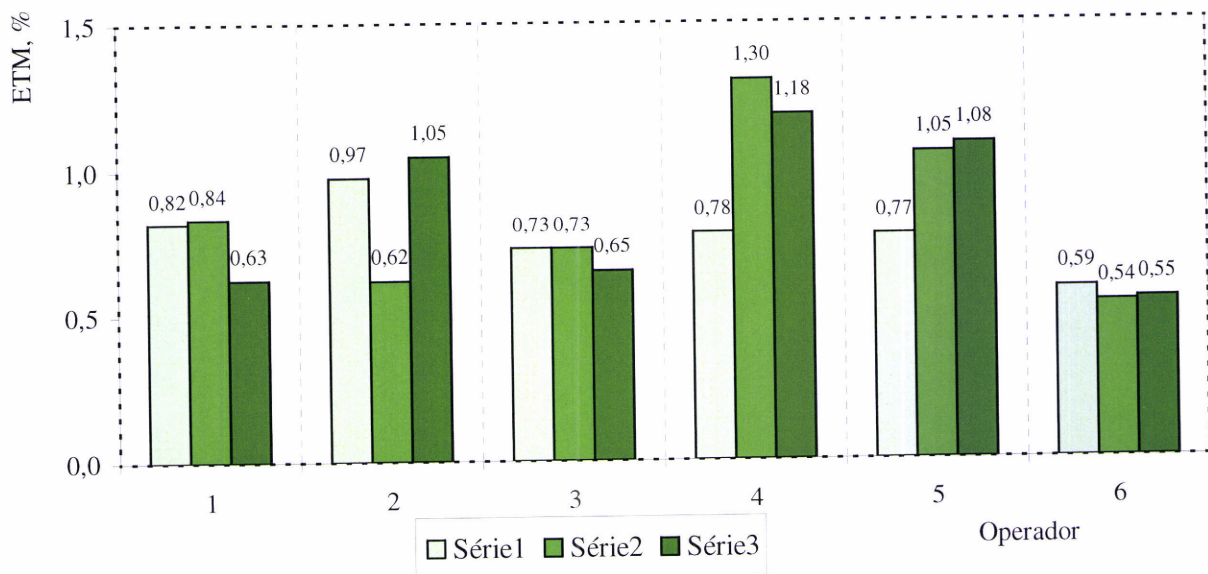


Figura 4.12 - Comportamento do ETM para a coordenada “y”, para cada operador, nas três séries de digitalizações consideradas.

4.3. Limitações do estudo desenvolvido

Atendendo a que em competição não é permitido aos atletas transportarem componentes electrónicos, não foi considerado o jogo, a competição, no processo de recolha de dados para avaliação da metodologia, o que se pode apontar como uma das principais limitações ao estudo desenvolvido nesta dissertação. A aleatoriedade ou imprevisibilidade do jogo permitiria a diversidade de situações típica do contexto real, o que conduziria a uma abordagem mais ecológica.

Por outro lado, a metodologia “TACTO-MATLAB” utilizada, baseada na reconstrução de coordenadas a duas dimensões (“2D-DLT”), obtidas a partir de imagens captadas por uma câmara de filmar fixa situada por cima da superfície de jogo é uma simplificação da metodologia “3D-DLT”, passível de utilização em desportos em que o movimento de interesse ocorre fundamentalmente em determinado plano, como é o caso do Futebol. No entanto, esta abordagem deixa de fora os movimentos que ocorrem no plano vertical, os quais poderão ser importantes especialmente em trabalhos específicos de análise do movimento, nomeadamente na avaliação e aperfeiçoamento do gesto técnico. Nestas situações, será imprescindível a utilização de mais câmaras de filmar e a sua respectiva sincronização, sendo fundamental considerar a colocação de câmaras mais próximas do campo e situadas ao nível da superfície de jogo para captar esta dimensão vertical do movimento.

Ainda como consideração metodológica, este trabalho não preencheu uma lacuna que se encontra em aberto e que a logística que envolveu a preparação das sessões de campo poderia justificar: a validação simultânea da metodologia “TACTO-MATLAB” e dos receptores GPS desportivos (“SPI Elite - GPSports Systems”) através do sistema GPS diferencial, o que deixa em aberto uma linha potencial de investigação para o futuro.

5. CONCLUSÃO

Podem enumerar-se as seguintes conclusões resultantes do trabalho experimental que suporta esta tese:

1. Os ensaios realizados confirmaram a precisão do sistema dGPS-RTK na medição de coordenadas, distâncias e velocidades, demonstrando que o mesmo pode ser utilizado como referência na validação do sistema de digitalização e reconstrução de coordenadas “TACTO-MATLAB”.

2. Os resultados da ANOVA entre as coordenadas obtidas pelo sistema “TACTO-MATLAB” e as coordenadas obtidas pelo sistema dGPS-RTK mostraram, por um lado, não existirem diferenças significativas ($p < 0,05$), para a coordenada “x” e, por outro, diferenças significativas para a coordenada “y”, no entanto, estas diferenças são da ordem de grandeza do decímetro, aceitáveis para os propósitos de monitorização do padrão de movimentos de um jogador de Futebol. A análise de regressão revelou que o modelo linear se ajusta adequadamente aos dados experimentais obtidos e os diferentes critérios de validade estatística utilizados (coeficiente de correlação de Pearson, coeficiente de variação e erro técnico relativo de medida) confirmaram a validade da técnica utilizada para as coordenadas, para as distâncias percorridas pelos atletas e para as velocidades típicas dos padrões de deslocamento do Futebol.

3. Os resultados da ANOVA entre as coordenadas obtidas pelo sistema “TACTO-MATLAB” em três diferentes regulações da velocidade de processamento do filme não apresentaram diferenças significativas ($p < 0,05$). Não havendo diminuição da precisão da recolha de coordenadas, o operador poderá utilizar velocidades mais lentas de processamento do filme durante a digitalização para atenuar a dificuldade de acompanhamento do atleta que poderá estar associada a deslocamentos em sprint ou com mudanças bruscas de direcção, ou utilizar velocidades de processamento do filme mais elevadas se pretender reduzir substancialmente o tempo envolvido no seguimento do atleta. Este aspecto ganha importância uma vez que a principal limitação que se aponta aos sistemas de digitalização manual se relaciona com as exigências de tempo (e, necessariamente, de concentração) no processo de monitorização.

4. Apesar dos resultados da ANOVA factorial entre as coordenadas obtidas nas setenta e oito digitalizações realizadas num período de duas semanas (treze digitalizações realizadas por cada um dos seis operadores) mostrarem a existência de diferenças significativas ($p < 0,05$), todos os

parâmetros estatísticos, nomeadamente o CV, em qualquer dos casos inferior a 1,5%, o coeficiente de correlação de Pearson (r) e o coeficiente de correlação intra-classe (ICC) próximos de um e o erro técnico relativo de medida abaixo dos 2% nas duas coordenadas, são indicadores de uma excelente consistência intra-operador e inter-operadores.

Como considerações finais, pode afirmar-se que a demonstração da validade e da fiabilidade deste sistema de baixo custo para obtenção de parâmetros biomecânicos na monitorização do padrão de deslocamentos de jogadores de Futebol abre boas perspectivas de utilização de forma generalizada em desportos intermitentes e dá resposta em desportos de pavilhão, onde não é possível a utilização de receptores GPS por inacessibilidade de captação de sinal no interior de edifícios.

A equipa que concebeu o *software*, consciente da necessidade de reduzir o tempo e o esforço de concentração envolvido no processo de digitalização, procura actualmente o desenvolvimento de algoritmos que permitam a monitorização ou seguimento automático dos atletas (“*tracking* automático”), aspecto fundamental para a aceitação e utilização desta ferramenta em desportos de equipa, que envolvem diversos atletas em simultâneo em campo e cuja informação relevante do desempenho deve estar disponível para os treinadores em prazos relativamente curtos, dada a intensidade dos calendários competitivos.

De entre os estudos potenciais a desenvolver tendo por base os resultados desta tese, deve referir-se o interesse em testar diferentes números de pontos de calibração no campo e respectiva localização, como mecanismo para minimizar o erro. Ainda na perspectiva da minimização do erro, em especial na aplicação à análise do movimento, em futuros trabalhos será interessante utilizar várias câmaras de filmar, em diferentes posições do campo. Poderá ainda admitir-se o interesse em aprofundar em estudos posteriores, simultaneamente, a influência da experiência dos operadores na técnica de digitalização e na precisão das coordenadas obtidas.

Numa abordagem integrada, deverão associar-se às questões biomecânicas cinemáticas medidas pela câmara de filmar, informações que permitam a caracterização fisiológica do padrão de esforço de desportos com solicitações intermitentes, por exemplo, através da monitorização da frequência cardíaca dos atletas.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdel-Aziz, Y. I. & Karara, H. M. (1971). Direct linear transformation from comparator coordinates into object-space coordinates. *Proc. ASP/UI Symp. On Close-range Photogrammetry* (Urbana, 1995). American Society of Photogrammetry, Falls Church (Va/USA), pp. 1-18.
- Atkinson, G. & Nevill, A. M. (1998). Statistical methods for assessing measurement error (reliability) in variables relevant to sport medicine. *Sports Medicine*, 26(4): 217-238.
- Barbero-Alvarez, J. C., Soto, V. M., Barbero-Alvarez, V. & Granda-Vera, J. (2008). Match analysis and heart rate of futsal players during competition. *Journal of Sport Science*, 26(1): 63-73.
- Barbero-Alvarez, J. C., Barbero-Alvarez, V., Gómez, M. & Castagna, C. (2009). Análisis cinemático del perfil de actividad en jugadoras infantiles de fútbol mediante tecnología GPS. *Cronos*, VII(14): 35-42.
- Barbero-Alvarez, J. C., Coutts, A., Granda, J., Barbero-Alvarez, V. & Castagna, C. (2010). The validity and reliability of a global positioning satellite system device to assess speed and repeated “sprint” ability (RSA) in athletes. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 13(2): 232-235.
- Barros, R. M. L., Brenzikofer, R., Leite, N. J. & Figueiroa, P. J. (1999). Desenvolvimento e avaliação de um sistema para análise cinemática tridimensional de movimentos humanos. *Revista Brasileira de Engenharia Biomédica*, 15(1-2): 79-86.
- Barros, R. M. L., Misuta, M. S., Menezes, R. P., Figueiroa, P. J., Moura, F. A., Cunha, S. A., Anido, R. & Leite, N. (2007). Analysis of the distances covered by first division Brazilian soccer players obtained with an automatic tracking method. *Journal of Sports Science and Medicine*, 6: 233-242.
- Brewer, C., Dawson, B., Heasman, J., Stewart, G. & Cormack S. (2010). Movement pattern comparisons in elite (AFL) and sub-elite (WAFL) Australian football games using GPS. *Journal of Science and Medicine in Sport* (in press). doi:10.1016/j.jsams.2010.01.005
- Carling, C., Bloomfield, J., Nelsen, L. & Reilly, T. (2008). The role of motion analysis in elite soccer. Contemporary performance measurement techniques and work rate data. *Sports Medicine*, 38(10): 829-862.
- Castellano, J. & Casamichana, D. (2010). Heart rate and motion analysis by GPS in beach soccer. *Journal of Sports Science and Medicine*, 9: 98-103.
- Chiari, L., Cappello, A., Lenzi, D. & Croce, U. (2000). An improved technique for the extraction of stochastic parameters from stabilograms. *Gait and Posture*, 12(3): 225-234.

- Collins, J. J. & De Luca, C. J. (1993). Open-loop and closed-loop control of posture: A random-walk analysis of center-of-pressure trajectories. *Experimental Brain Research*, 95(2): 308-318.
- Coutts, A. J., & Duffield, R. (2010). Validity and reliability of GPS devices for measuring movement demands of team sports. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 13(1): 133-135.
- Coutts, A. J., Quinn, J., Hocking, J., Castagna, C. & Rampinini, E. (2010). Match running performance in elite Australian Rules Football. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 13(5): 543-548.
- Di Salvo, V., Collins, A. McNeill, B. & Cardinale, M. (2006). Validation of prozone: a new video-based performance analysis system. *International Journal of Performance Analysis in Sport*, 6(1): 108-119.
- Di Salvo, W., Baron, R., Tschan, H., Calferon, F. J., Bachi, N. & Pigozzi, F. (2007). Performance characteristics according to playing position in elite soccer. *International Journal of Sports Medicine*, 28(3): 222-227.
- Dobson, B. P. & Keogh, J. W. L. (2007). Methodological Issues for the Application of Time-Motion Analysis Research. *Strength and Conditioning Journal*, 29(2): 48-55.
- Duffield, R., Reid, M., Baker, J. & Spratford, W. (2010). Accuracy and reliability of GPS devices for measurement of movement patterns in confined spaces for court-based sports. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 13(5): 523-525.
- Duncan, M. J., Badland, H. M. & Mummery, W. K. (2009). Applying GPS to enhance understanding of transport-related physical activity. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 12(5): 549-556.
- Duthie, G., Pyne, D. & Hooper, S. (2003). The reliability of video based time motion analysis. *Journal of Human Movement Studies*, 44: 259-272.
- Edgecomb, S. J. & Norton, K. I. (2006). Comparison of global positioning and computer-based tracking systems for measuring player movement distance during Australian Football. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 9(1): 25-32.
- Fernandes, O. (2008). Tool for Applied and Contextual Time-series Observation (“TACTO”). Oral Presentation of the 2nd *Internacional Congress of Complex Systems in Sport*, 4-8 November, Madeira.
- Gourgoulis, V., Aggeloussis, N., Kasimatis, P., Vezos, N., Boli, A. & Mavromatis, G (2008). Reconstruction accuracy in underwater three-dimensional kinematic analysis. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 11(2): 90-95.

- Hill-Haas, S., Dawson, B. T., Coutts, J. A. & Rowsell, G. J. (2009). Physiological responses and time-motion characteristics of various small-sided soccer games in youth players. *Journal of Sports Sciences*, 27(1): 1-8.
- Hopkins, W. G. (2000). Measures of Reliability in Sports Medicine and Science. *Sports Medicine*, 30(1): 1-15.
- Kuhtanen, P. (1999). Los aspectos biomecánicos: manual de las ciencias del entrenamiento - Fútbol. [S.l.]: Editorial Paidotribo.
- Larsson, P. (2003). Global Positioning System and Sport-Specific Testing. *Sport Medicine*, 33(15): 1093-1101.
- MacLeod, H., Morris, J., Nevill, A. & Sunderland, C. (2009). The validity of a non-differential global positioning system for assessing player movement patterns in field hockey. *Journal of Sport Sciences*, 27(2): 121-128.
- McInnes, S., Carlson, J. S., Jones, C.J. & McKenna, M. J. (1995). The physiological load imposed on basketball player during competition. *Journal of Sport Sciences*, 13(5): 387-397.
- Misuta, M. S. (2004). *Rastreamento automático de trajetórias de jogadores de Futebol por videografia: validação do método e análise dos resultados*. Tese de Mestrado, Faculdade de Educação Física, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil.
- Moorhouse, K. M. & Granata, K. (2007). Role of Reflex Dynamics in Spinal Stability: Intrinsic Muscle Stiffness Alone is Insufficient for Stability. *Journal of Biomechanics*, 40(5): 1058-1065.
- Morales, Y. & Tsubouchi, T. (2007). DGPS, RTK-GPS and StarFire GPS Performance Under Tree Shading Environments. In *Proc. of the IEEE International Conference on Intel. Shenzhen, China*, pp. 519-524.
- Perrin, O., Terrier, P., Ladetto, Q., Merminod, B. & Schutz, Y. (2000). Improvement of walking speed prediction by accelerometry, validated by satellite positioning. *Medical & Biological Engineering & Computing*, 38(2): 164-168.
- Pers, J., Bon, M., Kovacic, S., Sibila, M. & Dezman, B. (2002). Observation and analysis of large-scale human motion. *Human Movement Science*, 21(2): 295-311.
- Petersen, C., Pyne, D., Portus, M. & Dawson, B. (2009). Validity and Reliability of GPS Units to Monitor Cricket-Specific Movement Patterns. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 4: 381-393.
- Rampinini, E., Coutts, A., Castagna, C., Sassi, R. & Impellizzeri, F. M. (2007). Variation in top level soccer match performance. *International Journal of Sports Medicine*, 28(12): 1018-1024.

- Randers, M., Mujika, I., Hewitt, A., Santisteban, J., Bischoff, R., Solano, R., Zubillaga, A., Peltola, E., Krustup, P. & Mohr M. (2010). Application of four different football match analysis systems: A comparative study. *Journal of Sports Sciences*, 28(2): 171-182.
- Reid, M., Duffield, R. & Dawson, B. (2008). Quantification of the physiological and performance characteristics of on-court tennis drills. *Brasilian Journal of Sports Medicine*, 42:146–151.
- Relly, T. & Thomas, V. (1976). A motion analysis of work-rate in different positional roles in football match-play. *Journal of Human Movement Studies*, 2: 87-97.
- Relly, T. & Gilbourne, D. (2003). Science and football: a review of applied research in the football codes. *Journal of Sport Sciences*, 21(9): 693-705.
- Roberts, S., Trewartha, G. & Stokes, K. (2006). A comparison of time-motion analysis methods for field-based sports. *Journal of Sports Physiology and Performance*, 1: 388-399.
- Serra, G. & Bottura, C. (2007). An IV-QR Algorithm for Neuro-Fuzzy Multivariable Online Identification. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 15(2): 200-210.
- Terrier, P. & Schutz, Y. (2005). How useful is satellite positioning system (GPS) to track gait parameters? A review. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 2: 28-38.
- Townshend, A. D., Worringham, C. J. & Stewart, I. B. (2008). Assessment of speed and position during human locomotion using nondifferential GPS. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 40(1): 124-132.
- Vuckovic, G., Pers, J., James, N. & Hughes, M. (2010). Measurement error associated with the SAGIT/Squash computer tracking software. *European Journal of Sport Science*, 10(2): 129-140.
- Winter, D. (2004). *Biomechanics and Motor Control of Human Movement*. Third Edition, John Wiley & Sons, Inc., pp. 40-44.
- Wisbey, B., Montgomery, P. G., Pyne, D. B. & Rattray, B. (2010). Quantifying movement demands of AFL football using GPS tracking. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 13(5): 531-536.
- Witte, T. H. & Wilson, A. M. (2004). Accuracy of non-differential GPS for the determination of speed over ground. *Journal of Biomechanics*, 37(12): 1891-1898.
- Witte, T. H. & Wilson, A. M. (2005). Accuracy of WAAS-enabled GPS for the determination of position and speed over ground. *Journal of Biomechanics*, 38(8): 1717-1722.



ANEXOS

ANEXO 1

(Rotinas “MATLAB”)

```
% *****
% *                               João Serrano - Futebol                               *
% *****
% *           Started: 18/05/2010, Orlando Fernandes           *
% *   Last Revised: 18/05/2010, Orlando Fernandes           *
% *                               orlandoj@uevora.pt           *
% *                               jmrs@uevora.pt               *
% *****
% *                               LOAD FILE NAME                               *
% *****
clear all;clc;
SR=25;
dt=1/SR;
%*****
%*           Abrir os ficheiros das coordenadas           *
%*****
ext='.txt';
nome={
    ['Dig2506_cGPS_CIR_300_R1' ext]
    ['Dig2506_cGPS_CIR_100_R2' ext]
    ['Dig2606_cGPS_CIR_50_R3' ext]
};
nome1={
    ['volta1_GPS' ext]
    ['volta2_GPS' ext]
    ['volta3_GPS' ext]
};
%*****
comp=length(nome);
comp1=length(nome1);
%*****
%** Criar ficheiros de trabalho (coordenadas dos jogadores **
%*****
for j=1:comp
    file=char(nome(j));
    RawDados=load(file);
    Lgh(j)=length(RawDados);
    if j==1
        jogador1=RawDados(:,2:3);
    end
    if j==2
        jogador2=RawDados(:,2:3);
    end
    if j==3
        jogador3=RawDados(:,2:3);
    end
end
% %*****
% %*****          Ficheiros de Calibração          *****
% %*****
refeVirtual= load(['coord_Virtual_Cal2506_01' ext]);
refeReal= load(['Coord_real' ext]);
refeVirtual=refeVirtual*100;
% %*****
```



```
% ***** Cálculo dos parametros DLT *****
% *****
% Author: Christoph Reinschmidt, HPL, The University of Calgary
% Date: January, 1994
% Last changes: November 29, 1996
% Version: 1.0
% in International Society of Biomechanics (ISB)
% References: Woltring and Huiskes (1990) Stereophotogrammetry. In
% Biomechanics of Human Movement (Edited by Berme and
% Cappozzo). pp. 108-127.
% Adapted from dltfu.m (3-dimensional DLT)
% Liduin Meershoek, University of Utrecht
% April, 1997
Cut=[];
[PDLT,res]=dltfu2d(refeReal,refeVirtual,Cut);
% *****
% ***** Coordenadas Reais *****
% *****
jogadorR1=reconfu2(PDLT,jogador1);
jogadorR2=reconfu2(PDLT,jogador2);
jogadorR3=reconfu2(PDLT,jogador3);
% *****
cut=6;n=2;
[jogF1]=LPassF(jogadorR1,cut,n,SR);
[jogF2]=LPassF(jogadorR2,cut,n,SR);
[jogF3]=LPassF(jogadorR3,cut,n,SR);
%jog_F=jogF(90:Lgh,:);
% *****
jogFnew1=downsample(jogF1,25);
jogFnew2=downsample(jogF2,25);
jogFnew3=downsample(jogF3,25);
% *****
nSJog1=length(jogFnew1);
nSJog2=length(jogFnew2);
nSJog3=length(jogFnew3);
% *****
%* Coordenadas do GPS *
% *****
for j=1:comp1
    file1=char(nomel(j));
    RawDados1=load(file1);
    Lgh1(j)=length(RawDados1);
    volta=RawDados1(:,2:3);
    sequ=RawDados1(:,1);
end
% ***** Transformação de coordenadas *****
alfa=atan(0.376791);
RM(1,1)=cos(alfa);
RM(1,2)=-sin(alfa);
RM(2,1)=sin(alfa);
RM(2,2)=cos(alfa);
voltaR=volta*RM;
zero=[250702.978 186737.780];
zeroR=zero*RM;
lgh=length(voltaR);
origem= repmat(zeroR,[lgh,1]);
coordGPS=voltaR-origem;
% *****
```

```
%*****
for j=1:Lgh1
    seq=sequ(j);
    coordJog1(j,1)=jogFnew1(seq,1);
    coordJog1(j,2)=jogFnew1(seq,2);
end
%*****
dx=diff(coordGPS(:,1));
dy=diff(coordGPS(:,2));
%-----
Dist=sqrt(dx.^2+dy.^2);
%-----
%*****
% save('coordenadasGPS1.txt','coordGPS','-ascii');
% save('coordenadasDigit1.txt','jogFnew','-ascii');
% save('coordenadasDigit1.txt','coordJog','-ascii');
% todosPontos=[volta coordGPS coordJog];
% xlswrite('Final.xls',todosPontos,'R3_300','B2:G200');
% xlswrite('Final.xls',jogFnew,'R3_300','H2:I300');
% xlswrite('Final.xls',jogadorR,'R3_300','H2:I7000');
%*****
campoFuteRedondo
plot(jogFnew(:,1),jogFnew(:,2),'r')
title('Percurso realizado pelo Jogador (Digitalização300)')
xlabel('metros')
ylabel('metros')
%legend('jogador')
%*****
campoFuteRedondo
title('Percurso realizado pelo Jogador (GPS)')
xlabel('metros')
ylabel('metros')
%legend('jogador')
plot(coordGPS(:,1),coordGPS(:,2),'.k')
%*****
campoFuteRedondo
title('Percurso realizado pelo Jogador (GPS & Digitalização300)')
xlabel('metros')
ylabel('metros')
plot(coordJog(:,1),coordJog(:,2),'r')
hold on
plot(coordGPS(:,1),coordGPS(:,2),'.k')
legend('campo','digitalização300','GPS')
hold off
%*****
```

```
%*****
GPSSquare_x=coordGPS(:,1).^2;
GPSSquare_y=coordGPS(:,2).^2;
Digitquare_x=coordJog(:,1).^2;
Digitsquare_y=coordJog(:,2).^2;
%*****
residual_x=coordGPS(:,1)-coordJog(:,1);
residual_y=coordGPS(:,2)-coordJog(:,2);
SumR_x=residual_x.^2;
SumR_y=residual_y.^2;
%*****
Rhox=corr(coordJog(:,1),coordGPS(:,1));
RhoY=corr(coordJog(:,2),coordGPS(:,2));
VAF_x=100*(1-(sum(SumR_x)/sum(GPSSquare_x)));
VAF_y=100*(1-(sum(SumR_y)/sum(GPSSquare_y)));
dados=[Rhox VAF_x RhoY VAF_y];
% *****
% * gravar para excel *
% *****
%xlswrite('dados.xls',dados,'voltas','B10:E10');
%*****
%*          Preparar para fazer o Filme          *
%*****
% nfilme =[ 'circuito1' '.avi'];
% movi = avifile(nfilme,'compression','Cinepak' );
% movie.Quality = 100;
% %*****
% for i=1:Lgh(1)
%     figure
%     campoFuteRedondo
%     %-----
%     plot(jogFnew(i,1),jogFnew(i,2),'.r');
%     E = getframe(gca);
%     movi = addframe(movi,E);
%     close all
% end
% movi = close(movi);

% *****
% * gravar em ascii *%
% *****
% savefile=[codigo '_' sit '_dados' ext ];
% save(savefile,'dados','-ascii');

%
% *****
% * Fim da Rotina *
% *****
```

ANEXO 2

(Coordenadas rectangulares de pontos de referência no campo obtidos pelo receptor dGPS-RTK na primeira sessão)

Quadro A2.1-Coordenadas de vinte e quatro pontos referenciados, obtidas na primeira sessão de recolha de dados pelo receptor dGPS-RTK.

Ponto	Este (m)	Norte (m)
1	250679,089	186797,932
2	250687,289	186776,401
3	250709,488	186775,428
4	250694,005	186759,401
5	250702,371	186737,879
6	250711,751	186741,650
7	250735,020	186750,657
8	250744,597	186766,574
9	250754,520	186768,923
10	250791,038	186772,402
11	250780,234	186798,833
12	250777,556	186805,777
13	250767,393	186832,146
14	250757,100	186828,378
15	250761,453	186826,063
16	250759,868	186821,416
17	250736,563	186820,100
18	250737,683	186813,303
19	250737,615	186810,348
20	250729,008	186815,800
21	250735,797	186789,293
22	250737,642	186790,100
23	250737,564	186786,074
24	250694,827	186803,793

ANEXO 3

(Quadros resumo das análises de variância, ANOVA, realizadas na validação da metodologia “TACTO-MATLAB”)

Quadro A3.1- Resumo da análise de variância da variável “x” para os quatro métodos de obtenção de coordenadas (dGPS-RTK e digitalização com três velocidades de processamento de imagens).

K	Origem	Graus de Liberdade	Soma de Quadrados	Quadrado da Média	F	p
1	Repetições	344	347668,656	1010,665	4889,344	0,000
2	Métodos	3	0,639	0,213	1,031	0,378
-3	Erro	1032	213,322	0,207		
	Total	1379	347882,617			

Quadro A3.2- Resumo da análise de variância da variável “y” para os quatro métodos de obtenção de coordenadas (dGPS-RTK e digitalização com três velocidades de processamento de imagens).

K	Origem	Graus de Liberdade	Soma de Quadrados	Quadrado da Média	F	p
1	Repetições	344	534017,308	1552,376	12901,566	0,000
2	Métodos	3	4,956	1,652	13,730	0,000
-3	Erro	1032	124,175	0,120		
	Total	1379	534146,439			

ANEXO 4

(Quadros resumo das análises de variância, ANOVA, realizadas na avaliação da consistência da metodologia “TACTO-MATLAB”)

Quadro A4.1 -Resumo de análise de variância da coordenada “x” (CV = 0,91%) para o conjunto de resultados obtidos pelos seis operadores, em treze digitalizações, nas primeiras setenta e oito repetições.

K	Origem	Graus de Liberdade	Soma de Quadrados	Quadrado da Média	F	p
1	Repetições	77	95916,746	1245,672	9574,920	0,000
2	Operadores	5	7151,091	1430,218	10993,443	0,000
4	Digitalizações	12	204,708	17,059	131,125	0,000
6	Interacções	60	885,293	14,755	113,414	0,000
-7	Erro	5929	771,347	0,130		
Total		6083	104929,185			

*Diferenças Significativas (p <0,05) para operadores, digitalizações e interacções.

Quadro A4.2 -Resumo de análise de variância da coordenada “y” (CV = 0,82%) para o conjunto de resultados obtidos pelos seis operadores, em treze digitalizações, nas primeiras setenta e oito repetições.

K	Origem	Graus de Liberdade	Soma de Quadrados	Quadrado da Média	F	p
1	Repetições	77	14755,241	191,627	993,144	0,000
2	Operadores	5	3560,150	712,030	3690,241	0,000
4	Digitalizações	12	52,982	4,415	22,883	0,000
6	Interacções	60	342,401	5,707	29,576	0,000
-7	Erro	5929	1143,997	0,193		
Total		6083	19854,772			

*Diferenças Significativas (p <0,05) para operadores, digitalizações e interacções.

Quadro A4.3 -Resumo de análise de variância da coordenada “x” (CV = 1,39%) para o conjunto de resultados obtidos pelos seis operadores, em treze digitalizações, nas restantes setenta e oito repetições.

K	Origem	Graus de Liberdade	Soma de Quadrados	Quadrado da Média	F	p
1	Repetições	77	49250,720	639,620	3107,384	0,000
2	Operadores	5	6873,236	1374,647	6678,275	0,000
4	Digitalizações	12	98,886	8,241	40,034	0,000
6	Interacções	60	694,764	11,579	56,255	0,000
-7	Erro	5929	1220,417	0,206		
Total		6083	58138024			

*Diferenças Significativas (p <0,05) para operadores, digitalizações e interacções.

Quadro A4.4 -Resumo de análise de variância da coordenada “y” (CV = 0,97%) para o conjunto de resultados obtidos pelos seis operadores, em treze digitalizações, nas restantes setenta e oito repetições.

K	Origem	Graus de Liberdade	Soma de Quadrados	Quadrado da Média	F	p
1	Repetições	77	25691,129	333,651	1322,365	0,000
2	Operadores	5	4352,878	870,576	3450,367	0,000
4	Digitalizações	12	59,512	4,959	19,655	0,000
6	Interacções	60	387,090	6,452	25,569	0,000
-7	Erro	5929	1495,969	0,252		
Total		6083	31986,579			

*Diferenças Significativas (p <0,05) para operadores, digitalizações e interacções.

Quadro A4.5- Resumo da análise de variância intra-operador referente à coordenada “x”.

Parâmetro estatístico	Operador					
	1	2	3	4	5	6
Digitalizações						
Soma dos Quadrados	143,390	145,033	322,727	588,845	431,602	56,245
Quadrado da Média	11,949	12,086	26,894	49,070	35,967	4,687
F	0,473	0,457	1,084	1,999	1,491	0,195
p			0,369	0,021*	0,120	
Erro						
Soma dos Quadrados	50907,677	53256,072	49983,154	49471,865	48601,631	48427,261
Quadrado da Média	25,264	26,430	24,806	24,552	24,120	24,033
Total						
Soma dos Quadrados	51051,067	53401,105	50305,881	50060,710	49033,233	48483,507
Graus de liberdade: Digitalizações = 12; Erro = 2015; Total = 2027						

* Diferenças significativas (p <0,05)

Quadro A4.6- Resumo da análise de variância intra-operador referente à coordenada “y”

Parâmetro estatístico	Operador					
	1	2	3	4	5	6
Digitalizações						
Soma dos Quadrados	86,000	107,422	207,962	167,450	102,939	37,150
Quadrado da Média	7,167	8,952	17,330	13,954	8,578	3,096
F	1,710	1,961	4,216	3,258	2,012	0,777
p	0,059	0,024*	0,000*	0,000*	0,020*	
Erro						
Soma dos Quadrados	8447,401	9198,393	8283,403	8629,322	8591,120	8031,670
Quadrado da Média	4,192	4,565	4,111	4,283	4,264	3,986
Total						
Soma dos Quadrados	8533,401	9305,815	8491,365	8796,773	8694,059	8068,820
Graus de liberdade: Digitalizações = 12; Erro = 2015; Total = 2027						

* Diferenças significativas (p <0,05)

Quadro A4.7 -Resumo das médias da coordenada “x” (em m) obtidas no método LSD de separação de médias.

Digitalização	Operador					
	1	2	3	4*	5	6
1	37,28	34,62	37,61	35,60ac	36,01	36,56
2	37,21	34,38	37,25	35,90ac	36,00	36,34
3	37,51	34,12	38,82	35,70ac	36,03	36,71
4	37,46	34,68	37,42	35,98ac	36,15	36,22
5	37,91	34,68	37,55	36,17ad	36,11	36,36
6	36,90	34,03	37,55	35,56ac	36,00	36,45
7	37,58	34,75	37,35	35,39bd	35,77	36,05
8	37,24	34,54	37,46	35,30bd	35,84	36,22
9	37,64	34,58	37,37	34,29d	35,93	36,53
10	37,50	34,23	37,41	34,91cd	37,24	36,27
11	37,30	33,91	37,48	36,52a	37,24	36,51
12	37,67	34,39	37,14	35,48ac	36,06	36,49
13	37,83	34,69	37,25	35,44ac	36,01	36,38
Média±DP	37,46±0,28	34,43±0,28	37,51±0,42	35,56±0,56	36,18±0,48	36,39±0,17
(CV, %)	(0,74)	(0,81)	(1,11)	(1,58)	(1,33)	(0,48)

*Diferenças Significativas (p <0,05); DP- desvio padrão; CV- Coeficiente de variação.

Quadro A4.8 -Resumo das médias da coordenada “y” (em m) obtidas no método LSD de separação de médias.

Digitalização	Operador					
	1	2*	3*	4*	5*	6
1	52,12	54,13c	51,83a	53,29bd	53,07a	52,55
2	52,17	54,29bc	52,15a	52,98de	53,02a	52,60
3	52,96	54,46ac	50,86b	53,04ce	53,08a	52,47
4	52,03	54,32bc	52,01a	52,81e	52,95a	52,67
5	51,68	54,13c	51,91a	52,89de	53,00a	52,63
6	52,50	54,63ab	51,88a	53,22be	52,98a	52,63
7	51,84	54,02c	51,99a	53,46ac	53,18a	52,93
8	52,14	54,11c	52,02a	53,34ad	53,08a	52,87
9	51,86	54,17bc	51,95a	53,80a	53,05a	52,52
10	51,93	54,32bc	51,96a	53,65ab	53,43b	52,78
11	52,10	54,86a	51,94a	52,89de	52,43b	52,52
12	51,87	54,17bc	51,19a	53,26be	52,92a	52,57
Média±DP	52,07±0,34	54,29±0,24	51,83±0,38	53,22±0,30	53,01±0,22	52,63±0,27
(CV, %)	(0,66)	(0,44)	(0,72)	(0,56)	(0,41)	(0,27)

*Diferenças Significativas (p <0,05); DP- desvio padrão; CV- Coeficiente de variação.

ANEXO 5

(Quadros resumo dos coeficientes de correlação de Pearson na avaliação da consistência da metodologia “TACTO-MATLAB”)

Quadro A5.1- Coeficientes de correlação de Pearson referentes às treze digitalizações do operador “1” para a coordenada “x”.

r	Dig1	Dig2	Dig3	Dig4	Dig5	Dig6	Dig7	Dig8	Dig9	Dig10	Dig11	Dig12	Dig13
Dig1	1,000	0,994	0,997	0,995	0,994	0,996	0,997	0,993	0,996	0,996	0,999	0,998	0,996
Dig2		1,000	0,995	0,992	0,994	0,995	0,994	0,996	0,996	0,996	0,996	0,996	0,997
Dig3			1,000	0,997	0,997	0,996	0,997	0,996	0,998	0,996	0,998	0,997	0,996
Dig4				1,000	0,998	0,995	0,997	0,997	0,998	0,997	0,997	0,995	0,995
Dig5					1,000	0,996	0,997	0,997	0,997	0,997	0,997	0,994	0,993
Dig6						1,000	0,995	0,995	0,995	0,995	0,996	0,995	0,994
Dig7							1,000	0,996	0,998	0,997	0,998	0,996	0,995
Dig8								1,000	0,997	0,997	0,997	0,996	0,996
Dig9									1,000	0,997	0,997	0,996	0,997
Dig10										1,000	0,998	0,996	0,997
Dig11											1,000	0,998	0,996
Dig12												1,000	0,998
Dig13													1,000

Quadro A5.2- Coeficientes de correlação de Pearson referentes às treze digitalizações do operador “1” para a coordenada “y”.

r	Dig1	Dig2	Dig3	Dig4	Dig5	Dig6	Dig7	Dig8	Dig9	Dig10	Dig11	Dig12	Dig13
Dig1	1,000	0,972	0,987	0,979	0,971	0,975	0,992	0,973	0,988	0,978	0,987	0,992	0,988
Dig2		1,000	0,973	0,975	0,972	0,982	0,971	0,969	0,976	0,980	0,982	0,981	0,982
Dig3			1,000	0,985	0,984	0,976	0,989	0,976	0,988	0,982	0,991	0,982	0,978
Dig4				1,000	0,995	0,980	0,985	0,981	0,990	0,995	0,989	0,981	0,977
Dig5					1,000	0,980	0,980	0,976	0,984	0,993	0,987	0,973	0,966
Dig6						1,000	0,975	0,976	0,980	0,976	0,984	0,981	0,978
Dig7							1,000	0,980	0,992	0,984	0,990	0,987	0,982
Dig8								1,000	0,983	0,978	0,970	0,978	0,973
Dig9									1,000	0,988	0,985	0,984	0,982
Dig10										1,000	0,987	0,981	0,980
Dig11											1,000	0,986	0,981
Dig12												1,000	0,995
Dig13													1,000

Quadro A5.3 - Coeficientes de correlação de Pearson referentes às treze digitalizações do operador “2” para a coordenada “x”.

r	Dig1	Dig2	Dig3	Dig4	Dig5	Dig6	Dig7	Dig8	Dig9	Dig10	Dig11	Dig12	Dig13
Dig1	1,000	0,998	0,997	0,986	0,996	0,992	0,995	0,998	0,998	0,996	0,993	0,994	0,996
Dig2		1,000	0,996	0,990	0,998	0,994	0,998	0,999	0,998	0,998	0,995	0,997	0,998
Dig3			1,000	0,982	0,993	0,995	0,994	0,998	0,998	0,996	0,992	0,992	0,995
Dig4				1,000	0,990	0,984	0,993	0,988	0,987	0,987	0,990	0,992	0,990
Dig5					1,000	0,994	0,998	0,997	0,997	0,996	0,994	0,996	0,996
Dig6						1,000	0,997	0,994	0,994	0,996	0,992	0,992	0,990
Dig7							1,000	0,997	0,996	0,998	0,996	0,996	0,995
Dig8								1,000	0,999	0,998	0,993	0,995	0,997
Dig9									1,000	0,997	0,993	0,996	0,997
Dig10										1,000	0,994	0,993	0,996
Dig11											1,000	0,995	0,997
Dig12												1,000	0,995
Dig13													1,000

Quadro A5.4 - Coeficientes de correlação de Pearson referentes às treze digitalizações do operador “2” para a coordenada “y”.

r	Dig1	Dig2	Dig3	Dig4	Dig5	Dig6	Dig7	Dig8	Dig9	Dig10	Dig11	Dig12	Dig13
Dig1	1,000	0,995	0,989	0,899	0,986	0,936	0,988	0,993	0,985	0,988	0,939	0,981	0,974
Dig2		1,000	0,985	0,908	0,992	0,945	0,990	0,994	0,988	0,985	0,951	0,988	0,978
Dig3			1,000	0,880	0,973	0,947	0,978	0,990	0,989	0,987	0,946	0,966	0,965
Dig4				1,000	0,918	0,852	0,926	0,903	0,901	0,892	0,911	0,935	0,918
Dig5					1,000	0,938	0,989	0,983	0,974	0,984	0,943	0,991	0,968
Dig6						1,000	0,958	0,963	0,968	0,964	0,977	0,939	0,946
Dig7							1,000	0,990	0,983	0,988	0,959	0,989	0,971
Dig8								1,000	0,996	0,990	0,962	0,982	0,986
Dig9									1,000	0,985	0,971	0,977	0,986
Dig10										1,000	0,955	0,976	0,968
Dig11											1,000	0,962	0,964
Dig12												1,000	0,976
Dig13													1,000

Quadro A5.5 - Coeficientes de correlação de Pearson referentes às treze digitalizações do operador “3” para a coordenada “x”.

r	Dig1	Dig2	Dig3	Dig4	Dig5	Dig6	Dig7	Dig8	Dig9	Dig10	Dig11	Dig12	Dig13
Dig1	1,000	0,997	0,998	0,997	0,997	0,998	0,996	0,998	0,998	0,998	0,998	0,998	0,997
Dig2		1,000	0,997	0,995	0,997	0,997	0,996	0,997	0,996	0,997	0,997	0,997	0,996
Dig3			1,000	0,999	0,996	0,997	0,996	0,999	0,999	0,998	0,999	0,998	0,999
Dig4				1,000	0,995	0,997	0,993	0,998	0,998	0,997	0,998	0,996	0,998
Dig5					1,000	0,997	0,997	0,997	0,996	0,996	0,996	0,997	0,994
Dig6						1,000	0,997	0,998	0,996	0,998	0,998	0,998	0,996
Dig7							1,000	0,997	0,997	0,997	0,997	0,998	0,995
Dig8								1,000	0,998	0,998	0,999	0,998	0,998
Dig9									1,000	0,999	0,998	0,998	0,999
Dig10										1,000	0,998	0,999	0,998
Dig11											1,000	0,998	0,999
Dig12												1,000	0,997
Dig13													1,000

Quadro A5.6 - Coeficientes de correlação de Pearson referentes às treze digitalizações do operador “3” para a coordenada “y”.

r	Dig1	Dig2	Dig3	Dig4	Dig5	Dig6	Dig7	Dig8	Dig9	Dig10	Dig11	Dig12	Dig13
Dig1	1,000	0,988	0,987	0,990	0,987	0,984	0,976	0,989	0,984	0,988	0,992	0,987	0,990
Dig2		1,000	0,987	0,986	0,983	0,977	0,977	0,984	0,971	0,985	0,986	0,986	0,985
Dig3			1,000	0,993	0,988	0,979	0,985	0,988	0,983	0,996	0,991	0,995	0,989
Dig4				1,000	0,984	0,984	0,979	0,990	0,986	0,990	0,995	0,991	0,993
Dig5					1,000	0,985	0,984	0,984	0,979	0,994	0,984	0,991	0,983
Dig6						1,000	0,983	0,986	0,981	0,985	0,991	0,988	0,981
Dig7							1,000	0,990	0,980	0,988	0,985	0,993	0,977
Dig8								1,000	0,986	0,987	0,995	0,993	0,986
Dig9									1,000	0,982	0,990	0,989	0,991
Dig10										1,000	0,989	0,996	0,989
Dig11											1,000	0,993	0,992
Dig12												1,000	0,988
Dig13													1,000

Quadro A5.7 - Coeficientes de correlação de Pearson referentes às treze digitalizações do operador “4” para a coordenada “x”.

r	Dig1	Dig2	Dig3	Dig4	Dig5	Dig6	Dig7	Dig8	Dig9	Dig10	Dig11	Dig12	Dig13
Dig1	1,000	0,993	0,996	0,992	0,995	0,995	0,998	0,994	0,982	0,995	0,986	0,993	0,994
Dig2		1,000	0,995	0,991	0,992	0,997	0,995	0,994	0,988	0,993	0,981	0,992	0,994
Dig3			1,000	0,996	0,995	0,996	0,997	0,995	0,985	0,994	0,985	0,995	0,994
Dig4				1,000	0,997	0,993	0,995	0,993	0,971	0,989	0,991	0,993	0,992
Dig5					1,000	0,995	0,997	0,995	0,972	0,992	0,995	0,994	0,995
Dig6						1,000	0,997	0,998	0,986	0,995	0,987	0,992	0,995
Dig7							1,000	0,996	0,982	0,996	0,989	0,996	0,997
Dig8								1,000	0,983	0,996	0,988	0,996	0,998
Dig9									1,000	0,985	0,958	0,979	0,983
Dig10										1,000	0,982	0,995	0,996
Dig11											1,000	0,987	0,987
Dig12												1,000	0,998
Dig13													1,000

Quadro A5.8 - Coeficientes de correlação de Pearson referentes às treze digitalizações do operador “4” para a coordenada “y”.

r	Dig1	Dig2	Dig3	Dig4	Dig5	Dig6	Dig7	Dig8	Dig9	Dig10	Dig11	Dig12	Dig13
Dig1	1,000	0,981	0,983	0,974	0,986	0,981	0,994	0,980	0,854	0,981	0,899	0,972	0,981
Dig2		1,000	0,984	0,968	0,980	0,992	0,989	0,996	0,883	0,984	0,875	0,983	0,993
Dig3			1,000	0,960	0,963	0,986	0,987	0,987	0,915	0,978	0,835	0,978	0,986
Dig4				1,000	0,966	0,967	0,975	0,968	0,848	0,964	0,877	0,939	0,955
Dig5					1,000	0,976	0,984	0,975	0,803	0,965	0,941	0,970	0,979
Dig6						1,000	0,989	0,997	0,894	0,980	0,865	0,969	0,987
Dig7							1,000	0,988	0,870	0,986	0,889	0,980	0,987
Dig8								1,000	0,896	0,988	0,861	0,976	0,991
Dig9									1,000	0,888	0,576	0,858	0,880
Dig10										1,000	0,853	0,972	0,979
Dig11											1,000	0,865	0,873
Dig12												1,000	0,991
Dig13													1,000

Quadro A5.9 - Coeficientes de correlação de Pearson referentes às treze digitalizações do operador “5” para a coordenada “x”.

r	Dig1	Dig2	Dig3	Dig4	Dig5	Dig6	Dig7	Dig8	Dig9	Dig10	Dig11	Dig12	Dig13
Dig1	1,000	0,998	0,996	0,998	0,997	0,996	0,998	0,995	0,997	0,989	0,989	0,997	0,997
Dig2		1,000	0,996	0,997	0,997	0,995	0,998	0,998	0,998	0,987	0,987	0,996	0,997
Dig3			1,000	0,998	0,997	0,997	0,997	0,994	0,995	0,987	0,987	0,993	0,995
Dig4				1,000	0,998	0,997	0,998	0,995	0,996	0,992	0,992	0,997	0,997
Dig5					1,000	0,997	0,998	0,997	0,995	0,989	0,989	0,997	0,997
Dig6						1,000	0,997	0,993	0,994	0,985	0,985	0,994	0,994
Dig7							1,000	0,997	0,997	0,990	0,990	0,997	0,998
Dig8								1,000	0,997	0,987	0,987	0,997	0,998
Dig9									1,000	0,984	0,984	0,996	0,998
Dig10										1,000	1,000	0,990	0,988
Dig11											1,000	0,990	0,988
Dig12												1,000	0,998
Dig13													1,000

Quadro A5.10 - Coeficientes de correlação de Pearson referentes às treze digitalizações do operador “5” para a coordenada “y”.

r	Dig1	Dig2	Dig3	Dig4	Dig5	Dig6	Dig7	Dig8	Dig9	Dig10	Dig11	Dig12	Dig13
Dig1	1,000	0,972	0,986	0,990	0,973	0,979	0,986	0,979	0,986	0,915	0,915	0,981	0,982
Dig2		1,000	0,982	0,983	0,987	0,979	0,991	0,991	0,988	0,880	0,880	0,980	0,986
Dig3			1,000	0,996	0,980	0,983	0,992	0,981	0,984	0,924	0,924	0,976	0,984
Dig4				1,000	0,986	0,989	0,992	0,983	0,986	0,911	0,911	0,987	0,985
Dig5					1,000	0,990	0,988	0,987	0,982	0,864	0,864	0,984	0,985
Dig6						1,000	0,988	0,976	0,984	0,863	0,863	0,982	0,979
Dig7							1,000	0,988	0,992	0,906	0,906	0,984	0,993
Dig8								1,000	0,990	0,882	0,882	0,985	0,991
Dig9									1,000	0,877	0,877	0,979	0,989
Dig10										1,000	1,000	0,890	0,900
Dig11											1,000	0,890	0,900
Dig12												1,000	0,987
Dig13													1,000

Quadro A5.11 - Coeficientes de correlação de Pearson referentes às treze digitalizações do operador “6” para a coordenada “x”.

R	Dig1	Dig2	Dig3	Dig4	Dig5	Dig6	Dig7	Dig8	Dig9	Dig10	Dig11	Dig12	Dig13
Dig1	1,000	0,999	0,998	0,999	0,999	0,998	0,998	0,997	0,999	0,998	0,998	0,999	0,998
Dig2		1,000	0,996	0,999	0,998	0,999	0,998	0,996	0,999	0,998	0,998	0,999	0,998
Dig3			1,000	0,996	0,997	0,997	0,997	0,998	0,997	0,995	0,996	0,997	0,996
Dig4				1,000	0,998	0,999	0,998	0,996	0,998	0,997	0,998	0,999	0,999
Dig5					1,000	0,998	0,998	0,997	0,999	0,998	0,999	0,999	0,997
Dig6						1,000	0,998	0,997	0,998	0,997	0,998	0,999	0,998
Dig7							1,000	0,996	0,997	0,996	0,998	0,998	0,996
Dig8								1,000	0,997	0,994	0,997	0,997	0,998
Dig9									1,000	0,998	0,998	0,999	0,997
Dig10										1,000	0,998	0,998	0,997
Dig11											1,000	0,998	0,999
Dig12												1,000	0,998
Dig13													1,000

Quadro A5.12 - Coeficientes de correlação de Pearson referentes às treze digitalizações do operador “6” para a coordenada “y”.

r	Dig1	Dig2	Dig3	Dig4	Dig5	Dig6	Dig7	Dig8	Dig9	Dig10	Dig11	Dig12	Dig13
Dig1	1,000	0,995	0,979	0,994	0,991	0,993	0,984	0,988	0,996	0,984	0,990	0,993	0,987
Dig2		1,000	0,983	0,997	0,995	0,997	0,993	0,989	0,996	0,989	0,994	0,998	0,993
Dig3			1,000	0,977	0,981	0,988	0,986	0,992	0,976	0,962	0,983	0,978	0,981
Dig4				1,000	0,996	0,995	0,988	0,986	0,993	0,987	0,995	0,998	0,994
Dig5					1,000	0,994	0,993	0,986	0,990	0,989	0,997	0,995	0,995
Dig6						1,000	0,993	0,992	0,991	0,982	0,995	0,996	0,994
Dig7							1,000	0,986	0,981	0,980	0,991	0,988	0,987
Dig8								1,000	0,986	0,972	0,992	0,987	0,992
Dig9									1,000	0,989	0,990	0,994	0,990
Dig10										1,000	0,987	0,988	0,985
Dig11											1,000	0,996	0,997
Dig12												1,000	0,996
Dig13													1,000

ANEXO 6

(Quadros resumo dos erros técnicos relativos de medida na avaliação da consistência da metodologia “TACTO-MATLAB”)

Quadro A6.1 - Erro técnico relativo de medida (ETM, em %) para a coordenada “x”:
comparação entre as coordenadas obtidas na primeira digitalização e as coordenadas obtidas nas digitalizações subsequentes.

Digitalização	Operador					
	1	2	3	4	5	6
2	1,66	1,00	1,24	1,66	1,26	0,90
3	1,18	1,11	1,14	1,32	1,37	1,31
4	1,42	2,44	1,12	2,04	0,94	0,99
5	1,58	1,26	1,13	1,40	1,13	1,07
6	1,42	2,25	1,04	1,49	1,17	1,01
7	1,12	1,45	1,45	0,98	0,98	1,38
8	1,56	0,95	1,01	1,61	1,35	1,23
9	1,20	1,15	0,86	2,74	1,00	0,53
10	1,21	1,30	1,24	1,45	2,17	0,96
11	1,06	2,16	0,99	2,44	2,17	0,96
12	0,85	1,59	1,24	1,85	1,11	0,70
13	1,26	1,84	1,08	1,63	1,11	1,02
Média±DP	1,29±0,24	1,54±0,51	1,13±0,15	1,72±0,49	1,31±0,42	1,00±0,24

DP- Desvio padrão;

Quadro A6.2 - Erro técnico relativo de medida (ETM, em %) para a coordenada “y”:
comparação entre as coordenadas obtidas na primeira digitalização e as coordenadas obtidas nas digitalizações subsequentes.

Digitalização	Operador					
	1	2	3	4	5	6
2	0,99	0,47	0,71	0,80	0,94	0,50
3	0,71	0,67	0,76	0,82	0,70	0,76
4	0,82	1,77	0,69	1,07	0,56	0,49
5	0,98	0,70	0,61	0,72	0,92	0,53
6	0,90	1,61	0,80	0,80	0,84	0,53
7	0,53	0,62	0,81	0,48	0,67	0,70
8	0,94	0,50	0,65	0,81	0,82	0,60
9	0,70	0,70	0,74	2,30	0,70	0,32
10	0,87	0,67	0,79	0,80	1,63	0,69
11	0,71	1,40	0,52	1,79	1,63	0,54
12	0,54	0,79	0,64	0,96	0,84	0,47
13	0,62	0,94	0,80	0,79	0,77	0,64
Média±DP	0,78±0,16	0,90±0,44	0,71±0,09	1,01±0,51	0,92±0,35	0,56±0,12

DP- Desvio padrão;

Quadro A6.3 - Distâncias totais (acumuladas, em m) em cada digitalização e ETM (em %).

Digitalização	Operador					
	1	2	3	4	5	6
1	30,19	34,05	29,32	32,15	33,34	27,81
2	30,35	31,87	32,80	32,24	33,38	30,44
3	29,90	33,48	30,95	30,13	32,65	29,50
4	29,97	35,46	30,84	30,83	31,33	30,86
5	31,63	34,02	29,69	29,91	31,11	30,58
6	31,90	36,53	32,13	29,39	33,21	30,36
7	29,79	33,23	30,38	31,87	31,27	32,16
8	28,85	33,67	30,06	30,23	31,63	29,76
9	29,21	34,81	29,36	31,61	32,42	28,14
10	31,43	32,63	32,29	33,34	31,48	29,90
11	31,99	32,28	30,38	31,24	31,48	29,79
12	28,51	32,97	29,79	31,34	31,57	29,72
13	29,56	32,76	31,61	31,40	31,38	30,04
ETM (%)	3,86	4,38	3,85	3,65	2,85	3,68