



INSTITUTO
UNIVERSITÁRIO
DE LISBOA

Análise do desempenho tático de equipas de andebol
utilizando coordenadas contextuais e medidas de sincronismo

Rita Guerreiro de Moraes

Mestrado em Informática e Gestão

Orientador:

Doutor Ricardo Daniel Santos Faro Marques Ribeiro, Professor
Associado, Iscte – Instituto Universitário de Lisboa

Co-Orientador:

Doutor Rui Jorge Henriques Calado Lopes, Professor Associado,
Iscte – Instituto Universitário de Lisboa

Outubro, 2024



TECHNOLOGY
AND ARCHITECTURE

Departamento de Ciências e Tecnologias da Informação

Análise do desempenho tático de equipas de andebol
utilizando coordenadas contextuais e medidas de sincronismo

Rita Guerreiro de Moraes

Mestrado em Informática e Gestão

Orientador:

Doutor Ricardo Daniel Santos Faro Marques Ribeiro, Professor
Associado, Iscte - Instituto Universitário de Lisboa

Co-Orientador:

Doutor Rui Jorge Henriques Calado Lopes, Professor Associado,
Iscte - Instituto Universitário de Lisboa

Outubro, 2024

Agradecimentos

A realização desta dissertação resulta de muitas horas de trabalho e, apesar de assinada por mim, não pode ser dissociada de todos aqueles que, de forma direta ou indireta, se cruzaram no meu caminho. A todos, estarei eternamente grata.

Aos meus orientadores, Professores Ricardo Ribeiro e Rui Lopes, pelo conhecimento transmitido, pela ajuda e pela paciência ao longo deste último ano. Sei que nem sempre foi fácil.

À Professora Anna Volossovitch e ao Diogo Marques, pela disponibilização dos dados necessários para a realização deste trabalho, bem como pela ajuda e total disponibilidade durante todo o processo.

À minha família, a quem, além de agradecer, tenho também que pedir desculpa: desculpa pela ausência dos últimos anos, pelos aniversários falhados e pelas visitas menos frequentes. Joana, mãe e pai, nada disto teria sido possível sem vocês. Às minhas avós, pelo apoio incondicional que sempre me deram, pelas chamadas religiosamente marcadas para as quatro da tarde de sábado e pelas mensagens de domingo à noite, um bocadinho dessa força está também representado nestas 125 páginas.

Ao Simão, por ser a casa que tive de deixar nos últimos anos e por tornar tudo um pouco mais fácil.

Aos meus amigos de sempre e às suas famílias (que, na verdade, considero também meus amigos), tudo o que sou e faço é e será sempre um pouco deles. De todos. Sem exceções.

Por último, mas igualmente importante, aos amigos que o Iscte me deu e que viveram estes anos ao meu lado. Aprendi muito com cada um deles e levarei sempre isso comigo.

A todos, obrigada por terem feito parte desta bonita jornada.

Resumo

Esta dissertação propõe a comparação entre dois sistemas de coordenadas para analisar o desempenho tático no andebol, focando-se em situações de defesa individual e defesa à zona. O sistema cartesiano tradicional (coordenadas X e Y) é confrontado com um novo sistema que considera a distância e o ângulo em relação às balizas, proporcionando uma análise mais detalhada e orientada para a modalidade. A investigação segue a metodologia CRISP-DM, organizada em três iterações.

Na primeira iteração, foram utilizados mapas térmicos para avaliar o posicionamento dos jogadores, comparando como cada sistema representa as suas movimentações. Na segunda iteração, a análise centrou-se no sincronismo entre jogadores adversários diretos e não diretos, aplicando a Transformada de *Hilbert* para avaliar a coordenação das fases de movimento. Na terceira iteração, foi introduzida a decomposição dos sinais através da *Empirical Mode Decomposition* (EMD), permitindo uma análise detalhada dos movimentos em várias escalas temporais.

Os resultados evidenciam que o novo sistema de coordenadas, ao medir a distância e o ângulo em relação às balizas, oferece uma visão mais precisa e taticamente relevante, especialmente em defesas à zona, onde a proximidade à baliza é crucial. Em contraste, o sistema cartesiano revelou limitações ao avaliar nuances importantes da dinâmica do jogo. Apesar dos avanços, desafios técnicos surgiram na aplicação de algumas metodologias, como a Transformada de *Hilbert* e a decomposição de sinais, exigindo aperfeiçoamentos futuros para aumentar a eficiência e precisão da análise.

PALAVRAS CHAVE: *Análise de Desempenho em Andebol, Sistemas Táticos, Sistema de Coordenadas, Sincronismo, Transformada de Hilbert, Decomposição Empírica de Modos*

Abstract

This dissertation proposes a comparison between two coordinate systems to analyze tactical performance in handball, focusing on individual and zone defense scenarios. The traditional Cartesian system (X and Y coordinates) is contrasted with a new system that considers the distance and angle relative to the goals, offering a more detailed and sport-specific analysis. The research follows the CRISP-DM methodology, structured into three iterations.

In the first iteration, heat maps were used to evaluate player positioning, comparing how each system represents their movements. In the second iteration, the focus was on the synchrony between direct and indirect opposing players, applying the Hilbert Transform to assess the coordination of movement phases. In the third iteration, signal decomposition through the Empirical Mode Decomposition (EMD) was introduced, allowing for a detailed analysis of movements across various time scales.

The results show that the new coordinate system, by measuring the distance and angle relative to the goals, provides a more accurate and tactically relevant insight, especially in zone defenses, where proximity to the goal is crucial. In contrast, the Cartesian system showed limitations in assessing important nuances of game dynamics. Despite these advances, technical challenges emerged in applying some methodologies, such as the Hilbert Transform and signal decomposition, which require further refinement to improve the efficiency and accuracy of the analysis.

KEYWORDS: Performance Analysis in Handball, Tactical Systems, Coordinate System, Synchronisation, Hilbert Transform, Empirical Mode Decomposition

Conteúdo

Agradecimentos	i
Resumo	iii
Abstract	v
Lista de Figuras	ix
Lista de Tabelas	xiii
Lista de Acrónimos	xv
Capítulo 1. Introdução	1
1.1. Enquadramento e Motivação	1
1.2. Problema	2
1.3. Questões de Investigação	2
1.4. Metodologia	3
1.5. Estrutura da Dissertação	3
Capítulo 2. Estado da Arte	5
2.1. Introdução ao Estado da Arte	5
2.1.1. Objetivos de Pesquisa	5
2.1.2. <i>Keywords</i> e <i>Search String</i>	6
2.1.3. Critério de Seleção	7
2.1.4. Resultados	7
2.1.5. Extração de Resultados	9
2.2. Revisão da Literatura	10
2.2.1. Desporto de Equipa	10
2.2.2. Recolha de Dados em Contexto Desportivo	11
2.2.3. Métricas de Desempenho em Contexto Desportivo	13
2.2.4. Métodos de Aprendizagem Automática	14
Capítulo 3. Descrição e Execução do Processo CRISP-DM	17
3.1. Introdução à Metodologia	17
3.2. Descrição e Aplicação da Metodologia CRISP-DM	17
3.3. Execução do Processo CRISP-DM	19
3.3.1. Primeira Iteração - Mapas Térmicos	19
3.3.2. Segunda Iteração - Análise Sincronismo	31
	vii

3.3.3. Terceira Iteração - Decomposição Empírica do Sinal em Modos	39
Capítulo 4. Conclusões e Trabalho Futuro	53
4.1. Questões de Investigação	53
4.2. Implementação	55
4.3. Conclusões Finais	55
4.3.1. Análise Tática	56
4.3.2. Sincronismo	56
4.3.3. Adversários Diretos <i>vs.</i> Não Diretos	56
4.3.4. Tipos de Defesa	56
4.3.5. EMD e Sincronismo em Diferentes Escalas Temporais	57
4.3.6. Limitações e Desafios	57
4.4. Trabalho Futuro	58
4.4.1. Aplicação do Novo Sistema em Diferentes Contextos	58
4.4.2. Incorporação de Mais Jogadores e Variáveis	58
4.4.3. Integração com Outros Métodos de Análise de Performance	58
4.4.4. Proposta à Federação de Andebol de Portugal	58
4.4.5. Expansão para Outros Escalões	59
4.4.6. Aplicações em Outras Modalidades Desportivas	59
Referências	61
Anexo A. Implementação - Análise de Comportamento de Jogadores	65
A.1. Jogo 1: Sporting vs. Sassoeiros	65
A.1.1. Análise via Mapas Térmicos	65
A.1.2. Análise de Sincronismo	70
A.1.3. Análise do Sincronismo via EMD	75
A.2. Jogo 2: Sporting vs. Queijas	94
A.2.1. Análise via Mapas Térmicos	94
A.2.2. Análise de Sincronismo	100
Anexo B. Comentários dos Especialistas ao Anexo A	105

Lista de Figuras

Figure 2.1	Metodologia da Revisão Sistemática da Literatura	5
Figure 2.2	Distribuição de Artigos por Ano	8
Figure 2.3	Comprimento (a) e Largura (b).	13
Figure 2.4	Área Ocupada A e Índice de Alongamento B).	14
Figure 3.1	Diagrama da Metodologia CRISP-DM	18
Figure 3.2	Comparação das Dimensões dos Campos	19
Figure 3.3	Ficheiro Excel dos Dados Recolhidos	21
Figure 3.4	Comparação dos Sistemas de Coordenadas	24
Figure 3.5	Mapas Térmicos do Sistema Regular - Adversários Diretos	26
Figure 3.6	Mapas Térmicos do Novo Sistema em Relação à Baliza 0 - Adversários Diretos	27
Figure 3.7	Mapas Térmicos do Sistema Regular - Adversários Indiretos	27
Figure 3.8	Mapas Térmicos do Novo Sistema em Relação à Baliza 0 - Adversários Indiretos	28
Figure 3.9	Mapas Térmicos do Sistema Regular - Par Próximo	29
Figure 3.10	Mapas Térmicos do Novo Sistema em Relação à Baliza 0 - Par Próximo	29
Figure 3.11	Mapas Térmicos do Sistema Regular - Par Afastado	30
Figure 3.12	Mapas Térmicos do Novo Sistema em Relação à Baliza 0 - Par Afastado	30
Figure 3.13	Comparação de Sistemas - Jogo 1 - Adversários Diretos	36
Figure 3.14	Comparação de Sistemas - Jogo 1 - Adversários Indiretos	37
Figure 3.15	Comparação de Sistemas - Jogo 2 - Adversários Próximos	38
Figure 3.16	Comparação de Sistemas - Jogo 2 - Adversários Afastados	38
Figure 3.17	IMF dos Diferentes Modos para Distância à Baliza 0	43
Figure 3.18	Fase de Distância para Distância à Baliza 0	44
Figure 3.19	Sincronismo para Distância à Baliza 0	44
Figure 3.20	IMF dos Diferentes Modos para Ângulo à Baliza 0	45
Figure 3.21	Fase de Ângulo para Distância à Baliza 0	46
Figure 3.22	Sincronismo para Ângulo à Baliza 0	46
Figure 3.23	IMF dos Diferentes Modos para a Coordenada X	47

Figure 3.24	Fase - Coordenada X	48
Figure 3.25	Sincronismo - Coordenada X	48
Figure 3.26	IMF dos Diferentes Modos para a Coordenada Y	49
Figure 3.27	Fase - Coordenada Y	50
Figure 3.28	Sincronismo - Coordenada Y	50
Figure A.1	Adversários Diretos - Sistema de Coordenadas X,Y	65
Figure A.2	Adversários Diretos (Baliza 0) - Novo Sistema	66
Figure A.3	Adversários Diretos (Baliza 1) - Novo Sistema	67
Figure A.4	Adversários Indiretos - Sistema Coordenadas (X,Y)	68
Figure A.5	Adversários Indiretos (Baliza 0) - Novo Sistema	69
Figure A.6	Adversários Indiretos (Baliza 1) - Novo Sistema	69
Figure A.7	Sincronismo Adversários Diretos - Baliza 0	70
Figure A.8	Sincronismo Adversários Indiretos - Baliza 0	73
Figure A.9	IMF dos Diferentes Modos para Distância à Baliza 0	76
Figure A.10	Fase e Sincronismo Distância à Baliza 0 - IMF 1	77
Figure A.11	Fase e Sincronismo Distância à Baliza 0 - IMF 2	77
Figure A.12	Fase e Sincronismo Distância à Baliza 0 - IMF 3	77
Figure A.13	Fase e Sincronismo Distância à Baliza 0 - IMF 4	78
Figure A.14	Fase e Sincronismo Distância à Baliza 0 - IMF 5	78
Figure A.15	Fase e Sincronismo Distância à Baliza 0 - IMF 6	78
Figure A.16	Fase e Sincronismo Distância à Baliza 0 - IMF 7	79
Figure A.17	IMF dos Diferentes Modos para Ângulo à Baliza 0	81
Figure A.18	Fase e Sincronismo Ângulo à Baliza 0 - IMF 1	82
Figure A.19	Fase e Sincronismo Ângulo à Baliza 0 - IMF 2	82
Figure A.20	Fase e Sincronismo Ângulo à Baliza 0 - IMF 3	82
Figure A.21	Fase e Sincronismo Ângulo à Baliza 0 - IMF 4	83
Figure A.22	Fase e Sincronismo Ângulo à Baliza 0 - IMF 5	83
Figure A.23	Fase e Sincronismo Ângulo à Baliza 0 - IMF 6	83
Figure A.24	IMF dos Diferentes Modos para Coordenada Longitudinal (X)	85
Figure A.25	Fase e Sincronismo Coordenada Longitudinal (X) - IMF 1	86
Figure A.26	Fase e Sincronismo Coordenada Longitudinal (X) - IMF 2	86
Figure A.27	Fase e Sincronismo Coordenada Longitudinal (X) - IMF 3	86
Figure A.28	Fase e Sincronismo Coordenada Longitudinal (X) - IMF 4	87
Figure A.29	Fase e Sincronismo Coordenada Longitudinal (X) - IMF 5	87

Figure A.30	Fase e Sincronismo Coordenada Longitudinal (X) - IMF 6	87
Figure A.31	Fase e Sincronismo Coordenada Longitudinal (X) - IMF 7	88
Figure A.32	IMF dos Diferentes Modos para Coordenada Lateral (Y)	90
Figure A.33	Fase e Sincronismo Coordenada Lateral (Y) - IMF 1	91
Figure A.34	Fase e Sincronismo Coordenada Lateral (Y) - IMF 2	91
Figure A.35	Fase e Sincronismo Coordenada Lateral (Y) - IMF 3	91
Figure A.36	Fase e Sincronismo Coordenada Lateral (Y) - IMF 4	92
Figure A.37	Fase e Sincronismo Coordenada Lateral (Y) - IMF 5	92
Figure A.38	Fase e Sincronismo Coordenada Lateral (Y) - IMF 6	92
Figure A.39	Fase e Sincronismo Coordenada Lateral (Y) - IMF 7	93
Figure A.40	Par Próximo - Sistema de Coordenadas X,Y	94
Figure A.41	Par Próximo (Baliza 0) - Novo Sistema	95
Figure A.42	Par Próximo (Baliza 1) - Novo Sistema	96
Figure A.43	Par Afastado - Sistema de Coordenadas X,Y	97
Figure A.44	Par Afastado (Baliza 0) - Novo Sistema	98
Figure A.45	Par Afastado (Baliza 1) - Novo Sistema	99
Figure A.46	Comparação de Sistemas - Jogo 2 - Par Próximo	100
Figure A.47	Comparação de Sistemas - Jogo 2 - Par Afastado	101

Lista de Tabelas

Table 2.1	Critérios de Inclusão e Exclusão	7
Table 2.2	Critérios Utilizados na Primeira Fase da Pesquisa	7
Table 2.3	Resultado dos Critérios de Exclusão	8
Table 2.4	Total de Artigos no Final de Cada Fase	9
Table 2.5	Distribuição de Artigos por Modalidade	10
Table 2.6	Distribuição de Artigos por Escalão	10
Table A.1	Atributos Jogo 1: Sporting vs. Sassoeiros	65
Table A.2	Atributos Jogo 2: Sporting vs. Queijas	94

Lista de Acrónimos

ANN: *Artificial Neural Networks*

CE: Critérios de Exclusão

CI: Critérios de Inclusão

CRISP-DM: *Cross Industry Standard Process for Data Mining*

DSR: *Design Science Research*

EMD: *Empirical Mode Decomposition*

FAUPA-ML: *Framework for Automatic Upscaled Performance Analysis with Machine Learning*

GPS: *Global Positioning System*

IA: Inteligência Artificial

IMF: *Intrinsic Mode Function*

IMU: *Inertial Measurement Unit*

IoT: *Internet of Things*

RFE: *Recursive Feature Elimination*

RSL: Revisão Sistemática da Literatura

SVR: *Support Vector Regression*

UWB: Ultra-Wideband

VSURF: *Variable Selection Using Random Forest*

WIMU: *Wireless Inertial Measurement Unit*

CAPÍTULO 1

Introdução

1.1. Enquadramento e Motivação

O andebol, enquanto desporto dinâmico e estratégico, desafia constantemente as perceções convencionais de desempenho atlético. A complexidade intrínseca do jogo, que envolve a interação entre as habilidades individuais dos jogadores e a coordenação tática da equipa, suscita um interesse crescente na compreensão aprofundada do seu rendimento. Apesar do grande avanço tecnológico no mundo do desporto, a modalidade de andebol permanece em Portugal como uma área pouco explorada. O crescimento recente da modalidade, impulsionado pelos resultados notáveis tanto da equipa sénior como das equipas de sub20 e sub21 nos últimos campeonatos da Europa e Mundiais (2020-2024), destacadamente o 6^o lugar no Europeu de 2020, o 2^o lugar no Europeu de sub20 em 2022 e o 6^o lugar no Mundial de sub21 em 2023, não tem sido acompanhado por uma atenção académica proporcional, sendo que a exploração de dados posicionais emerge como uma ferramenta inovadora e promissora para analisar e interpretar a vasta quantidade de dados gerados durante os jogos, identificando padrões de movimento e promovendo correções para melhorar o desempenho tático das equipas. [1].

A motivação para esta pesquisa decorre desse crescimento tanto da modalidade de andebol quanto do mundo da tecnologia e análise de dados. Cada vez mais, há melhores e mais abrangentes recolhas de dados relacionadas com esta modalidade, o que, aliado ao crescente interesse na mesma, representa uma excelente oportunidade para explorar. Deste modo, com esta pesquisa, pretendo contribuir para a análise do desempenho no andebol, desenvolvendo um novo sistema de coordenadas, exclusivo para a modalidade, que tenha em consideração as regras específicas do jogo, bem como analisar o posicionamento dos jogadores e identificar as diferenças entre sistemas defensivos, como a defesa individual e a defesa zona. Esta análise tem como objetivo auxiliar os treinadores na adaptação de estratégias e posicionamentos para melhorar o desempenho das suas equipas.

A análise de desempenho em desportos de equipa implica a exploração de diferentes tipos de variáveis técnicas, táticas e condicionais representando um desafio na concretização de um processo de modelação que permita a compreensão global do comportamento de uma equipa [2]. No entanto, torna-se cada vez mais crucial realizar essa análise, pois proporciona conhecimento fundamental sobre estratégias eficazes, padrões de jogo e interações entre membros da mesma equipa e com adversários. A aquisição deste conhecimento permite ao treinador aprimorar abordagens de treino, tanto técnica como taticamente, contribuindo assim para a maximização do potencial da equipa [3]. Apesar de a utilidade deste conhecimento ser transversal a todas as modalidades e escalões, destaca-se, na

modalidade do andebol, um crescimento significativo na identificação de indicadores de desempenho nos últimos 6 anos [4].

A implementação de novas tecnologias no setor desportivo, como sistemas de acompanhamento da linha de golo, monitorização do desempenho dos jogadores através de dispositivos como os *Wearable Inertial Measurement Unit* (WIMU), e arbitragem assistida por vídeo, tem conduzido a uma modernização significativa em várias modalidades. Estas tecnologias envolvem a instalação de um grande número de câmaras à volta do campo desportivo e/ou outros dispositivos eletromecânicos. A monitorização do desempenho dos jogadores e outras estatísticas relacionadas com o jogo era uma tarefa difícil para os diretores das equipas e treinadores até há alguns anos. No entanto, a introdução de tecnologias como a Inteligência Artificial (IA) e a *Internet of Things* (IoT) trouxe várias mudanças na forma como os jogos são acompanhados e desfrutados pelos adeptos. A IoT simplifica a recolha de dados, tornando-a mais conveniente ao permitir a obtenção de grandes volumes de informações em tempo real através de diversos sensores, enquanto a IA facilita a realização de previsões através de algoritmos eficazes de aprendizagem automática [5].

1.2. Problema

Apesar do enorme desenvolvimento tecnológico que se tem vindo a verificar no mundo do desporto, a modalidade de andebol permanece em Portugal como uma área pouco explorada. No que diz respeito aos escalões jovens, a escassez de informação é ainda mais evidente. É precisamente a partir destas faixas etárias mais jovens que os atletas devem iniciar o desenvolvimento e ser dada atenção ao seu desempenho, tanto a nível coletivo como individual. Esta preparação desde cedo é crucial para assegurar que, ao atingirem o escalão sénior, os jogadores estejam devidamente preparados.

No entanto, é importante sublinhar que a ausência de estudos específicos sobre o andebol jovem oferece uma oportunidade valiosa para uma análise mais aprofundada no tema. A pesquisa nessa área pode não só preencher lacunas de conhecimento, como também desempenhar um papel fundamental na otimização dos métodos de treino, contribuindo assim para promover um crescimento mais sólido e sustentável do andebol em Portugal, algo em que a Federação de Andebol de Portugal tem demonstrado bastante interesse recentemente.

1.3. Questões de Investigação

Desta forma, podemos concluir que ainda existem lacunas na análise de desempenho, sobretudo ao nível tático, em modalidades como o andebol, especialmente nos escalões jovens. Por este motivo, foram delineadas três questões de investigação que se revelam pertinentes e que se pretende explorar ao longo da investigação.

Assim, definiram-se as seguintes questões de investigação (Q):

Q1 Com base na topologia do espaço de jogo, v.g. área restritiva, como definir um sistema de coordenadas mais adaptado à análise de desempenho?

- Q2 Quais as vantagens e desvantagens de utilizar diferentes técnicas de análise de sincronismo entre jogadores para avaliar o desempenho tático no andebol?
- Q3 De que forma as técnicas de análise de sincronismo entre jogadores no andebol podem contribuir para a compreensão de como o desempenho tático varia em função do tipo de defesa (individual ou à zona) e do escalão dos jogadores?

1.4. Metodologia

O *Cross Industry Standard Process for Data Mining* (CRISPM-DM) é uma metodologia reconhecida para orientar projetos de mineração de dados. O seu propósito é guiar o processo de mineração de dados, desde a compreensão do problema até à implementação de soluções eficazes. Além disso, a sua abordagem estruturada e iterativa é particularmente valiosa para ajudar a responder às questões de investigação propostas. Para a presente dissertação, foi utilizada esta metodologia devido à sua adaptação à natureza complexa da análise do desempenho tático em equipas de andebol.

Esta metodologia apresenta seis fases que serão exploradas ao longo desta investigação.

- **Compreensão do Problema:** onde será efetuada a exploração do contexto do andebol, a identificação de objetivos de análise tática e a compreensão das necessidades específicas de treinadores e analistas.
- **Compreensão dos Dados:** onde será realizado o levantamento e avaliação dos dados disponíveis, incluindo estatísticas de jogadores e informações táticas, explicando-se o contexto desses dados, a sua origem, natureza e relevância para o estudo.
- **Preparação dos Dados:** onde se efetuará a limpeza, integração e transformação dos dados para criar um conjunto de dados coeso e apto para análise.
- **Modelação:** onde será implementado um novo sistema de coordenadas específico para o andebol, considerando as restrições do jogo. Serão gerados mapas térmicos para comparar os dois sistemas de coordenadas, analisado o sincronismo entre jogadores através da Transformada de *Hilbert*, e será utilizada a Decomposição Empírica de Modos para explorar diferentes escalas temporais dos movimentos.
- **Avaliação:** onde será realizada uma avaliação rigorosa dos modelos desenvolvidos, considerando métricas específicas do desempenho tático no andebol e ajustes necessários para otimização.
- **Implementação:** onde se realizará a integração das perceções e dos resultados obtidos com a análise tática nos processos de treino e estratégias da equipa. Além disso, será elaborado um relatório detalhado com os resultados, que será enviado a um especialista para validação e discussão de possíveis melhorias.

1.5. Estrutura da Dissertação

No âmbito desta dissertação, a estrutura adotada segue uma abordagem sequencial, proporcionando uma compreensão clara e organizada do tema em análise. O trabalho

encontra-se dividido em quatro capítulos distintos: Introdução, Estado da Arte, Descrição e Execução do Processo CRISP-DM e Conclusões e Trabalho Futuro.

No presente capítulo introdutório, efetua-se um enquadramento ao tema, apresenta-se um resumo da metodologia utilizada e definem-se as questões de investigação que são abordadas ao longo da dissertação.

No Estado da Arte, apresenta-se o conhecimento já existente nos temas relevantes para esta investigação, com destaque para a análise dos métodos utilizados na recolha de dados em contexto desportivo, as métricas de desempenho e os métodos de aprendizagem automática, recorrendo à Revisão Sistemática da Literatura (RSL) como metodologia para a sua elaboração.

No capítulo dedicado à Descrição e Execução do Processo CRISP-DM, detalha-se a abordagem escolhida para esta investigação, o CRISP-DM, e faz-se uma referência a outra metodologia, explicando o motivo da sua não utilização no presente trabalho. Além disso, descrevem-se as várias fases e iterações realizadas de acordo com o contexto do problema em estudo. Cada iteração corresponde a um objeto de análise específico, passando por todas as etapas do ciclo do CRISP-DM, a partir das quais se extraem as respetivas conclusões.

Finalmente, no capítulo das Conclusões e Trabalho Futuro, são discutidos os principais resultados e implicações das análises realizadas ao longo do trabalho, avaliando o sucesso da metodologia aplicada e os sistemas de coordenadas utilizados. São também propostas direções para investigações futuras, com sugestões de como expandir a análise e aplicar os resultados obtidos em contextos mais abrangentes.

CAPÍTULO 2

Estado da Arte

2.1. Introdução ao Estado da Arte

Para a realização desta secção foi necessária efetuar uma revisão sistemática da literatura. Deste modo, para realizar a mesma optou-se por adotar a metodologia revisão sistemática da literatura (RSL), seguindo os princípios delineados por Kitchenham [6]. A realização de uma RSL implica a execução de diversas atividades distintas, estruturadas em fases essenciais que serão exploradas nesta secção. Estas etapas principais são o Planeamento da Revisão, Condução da Revisão e Reporte da Revisão [6]. A Figura 2.1 representa o esquema destas três fases.

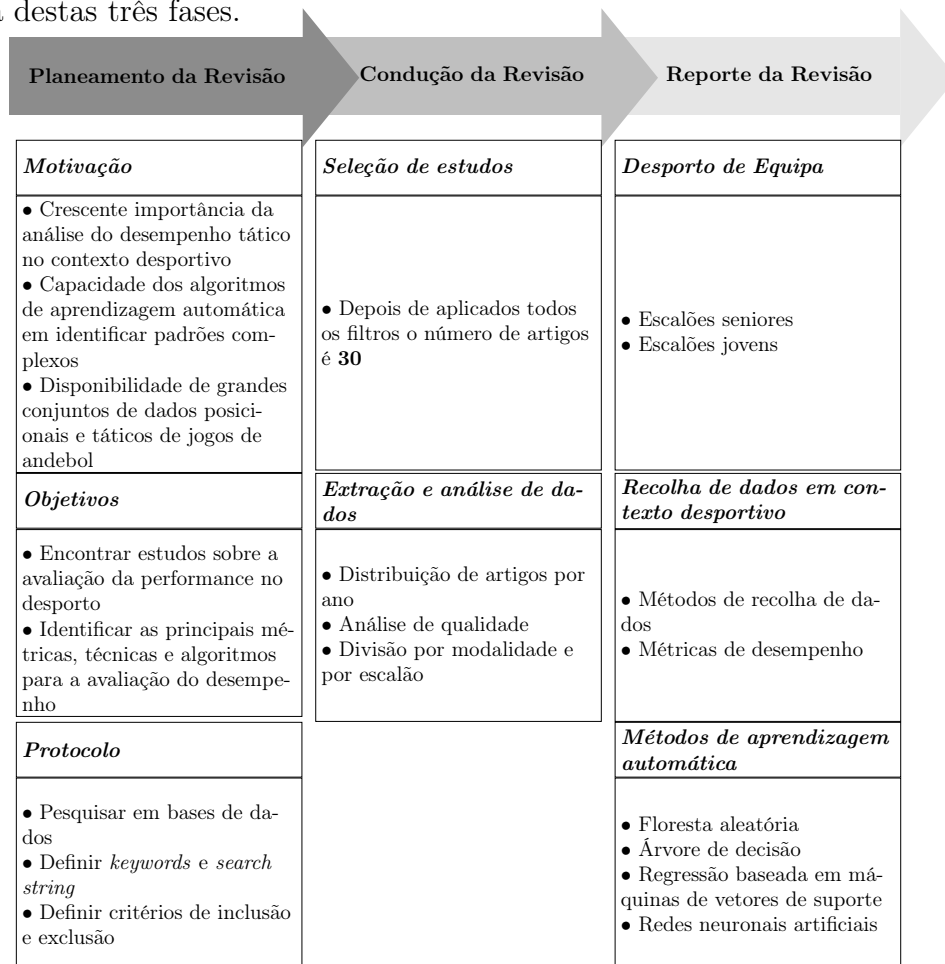


FIGURA 2.1. Metodologia da Revisão Sistemática da Literatura

2.1.1. Objetivos de Pesquisa

Nesta revisão, o objetivo inicial passava por compreender o que já havia sido explorado na análise de desempenho da modalidade de andebol em escalões jovens. Contudo, tornou-se

evidente que essa área estava pouco explorada e a falta de conteúdo significativo impossibilitou a realização desta revisão com um tema tão específico. Por essa razão, foi necessário ampliar a pesquisa para diversas modalidades e escalões, e, nesse contexto, foram estabelecidos os seguintes objetivos:

- Encontrar estudos sobre a avaliação do desempenho no desporto;
- Identificar dispositivos utilizados para a recolha de dados;
- Identificar métricas e técnicas para a avaliação do desempenho no desporto (com especial foco no andebol);
- Perceber como o fator idade influencia o desempenho no desporto (com especial foco no andebol).

2.1.2. *Keywords e Search String*

Numa fase inicial, com o intuito de aprimorar a *search string* final para garantir a filtragem dos resultados mais relevantes para o estudo, foram conduzidas várias experiências. Inicialmente, ao tentar utilizar as *keywords* “*Youth*” e “*Handball*” para o estudo do desempenho no andebol das camadas jovens, verificou-se que, quando utilizadas em conjunto ou apenas a palavra “*Youth*”, não foram obtidos resultados. Por outro lado, ao utilizar apenas a palavra “*Handball*”, a pesquisa resultou numa lista com apenas dez artigos.

Ficou evidente que o andebol em escalões de formação é um tema pouco explorado, motivando a expansão da pesquisa para diversas modalidades. Essa expansão deve-se ao facto de que os resultados obtidos são transversais, podendo ser facilmente generalizados e aplicados ao contexto do andebol.

A *search string* foi cuidadosamente concebida para abranger três fatores essenciais nesta revisão: técnicas, foco e domínio. A opção pelo uso do operador lógico “*AND*” entre esses fatores fundamentou-se na necessidade de restringir os resultados às ocorrências que atendem simultaneamente a todos esses critérios. Ao utilizar “*AND*”, a pesquisa foi refinada para incluir apenas informações que abrangessem todas as dimensões especificadas: técnicas, foco e domínio. Adicionalmente, o operador lógico “*OR*” foi estrategicamente incorporado para ampliar os resultados da pesquisa. Isso significa que, ao utilizar “*OR*”, a pesquisa passou a incluir informações que abordassem qualquer uma das características especificadas, mesmo que não necessariamente todas em simultâneo. Essa abordagem mais abrangente permitiu a inclusão de dados relevantes para a revisão, mesmo que não cumprissem todos os critérios. Portanto, a combinação de “*AND*” e “*OR*” proporcionou uma estratégia de pesquisa equilibrada, focada e abrangente.

Foram utilizadas as seguintes *keywords* para a *search string*:

KW1: Técnicas

Machine Learning OR Data Mining OR Artificial Intelligence

KW2: Foco

Performance

KW3: Domínio

Team Sport OR Handball

Como resultado foi obtida a seguinte *search string*: (“Machine Learning” OR “Data Mining” OR “Artificial Intelligence”) AND “Performance” AND (“Team Sport” OR “Handball”).

2.1.3. Critério de Seleção

Numa primeira fase a *search string* foi utilizada nas bases de dados *Scopus*, *Web of Science* e *ACM Digital Library* e foram aplicados critérios de inclusão e de exclusão. Os critérios de inclusão foram estabelecidos para determinar quais as características essenciais nos resultados, estes visam garantir a relevância direta ao tema investigado. Por outro lado, os critérios de exclusão foram aplicados para filtrar resultados indesejados, eliminando informações não pertinentes, aprimorando assim a precisão e o foco da pesquisa. Essa abordagem deliberada permitiu otimizar a procura de informações relevantes e significativas para a revisão.

Os critérios de inclusão (CI) e exclusão (CE) utilizados encontram-se descritos na Tabela 2.1.

TABELA 2.1. Critérios de Inclusão e Exclusão

Critério	Motivo
CI1	Artigos publicados após 2017
CI2	Artigos recomendados por especialistas
CI3	Artigos e conferências
CE4	Artigos não escritos em inglês
CE5	Artigos duplicados
CE6	Artigos que não atendem aos objetivos da revisão

2.1.4. Resultados

Numa primeira fase procurou-se pesquisar nas bases de dados já descritas com o critério de “Todos os campos”, que gerou um somatório de 2595 artigos entre as três bases de dados (Tabela 2.2). Com o objetivo de reduzir esse número procurou-se perceber em quais desses as *keywords* estavam presentes no *Abstract*, o que reduziu significativamente a pesquisa para 59 artigos (Tabela 2.2). Para além disso, procurou-se limitar os artigos aos escritos em inglês e que teriam uma data posterior a 2017. No fim desta pesquisa o resultado foram 54 artigos (Tabela 2.2).

TABELA 2.2. Critérios Utilizados na Primeira Fase da Pesquisa

Bases de dados	Todos os campos	Abstract	Inglês	>2017
Scopus	2454	44	43	40
ACM Digital Library	94	1	1	1
Web of Science	47	14	14	13
Total	2595	59	58	54

O último critério utilizado na Tabela 2.2 (>2017) tem como objetivo garantir que os artigos que serão utilizados nesta revisão estão em sintonia com a evolução constante da tecnologia. Nos últimos anos, assistimos a rápidas mudanças e inovações no campo tecnológico, tornando crucial que os estudos reflitam as tendências mais recentes [5]. Para contextualizar temporalmente todos os artigos que resultaram desta primeira fase de pesquisa a Figura 2.2 representa a distribuição de artigos por ano.

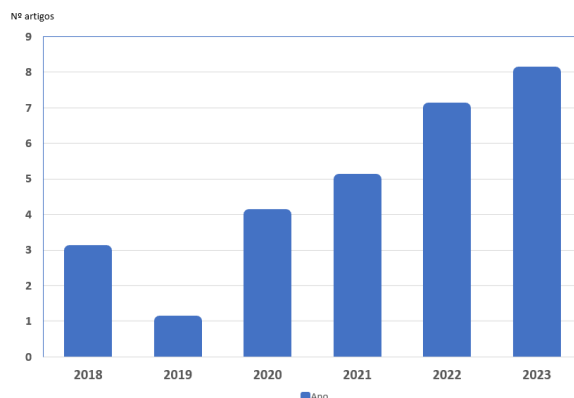


FIGURA 2.2. Distribuição de Artigos por Ano

Numa segunda fase foi necessário executar uma revisão manual para eliminar duplicados e artigos que pudessem não ser relevantes para os objetivos da revisão. Foram encontrados 14 duplicados e eliminados 12 artigos não relevantes, o que fez um total de 28 artigos relevantes nesta fase (Tabela 2.3a).

TABELA 2.3. Resultado dos Critérios de Exclusão

(A) Segunda fase

Base de Dados	Duplicados	Manual ^a
Scopus	0	12
ACM Digital Library	1	0
Web of Science	13	0
Total	14	12

^aArtigos não relevantes para a pesquisa.

(B) Terceira fase

Quartil	Quantidade
Q1	11
Q2	5
Q3	1
Q4	4
Total eliminados: 5	

A partir do conjunto de 28 artigos obtidos, considerou-se relevante aplicar um filtro de controlo de qualidade. Nesse sentido, foram excluídos os artigos que segundo o portal Scimago¹ não atendiam ao quartil de qualidade Q1 ou Q2. A decisão de incluir também artigos presentes no quartil Q2 fundamentou-se no facto de que ser publicado numa dessas bases de dados por si só já indica um elevado padrão de qualidade. Portanto, excluir artigos Q2 poderia resultar na eliminação de contribuições valiosas e úteis para esta pesquisa. O número de artigos associado a cada grau de qualidade e consequente número de artigos excluídos nesta fase encontra-se representado na Tabela 2.3b.

¹<https://www.scimagojr.com/>

Nesta terceira fase foi ainda avaliada a qualidade das conferências através do *Conference portal*.² Considerou-se de elevada qualidade as conferências listadas no portal, uma vez que este apenas apresenta um total de 803 eventos deste género. Destacar o facto de que, dos 28 artigos analisados, 7 estavam associados a conferências, sendo que apenas uma delas estava avaliada no portal referido [1]. Contudo, dado o rigoroso critério de qualidade necessário para figurar na lista do portal, optou-se por realizar uma revisão manual das conferências em questão, a fim de determinar a sua relevância para esta pesquisa.

Após uma análise conduzida em colaboração com um especialista na área, concluiu-se que todas as conferências eram pertinentes e valiosas para o estudo pois mencionavam tópicos relacionados com métodos de aprendizagem automática bastante relevantes. Por esse motivo, não se eliminou nenhuma conferência, mantendo-se o número total de artigos eliminados nesta fase em 5, conforme indicado na Tabela 2.3b.

Dada a constatação durante a pesquisa de que a informação disponível estava sobretudo centrada nos escalões profissionais de diversas modalidades, em detrimento dos escalões de formação, que eram mais pertinentes para a investigação, tornou-se necessário introduzir uma quarta fase na pesquisa.

Apesar de várias tentativas de refinar a *search string* para encontrar artigos relacionados com escalões de formação, os resultados não foram bem sucedidos. Deste modo foi possível concluir que havia uma lacuna significativa de informação documentada sobre o tema. Nesse contexto, a solução foi recorrer a recomendações de um especialista para incluir artigos específicos sobre escalões de formação. Essa recomendação resultou na inclusão de 7 artigos, totalizando assim 30 artigos como resultado após as quatro fases de pesquisa (conforme apresentado na Tabela 2.4).

TABELA 2.4. Total de Artigos no Final de Cada Fase

	Fase 1	Fase 2	Fase 3	Fase 4
Artigos	54	28	23	30

2.1.5. Extração de Resultados

Da lista de 30 artigos que resultou da aplicação de todas as fases procedeu-se à sua divisão por modalidade (Tabela 2.5) e por escalão (Tabela 2.6).

²<http://portal.core.edu.au/conf-ranks/>

TABELA 2.5. Distribuição de Artigos por Modalidade

Modalidades	Referências	Total
Andebol	[7] [8] [9] [10] [11] [12]	6
Futebol	[13] [14] [15] [16] [17] [18] [19] [3] [20] [21] [22]	11
Críquete	[23] [24] [25]	3
Basquetebol	[1] [26]	2
Voleibol	[27] [28]	2
Futebol americano	[29]	1
Desporto (geral)	[30] [31] [32] [2] [33]	5

TABELA 2.6. Distribuição de Artigos por Escalão

Tipo de escalão	Referências	Total
Formação	[19] [11] [3] [20] [21] [22]	6
Equipas não profissionais	[23] [30] [9] [14] [31] [24] [32] [15] [2] [25] [10] [16] [33]	13
Equipas profissionais	[7] [8] [1] [13] [26] [29] [27] [17] [28] [18] [12]	11

2.2. Revisão da Literatura

Nesta secção serão abordadas as nuances do desporto de equipa, considerando diferentes modalidades e faixas etárias. A distinção entre escalões de formação e seniores, tanto profissionais como não profissionais, revelou-se fundamental para a análise abrangente do desempenho desportivo. Serão ainda descritos os dispositivos utilizados para a extração de dados, bem como as variáveis e algoritmos mais utilizados para avaliar o desempenho nos escalões referidos.

2.2.1. Desporto de Equipa

Como já referido, para efetuar esta secção foram abordadas várias modalidades e faixas etárias. Foram separados os artigos que faziam referência a escalões de formação daqueles que faziam referência a escalões seniores, tanto profissionais como não profissionais.

Verificou-se que todos os escalões de formação em todas as modalidades abordadas realizam os seus treinos e jogos em campos cujas dimensões são adequadas à faixa etária dos praticantes. O principal objetivo da investigação nestes escalões passa por compreender como a idade dos jogadores condiciona o desempenho da equipa. Para a modalidade de futebol foram realizados jogos em formato 3vs3, 4vs4, 5vs5 e 6vs6, com a inclusão de guarda-redes em todas as situações [19], [3], [20], [21], [22]. A análise dos dados provenientes destes distintos formatos de jogos visa auxiliar os treinadores na compreensão das

variações de treino a aplicar nos diferentes escalões e identificar oportunidades de melhoria nos seus planos de treino atuais, baseando-se nas evidências recolhidas [19], [3]. Este estudo abrangeu a avaliação de praticantes nos escalões dos sub13 aos sub19, com idades compreendidas entre os 13 e os 19 anos.

Para os escalões seniores tanto profissionais como não profissionais, verificou-se que a grande maioria dos estudos envolve respostas mais físicas ou motoras por parte dos atletas. Algumas das variáveis mais utilizadas são a distância percorrida e a velocidade [8]. Não foi encontrado um número significativo de pesquisas relativas a comportamentos táticos e técnicos neste escalão, porém foram explorados alguns algoritmos e modelos pertinentes que serão destacados ao longo desta subsecção.

2.2.2. Recolha de Dados em Contexto Desportivo

É comum que a extração de dados para avaliar o desempenho das equipas parta de uma análise realizada por especialistas recorrendo a vídeo, no entanto, este processo é muito trabalhoso e pouco eficiente. Percebeu-se que para combater esta limitação seria interessante utilizar sistemas que analisassem os dados contextualizados e em larga escala [8]. Atualmente, existem dois tipos de recolha de dados: o sistema notacional e o sistema totalmente automatizado. Inicialmente, recorria-se a métodos simplistas, como papel e caneta, onde os especialistas avaliavam, em tempo real ou diferido, os jogos disputados, realizando anotações manualmente. Ao longo dos anos, a tecnologia tem sido cada vez mais incorporada neste contexto, não sendo exceção a utilização de sistemas automáticos para a recolha de dados. Este avanço tecnológico visa superar o principal desafio dos sistemas notacionais: o elevado volume de dados. Contudo, os sistemas automatizados também apresentam desvantagens, como a dificuldade em obter dados com elevado valor semântico. Por exemplo, é complexo para um computador compreender o movimento específico de uma falta e, conseqüentemente, determinar o tipo de falta a ser adjudicado. Atualmente, devido às limitações inerentes a cada tipo de sistema, a tendência é a utilização complementar destes, aproveitando as vantagens específicas de cada um. Nesta secção, serão descritos exemplos do sistema notacional e do sistema totalmente automatizado (*Inertial Measurement Unit*, *Global Positioning System*, *Wearable Inertial Measurement Unit*).

Metodologia Notacional

A metodologia notacional foi uma das formas utilizadas para realizar a extração de dados. Apesar das suas limitações inerentes, como a dificuldade em recolher grandes quantidades de dados, uma vez que tal exigiria um número considerável de pessoas, acarretando custos elevados, a observação de jogos em diversas modalidades, tanto em tempo real como através da análise posterior de gravações em vídeo, e a subsequente anotação das estatísticas gerais das equipas destacam-se como um método amplamente utilizado.

Esta observação em vídeo é frequentemente realizada em simultâneo com a utilização de um *Global Positioning System* (GPS) colocado no colete de cada atleta [21]. Os

dados obtidos desta forma são reunidos e, posteriormente, registados num ficheiro Excel, utilizando aplicações como por exemplo o *software Team AMS R2 2010*, facilitando assim uma análise futura [19], [22].

Inertial Measurement Unit

O *Inertial Measurement Unit* (IMU) é um dispositivo multifuncional que integra diversos sensores, tais como acelerómetros, giroscópios e magnetómetros. A sua finalidade reside na medição e registo em tempo real dos movimentos e orientações de um objeto [9]. Este aparelho é utilizado para captar dados de movimento, proporcionando informações cruciais sobre a posição, velocidade e aceleração do objeto em questão.

Constatou-se que o IMU foi empregue para a recolha de dados de movimento durante jogos de andebol. Para tal, o dispositivo foi fixado nas costas dos atletas enquanto estes eram simultaneamente gravados em vídeo. O propósito subjacente a esta abordagem consistiu na integração dos dados obtidos pelo IMU com as gravações em vídeo, visando a identificação e anotação de eventos específicos, como lançamentos e corrida.

Sistemas Baseados em GPS

A utilização do *Global Positioning System* para recolher dados durante os jogos tem revelado ser uma ferramenta valiosa na análise do desempenho dos jogadores [19], [22]. Estes dispositivos permitem obter informações pormenorizadas sobre a distância percorrida, velocidade, padrões de movimento e intensidade do esforço físico, possibilitando uma avaliação abrangente das exigências físicas do jogo.

Ao monitorizar em tempo real a localização e movimentos dos jogadores, os treinadores e equipas técnicas conseguem obter informações cruciais sobre o comportamento tático, condição física e estratégias de jogo [3], [20]. A integração do GPS no contexto do desporto não só contribui para otimizar o treino e o desempenho individual, como também fornece uma base objetiva para ajustes táticos e estratégicos durante as partidas. Esta tecnologia desempenha um papel fundamental na evolução da análise desportiva, proporcionando uma compreensão mais profunda e fundamentada em dados do desempenho dos jogadores em campo.

Wireless IMU da PROTM

O IMU de banda ultralarga WIMU PROTM é uma ferramenta inercial utilizada na análise de jogos de andebol. Este dispositivo foi criado pela empresa Realtrack Systems, Almeria, Espanha [11] e diferencia-se do IMU já descrito nesta secção por utilizar a tecnologia de banda ultralarga (*Ultra-Wideband* - UWB) para registar dados de posicionamento, tendo sido aplicado para monitorizar a posição dos jogadores durante o jogo. A validade deste aparelho foi avaliada através da comparação das suas medidas com as dimensões oficiais de um campo de andebol regulamentado pela Federação Internacional de Andebol. Os resultados evidenciaram uma elevada validade do dispositivo, apresentando uma discrepância média reduzida entre as suas medidas e as dimensões oficiais do campo. Adicionalmente,

a fiabilidade entre dispositivos revelou-se igualmente elevada, indicando consistência nas medidas quando dois dispositivos eram utilizados simultaneamente [11], [12].

2.2.3. Métricas de Desempenho em Contexto Desportivo

Foram recolhidos vários dados e avaliadas inúmeras variáveis nos estudos utilizados para esta pesquisa. Nesta subsecção serão descritas quais as mais relevantes, bem como a sua utilidade e aplicação.

Para efetuar a RSL, foram recolhidos dados e efetuada uma avaliação abrangente de diversas variáveis essenciais. Esta subsecção destina-se a detalhar as mais pertinentes entre elas, delineando não apenas as suas características, mas também destacando a sua utilidade e aplicação no contexto do estudo. Importa salientar que estas variáveis mostraram-se particularmente relevantes em escalões de formação.

Comprimento e Largura da Equipa

As variáveis mais comuns na pesquisa efetuada foram o comprimento e a largura da equipa, bem como a relação entre ambos. Verificou-se que jogadores mais velhos e com mais experiência têm tendência a utilizar uma maior largura do campo, tanto para atacar como para defender [19]. A relação entre estas duas variáveis é uma medida que indica a dispersão dos jogadores em campo. Nos escalões mais jovens, verificou-se uma menor utilização da largura do campo, o que sugere que os jogadores mais novos tendem a agrupar-se mais, não aproveitando ao máximo a largura disponível [21].

Na Figura 2.3 encontram-se representadas graficamente as variáveis referidas.

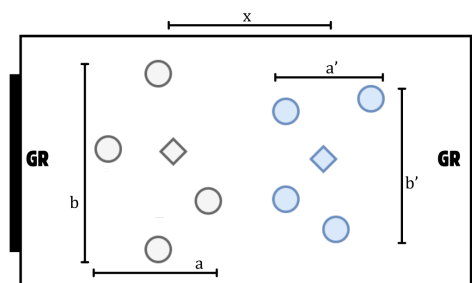


FIGURA 2.3. Comprimento (a) e Largura (b).

Distância Média Entre Centroides

A distância média entre centroides reflete a proximidade ou distância entre as equipas durante o jogo. O centroide de uma equipa é obtido a partir da média das posições dos jogadores da equipa em cada momento do jogo.

A distância média entre os centroides de duas equipas adversárias é calculada para determinar a separação média entre as equipas durante o jogo. Uma maior distância sugere uma possível abordagem mais defensiva e tática, enquanto uma distância menor indica um comportamento mais ofensivo, permitindo que os treinadores ajustem táticas e estratégias com base nos padrões identificados. Também nesta medida se verificaram valores mais altos para os escalões mais velhos [3], [21].

A distância média entre centroides de duas equipas adversárias é também influenciada pelo tipo de defesa escolhido pelas equipas. Caso as mesmas optem por uma defesa zonal a distância média entre centroides tende a ser maior em comparação com a defesa individual, isto porque cada equipa estará bastante mais distante da sua equipa adversária do que se optasse pela defesa individual [22].

Na Figura 2.3 encontra-se representado o centroide de cada equipa num dado momento ($\blacklozenge$) e a respetiva distância média entre centroides (representado com x).

Área Ocupada e Índice de Alongamento

Vários estudos destacam a área ocupada e o índice de alongamento como medidas fulcrais para a otimização do desempenho. O índice de alongamento é uma medida que quantifica a expansão ou contração radial que uma equipa demonstra à medida que o jogo se desenrola, valores mais elevados da mesma indicam uma maior dispersão dos jogadores pelo campo.

Tal como já tinha sido verificado nas medidas de comprimento e largura, também a área ocupada e o índice de alongamento têm tendência a ser maiores nos escalões mais velhos [3], [19]. Esta condição verifica-se, uma vez que com o acumular de experiência os jogadores mais velhos tendem a dispor-se no campo de forma mais estratégica e tática. Estes resultados ajudam os treinadores a perceber em que idades se torna mais relevante proceder a ajustes no treino para melhorar o comportamento e posicionamento dos jogadores [3].

A forma como as equipas defendem também tem impacto nestas variáveis, as equipas que optam por uma defesa zonal deslocam-se em campo de forma mais compacta quando comparadas com as equipas que defendem de forma individual. As primeiras, fruto de se deslocarem em bloco ocupam uma área menor em relação às segundas, que se encontram mais dispersas [22].

Na Figura 2.4 encontra-se representada a área ocupada A) e o índice de alongamento B).

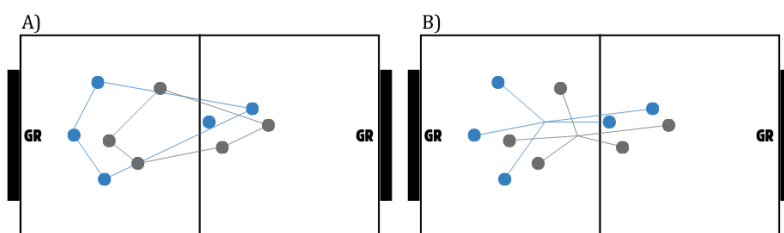


FIGURA 2.4. Área Ocupada A) e Índice de Alongamento B).

2.2.4. Métodos de Aprendizagem Automática

Verificou-se que, nos artigos sobre escalões seniores, havia uma atenção significativa à utilização de algoritmos como ferramentas essenciais na análise do desempenho. Assim, esta subsecção visa explorar detalhadamente a aplicação e impacto destes algoritmos, proporcionando uma visão esclarecedora sobre a sua influência nos resultados obtidos neste escalão.

Regressão Linear

A regressão linear é um método estatístico utilizado para modelar a relação entre uma variável dependente e uma ou mais variáveis independentes, assumindo uma relação linear entre elas.

Nesta revisão foram encontrados estudos que utilizavam este método aplicado a diferentes variáveis, como por exemplo: idade, medidas antropométricas (altura, peso corporal) e testes físicos (potência média, potência máxima) para prever o desempenho dos jogadores em exercícios como saltos com contramovimento, *sprints* e testes de agilidade direcionados para o andebol [10]. Também foi utilizado para testar variáveis como a direção da curva, a velocidade e o trabalho mecânico relacionado, ou seja, a energia associada para executar acelerações e desacelerações [17].

Árvore de Decisão

Uma árvore de decisão é uma estrutura em árvore onde cada nó representa uma decisão ou teste sobre uma característica e cada ramo representa um resultado possível desse teste. Este modelo foi aplicado tanto para o futebol como para o andebol. Os resultados do mesmo quando aplicado ao futebol foram bastante positivos [17], no entanto no andebol nem todos os estudos obtiveram bons resultados deste modelo [4] [10].

Apesar de o sucesso não ser consensual em todos os estudos verificados na modalidade de andebol, um deles obteve como uma das principais conclusões que o uso de árvores de decisão como ferramenta de aprendizagem automática para identificar indicadores de desempenho no andebol é funcional e útil [4]. O modelo simplificou o problema ao determinar as variáveis mais importantes, o que reduziu a complexidade na análise dos indicadores de desempenho.

Floresta Aleatória

A Floresta Aleatória é um algoritmo de aprendizagem automática que opera através da construção de várias árvores de decisão e da combinação dos seus resultados para realizar tarefas de classificação ou regressão. Cada árvore é treinada de forma independente em diferentes subconjuntos de dados e variáveis, promovendo uma abordagem diversificada que aumenta a precisão e a robustez do modelo global. Este algoritmo foi aplicado na modalidade de Andebol, permitindo a análise de indicadores de performance e a previsão de resultados, contribuindo assim para a otimização de estratégias de treino e melhoria do desempenho das equipas.

Dentro deste algoritmo foram abordadas algumas técnicas, como o *Recursive Feature Elimination (RFE)* que se trata de uma repetição do treino do modelo, removendo iterativamente as características menos importantes até se atingir o número desejado de características [9].

Para além dessa, também a *Variable Selection Using Random Forest (VSURF)* foi utilizada, esta trata-se de uma abordagem estatística e de aprendizagem automática que utiliza a floresta aleatória para efetuar a seleção otimizada de variáveis em conjuntos de dados [9]. Ao construir várias árvores de decisão em subconjuntos aleatórios dos dados,

o VSURF avalia a importância relativa de cada variável, permitindo a identificação das mais significativas para o modelo.

Regressão Baseada em Máquinas de Vetores de Suporte

A regressão baseada em máquinas de vetores de suporte (SVR – *Support Vector Regression*) é uma técnica de aprendizagem automática utilizada para tarefas de regressão. Esta técnica utiliza vetores de suporte para encontrar o hiperplano que melhor se ajusta aos dados de treino minimizando a diferença entre as previsões e os valores reais.

Quando aplicada ao andebol a SVR não obteve resultados ótimos para nenhum dos testes, no entanto, quando comparada com os modelos já descritos (regressão linear e árvore de decisão) apresentou resultados superiores em cinco de seis testes realizados [10]. Por outro lado, quando aplicada ao futebol esta técnica teve um desempenho muito positivo, obtendo uma boa precisão para variáveis como direção da curva, trabalho mecânico e velocidade de corrida antes e depois das curvas [17].

Redes Neurais Artificiais

As Redes Neurais Artificiais (ANN – *Artificial Neural Networks*) são modelos de aprendizagem automática inspirados na estrutura cerebral, formados por neurónios interligados. Estas redes são treinadas através de algoritmos como a retropropagação [10] e revelaram-se eficazes na resolução de desafios complexos e não-lineares, sendo aplicadas não apenas no desporto, mas em várias áreas. No contexto desportivo, as ANN são utilizadas na recolha de dados para avaliação do desempenho das equipas. Sensores inerciais capturam dados cruciais, como a direção da curva e a velocidade, os quais alimentam a ANN. Este modelo é capaz de antecipar métricas de desempenho da equipa, proporcionando informações valiosas para estratégias de treino, decisões em tempo real e otimização global do rendimento desportivo [17].

Framework for Automatic Upscaled Performance Analysis with Machine Learning

A Framework for Automatic Upscaled Performance Analysis with Machine Learning (FAUPA-ML) é um modelo desenvolvido com o propósito de avaliar o desempenho em desportos de equipa, com destaque para a modalidade de andebol [8]. Este modelo utiliza redes neurais baseadas em grafos para processar conjuntos extensos de dados provenientes de jogos de andebol.

Inicialmente, o treino da rede é realizado utilizando dados de posição manualmente anotados a partir de um conjunto específico de jogos. Posteriormente, a aplicação da rede permite a análise automatizada e escalável de um conjunto mais alargado de partidas, facilitando assim uma avaliação abrangente do desempenho.

Esta ferramenta demonstrou ser eficaz na realização de análises contextualizadas em grande escala do desempenho no andebol, proporcionando uma compreensão mais aprofundada dos padrões e tendências do jogo. Alguns dos resultados que sustentam esta conclusão incluem a capacidade da ferramenta em identificar diferenças significativas entre contra-ataques e ataques posicionais, assim como entre situações de ataque e defesa [8].

Descrição e Execução do Processo CRISP-DM

3.1. Introdução à Metodologia

Na fase inicial desta pesquisa, a escolha da metodologia foi cuidadosamente ponderada entre o CRISP-DM e a *Design Science Research* (DSR). O CRISP-DM, focado na análise de dados e na descoberta de padrões, revelou-se a escolha mais apropriada, dado o objetivo deste estudo. Já a DSR centra-se na criação e avaliação de soluções práticas para problemas específicos, promovendo o desenvolvimento de teorias, modelos ou sistemas inovadores. Contudo, esta abordagem mostrou-se menos adequada para o presente estudo, cujo foco é a análise e interpretação de dados. Ainda assim, a DSR poderá ser útil em investigações futuras, especialmente no desenvolvimento de ferramentas e soluções tecnológicas para otimizar o desempenho tático no andebol.

Esta secção introduz a metodologia adotada para conduzir a pesquisa, seguindo a abordagem estruturada e iterativa do CRISP-DM. A natureza desta metodologia orientará a investigação através de iterações distintas, cada uma abrangendo as seis fases que a caracterizam. As iterações incluirão a análise de mapas térmicos, a avaliação do sincronismo entre adversários e a decomposição dos sinais, que permitirá explorar os movimentos dos jogadores em diferentes escalas temporais, contribuindo para uma compreensão mais detalhada do desempenho tático no andebol.

3.2. Descrição e Aplicação da Metodologia CRISP-DM

Nesta secção, será explorado em detalhe o CRISP-DM, a metodologia que guiará a pesquisa na análise do desempenho tático de equipas de andebol. Esta metodologia possui uma abordagem robusta para projetos de mineração de dados, composta por seis fases interligadas e iterativas, cada uma desempenhando um papel crucial no desenvolvimento do estudo. Para uma compreensão mais aprofundada, esta secção será dividida por iterações e em cada uma serão descritas as fases da CRISP-DM.

Na primeira fase, **Compreensão do Problema**, estabelece-se uma compreensão clara dos objetivos da análise, identificando as necessidades do utilizador e são definidas metas claras para orientar o processo. Nesta fase, é explicado o contexto do problema e são descritas as informações necessárias para a sua compreensão.

Segue-se a **Compreensão dos Dados**, onde são recolhidos e avaliados dados sobre jogos de andebol, analisando a qualidade e relevância para a pesquisa. São analisados ficheiros de Excel que contêm dados provenientes de filmagens de jogos de vários escalões. No documento, cada linha corresponde a uma instância temporal, enquanto que as colunas representam a posição longitudinal (X) ou lateral (Y) de cada jogador em cada momento.

Ao jogo entre as equipas A e B estão associados quatro ficheiros: o das coordenadas X da equipa A, o das coordenadas Y da mesma equipa, o das coordenadas X da equipa B e o das coordenadas Y da equipa B.

Nestas duas primeiras fases foi importante a ajuda de uma especialista da área, a Professora Anna Volossovitch, que disponibilizou os dados, explicou as necessidades identificadas por profissionais na área e o contexto em que estes dados se inseriam.

A **Preparação dos Dados** é a próxima etapa, dedicada à limpeza e transformação dos dados para garantir a sua consistência. Nesta fase, são selecionadas e desenvolvidas características essenciais para preparar terreno para a fase de Modelação. Este processo inclui diversas operações, como a normalização dos dados e o tratamento de valores em falta, de modo a evitar distorções nos resultados.

Na fase de **Modelação**, são implementados os sistemas e ferramentas necessários, como o novo sistema de coordenadas específico para o andebol, com o objetivo de preparar os dados para análise. Esta fase envolve a configuração de métodos para mapear as posições dos jogadores em campo e a sua relação com as áreas de baliza.

A quinta fase é a **Avaliação**, onde se examina o desempenho dos modelos, refinando e ajustando conforme necessário. Esta é a fase mais extensa, que envolve a análise dos resultados obtidos.

Por fim, na fase de **Implementação**, adota-se uma abordagem global, apresentada no capítulo de Conclusões e Trabalho Futuro, em vez de ser detalhada em cada iteração. O processo consiste na elaboração de um relatório que reúne os resultados e conclusões das análises realizadas, apresentado à Professora Anna Volossovitch, especialista que forneceu os dados (Anexo A). O objetivo é partilhar os conhecimentos obtidos e discutir a aplicabilidade do novo sistema de coordenadas na análise tática do andebol, explorando também oportunidades para futuras colaborações e melhorias no uso deste sistema em contextos práticos.

A Figura 3.1 representa o diagrama da metodologia referida, bem como as suas fases e respetivas ligações.

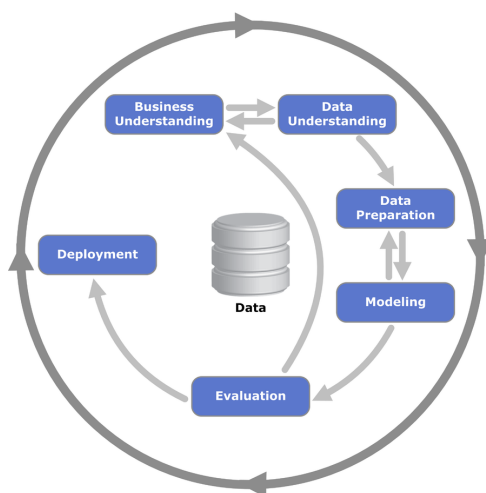


FIGURA 3.1. Diagrama da Metodologia CRISP-DM

3.3. Execução do Processo CRISP-DM

Nesta secção, é executada a metodologia CRISP-DM, que orienta a análise dos dados de forma iterativa. Esta metodologia permite abordar o problema de forma cíclica, realizando três iterações distintas para explorar e aprofundar o desempenho tático no andebol. Cada iteração segue todas as fases do ciclo CRISP-DM, proporcionando uma análise estruturada e detalhada das dinâmicas táticas, com ajustes e refinamentos contínuos ao longo do processo.

3.3.1. Primeira Iteração - Mapas Térmicos

Nesta primeira iteração, o sistema de coordenadas regular será comparado com o novo sistema proposto especificamente para o andebol. Esta comparação será realizada através de mapas térmicos que representarão as posições dos jogadores em vários jogos e para diferentes pares de jogadores.

3.3.1.1. Compreensão do Problema

Neste trabalho, a análise foca-se em jogos de andebol de escalões jovens, com idades compreendidas entre os 9 e os 12 anos. Os jogos são disputados com 3 jogadores de campo por equipa, mais um guarda-redes (totalizando 4 jogadores por equipa), ao contrário dos escalões seniores, onde cada equipa conta com 7 jogadores. Como consequência, os jogos realizam-se em campos com dimensões reduzidas em comparação com os campos oficiais de seniores. A principal diferença é a redução do comprimento, que passa de 40 para 20 metros, e da largura, que diminui de 20 para 13 metros. Além disso, a área de baliza tem um raio menor, sendo de 5 metros, em vez dos habituais 6 metros.

A comparação dos campos de seniores e de escalões jovens, respetivamente, encontra-se representada na Figura 3.2.

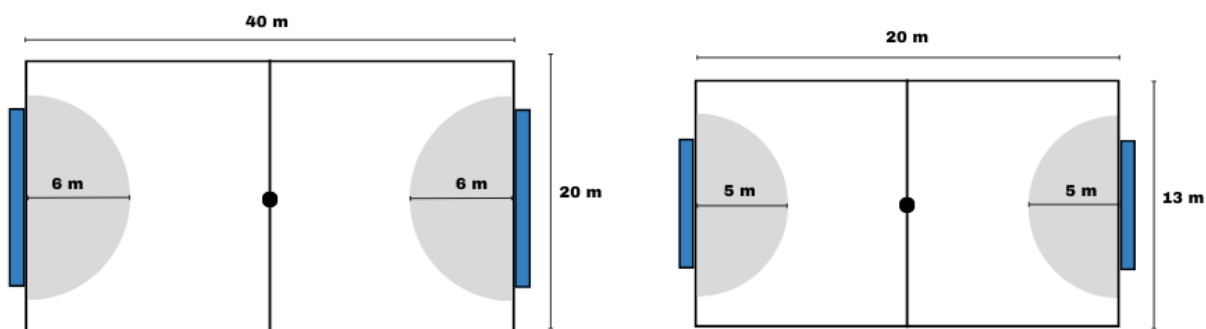


FIGURA 3.2. Comparação das Dimensões dos Campos

Esta análise visa comparar dois tipos distintos de sistemas defensivos utilizados no andebol: a defesa individual e a defesa zona. Na defesa individual, cada jogador é responsável por marcar um adversário direto, resultando em movimentações focadas no seguimento do adversário pelo campo. Em contraste, na defesa zona, os jogadores defendem áreas específicas, o que implica um comportamento coletivo orientado para a ocupação dos espaços, independentemente dos movimentos dos adversários.

O andebol apresenta características específicas que exigem uma abordagem analítica adaptada à sua dinâmica. Uma das particularidades mais importantes é a área de baliza, com um raio de 5 metros, que não pode ser pisada por atacantes nem por defensores, tornando a relação entre a posição dos jogadores e estas áreas essencial para interpretar o desempenho em campo. Para responder a esta necessidade, foi desenvolvido um novo sistema de coordenadas específico para o andebol, que considera dois parâmetros fundamentais: o ângulo do jogador em relação ao centro da baliza e a distância do jogador à área de baliza (e não à baliza diretamente).

O objetivo principal desta análise é avaliar a eficácia de dois sistemas de coordenadas distintos na representação das movimentações dos jogadores de andebol, com o intuito de identificar qual dos sistemas oferece uma melhor compreensão das dinâmicas táticas em jogo. Em contraste ao novo sistema, o sistema regular cartesiano, utilizado em várias modalidades desportivas, mede as posições absolutas dos jogadores no campo através de coordenadas laterais e longitudinais, com o ponto de origem (0,0) situado no canto inferior esquerdo. Este sistema não considera a relevância das balizas ou das áreas de baliza na análise.

O estudo será conduzido com base em dois jogos diferentes. O primeiro jogo será disputado com um sistema defensivo de marcação individual, enquanto o segundo utilizará um sistema de defesa zona. Durante os jogos, serão gerados mapas térmicos para representar as movimentações dos jogadores, tanto no sistema de coordenadas regular como no novo sistema adaptado ao andebol. Através desta comparação, pretende-se identificar qual dos sistemas de coordenadas oferece uma análise mais eficaz e detalhada do comportamento tático, bem como compreender as diferenças e semelhanças entre os dois tipos de defesa, em termos de ocupação espacial e movimentação dos jogadores.

Este estudo é particularmente relevante, pois procura não apenas explorar a utilidade de diferentes representações espaciais no andebol, mas também contribuir para uma melhor compreensão das dinâmicas táticas da modalidade, oferecendo informações valiosas que podem ser aplicadas na análise de jogos, na preparação de treinos e na definição de estratégias futuras.

3.3.1.2. *Compreensão dos Dados*

Os dados utilizados nesta investigação foram recolhidos através da monitorização de jogos de andebol, nos quais cada jogador foi equipado com um dispositivo WIMU. Este dispositivo tem como principal função medir e registar a posição exata de cada atleta no campo ao longo do tempo, permitindo assim a geração de mapas térmicos e a análise dos seus movimentos durante o jogo.

Cada jogo teve uma duração de 8 minutos cronometrados, sem substituições de jogadores, o que garante que os mesmos atletas foram monitorizados ao longo de toda a partida. Esta continuidade de dados facilita a análise, pois não há interrupções devido a mudanças na equipa em campo.

Após a recolha dos dados, estes foram organizados em quatro ficheiros Excel por cada jogo. Para cada equipa, foi criado um ficheiro com as coordenadas longitudinais e outro com as coordenadas laterais, totalizando dois ficheiros por equipa e quatro ficheiros no total por jogo. Nas colunas de cada um destes ficheiros estão representados os WIMUs atribuídos aos jogadores, enquanto as linhas contêm as posições registadas ao longo do tempo, medindo assim as movimentações contínuas dos jogadores em cada instante. Na Figura 3.3 encontra-se uma imagem de uma pequena parte de um dos ficheiros Excel em bruto, ilustrando a estrutura dos dados tal como foram recolhidos.

TIME	WIMU_22 Indoor X	WIMU_24 Indoor X	WIMU_25 Indoor X
10:07:05 203			
10:07:05 233		11,65360221	8,701938525
10:07:05 243	10,22559185		
10:07:05 283		11,64500569	8,695657307
10:07:05 293	10,2300221		
10:07:05 333		11,63378118	8,690177873
10:07:05 343	10,23521529		
10:07:05 383		11,62099009	8,685281716
10:07:05 393	10,24096988		
10:07:05 433		11,60819988	8,680319514
10:07:05 443	10,24702962		
10:07:05 483		11,59697478	8,674534766
10:07:05 493	10,25316428		
10:07:05 533		11,58849384	8,667403986
10:07:05 543	10,25889327		
10:07:05 583		11,58418656	8,658680656
10:07:05 593	10,26345438		
10:07:05 633		11,5855029	8,648558822
10:07:05 643	10,26611428		
10:07:05 683		11,5928141	8,637698844

FIGURA 3.3. Ficheiro Excel dos Dados Recolhidos

Embora os dados forneçam informações detalhadas sobre as movimentações dos jogadores, é importante realçar que não foram anotadas algumas paragens curtas que possam ter ocorrido durante os jogos, tais como paragens de jogo para golos, bolas fora ou outras interrupções breves. Essa ausência de anotações pode gerar pequenas inconsistências na continuidade dos dados.

A recolha e disponibilização destes dados foi realizada por uma especialista na área, com quem foram realizadas várias reuniões para assegurar que os dados eram compreendidos corretamente e que as suas características e limitações eram adequadamente interpretadas para a investigação. A especialista também forneceu informações sobre quais pares de jogadores eram adversários diretos (na defesa individual) e quais ocupavam as mesmas áreas do campo (na defesa zona), assim como sobre qual baliza era defendida por cada equipa em cada jogo. Estas informações revelaram-se bastante importantes para as análises conduzidas neste trabalho.

3.3.1.3. *Preparação dos Dados*

Nesta fase, foram realizadas diversas etapas para garantir a preparação adequada dos dados para a análise. Como ponto de partida, os dados recolhidos através dos dispositivos WIMU foram importados e organizados. Cada jogador utilizava um WIMU, e os dados destes dispositivos foram registados em ficheiros separados, divididos entre coordenadas X e Y para cada equipa. Cada jogo resultou em quatro ficheiros CSV: um com as coordenadas X de uma equipa, outro com as coordenadas Y da mesma equipa, e o mesmo para a equipa adversária. A preparação dos dados envolveu várias etapas fundamentais:

Organização e Nomeação dos Dados

Primeiramente, os dados foram organizados para que cada ficheiro CSV fosse corretamente atribuído aos respetivos jogadores e equipas. Isto foi feito através de um processo automatizado, em que os nomes das colunas dos ficheiros CSV, correspondentes aos WIMUs, foram associados a cada jogador, permitindo identificar quais as coordenadas que pertencem a cada um. Este passo foi essencial para garantir que os dados de cada jogador estivessem corretamente mapeados ao longo de todo o jogo.

Sincronização Temporal

Uma das principais preocupações durante a preparação dos dados foi garantir a sincronização temporal entre as duas equipas e todos os jogadores. Para tal, foram ajustados os dados de tempo de forma a garantir que todos os registos de posição (coordenadas X e Y) estivessem devidamente alinhados, independentemente de possíveis pequenas diferenças no momento de início da recolha de dados entre os diferentes WIMUs. Foi implementada uma função para calcular a diferença temporal entre os vários *frames* de dados e o tempo de referência inicial, assegurando assim que os dados recolhidos para cada jogador estivessem sincronizados, permitindo uma comparação direta entre as equipas e os jogadores ao longo do tempo.

Interpolação e Preenchimento de Valores Ausentes

Para assegurar a completude dos dados, foi aplicado um processo de interpolação. Este processo foi necessário para lidar com valores ausentes nas leituras dos WIMUs, que podem ocorrer devido a falhas momentâneas no registo dos dados. A interpolação preencheu estas lacunas de forma a garantir que existisse uma sequência contínua de posições para cada jogador ao longo de toda a duração do jogo. Este processo é crucial para a análise subsequente, uma vez que a ausência de dados poderia comprometer a análise da movimentação e comportamento tático dos jogadores. Além disso, foi realizada uma correção para que, no novo sistema, a coordenada (0,0) fosse posicionada no centro do campo, facilitando a comparação das posições dos jogadores em relação às balizas.

Estrutura de Dados Unificada

Após a interpolação e sincronização dos dados, foi criada uma estrutura de dados unificada que combina as coordenadas X e Y de ambas as equipes num único conjunto de dados. Esta estrutura foi configurada de maneira a permitir o acesso eficiente aos dados de cada jogador, garantindo que os valores de posição de todos os jogadores estão corretamente organizados e prontos para análise. Esta estrutura contém todos os dados interpolados e sincronizados, o que facilita a aplicação de algoritmos de análise mais avançados.

Preparação dos Eixos para Análise

Na preparação dos dados, os eixos foram ajustados para representar as dimensões do campo de jogo. O sistema regular considera o ponto (0,0) no canto inferior esquerdo, com o eixo horizontal estendendo-se por 20 metros e o eixo vertical até 15 metros. Esses limites de escala refletem as dimensões associadas ao campo utilizado em modalidades jovens, como já referido. Já no novo sistema de coordenadas, o ponto (0,0) está localizado no centro do campo, e as escalas foram ajustadas para refletir as variáveis de distância à área de baliza e o ângulo em relação ao centro da baliza. A escala do eixo horizontal, que varia entre 0 e 15, representa a distância do jogador à área de baliza, considerando que o raio da área é de 5 metros. O eixo vertical, por sua vez, varia entre -1.5 e 1.5 radianos, representando o ângulo em que o jogador se encontra em relação ao centro da baliza.

Visualização e Ajustes Finais

Após a preparação dos dados, foi feita uma primeira visualização para validar se os dados de cada jogador estavam corretamente atribuídos e se a conversão para o novo sistema de coordenadas foi realizada com sucesso. As visualizações preliminares permitiram verificar a coerência da movimentação dos jogadores em ambos os sistemas de coordenadas.

Em suma, a fase de Preparação de Dados garantiu que os dados estivessem completos, sincronizados e organizados, prontos para serem analisados, permitindo uma avaliação precisa das movimentações e comportamentos táticos dos jogadores ao longo dos jogos.

3.3.1.4. Modelação

Nesta fase, o foco está na aplicação e análise dos dois sistemas de coordenadas: o sistema regular e o novo sistema adaptado ao contexto do andebol, que considera o ângulo e a distância em relação às balizas. O novo sistema é proposto como o modelo principal, uma vez que oferece uma abordagem tática mais centrada nas ações próximas das balizas, onde ocorrem as jogadas mais determinantes do jogo. Para além disso, a análise inclui a comparação das dinâmicas de dois tipos de defesa (individual e à zona), proporcionando uma compreensão mais detalhada do comportamento dos jogadores em diferentes cenários.

No novo sistema de coordenadas, o centro do campo serve como ponto de origem (0,0), permitindo que a avaliação seja feita com base nas ações que envolvem as balizas.

A distância e o ângulo são calculados em função de cada baliza, gerando quatro medidas principais: a distância à baliza 0, a distância à baliza 1, o ângulo em relação à baliza 0 e o ângulo em relação à baliza 1. Na Figura 3.4 é apresentada uma comparação visual entre o sistema regular e o novo sistema, juntamente com a representação das suas coordenadas e ponto central. É importante notar que, neste novo sistema, a figura ilustra especificamente o ângulo e a distância em relação à baliza 0 (B0).

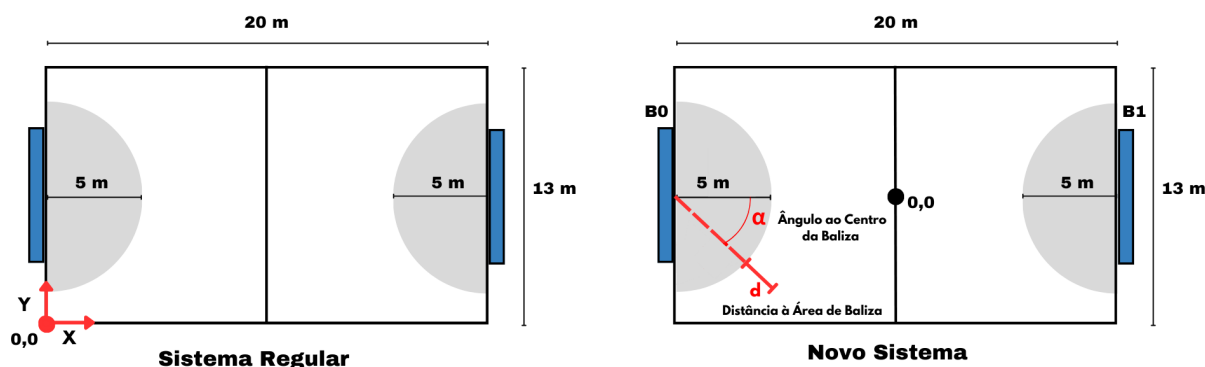


FIGURA 3.4. Comparação dos Sistemas de Coordenadas

A apresentação dos sistemas de coordenadas é realizada através dos mapas térmicos, que ilustram os padrões posicionais dos jogadores. Este procedimento é fundamental para garantir uma comparação direta entre os dois sistemas, destacando as diferenças na forma como as dinâmicas de jogo são analisadas.

Ferramentas Utilizadas

Foi utilizada a linguagem *Python* como principal ferramenta para o desenvolvimento do código e geração dos mapas térmicos, usando bibliotecas como *NumPy*¹, *SciPy* e *Matplotlib* para o processamento e visualização dos dados.

Geração dos Mapas Térmicos

Os mapas térmicos foram gerados a partir das coordenadas dos jogadores recolhidas durante os jogos. Estes mapas representam a concentração de tempo em que os jogadores se posicionaram em cada área do campo. Para a criação dos mapas, foi utilizada uma função de histogramas bidimensionais que mapeia as coordenadas dos jogadores ao longo do jogo, resultando em gráficos que exibem a densidade das suas posições. As cores mais quentes (próximas de vermelho) indicam áreas em que o jogador passou mais tempo, enquanto as cores mais frias (próximas de azul) representam áreas de menor presença.

Para garantir a comparabilidade entre os jogos e os diferentes sistemas de coordenadas, foram realizados ajustes tanto na escala de calor quanto nas dimensões dos gráficos. A escala foi uniformemente definida entre 0 e 400, correspondendo ao tempo máximo (400 *frames*, ou 4'40") que qualquer jogador passou numa área do campo, com base nos dados recolhidos ao longo de vários jogos. Estes ajustes asseguram que todas as figuras seguem

¹<https://numpy.org>

os mesmos parâmetros de escala, evitando distorções visuais e facilitando a interpretação dos resultados, permitindo comparações diretas entre diferentes tipos de defesa e sistemas de coordenadas.

Interpretação dos Mapas Térmicos

Os mapas térmicos permitem uma análise detalhada dos padrões posicionais dos jogadores. No contexto deste trabalho, serão analisados tanto o comportamento defensivo como o ofensivo de jogadores em diferentes tipos de defesa: individual e à zona.

Na defesa individual, onde cada jogador tem um adversário direto para marcar, espera-se observar uma correspondência significativa entre os mapas térmicos de jogadores adversários diretos. Isto significa que as áreas de maior concentração de calor dos dois jogadores adversários deverão sobrepor-se, indicando que o defensor seguiu o atacante de forma eficiente ao longo do jogo. Este tipo de análise é feito tanto no sistema de coordenadas regular quanto no novo sistema de coordenadas. No sistema regular, a análise baseia-se nas posições X e Y, que indicam a localização física dos jogadores no campo, mas não fornecem informações sobre a proximidade em relação à área ou orientação em relação à baliza. No novo sistema de coordenadas, a relação entre o jogador e a baliza é mais clara, sendo possível analisar a cobertura de ângulos de ataque e a eficiência defensiva de forma mais detalhada.

Na defesa à zona, os jogadores têm a responsabilidade de cobrir uma área específica do campo, independentemente dos adversários diretos. A análise dos mapas térmicos deverá mostrar que os jogadores permanecem, maioritariamente, dentro das zonas que lhes foram atribuídas. Espera-se que, nas áreas centrais do campo, os mapas térmicos de jogadores adversários não se sobreponham, uma vez que a defesa à zona não requer que os jogadores sigam os adversários por todo o campo. Neste caso, o novo sistema de coordenadas deverá destacar-se novamente, pois permite avaliar a eficiência com que os jogadores cobrem os ângulos e as distâncias críticas em relação à baliza, algo que o sistema regular de X e Y não apreende com a mesma precisão.

Comparação entre os Sistemas de Coordenadas

A comparação entre os dois sistemas de coordenadas é um dos pontos centrais desta análise. O sistema regular, ao utilizar coordenadas X e Y, fornece uma visão espacial das posições dos jogadores no campo, mas não reflete diretamente a proximidade e orientação em relação à baliza, uma componente essencial no andebol. O novo sistema, ao medir a distância à área de baliza e o ângulo em relação ao centro da baliza, oferece uma análise mais tática e específica da modalidade.

3.3.1.5. Avaliação

Nesta fase serão analisados os resultados obtidos ao longo dos dois jogos, comparando os dois sistemas de coordenadas utilizados. Serão também discutidas as diferenças entre as defesas à zona e individual, com o objetivo de avaliar a eficácia e as vantagens do novo sistema de coordenadas em relação ao sistema tradicional, no que toca à análise tática e ao posicionamento dos jogadores em campo. Em cada jogo, serão avaliados dois pares de jogadores adversários: no jogo de defesa individual, serão comparados pares de adversários diretos e não diretos, enquanto no jogo de defesa à zona, será realizada a análise de um par de jogadores adversários mais próximos e outro mais afastado no campo.

Jogo 1 - Defesa Individual - Adversários Diretos

Sistema de Coordenadas Regular

Na Figura 3.5 estão representados os mapas térmicos no sistema de coordenadas regular (X, Y) para o jogador 2 dos Sassoeiros e o jogador 1 do Sporting, que são adversários diretos. Este sistema permite visualizar as zonas do campo onde os jogadores concentram as suas ações, mas apresenta limitações. Não é possível determinar claramente para que baliza cada jogador estava a atacar, uma vez que a posição relativa à baliza não é perceptível diretamente nos mapas térmicos. A representação em coordenadas X e Y não facilita a análise da orientação tática dos jogadores, pois não destaca a proximidade em relação às balizas, que são elementos críticos na defesa individual e no andebol em geral.

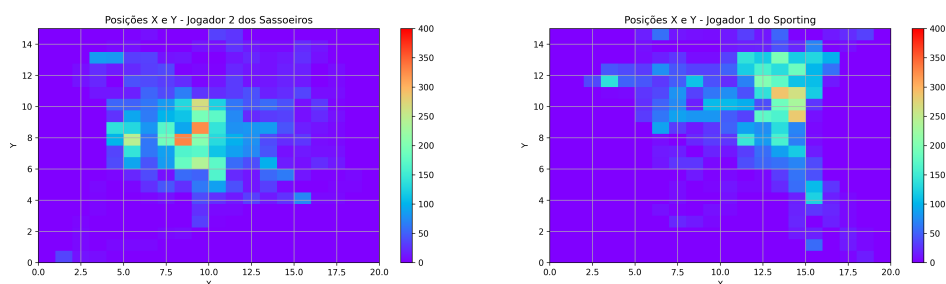


FIGURA 3.5. Mapas Térmicos do Sistema Regular - Adversários Diretos

Novo Sistema de Coordenadas

Por outro lado, ao utilizar o novo sistema de coordenadas baseado na distância à área de baliza e no ângulo em relação a esta, os mapas térmicos proporcionam uma visão mais clara das movimentações dos jogadores em relação ao objetivo principal do jogo: a baliza. Na Figura 3.6 é evidente que os Sassoeiros estavam a defender a baliza 0 e o Sporting a baliza 1, como indicado pela especialista. Esta abordagem facilita a identificação da baliza que está a ser atacada ou defendida, algo que não é facilmente observável com as coordenadas X e Y. Além disso, o sistema permite uma análise mais detalhada da

cobertura defensiva e da exploração dos ângulos de ataque, especialmente em jogos de defesa individual, onde a relação com a baliza é determinante para a eficácia defensiva.

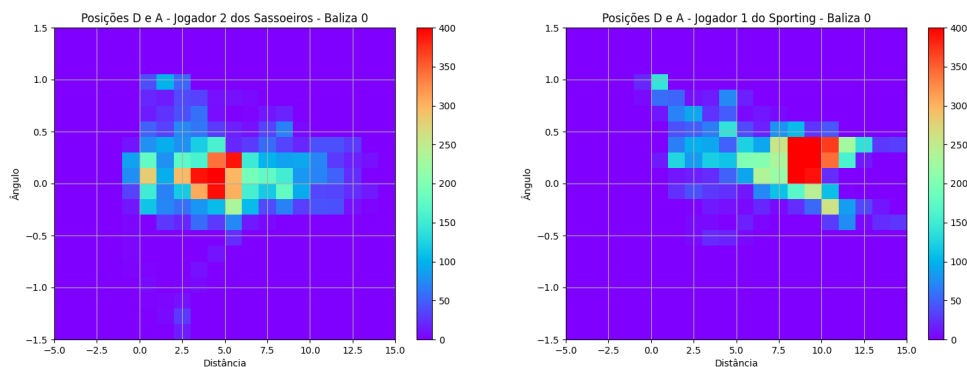


FIGURA 3.6. Mapas Térmicos do Novo Sistema em Relação à Baliza 0 - Adversários Diretos

Jogo 1 - Defesa Individual - Adversários Indiretos

Nesta análise será avaliado o mesmo jogador do Sporting do par anterior. No entanto, este será comparado com um jogador dos Sasseiros que não é seu adversário direto.

Sistema de Coordenadas Regular

Na Figura 3.7, os mapas térmicos mostram a movimentação dos jogadores no sistema de coordenadas regular (X, Y). Este sistema é útil para visualizar onde os jogadores passam mais tempo no campo, com o jogador dos Sasseiros a ocupar principalmente zonas centrais e o jogador do Sporting com uma maior distribuição para o lado direito. No entanto, uma limitação importante deste sistema é a falta de informação direta sobre a relação dos jogadores com as balizas, à semelhança do que já tinha sido verificado para o par de adversários diretos. Não se consegue discernir claramente qual baliza está a ser defendida ou atacada, o que dificulta a análise tática em cenários onde essa relação é crucial. Como tal, o sistema regular não oferece uma visão detalhada do contexto estratégico das movimentações.

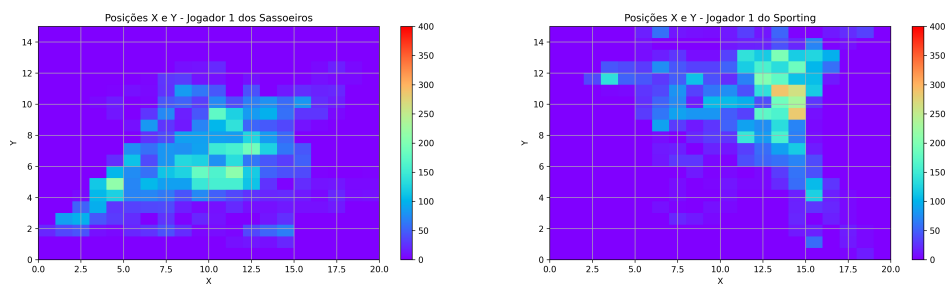


FIGURA 3.7. Mapas Térmicos do Sistema Regular - Adversários Indiretos

Novo Sistema de Coordenadas

Por outro lado, o novo sistema de coordenadas, que considera a distância à área de baliza e o ângulo em relação a esta, facilita a interpretação do contexto tático. Na Figura 3.8 é possível identificar com clareza a relação dos jogadores com as balizas, mostrando para qual baliza cada equipa está a defender. Este sistema permite uma análise mais detalhada das movimentações em função das balizas, tornando evidente a distribuição espacial dos jogadores em relação ao objetivo defensivo ou ofensivo. Ao comparar com o sistema regular, observa-se que este novo sistema oferece uma representação mais clara das zonas ocupadas no campo e como estas se relacionam com as balizas, sendo particularmente útil para entender a organização tática dos jogadores mesmo quando não são adversários diretos.

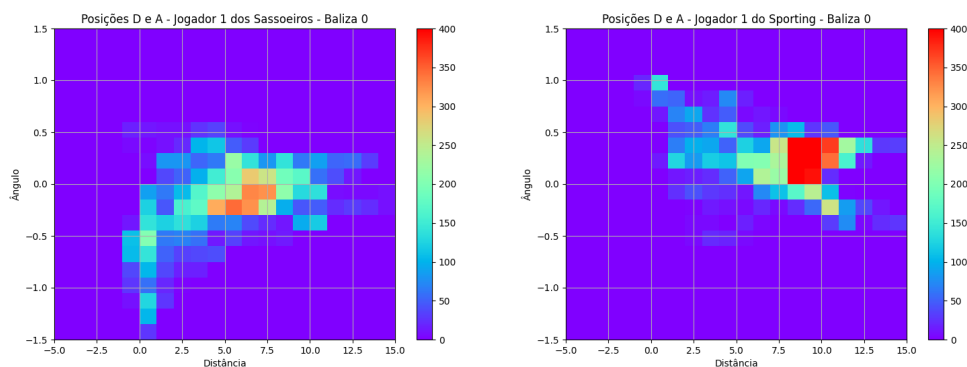


FIGURA 3.8. Mapas Térmicos do Novo Sistema em Relação à Baliza 0 - Adversários Indiretos

Jogo 2 - Defesa Zona - Primeiro Par

Sistema de Coordenadas Regular

Na Figura 3.9 os mapas térmicos do sistema de coordenadas regular mostram a movimentação dos jogadores 3 do Sporting e 3 do Queijas num jogo de defesa à zona. Embora este sistema permita identificar as áreas de maior concentração de atividade dos jogadores, não oferece informações suficientes para compreender a relação entre as movimentações e a organização defensiva típica de uma defesa à zona. Os jogadores cobrem áreas semelhantes no campo, mas não é possível discernir claramente quais são as zonas de responsabilidade de cada um, uma vez que o sistema (X, Y) não distingue entre posições ofensivas e defensivas em relação às balizas. A falta de contexto tático limita a análise das estratégias de defesa à zona, onde a cobertura de áreas específicas é essencial.

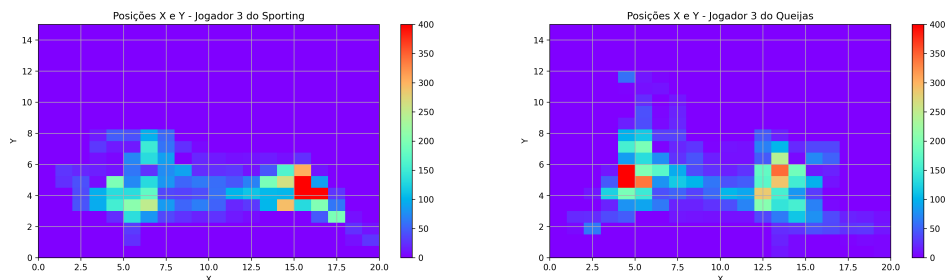


FIGURA 3.9. Mapas Térmicos do Sistema Regular - Par Próximo

Novo Sistema de Coordenadas

O novo sistema de coordenadas, que considera a distância à baliza e o ângulo em relação a esta, revela-se mais adequado para analisar a defesa à zona. Na Figura 3.10, os mapas térmicos mostram claramente a variação na cobertura dos jogadores em função das balizas. O jogador do Sporting, ao aproximar-se da baliza que ataca, apresenta uma maior variação angular, o que é típico de ações ofensivas. Por outro lado, a menor variação angular em zonas mais recuadas reflete uma abordagem defensiva característica da defesa à zona, com os jogadores a cobrir áreas específicas do campo.

Comparativamente ao sistema regular, o novo sistema permite identificar melhor as funções táticas dos jogadores. A clareza na representação das zonas cobertas e a relação com as balizas são especialmente úteis para entender as estratégias de defesa à zona, onde a cobertura espacial e a coordenação entre os jogadores são fundamentais para a eficácia defensiva.

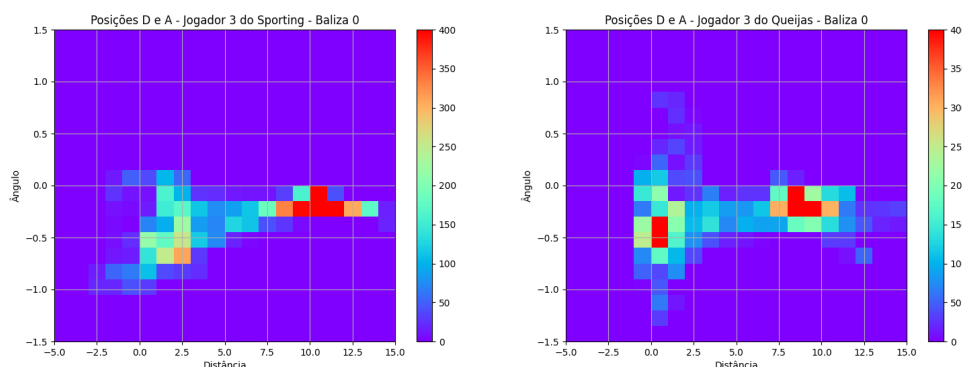


FIGURA 3.10. Mapas Térmicos do Novo Sistema em Relação à Baliza 0 - Par Próximo

Jogo 2 - Defesa Zona - Segundo Par

Nesta análise será avaliado o mesmo jogador do Sporting do par anterior. No entanto, este será comparado com um jogador dos Queijas que não ocupa posições próximas no campo.

Sistema de Coordenadas Regular

Na Figura 3.11, os mapas térmicos do sistema regular apresentam os movimentos do jogador 3 do Sporting e do jogador 1 do Queijas em coordenadas X e Y. Embora sejam visíveis as áreas de atividade dos jogadores, o sistema não oferece clareza sobre a relação com as balizas, dificultando a interpretação das funções táticas, especialmente na defesa à zona. Esta limitação torna-se ainda mais evidente para pares afastados, onde as movimentações se dispersam por áreas mais amplas.

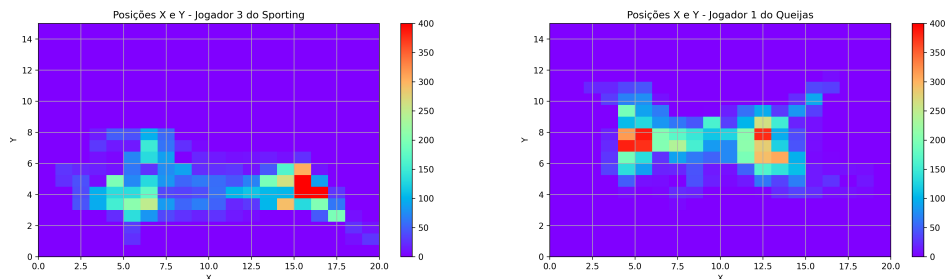


FIGURA 3.11. Mapas Térmicos do Sistema Regular - Par Afastado

Novo Sistema de Coordenadas

Na Figura 3.12 observa-se que, mesmo para este par mais afastado em campo numa defesa à zona, o novo sistema de coordenadas continua a ser mais eficaz. Baseado na distância à baliza e na variação angular, este sistema permite uma análise mais detalhada das transições entre defesa e ataque, características fundamentais na defesa à zona, onde cada jogador deve cobrir áreas específicas. A dispersão angular próxima das balizas facilita a identificação de ações ofensivas, enquanto em zonas mais distantes, a menor variação sugere uma função defensiva mais estável.

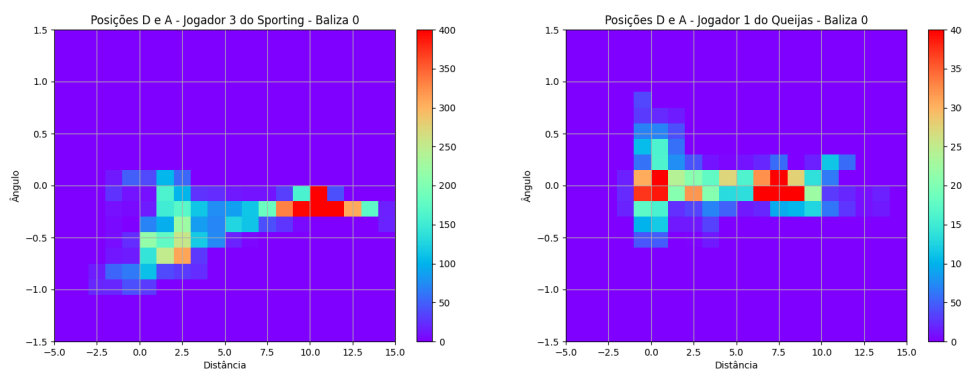


FIGURA 3.12. Mapas Térmicos do Novo Sistema em Relação à Baliza 0 - Par Afastado

Mais uma vez, comparando com o sistema regular, o novo sistema proporciona uma representação mais clara das funções táticas, destacando a necessidade de flexibilidade na

defesa à zona, especialmente em situações em que os jogadores precisam de cobrir grandes áreas no campo.

Uma análise mais detalhada, com maior nível de pormenor e incluindo também a exploração dos mapas térmicos em relação à Baliza 1, pode ser encontrada na secção de Implementação do Anexo A.

3.3.2. Segunda Iteração - Análise Sincronismo

Nesta segunda iteração, o foco mantém-se na comparação entre dois sistemas de coordenadas distintos para representar as movimentações dos jogadores de andebol. No entanto, ao contrário da primeira iteração, que se centrou nas posições individuais, esta análise foca-se no sincronismo entre os jogadores. O objetivo é avaliar como cada sistema de coordenadas capta a coordenação e a interação dos movimentos ao longo do tempo.

3.3.2.1. Compreensão do Problema

Tal como na iteração anterior, são analisados adversários diretos e não diretos, com foco nos dois tipos de defesa já estudados: defesa individual e defesa à zona. Mantém-se também a comparação entre o sistema de coordenadas cartesiano tradicional e o novo sistema, que utiliza a distância e o ângulo em relação à baliza.

A novidade desta iteração reside na análise detalhada do sincronismo entre jogadores, feita através da aplicação da Transformada de *Hilbert*. Esta técnica permite estudar a fase e a amplitude dos movimentos dos jogadores, oferecendo uma visão mais precisa sobre as suas interações e o nível de coordenação em ambos os sistemas de coordenadas. Esta abordagem possibilita uma análise comparativa mais rigorosa das dinâmicas de jogo.

3.3.2.2. Compreensão dos Dados

Nesta segunda iteração da análise, são utilizados os mesmos dados recolhidos e descritos no primeiro ciclo, que foram recolhidos através de dispositivos WIMU durante os jogos de andebol, sem substituições de jogadores e com uma duração cronometrada de 8 minutos por jogo. A organização dos dados mantém-se idêntica: quatro ficheiros Excel por jogo, divididos entre as coordenadas X e Y de cada equipa, tal como explicado detalhadamente na Compreensão dos Dados da primeira iteração.

A principal diferença nesta iteração prende-se com o tipo de análise a ser realizada. Enquanto na primeira iteração o foco estava no estudo do posicionamento dos jogadores através de mapas térmicos, nesta segunda iteração o foco é a análise do sincronismo entre os jogadores. Serão utilizados gráficos que comparam o sincronismo em termos de distância e ângulo no novo sistema de coordenadas e em termos de coordenadas X e Y no sistema regular, com o objetivo de avaliar as interações entre adversários diretos e não diretos.

Estes pares de adversários diretos e não diretos são os mesmos da iteração anterior e foram fornecidos pela especialista que disponibilizou os dados, assegurando que os pares

escolhidos são representativos das dinâmicas defensivas de cada jogo, quer em defesa individual, quer em defesa à zona.

Assim, esta fase de Compreensão dos Dados mantém a mesma estrutura de dados, mas a abordagem analítica foca-se na comparação de coordenadas e avaliação do sincronismo entre os jogadores.

3.3.2.3. *Preparação dos Dados*

Nesta fase, o processo de preparação dos dados segue, em grande parte, os mesmos princípios descritos na primeira iteração. Tal como anteriormente, os dados recolhidos através dos dispositivos WIMU foram importados e organizados em ficheiros CSV separados, com as coordenadas X e Y dos jogadores registadas em ficheiros distintos. Cada jogo resultou em quatro ficheiros CSV: um para as coordenadas X de uma equipa, outro para as coordenadas Y dessa mesma equipa, e dois ficheiros equivalentes para a equipa adversária.

As etapas de sincronização temporal, interpolação e preenchimento de valores ausentes, descritas detalhadamente na primeira iteração, foram igualmente aplicadas neste ciclo. As coordenadas dos jogadores foram sincronizadas e qualquer valor ausente nas leituras dos dispositivos WIMU foi interpolado de forma a garantir uma sequência contínua de posições para cada jogador ao longo dos jogos. A estrutura unificada de dados foi também utilizada para integrar as coordenadas X e Y das duas equipas num único conjunto de dados, facilitando a análise.

A principal diferença nesta iteração é que, além da análise da distância e ângulo no novo sistema de coordenadas, foi utilizada a Transformada de *Hilbert* para medir o sincronismo entre jogadores adversários. A Transformada foi aplicada a vários parâmetros, como as coordenadas X e Y e as variáveis distância e ângulo. A forma como o sincronismo foi analisado será descrita com maior detalhe na fase seguinte, a Modelação.

3.3.2.4. *Modelação*

Nesta fase de Modelação, o foco está na comparação do sincronismo entre pares de jogadores, sejam adversários diretos ou não, utilizando dois gráficos baseados na aplicação da Transformada de *Hilbert* e de uma função que calcula o coeficiente de sincronismo. Esta análise é realizada tanto para os parâmetros do novo sistema de coordenadas (distância e ângulo) como para os parâmetros do sistema regular (X e Y).

Como na iteração anterior, o desenvolvimento do código e geração dos gráficos foi realizado em Python, utilizando bibliotecas como *NumPy*, *Matplotlib* e *SciPy* para processamento e visualização dos dados. Nesta fase, a Transformada de *Hilbert* é utilizada para medir o sincronismo entre os sinais dos diferentes parâmetros dos sistemas de coordenadas.

Geração dos Gráficos de Comparação

Os gráficos gerados nesta fase aplicam o cálculo do coeficiente de sincronismo à Transformada de *Hilbert*, permitindo medir o sincronismo entre dois sinais. Para cada par de jogadores, foram gerados dois gráficos principais que realizam as seguintes comparações:

- Distância à baliza com o ângulo em relação ao centro da baliza no novo sistema de coordenadas;
- Coordenadas X com a coordenada Y no sistema regular de coordenadas.

A Transformada de *Hilbert* é aplicada a cada um dos sinais (distância e ângulo, ou X e Y). Esta técnica matemática avançada permite analisar e processar sinais temporais, fornecendo informações detalhadas sobre a fase e a amplitude de um sinal ao longo do tempo. Ao aplicá-la aos dados de movimento dos jogadores, é possível observar as variações de fase e amplitude, oferecendo uma visão objetiva das interações e da dinâmica entre eles.

No contexto do andebol, a Transformada de *Hilbert* revela padrões de sincronização e coordenação entre os jogadores, permitindo identificar as relações espaciais e temporais dos seus movimentos e como essas interações influenciam as táticas e estratégias de jogo. Assim, facilita-se a análise da coordenação coletiva e a otimização das estratégias da equipa.

O Coeficiente de sincronismo, crucial nesta análise, avalia o grau de sincronismo entre os dois sinais ao calcular o alinhamento das suas fases ao longo do tempo. O fator de sincronismo, $\rho_j(t)$, dentro do *cluster* j e no instante t , é dado pela seguinte equação:

$$\rho_j(t) = \frac{1}{N_j} \sum_{i=1}^{N_j} e^{i\phi_{ji}(t)} \quad (3.1)$$

em que N_j é o número de elementos do *cluster* j e é igual a 2, e $\phi_{ji}(t)$ é a fase do elemento i no *cluster* j e no instante t , após a aplicação da Transformada de Hilbert.

Esta função mede o grau de sincronismo entre os sinais, calculando o alinhamento das fases ao longo do tempo. A fase de cada sinal é extraída através da Transformada de *Hilbert* e, com base nisso, o coeficiente de sincronismo avalia o grau de correspondência entre as fases numa escala contínua de 0 (sem sincronismo) a 1 (sincronismo total).

Implementação da Transformada de Hilbert e Função quof()

A função *quof()* foi desenvolvida no âmbito deste trabalho e representa o coeficiente de sincronismo, sendo utilizada para avaliar o alinhamento das fases entre dois sinais transformados pela Transformada de *Hilbert*. Esta função é aplicada tanto às coordenadas X e Y no sistema regular, como à distância e ao ângulo no novo sistema de coordenadas.

Antes de aplicar a Transformada de *Hilbert*, os sinais são centralizados, removendo-se a média para garantir que as análises se concentrem apenas nas variações, e não nos valores absolutos. Este processo isola as oscilações nas trajetórias dos jogadores, facilitando uma análise comparativa mais precisa.

A Transformada de *Hilbert* gera, então, uma representação complexa de cada sinal, permitindo que se extraia a fase e amplitude dos movimentos de cada jogador. A partir dessas fases, a função *quof()* avalia o grau de sincronismo entre os dois sinais.

Esta metodologia integra-se bem com o Método de Fase de *Clusters*, proposto por Frank e Richardson em 2010, que utiliza transformações matemáticas como a Transformada de *Hilbert* para calcular a fase de *clusters* dos movimentos dos jogadores [34], [35]. O método baseia-se no Modelo de Kuramoto e permite calcular o sincronismo médio e contínuo dos jogadores ao longo do tempo [36]. Através da fase de *clusters*, avalia-se como cada jogador está sincronizado com o comportamento coletivo da equipa, proporcionando uma análise detalhada da estabilidade do sincronismo. No contexto deste trabalho, os *clusters* têm tamanho 2, dado que o objetivo é observar o sincronismo entre pares de jogadores.

Em termos práticos, a função *quof()* mede o grau de sincronização ao calcular o alinhamento das fases dos sinais num determinado intervalo temporal. A fase de cada jogador, extraída pela Transformada de *Hilbert*, permite avaliar de forma contínua a coordenação entre os jogadores e obter uma métrica clara da sua interação. Este processo é fundamental para entender como as equipas se organizam taticamente em campo e como se ajustam durante o jogo.

Interpretação dos Gráficos

Os dois gráficos gerados para cada par de jogadores fornecem uma visão clara sobre o sincronismo entre os sinais avaliados. No primeiro gráfico, que utiliza o novo sistema de coordenadas, são apresentados os valores de sincronismo entre a distância à baliza e o ângulo em relação ao centro da baliza. No segundo gráfico, o foco está nas coordenadas X e Y do sistema regular de coordenadas.

Estes gráficos permitem avaliar como os jogadores interagem em termos de posições no campo e como o sincronismo entre eles evolui ao longo do tempo. Nos pares de adversários diretos, é esperado um nível mais elevado de sincronismo. Por outro lado, nos adversários não diretos, o sincronismo tende a ser menor, já que os jogadores estão focados em zonas diferentes do campo e têm objetivos distintos. Em relação ao tipo de defesa, é esperado que uma defesa individual apresente mais sincronismo comparativamente a uma defesa à zona, uma vez que, na defesa individual, os jogadores estão mais diretamente focados em acompanhar os movimentos dos adversários diretos.

Comparação entre os Sistemas de Coordenadas

A comparação entre o sistema regular de coordenadas e o novo sistema focado no andebol continua a ser um ponto central desta fase de Modelação. O sistema regular, ao utilizar as coordenadas X e Y, proporciona uma visão geral das trajetórias dos jogadores, mas nem sempre reflete de forma clara a relação deles com a baliza. Já o novo sistema, ao utilizar a distância e o ângulo em relação à baliza, oferece uma perspetiva mais orientada para as necessidades táticas do andebol, permitindo uma análise mais precisa das movimentações dos jogadores.

Com a aplicação da Transformada de *Hilbert* em ambos os sistemas, é possível comparar o nível de sincronismo nas diferentes métricas e compreender como os jogadores se coordenam em relação à baliza ou às suas posições gerais no campo.

Ajustes e Otimização dos Gráficos

Tal como na primeira iteração, foram realizados vários ajustes para garantir que todos os gráficos seguissem os mesmos parâmetros de escala, permitindo uma comparação direta entre os diferentes jogadores e sistemas de coordenadas.

3.3.2.5. Avaliação

Nesta fase serão analisados os resultados obtidos ao longo dos dois jogos, comparando os dois sistemas de coordenadas utilizados através da avaliação do sincronismo entre os jogadores. Serão discutidas as diferenças entre as defesas à zona e individual, com o objetivo de avaliar a eficácia e as vantagens do novo sistema de coordenadas em relação ao sistema tradicional, no que toca à análise tática e ao ajuste das movimentações dos jogadores em campo. Para cada par de jogadores adversários foram gerados dois gráficos: a aplicação da função *quof()* à Transformada de *Hilbert* para o ângulo e distância no novo sistema de coordenadas e a aplicação da função *quof()* à mesma Transformada para as posições X e Y no sistema regular. Em cada jogo, serão avaliados dois pares de jogadores adversários: no jogo de defesa individual, serão comparados pares de adversários diretos e não diretos, enquanto no jogo de defesa à zona, será feita a análise de um par de jogadores que ocupam zonas próximas no campo e outro que ocupa zonas mais afastadas.

Jogo 1 - Defesa Individual - Adversários Diretos

Na Figura 3.13, o gráfico à esquerda mostra o sincronismo entre os adversários diretos num jogo de defesa individual, medido em termos de distância e ângulo em relação à baliza 0 (novo sistema), enquanto o gráfico à direita apresenta o sincronismo com base nas coordenadas X e Y (sistema regular). O gráfico da esquerda utiliza a Transformada de *Hilbert* para calcular e comparar as fases das distâncias (linha azul) e dos ângulos (linha laranja) dos dois jogadores em relação à baliza 0, escolhida para a análise por se tratar da baliza onde grande parte do jogo ocorria, conforme observado na primeira iteração.

A função *quof()* foi aplicada à Transformada de *Hilbert* para avaliar o grau de proximidade entre as fases dos dois sinais, oferecendo uma medida do sincronismo entre os jogadores ao longo do tempo. Por se tratar de adversários diretos, o sincronismo é particularmente relevante, dado que o defensor deve ajustar continuamente a sua posição para seguir o movimento do atacante.

O novo sistema revela-se mais eficaz neste contexto, pois a utilização da distância e do ângulo em relação à baliza facilita a avaliação do alinhamento tático dos jogadores em momentos chave. Para os adversários diretos, as flutuações no sincronismo tornam-se mais evidentes no novo sistema, permitindo identificar de forma mais clara os momentos

em que o defensor se ajusta para acompanhar o atacante. Em contraste, o sistema regular, que mede apenas as coordenadas X e Y, não reflete com a mesma precisão essa dinâmica de ajuste, apresentando variações menos significativas e dificultando a interpretação do comportamento tático dos jogadores.

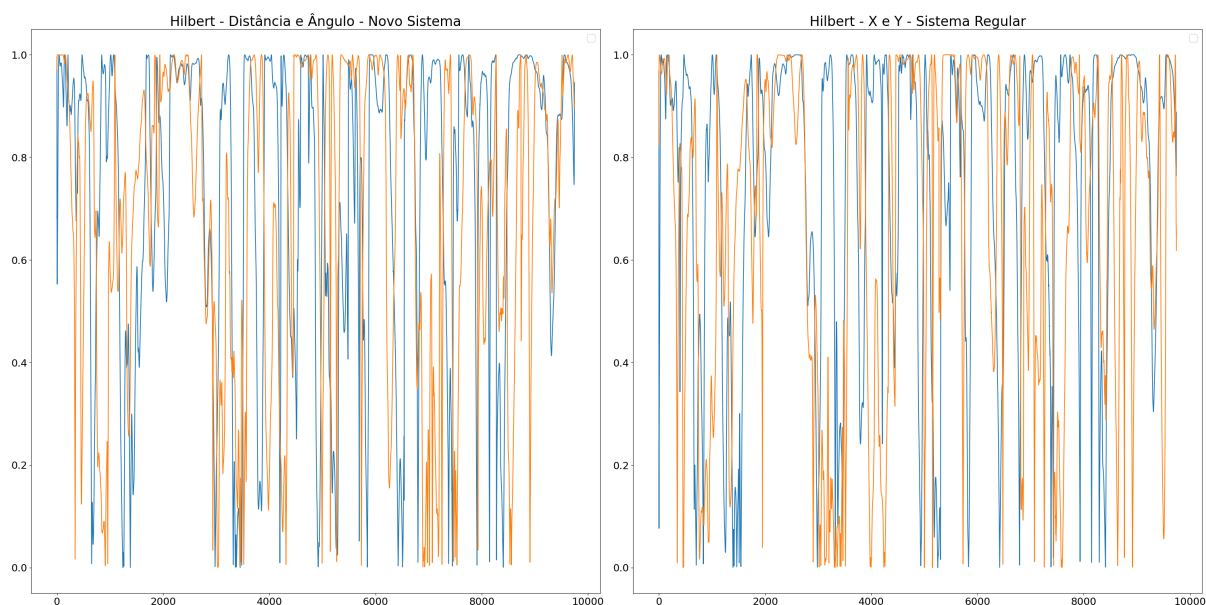


FIGURA 3.13. Comparação de Sistemas - Jogo 1 - Adversários Diretos

Jogo 1 - Defesa Individual - Adversários Não Diretos

Na Figura 3.14 é apresentado o sincronismo entre dois jogadores que não são adversários diretos num jogo de defesa individual, utilizando o novo sistema de coordenadas à esquerda e o sistema regular à direita.

No novo sistema, a análise mostra-se mais eficaz para identificar momentos de alinhamento, especialmente em termos de distância à baliza, com a função *quof()* a revelar picos de sincronismo mais nítidos. A discrepância nos ângulos indica que, mesmo quando as distâncias são semelhantes, os jogadores estão a cobrir diferentes áreas do campo, o que é esperado num par de adversários indiretos. Em contrapartida, no sistema regular, o sincronismo é menos evidente, com variações nas coordenadas X e Y que dificultam a interpretação da coordenação dos jogadores.

A comparação entre os sistemas destaca que, mesmo para pares não diretos, o novo sistema proporciona uma análise mais precisa das diferenças na dinâmica de movimentação. A utilização da distância e do ângulo em relação à baliza oferece uma visão mais clara sobre os ajustes posicionais dos jogadores, algo que o sistema regular não consegue captar com a mesma clareza.

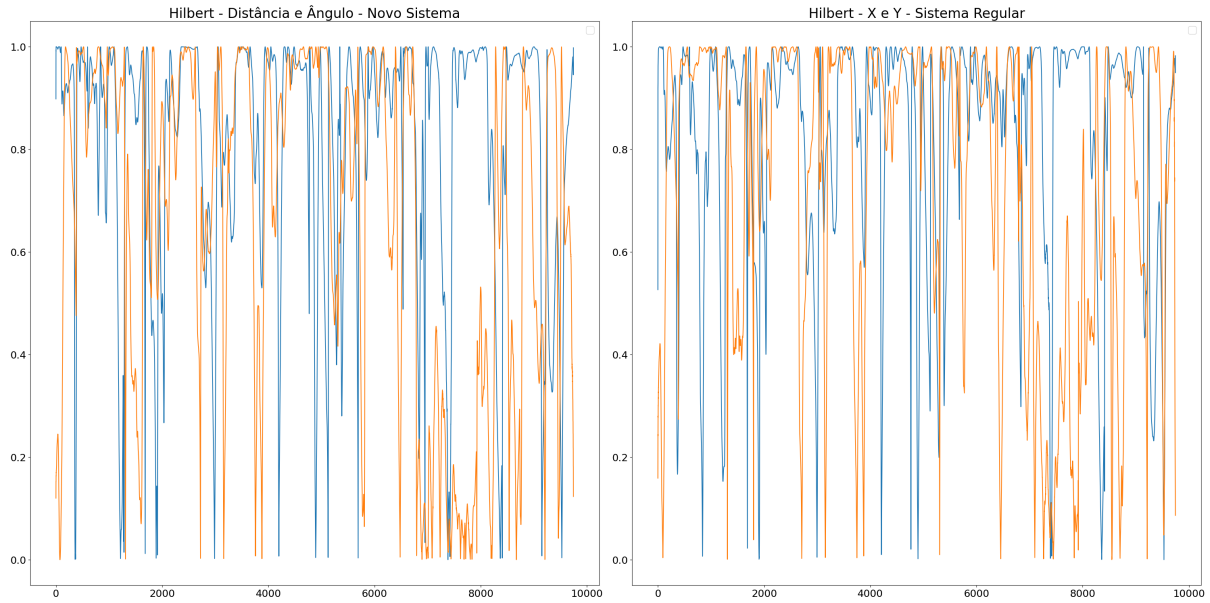


FIGURA 3.14. Comparação de Sistemas - Jogo 1 - Adversários Indiretos

Jogo 2 - Defesa Zona - Primeiro Par

Na Figura 3.15, comparam-se os gráficos de sincronismo para um par de jogadores próximos no campo num jogo de defesa zona, com o novo sistema à esquerda e o sistema regular à direita. A análise foi feita em relação à baliza 1, onde o Sporting está a atacar. Neste contexto, o sincronismo reflete a necessidade de coordenação na ocupação de espaços específicos, característica essencial de uma defesa zona.

No novo sistema, observa-se uma sincronização forte nas distâncias (linha azul), com o coeficiente a aproximar-se de 1 durante grande parte do jogo. Isto sugere que os jogadores mantêm uma proximidade constante e ajustam as suas posições de forma coordenada em termos de distância à baliza, o que é típico numa defesa zona, onde a ocupação do espaço deve ser uniforme. O sincronismo nos ângulos (linha laranja) é um pouco mais variável, mas mantém-se elevado em várias fases, indicando que os jogadores estão geralmente alinhados na cobertura dos ângulos defensivos.

Por outro lado, no sistema regular, embora exista uma boa sincronização no eixo X, o eixo Y mostra flutuações frequentes, sugerindo variações na coordenação vertical. As oscilações no eixo Y indicam que, mesmo numa defesa zona, os jogadores ajustam as suas posições em resposta a diferentes situações, o que o novo sistema regista com mais precisão através da análise dos ângulos e distâncias. Desta forma, o novo sistema demonstra ser mais eficaz para interpretar a dinâmica de movimentação numa defesa zona num par de adversários próximo no campo, proporcionando uma visão detalhada e ajustada à cobertura espacial dos jogadores.

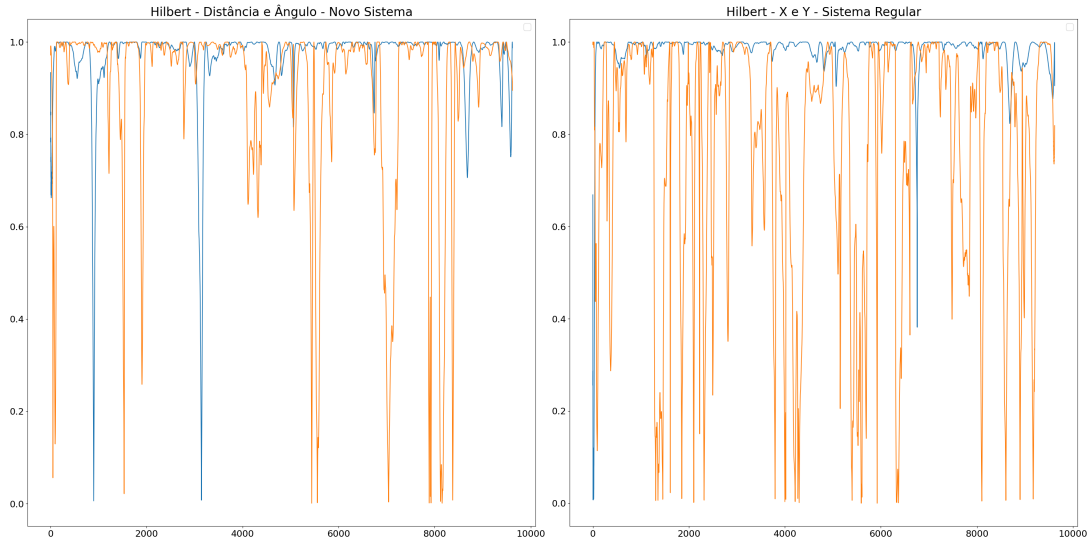


FIGURA 3.15. Comparação de Sistemas - Jogo 2 - Adversários Próximos

Jogo 2 - Defesa Zona - Segundo Par

No caso do par mais afastado em campo, numa defesa zona, o novo sistema de coordenadas revela-se novamente superior ao sistema regular. A Figura 3.16, mostra que, mesmo para jogadores distantes, a análise baseada na distância e ângulo em relação à baliza consegue registrar melhor o grau de coordenação, evidenciado pelos valores elevados do coeficiente na linha azul (distância). Isso sugere que, mesmo estando afastados, os jogadores mantêm uma certa sincronização na sua relação com a baliza, o que é fundamental numa defesa zona para garantir a cobertura coesa de diferentes áreas do campo.

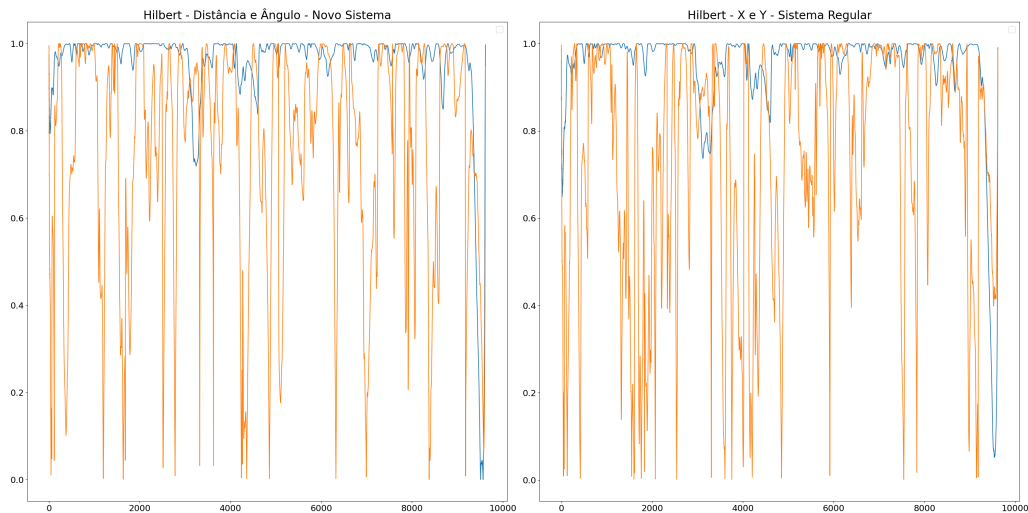


FIGURA 3.16. Comparação de Sistemas - Jogo 2 - Adversários Afastados

Por outro lado, a sincronização dos ângulos (linha laranja) mostra valores mais baixos e uma maior variabilidade, o que reflete as diferenças naturais nos ângulos cobertos pelos jogadores em zonas afastadas. Esse comportamento é esperado, dado que, em defesa zona,

jogadores em posições distantes não precisam coordenar os ângulos da mesma forma que o fariam em pares próximos. Em comparação, o sistema regular apresenta uma boa coordenação no eixo horizontal (linha azul), mas uma maior descoordenação no eixo vertical (linha laranja), o que reforça a vantagem do novo sistema em representar as dinâmicas táticas de forma mais clara, especialmente para pares afastados, onde o foco na baliza e ângulos é mais relevante.

Uma análise mais detalhada, incluindo a avaliação completa dos gráficos e outras observações relevantes, encontra-se na secção de Implementação no Anexo A.

3.3.3. Terceira Iteração - Decomposição Empírica do Sinal em Modos

Na terceira iteração, vão ser novamente comparados os dois sistemas de coordenadas, mas desta vez, o foco está apenas num só jogo e par de jogadores. Nesta iteração será utilizada a Decomposição Empírica dos Sinais para analisar a sincronização dos movimentos dos jogadores em diferentes escalas temporais, medindo a coordenação ao longo do tempo.

3.3.3.1. Compreensão do Problema

Nesta iteração, o foco é a comparação dos dois sistemas de coordenadas na análise do sincronismo entre um par de adversários diretos, num jogo de defesa individual já analisado nas iterações anteriores. Ao contrário das iterações anteriores, onde foram analisados múltiplos jogadores e diferentes contextos defensivos, esta fase concentra-se apenas num par de jogadores a defender de forma individual, permitindo uma análise mais aprofundada da coordenação entre eles.

A principal novidade nesta iteração é a decomposição dos sinais através da Decomposição Empírica dos Sinal em Modos (*Empirical Mode Decomposition - EMD*). Este processo permite a identificação de padrões de coordenação mais complexos dividindo os movimentos dos jogadores em diferentes escalas temporais, obtendo para cada uma função intrínseca desse modo (*Intrinsic Mode Function - IMF*). Com a aplicação da Transformada de *Hilbert* às IMFs, é possível analisar as fases instantâneas dos movimentos em cada um desses modos, medindo o grau de sincronismo entre os jogadores através da função *quof()* já descrita anteriormente. Esta abordagem oferece uma visão detalhada dos momentos em que os jogadores estão mais ou menos coordenados ao longo do tempo.

Espera-se que o novo sistema de coordenadas ofereça uma visão mais tática, destacando a proximidade à baliza e a cobertura angular como elementos fundamentais para a defesa individual. A comparação com o sistema cartesiano permitirá determinar qual dos dois sistemas descreve de forma mais eficaz a dinâmica do jogo em diferentes escalas de movimento.

3.3.3.2. Compreensão dos Dados

Os dados utilizados nesta iteração são os mesmos recolhidos através dos dispositivos

WIMU, tal como descrito nas iterações anteriores. Cada jogador foi monitorizado durante o jogo de andebol, com as suas coordenadas X e Y registadas continuamente em ficheiros CSV separados para cada equipa. A organização, estrutura e sincronização temporal destes dados seguem os mesmos procedimentos já explicados anteriormente.

Nesta iteração, o foco está num par de adversários diretos num contexto de defesa individual, num jogo já analisado nas fases anteriores. Este par foi previamente identificado pela especialista como adversários diretos, assegurando que as dinâmicas analisadas refletem interações defensivas reais.

A novidade desta iteração é a análise detalhada do sincronismo entre os jogadores, que será realizada através da decomposição de sinais e da aplicação da Transformada de *Hilbert*. Para esta análise, é essencial que os dados sejam contínuos e sincronizados, de modo a garantir uma avaliação precisa das fases instantâneas e das diferentes escalas temporais de movimento dos jogadores.

3.3.3.3. *Preparação dos Dados*

O processo de preparação dos dados nesta iteração segue os princípios já detalhados nas iterações anteriores. Como previamente descrito, os dados recolhidos pelos dispositivos WIMU foram organizados em ficheiros CSV, contendo as coordenadas X e Y dos jogadores ao longo do jogo. A sincronização temporal, interpolação de valores ausentes e a conversão para o novo sistema de coordenadas também foram aplicadas da mesma forma, garantindo a continuidade e comparabilidade dos dados.

A principal inovação nesta fase foi a aplicação da Decomposição Empírica de Modos e da Transformada de *Hilbert*. A função `menosMean()` foi utilizada para centralizar os dados de distância e ângulo, removendo a média dos sinais, e posteriormente aplicou-se a Transformada de *Hilbert* para calcular as fases instantâneas dos movimentos dos jogadores, proporcionando uma análise mais precisa do sincronismo.

Além disso, utilizou-se uma função específica para eliminar os primeiros e últimos 5% dos dados. Esta função, chamada `trim_5_percent()`, foi aplicada para remover os dados extremos no início e no fim dos sinais, assegurando que apenas a parte central, e portanto mais estável e relevante, dos dados fosse considerada na análise. Isto permitiu reduzir eventuais ruídos ou distorções que poderiam influenciar os resultados.

Adicionalmente, a decomposição dos sinais em IMFs permitiu dividir os movimentos dos jogadores em diferentes escalas temporais. Esta técnica foi aplicada tanto para os parâmetros do sistema cartesiano (X e Y) quanto para o novo sistema (distância e ângulo), possibilitando uma análise mais detalhada dos movimentos em múltiplas escalas.

3.3.3.4. *Modelação*

Nesta terceira iteração, o foco é a análise detalhada do sincronismo entre um par de adversários diretos, num contexto de defesa individual. Para isso, foram aplicadas técnicas avançadas de processamento de sinais, como a Decomposição Empírica de Modos e a

Transformada de *Hilbert*, tanto para o sistema cartesiano tradicional, quanto para o novo sistema de coordenadas.

Decomposição Empírica do Sinal em Modos

A EMD é uma técnica de decomposição de sinais que permite dividir o movimento dos jogadores em diferentes componentes oscilatórios, chamados IMFs. Cada IMF reflete uma escala temporal distinta, permitindo analisar os padrões de movimento desde as oscilações mais rápidas e curtas até aos movimentos mais lentos e amplos.

A EMD é uma técnica particularmente útil quando os sinais são não lineares e não estacionários, como é o caso dos movimentos de jogadores num campo de andebol, que variam em diferentes frequências ao longo do tempo. Esta técnica isola padrões de movimento específicos, possibilitando uma análise detalhada de como os jogadores se movem em escalas temporais distintas.

Na prática, a função de decomposição EMD divide os sinais de movimento (coordenadas X e Y no sistema cartesiano, e distância e ângulo no novo sistema) em várias IMFs. Para este par de jogadores, estas IMFs foram geradas e comparadas para analisar o comportamento de sincronismo em diferentes frequências.

Aplicação da Transformada de Hilbert

Após a decomposição dos sinais em IMFs, foi aplicada a Transformada de *Hilbert* a cada IMF. Esta transformada permite calcular a fase instantânea de cada componente de movimento, oferecendo uma visão sobre o alinhamento ou desfasamento dos movimentos entre os jogadores ao longo do tempo. A fase instantânea indica a posição relativa dos jogadores em cada momento, mostrando se os seus movimentos estão em sincronia ou fora de fase.

A Transformada de *Hilbert* extrai informações importantes, como a amplitude e a fase dos sinais. Ao aplicá-la a cada IMF, obtemos uma representação clara dos momentos em que os jogadores estão mais alinhados ou descoordenados.

Sincronismo (quof())

A função *quof()* já foi abordada na segunda iteração, esta mede o grau de sincronismo entre dois sinais com base nas suas fases instantâneas. A função calcula o sincronismo entre dois jogadores a partir dos resultados da Transformada de *Hilbert*, retornando um valor entre 0 (sem sincronismo) e 1 (sincronismo perfeito). Este valor é calculado para cada IMF, permitindo avaliar o alinhamento dos jogadores em diferentes escalas temporais.

A função *quof()* foi aplicada às fases instantâneas das IMFs tanto no sistema cartesiano quanto no novo sistema, permitindo uma comparação do sincronismo entre os dois jogadores nos dois sistemas de coordenadas.

Geração de Gráficos Comparativos

Para visualizar os resultados, foram gerados três tipos de gráficos para cada IMF, fornecendo uma visão detalhada do comportamento dos jogadores e do sincronismo ao longo do tempo:

Gráfico das IMFs

Este gráfico representa cada IMF individualmente, permitindo visualizar como os movimentos dos jogadores são decompostos em diferentes frequências. As IMFs mais baixas captam os padrões de movimento mais rápidos, enquanto as IMFs de ordem superior captam movimentos mais lentos. A comparação das IMFs dos dois jogadores permite analisar como as suas trajetórias variam ao longo do tempo e em diferentes escalas temporais.

Gráfico das Fases Instantâneas

Após a aplicação da Transformada de *Hilbert*, este gráfico mostra a fase instantânea de cada IMF ao longo do tempo. A fase indica a posição relativa de cada jogador em termos de movimento. Quando as fases estão alinhadas, significa que os jogadores estão em sincronia, e quando há desfasamento, os jogadores estão a mover-se de forma independente. Este gráfico permite visualizar diretamente os momentos de sincronismo e desfasamento entre os jogadores.

Gráfico do Sincronismo

Este gráfico mostra o sincronismo (*quof()*) entre os dois jogadores em cada IMF. O *quof()* varia entre 0 e 1 e é calculado ao longo do tempo. Este gráfico é particularmente útil para identificar os momentos em que os jogadores estão mais coordenados e as fases em que há uma falha no sincronismo.

Ajuste das Escalas

Para garantir uma comparação direta e clara entre os gráficos gerados para cada coordenada, foi aplicado um ajuste das escalas dos eixos. Assim, gráficos do mesmo tipo (por exemplo, as IMFs de X) foram gerados com a mesma escala para facilitar a comparação entre jogadores e coordenadas. Este ajuste permite observar de forma precisa as diferenças e semelhanças nas dinâmicas de movimento dos jogadores em ambos os sistemas de coordenadas. Estes gráficos foram gerados tanto para as coordenadas X e Y do sistema cartesiano quanto para a distância e o ângulo no novo sistema.

3.3.3.5. *Avaliação*

Nesta fase, são comparados dois sistemas de coordenadas para avaliar o sincronismo entre um par de adversários diretos, no contexto de um jogo de defesa individual. O primeiro sistema utiliza a distância e o ângulo em relação à baliza 0, que é a baliza para onde o jogador mais ofensivo, neste caso do Sporting, ataca. Como tal, esta baliza torna-se a mais interessante para analisar. O segundo sistema recorre às tradicionais coordenadas X e Y. A análise centra-se nos resultados obtidos a partir das decomposições de sinal (IMFs), das fases instantâneas (*Hilbert*) e do sincronismo medido pela função *quof()*, com o objetivo de avaliar como cada sistema capta a coordenação entre os jogadores.

Distância à Baliza

Para a distância à baliza 0, as IMFs de ordens inferiores captam movimentos rápidos e instáveis, enquanto as IMFs intermédias mostram maior estabilidade, indicando melhor coordenação. Nas ordens superiores, os movimentos são mais lentos e os ajustes posicionais são graduais (Figura 3.17).

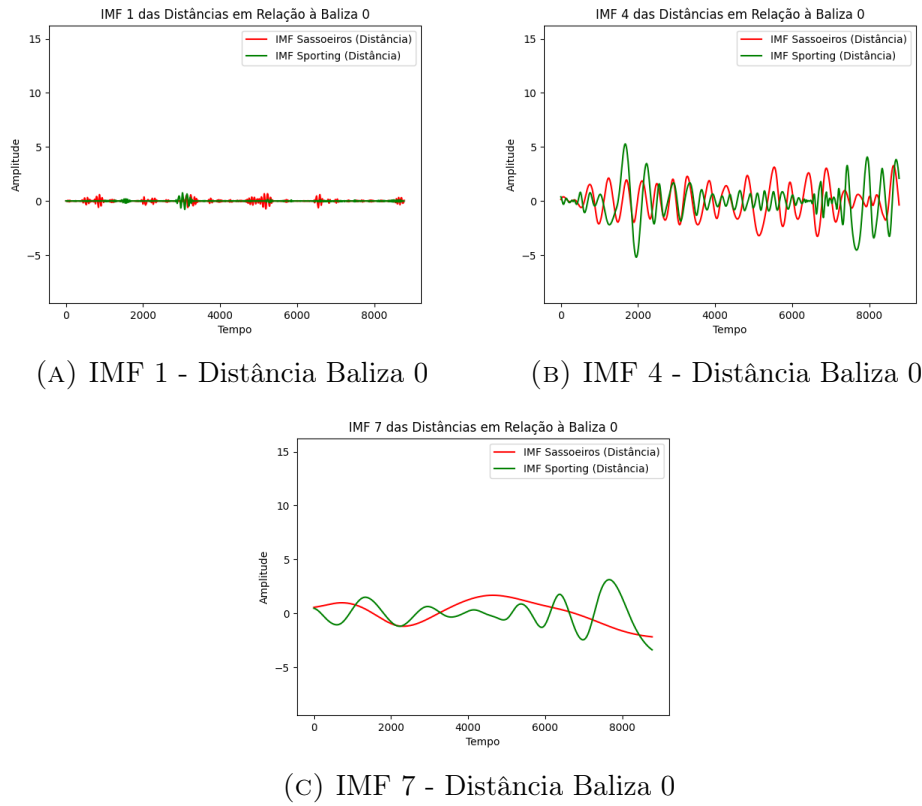
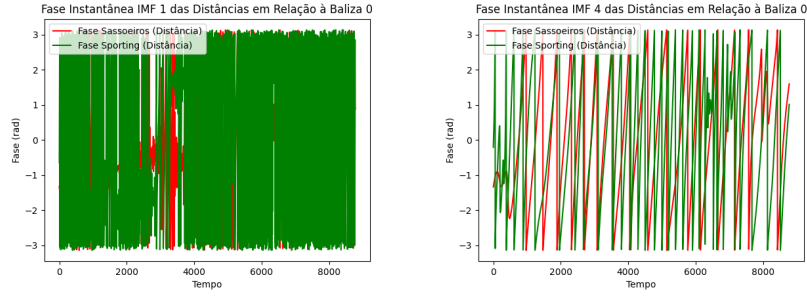
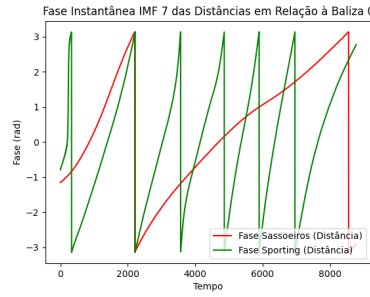


FIGURA 3.17. IMF dos Diferentes Modos para Distância à Baliza 0

As fases instantâneas revelam mais desfasamentos nas IMFs inferiores, melhor correspondência nas intermédias e alguma divergência nas superiores (Figura 3.18). Os gráficos de sincronismo ($quof()$) refletem essa tendência, com maior instabilidade nas ordens inferiores, melhor sincronismo nas intermédias e uma diminuição em certos momentos nas superiores (Figura 3.19).

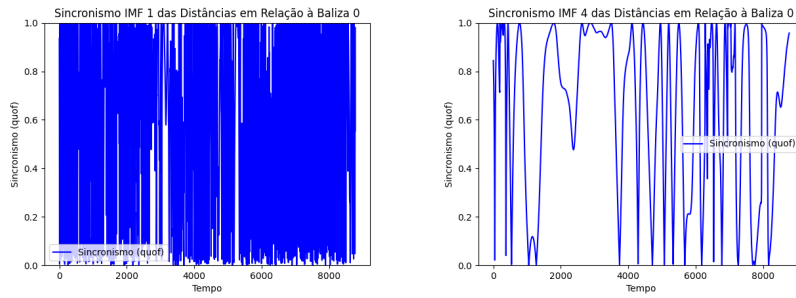


(A) IMF 1 - Fase de Distância Ba- (B) IMF 4 - Fase de Distância Ba-
liza 0 liza 0

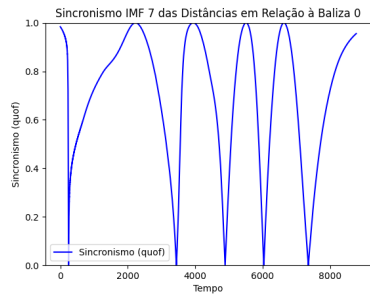


(C) IMF 7 - Fase de Distância Ba-
liza 0

FIGURA 3.18. Fase de Distância para Distância à Baliza 0



(A) IMF 1 - Sincronismo Distân- (B) IMF 4 - Sincronismo Distân-
cia Baliza 0 cia Baliza 0



(C) IMF 7 - Sincronismo Distân-
cia Baliza 0

FIGURA 3.19. Sincronismo para Distância à Baliza 0

Ângulo à Baliza

Para o ângulo em relação à baliza 0, as IMFs de ordens inferiores mostram variações rápidas e instáveis, com maior dificuldade de coordenação por parte do defensor. Nas IMFs de ordens intermédias e superiores, os movimentos tornam-se mais suaves e controlados, com melhor coordenação entre os jogadores (Figura 3.20).

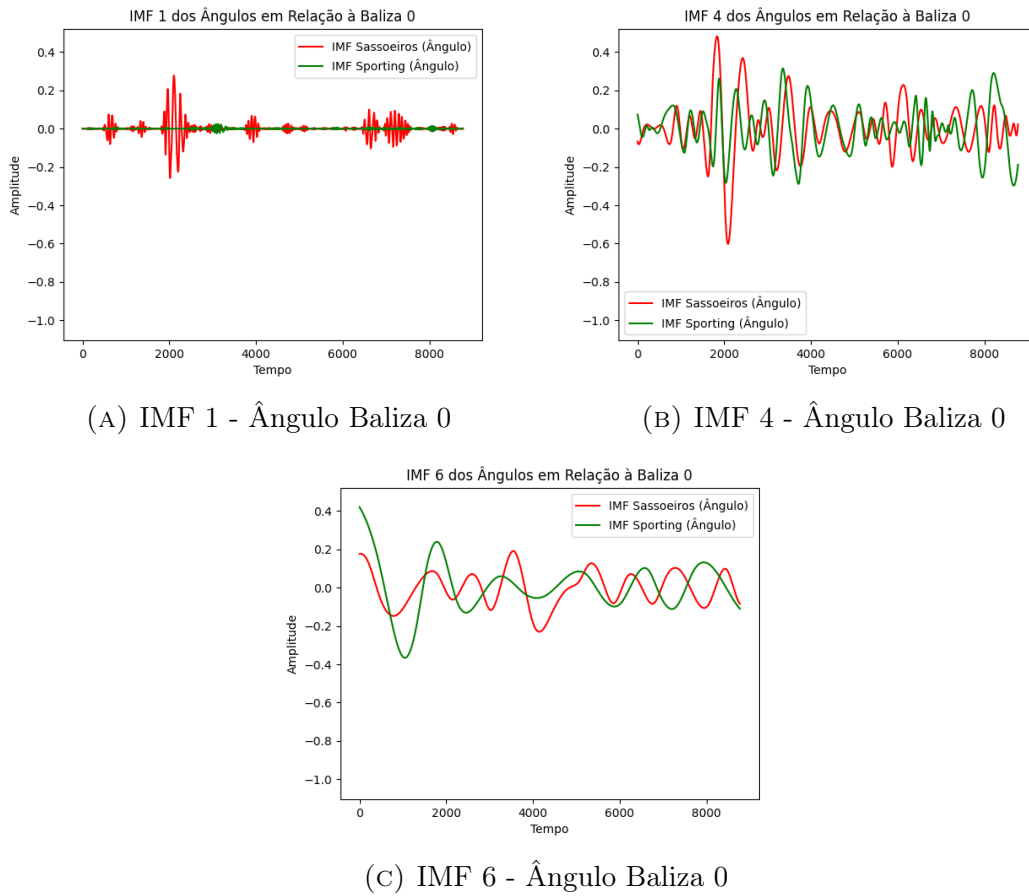
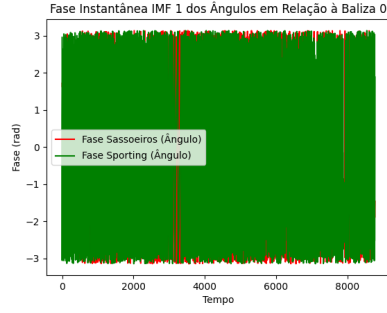
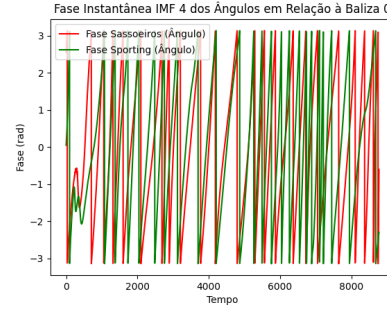


FIGURA 3.20. IMF dos Diferentes Modos para Ângulo à Baliza 0

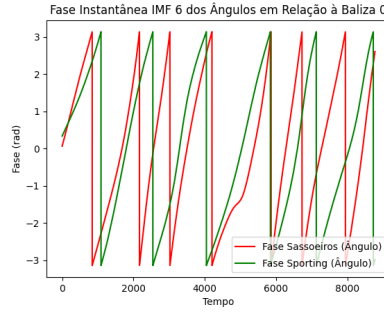
As fases instantâneas revelam maior alinhamento nas IMFs superiores, indicando uma melhor sincronização em fases mais estratégicas do jogo, enquanto nas ordens inferiores o desfasamento é mais evidente (Figura 3.21). O sincronismo (*quof()*) é mais elevado e estável nas ordens superiores, refletindo uma maior coordenação angular em movimentos mais lentos, e diminui nas ordens inferiores devido à natureza imprevisível dos movimentos rápidos (Figura 3.22).



(A) IMF 1 - Fase de Ângulo Baliza 0

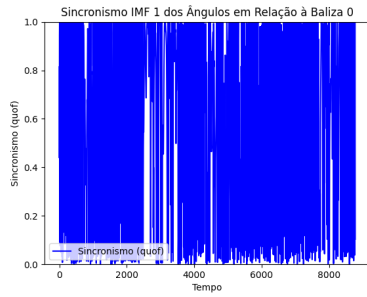


0

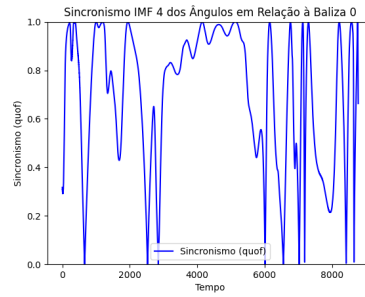


(C) IMF 6 - Fase de Ângulo Baliza 0

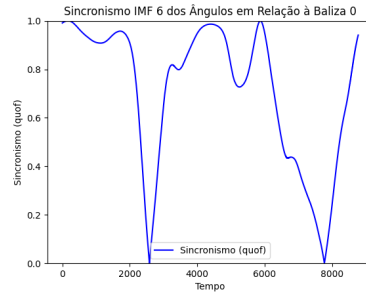
FIGURA 3.21. Fase de Ângulo para Distância à Baliza 0



(A) IMF 1 - Sincronismo Ângulo Baliza 0



Baliza 0



(C) IMF 6 - Sincronismo Ângulo Baliza 0

FIGURA 3.22. Sincronismo para Ângulo à Baliza 0

Coordenada Longitudinal - X

Nos gráficos das IMFs para a coordenada X, observam-se oscilações com amplitudes semelhantes para os dois jogadores, tanto nas IMFs de ordens inferiores (variações rápidas e de menor amplitude) quanto nas de ordens superiores (movimentos mais suaves), como se verifica na Figura 3.23. No entanto, a coordenação horizontal entre os jogadores é limitada, uma vez que as diferenças de comportamento não são tão evidentes, o que sugere uma dificuldade em representar com precisão a dinâmica tática neste sistema.

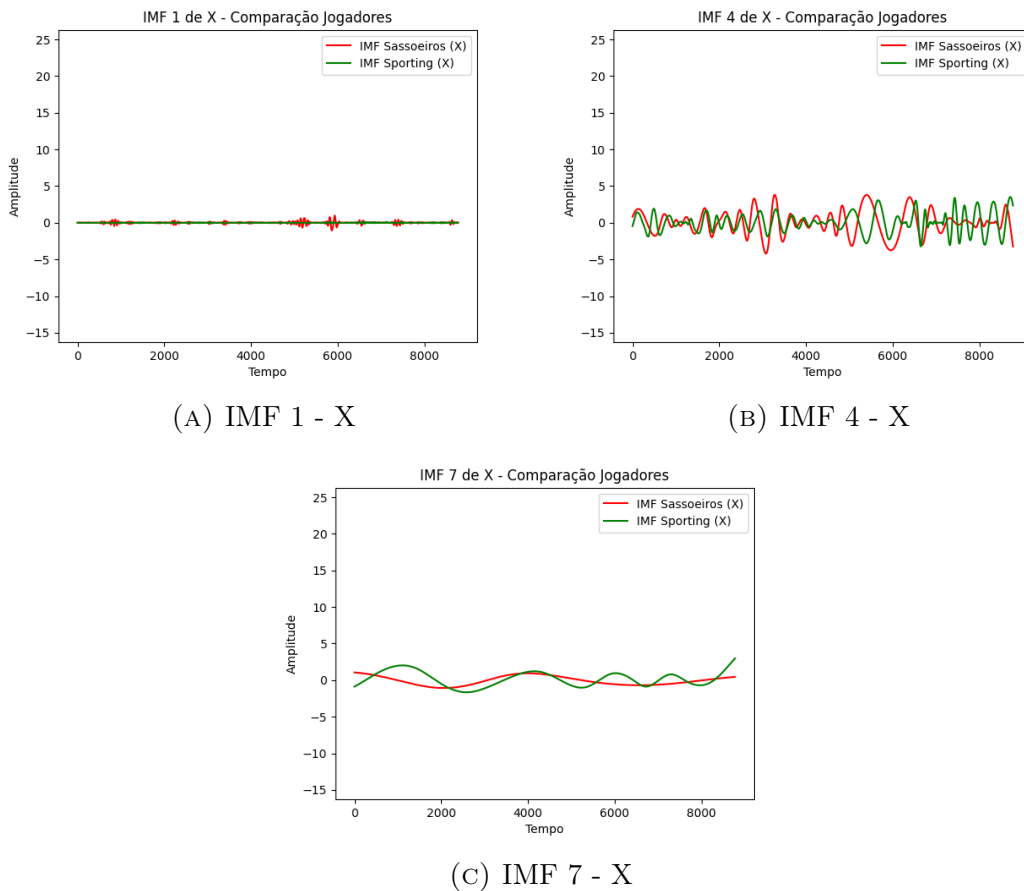
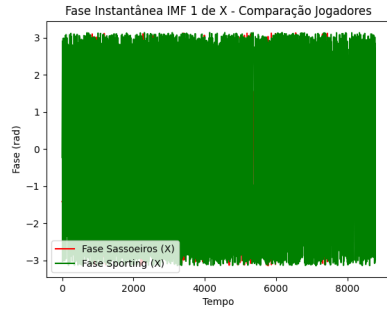
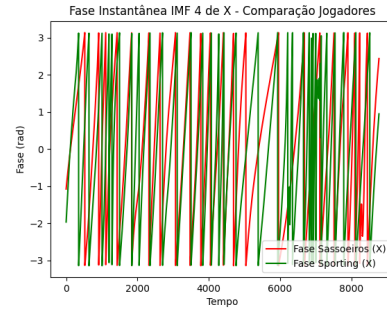


FIGURA 3.23. IMF dos Diferentes Modos para a Coordenada X

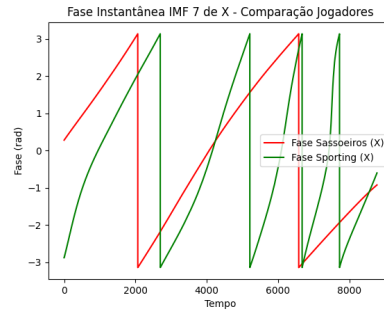
As fases instantâneas mostram desfasamento nas ordens inferiores, com melhor alinhamento nas IMFs superiores (Figura 3.24). O sincronismo (*quof()*) ao longo do eixo X é irregular nas ordens inferiores, evidenciando que os movimentos horizontais não são bem coordenados. No entanto, este torna-se mais alto e estável nas ordens superiores (Figura 3.25). Comparativamente, o novo sistema, que usa distância e ângulo, oferece uma visão mais precisa das interações táticas e da coordenação.



(A) IMF 1 - Fase - X

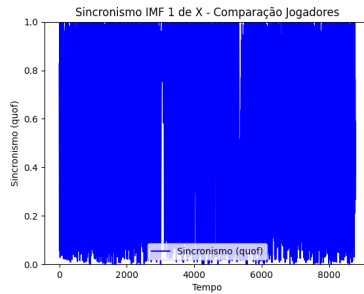


(B) IMF 4 - Fase - X

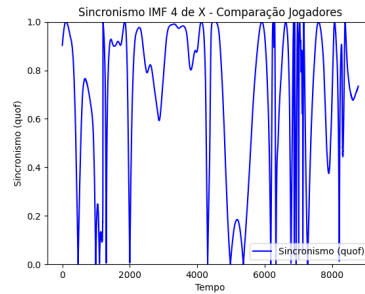


(C) IMF 7 - Fase - X

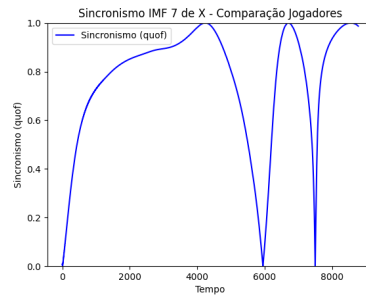
FIGURA 3.24. Fase - Coordenada X



(A) IMF 1 - Sincronismo - X



(B) IMF 4 - Sincronismo - X



(C) IMF 7 - Sincronismo - X

FIGURA 3.25. Sincronismo - Coordenada X

Coordenada Lateral - Y

Nos gráficos de IMF para a coordenada Y, as oscilações são menos intensas do que para a coordenada X, refletindo uma movimentação vertical mais contida. Nas IMFs de ordens inferiores, observa-se maior variabilidade, indicando movimentos rápidos e descoordenados, com flutuações frequentes. À medida que avançamos para as IMFs de ordens superiores, os movimentos tornam-se mais suaves, mostrando maior estabilidade (Figura 3.26).

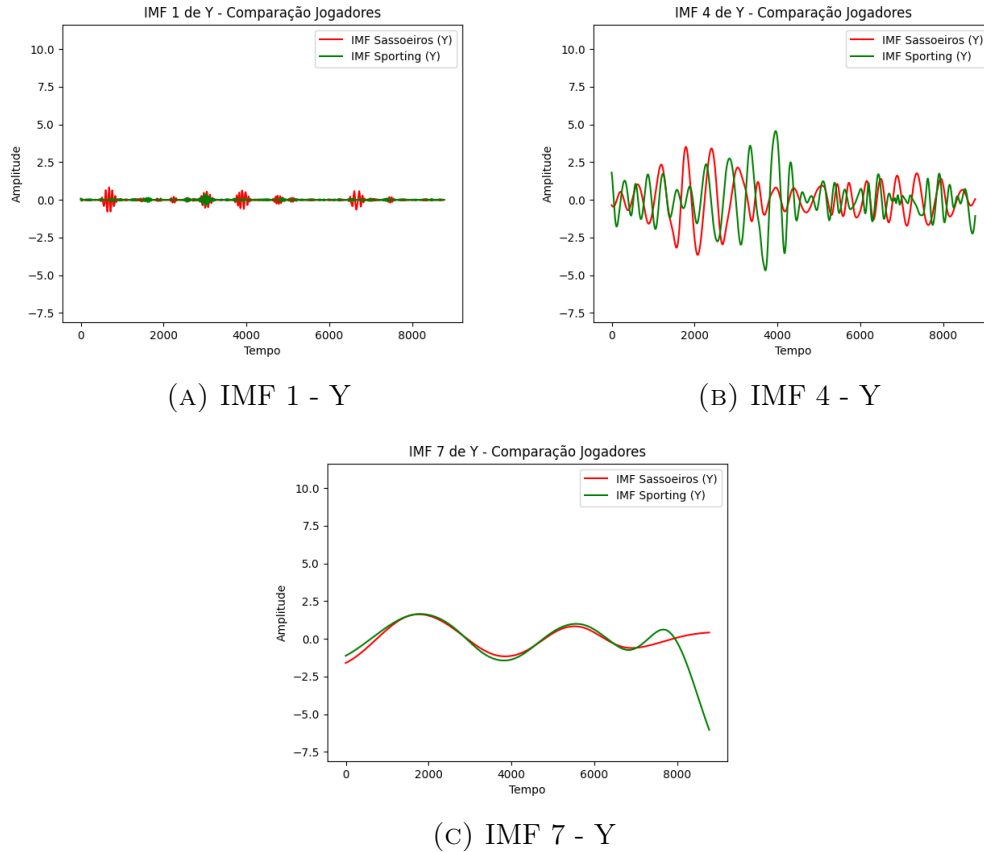
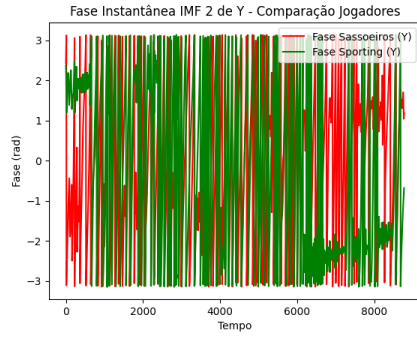


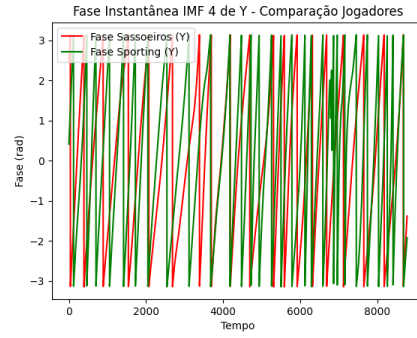
FIGURA 3.26. IMF dos Diferentes Modos para a Coordenada Y

Os gráficos de fase instantânea revelam uma maior dispersão nas IMFs de ordens inferiores, sugerindo descoordenação nos movimentos verticais rápidos. À medida que as IMFs avançam, o alinhamento das fases melhora, refletindo maior coordenação em movimentos mais lentos e estratégicos (Figura 3.27). Os gráficos de sincronismo (*quof()*) apresentam oscilações significativas nas IMFs de ordens inferiores, indicando momentos frequentes de descoordenação. No entanto, à medida que avançamos para as IMFs de ordens superiores, o sincronismo torna-se mais consistente, com valores próximos de 1, sugerindo uma maior coordenação em movimentos verticais mais lentos (Figura 3.28).

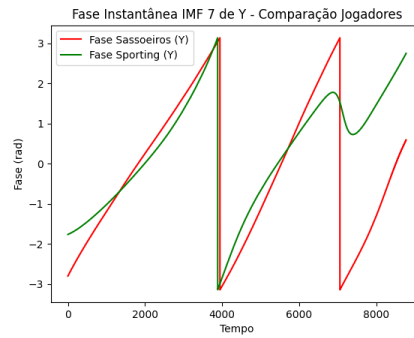
Comparado ao sistema baseado na distância e ângulo, o sistema regular não representa o sincronismo com a mesma precisão, especialmente em movimentos menos acelerados, onde a coordenação é mais evidente.



(A) IMF 2 - Fase - Y

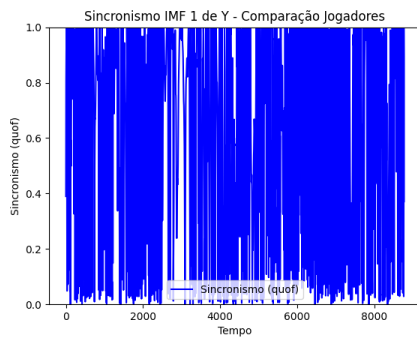


(B) IMF 4 - Fase - Y

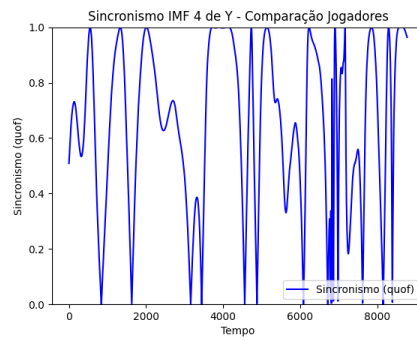


(C) IMF 7 - Fase - Y

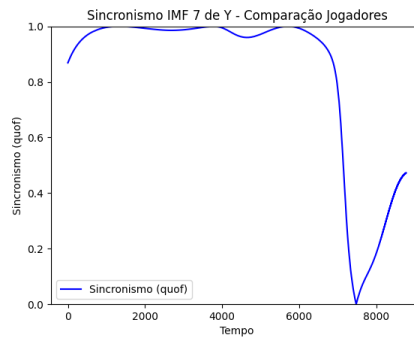
FIGURA 3.27. Fase - Coordenada Y



(A) IMF 1 - Sincronismo - Y



(B) IMF 4 - Sincronismo - Y



(C) IMF 7 - Sincronismo - Y

FIGURA 3.28. Sincronismo - Coordenada Y

Uma análise mais detalhada, com todos os gráficos, encontra-se disponível na secção de Implementação no Anexo A. Nesta secção, são exploradas as diferentes ordens das IMFs e os respetivos padrões de sincronismo e fases instantâneas, proporcionando uma compreensão mais aprofundada das dinâmicas entre os jogadores.

Conclusões e Trabalho Futuro

4.1. Questões de Investigação

Ao longo das três iterações desenvolvidas nesta dissertação, foram comparados dois sistemas de coordenadas distintos – o sistema cartesiano tradicional e um novo sistema adaptado ao contexto do andebol, que considera a distância e o ângulo em relação às balizas. A análise centrou-se na avaliação das movimentações e do sincronismo entre jogadores, tanto em situações de defesa individual como de defesa à zona. Com base nos resultados obtidos, foram extraídas conclusões relevantes que evidenciam as vantagens do novo sistema de coordenadas, especialmente no contexto de uma análise mais tática e orientada para a modalidade de andebol.

Na primeira iteração, a análise foi focada nos padrões posicionais dos jogadores através de mapas térmicos, permitindo uma compreensão mais visual das áreas de concentração de movimento em ambos os sistemas de coordenadas. Através dos resultados, foi possível observar que, no sistema cartesiano, as movimentações são representadas de forma mais linear, sem grande clareza em relação à relação dos jogadores com a baliza. No entanto, o novo sistema de coordenadas demonstrou ser mais eficaz ao destacar a posição relativa dos jogadores em relação à baliza, permitindo uma análise mais tática da ocupação dos espaços e das trajetórias em direção à baliza. Este sistema mostrou-se especialmente útil na defesa individual, onde a proximidade à baliza é fundamental para a análise das movimentações ofensivas e defensivas.

A segunda iteração trouxe uma nova camada de análise, focando-se no sincronismo entre os jogadores através da Transformada de *Hilbert*. Também aqui, foram comparados adversários diretos e não diretos, tanto em defesa individual como em defesa à zona, e avaliadas as suas fases e sincronismos ao longo do tempo. Esta abordagem permitiu observar como os jogadores ajustam as suas posições ao longo do jogo, especialmente em relação à baliza. Os resultados mostraram que o novo sistema de coordenadas, ao medir a distância e o ângulo, proporciona uma visão mais clara e precisa do alinhamento tático dos jogadores, especialmente em defesa à zona, onde o sincronismo em relação à baliza é crucial para a eficácia defensiva. No sistema cartesiano, a análise de sincronismo foi mais limitada, já que as coordenadas X e Y não refletem diretamente a tática e a relação com as balizas, perdendo-se assim nuances importantes da coordenação defensiva.

Por fim, a terceira iteração proporcionou uma análise mais detalhada do sincronismo através da decomposição de sinais com a *Intrinsic Mode Function* e a aplicação da Transformada de *Hilbert*. Esta abordagem permitiu estudar as diferentes escalas temporais dos movimentos dos jogadores e observar a coordenação em várias frequências, desde os

movimentos mais rápidos e dinâmicos até aos mais lentos e estratégicos. Os resultados confirmaram que o novo sistema de coordenadas se destaca em situações onde a proximidade e o ângulo em relação à baliza são fundamentais. No sistema cartesiano, a análise foi menos clara, sobretudo nas IMFs de ordens superiores, onde o sincronismo não se mostrou tão evidente em comparação com o novo sistema. A análise das fases instantâneas e do sincronismo (*quof()*) destacou que o novo sistema permite captar, de forma mais precisa, os momentos em que os jogadores estão mais coordenados, especialmente em movimentos mais lentos e estratégicos.

Com base nestas três iterações, as questões de investigação definidas anteriormente foram respondidas:

1. Com base na topologia do espaço de jogo, v.g. área restritiva, como definir um sistema de coordenadas mais adaptado à análise de desempenho?

A topologia do espaço de jogo no andebol, com destaque para a área restritiva e a proximidade das balizas, provou ser fundamental na definição de um sistema de coordenadas adaptado. O novo sistema, que se foca na distância e no ângulo em relação à baliza, oferece uma visão mais tática e alinhada com as necessidades do jogo, permitindo analisar de forma mais precisa as trajetórias ofensivas e defensivas. Através deste sistema, foi possível avaliar não só a ocupação do espaço, mas também a forma como os jogadores utilizam a proximidade à baliza para otimizar as suas ações táticas. Em contraste, o sistema cartesiano mostrou-se menos eficiente para avaliar estas dinâmicas, limitando-se a uma representação espacial genérica que não reflete adequadamente as nuances táticas do andebol.

2. Quais as vantagens e desvantagens de utilizar diferentes técnicas de análise de sincronismo entre jogadores para avaliar o desempenho tático no andebol?

A utilização da Transformada de *Hilbert* e da decomposição de sinais (IMF) provou ser uma abordagem eficaz para avaliar o sincronismo entre jogadores, especialmente no contexto do novo sistema de coordenadas. As vantagens incluem a capacidade de identificar padrões de coordenação tática em diferentes escalas temporais e a possibilidade de medir o sincronismo de forma contínua. No novo sistema, a medição do sincronismo em relação à baliza foi mais clara, permitindo uma análise mais precisa da interação tática, especialmente em defesa à zona, onde o alinhamento posicional é essencial. Em contrapartida, o sistema cartesiano apresentou desvantagens ao utilizar estas técnicas, uma vez que as coordenadas X e Y não detetam diretamente a relação tática entre os jogadores e a baliza, limitando a profundidade da análise de sincronismo.

3. De que forma as técnicas de análise de sincronismo entre jogadores no andebol podem contribuir para a compreensão de como o desempenho tático

varia em função do tipo de defesa (individual ou à zona) e do escalão dos jogadores?

No que diz respeito ao tipo de defesa, os resultados mostraram que o sincronismo entre os jogadores é significativamente mais elevado em defesa à zona, onde os jogadores mantêm uma linha defensiva coordenada em relação à baliza. A defesa individual, por sua vez, apresentou movimentos mais descoordenados, especialmente durante as fases mais dinâmicas do jogo, onde os jogadores reagem diretamente às ações dos seus adversários diretos. Estas observações reforçam a importância das técnicas de análise de sincronismo, que permitem identificar estas diferenças táticas entre os tipos de defesa e adaptar as estratégias em função das necessidades da equipa.

Em relação ao escalão dos jogadores, verificaram-se momentos de descoordenação, possivelmente relacionados com a inexperiência e o desenvolvimento tático incompleto dos jogadores mais jovens. Espera-se que, com o aumento da idade e da experiência, os jogadores melhorem o seu sincronismo tanto em defesa como em ataque. Esta análise sublinha a importância de começar a aplicar estas técnicas de avaliação tática em escalões jovens, permitindo identificar e corrigir falhas de coordenação desde cedo, o que poderá potenciar o desenvolvimento de uma compreensão tática mais avançada nos escalões superiores.

4.2. Implementação

Embora o ciclo CRISP-DM tenha sido seguido ao longo do trabalho, a fase de Implementação assume uma relevância especial na fase final desta análise. O processo de Implementação não se limita à conclusão técnica do trabalho, mas abrange a aplicação dos resultados e o impacto real que este estudo pode ter para as equipas de andebol. Neste contexto, um dos primeiros passos foi a realização do Anexo A, que foi entregue para análise da especialista que forneceu os dados. Esta avaliação, apresentada no Anexo B, forneceu comentários e observações valiosas, das quais se destaca o reconhecimento do carácter inovador do trabalho, pela introdução de técnicas e métricas pioneiras na análise do desempenho dos jogadores de andebol. A especialista sublinhou a utilidade dos resultados, destacando a capacidade de identificar os espaços predominantemente ocupados por cada jogador, registar o sincronismo entre adversários diretos e compreender os deslocamentos individuais em relação à baliza. Além disso, sugeriu que, em estudos futuros, se explore a sincronização em função do esforço físico dos atletas, o que poderá revelar padrões de comportamento relacionados ao cansaço.

4.3. Conclusões Finais

Com base na análise das três iterações, várias conclusões importantes podem ser retiradas em relação aos sistemas de coordenadas e ao comportamento dos jogadores, tanto em defesa individual como em defesa à zona:

4.3.1. Análise Tática

O novo sistema de coordenadas, que utiliza a distância e o ângulo em relação às balizas, provou ser significativamente mais eficaz na análise tática das movimentações dos jogadores. A capacidade de avaliar a relação entre os jogadores e as balizas de forma mais direta é crucial para o andebol, onde a estratégia se concentra frequentemente na proximidade das áreas de baliza. Este sistema permitiu uma análise mais precisa da ocupação dos espaços e das trajetórias ofensivas e defensivas, algo que o sistema cartesiano não captou com a mesma clareza. Além disso, a visão mais holística do posicionamento e orientação dos jogadores abriu novas possibilidades para a análise tática, proporcionando conhecimento que pode ser diretamente aplicado em situações de jogo.

4.3.2. Sincronismo

A aplicação da Transformada de *Hilbert* e da função *quof()* evidenciou que o novo sistema oferece uma visão mais detalhada e precisa do sincronismo entre os jogadores. A medição da distância e do ângulo em relação à baliza permite captar a interação tática de uma forma mais direta do que as coordenadas X e Y, que se mostraram menos eficazes na avaliação de sincronismos complexos. Nos jogos de defesa à zona, onde o alinhamento posicional é essencial para uma defesa eficaz, o novo sistema mostrou-se particularmente superior, destacando-se como uma ferramenta mais robusta para a análise de coordenação entre jogadores.

4.3.3. Adversários Diretos vs. Não Diretos

No contexto de adversários diretos, foi evidente um sincronismo mais elevado, especialmente durante movimentos de maior intensidade. Em contrapartida, nos adversários não diretos, o sincronismo foi consideravelmente menor, especialmente no sistema cartesiano, o que revela uma limitação do mesmo em capturar interações subtis entre jogadores que não estão diretamente envolvidos. A vantagem do novo sistema é clara: a proximidade à baliza e os ângulos táticos são apreendidos de forma muito mais eficaz, permitindo uma leitura mais precisa da pressão defensiva e do comportamento dos jogadores em situações de marcação individual.

4.3.4. Tipos de Defesa

Na defesa à zona, onde os jogadores têm a responsabilidade de cobrir áreas específicas do campo, observou-se um maior nível de sincronismo, com uma melhor coordenação entre as posições dos jogadores ao longo do tempo. Em contraste, na defesa individual, onde os jogadores têm de responder diretamente às ações dos adversários, os movimentos foram mais descoordenados, especialmente nas fases mais dinâmicas e imprevisíveis do jogo. O novo sistema de coordenadas, ao focar-se na proximidade à baliza, mostrou-se mais eficaz na análise deste tipo de defesa, fornecendo uma representação mais clara da eficácia dos movimentos defensivos.

4.3.5. EMD e Sincronismo em Diferentes Escalas Temporais

A decomposição dos sinais em diferentes escalas temporais, através da EMD, demonstrou que os movimentos rápidos e imprevisíveis são mais difíceis de coordenar, resultando em menor sincronismo nas IMFs de ordens inferiores. No entanto, à medida que as escalas temporais se tornam mais lentas, como nas IMFs de ordens superiores, o sincronismo entre os jogadores melhora, sendo mais evidente no novo sistema de coordenadas. O sistema cartesiano, embora útil em certos aspectos, não conseguiu obter a profundidade da coordenação em momentos estratégicos, especialmente quando os movimentos táticos de longo prazo precisavam de ser analisados.

4.3.6. Limitações e Desafios

Apesar das vantagens significativas demonstradas pelo novo sistema de coordenadas, foram identificados vários desafios e limitações durante o processo de análise, que devem ser considerados em futuras aplicações.

Uma das principais limitações relaciona-se com a complexidade computacional. A utilização de técnicas avançadas como a Transformada de *Hilbert* e a Decomposição Empírica de Modos exige um processamento intensivo e poder computacional elevado, sobretudo quando se lida com grandes volumes de dados ou jogos de maior duração. Em contraste, o sistema cartesiano tradicional, que utiliza apenas as coordenadas X e Y, é significativamente mais leve em termos de computação e não requer algoritmos tão complexos para gerar análises básicas de movimentação. Esta diferença de exigência pode tornar o novo sistema mais difícil de escalar em situações em que o tempo de processamento seja crítico, como análises em tempo real ou durante eventos desportivos ao vivo.

Outro desafio técnico é a precisão e sincronização dos dados recolhidos pelos dispositivos WIMU. Embora o novo sistema tenha mostrado ser mais detalhado na análise tática, a dependência de dados precisos e continuamente sincronizados é maior do que no sistema cartesiano. Pequenas inconsistências na recolha de dados, causadas por falhas nos dispositivos ou variações no posicionamento dos sensores, podem introduzir erros que afetam diretamente a qualidade da análise, sendo mais sensível a estas falhas do que o sistema tradicional. Isto pode ser um problema especialmente em contextos de treino ou competição onde o equipamento utilizado não é de alta precisão.

Além disso, o novo sistema pode também apresentar limitações em termos de interpretação e adaptabilidade para técnicos e analistas desportivos. A transição de um sistema cartesiano, bastante conhecido e utilizado em várias modalidades desportivas, para um sistema baseado no ângulo e distância em relação à baliza pode representar um desafio significativo de adaptação para as equipas técnicas e analistas. O sistema cartesiano, por mais simples que seja, é intuitivo para os utilizadores que estão habituados a trabalhar com gráficos bidimensionais que mostram a posição dos jogadores no campo. O novo sistema, apesar de ser mais específico para o andebol, requer um entendimento mais profundo da relação entre as variáveis angulares e de distância e como estas se traduzem em ações táticas. Esta curva de aprendizagem pode atrasar a sua implementação

prática, especialmente em equipas que estão mais habituadas a trabalhar com métodos tradicionais.

Outro ponto a considerar é que, embora o novo sistema seja particularmente útil para capturar a dinâmica de movimentações em torno da baliza, pode não ser tão eficaz em certas situações de jogo que não envolvem diretamente a proximidade da baliza. Por exemplo, durante as transições de meio-campo ou jogadas de circulação de bola mais afastadas da área de ataque, o sistema cartesiano pode ser suficiente para fornecer informações relevantes. Nestes casos, o novo sistema pode introduzir uma complexidade desnecessária, dado que a relação com a baliza não é tão central e o foco está mais na organização espacial geral dos jogadores no campo.

4.4. Trabalho Futuro

O trabalho desenvolvido nesta dissertação abre várias oportunidades para futuras investigações. Algumas direções promissoras incluem:

4.4.1. Aplicação do Novo Sistema em Diferentes Contextos

O novo sistema de coordenadas provou ser eficaz na análise de defesa individual e à zona, mas seria interessante expandir a sua aplicação para outras situações de jogo, como a análise de transições ofensivas ou estratégias de ataque. Em particular, o novo sistema pode ser fundamental para avaliar as movimentações de jogadores em contra-ataques rápidos, onde a proximidade à baliza e a exploração dos ângulos de ataque são críticos.

4.4.2. Incorporação de Mais Jogadores e Variáveis

Até agora, o foco esteve em grupos reduzidos de jogadores num campo de menores dimensões. No entanto, seria extremamente valioso expandir esta análise para equipas completas e para jogos em campos de tamanho oficial, especialmente em escalões seniores. Além disso, a inclusão de variáveis adicionais, como a velocidade dos passes, a precisão dos remates ou os tempos de reação dos jogadores, pode enriquecer ainda mais a análise do desempenho tático.

4.4.3. Integração com Outros Métodos de Análise de Performance

Uma direção futura interessante seria a integração do novo sistema de coordenadas com outros métodos de análise de performance, como a deteção de padrões recorrentes de ataque e defesa, ou a utilização de modelos preditivos que possam antecipar os comportamentos futuros dos jogadores com base em dados históricos. Esta integração proporcionaria uma análise mais profunda e preditiva do desempenho das equipas.

4.4.4. Proposta à Federação de Andebol de Portugal

Dada a relevância dos resultados obtidos e o interesse demonstrado pela Federação de Andebol de Portugal, propõe-se apresentar este novo sistema de coordenadas à instituição. Este sistema poderia ser utilizado na análise dos jogadores a partir de escalões mais jovens, com o objetivo de fomentar o desenvolvimento tático desde cedo. A proposta incluiria a

implementação deste sistema nos jogos e treinos das equipas nacionais, com o objetivo de escalar gradualmente a sua aplicação até ao nível sénior. Com o tempo, esta abordagem poderia servir de base para um modelo nacional de análise tática, que integrasse este sistema de coordenadas em todas as fases de desenvolvimento dos jogadores.

4.4.5. Expansão para Outros Escalões

Uma outra vertente promissora seria escalar o uso deste sistema de coordenadas a diferentes escalões etários e competitivos, até chegar ao nível sénior. O objetivo seria adaptar as análises e as metodologias a equipas profissionais, que poderiam beneficiar ainda mais da capacidade de análise tática avançada fornecida por este sistema. A transição para escalões mais elevados permitiria validar a robustez do sistema em contextos de alta competição e fomentar a sua adoção por equipas de topo.

4.4.6. Aplicações em Outras Modalidades Desportivas

Embora este trabalho se foque no andebol, o novo sistema de coordenadas pode ser adaptado e aplicado a outras modalidades desportivas que envolvem dinâmicas espaciais e posicionamento estratégico. Um exemplo interessante é o basquetebol, onde o posicionamento dos jogadores em relação à área restritiva e à linha de três pontos é crucial para o desempenho tático. Através de um sistema que considere a distância e o ângulo em relação ao cesto, seria possível avaliar, de forma mais precisa, as movimentações dos jogadores em função das suas posições no campo e das suas funções específicas, como postes, extremos ou bases.

Por exemplo, seria possível analisar o tempo que um poste passa na área restritiva, ou como um extremo se posiciona em relação à linha de três pontos para realizar lançamentos de longa distância. Esta abordagem permitiria identificar padrões de posicionamento mais eficazes, otimizando tanto a defesa como o ataque, e poderia ser particularmente útil para equipas técnicas e treinadores ao ajustar estratégias de jogo e rotinas de treino.

Referências

- [1] T. Tanaka, A. Uchiyama e H. Yamaguchi, «ML-based Individual Contribution Assessment of Basketball Players from Their Trajectories,» vol. 2023-July, Institute of Electrical e Electronics Engineers Inc., 2023, pp. 55–64. DOI: 10.1109/MDM58254.2023.00021.
- [2] J. Pino-Ortega, D. Rojas-Valverde, C. D. Gómez-Carmona e M. Rico-González, «Training design, performance analysis and talent identification—a systematic review about the most relevant variables through the principal component analysis in soccer, basketball and rugby,» *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 18, n.º 5, pp. 1–18, 2021. DOI: 10.3390/ijerph18052642.
- [3] F. M. Clemente, D. Castillo e A. Los Arcos, «Tactical Analysis According to Age-level Groups during a 4 vs. 4 Plus Goalkeepers Small-sided Game,» *Int J Environ Res Public Health*, vol. 17, n.º 5, p. 1667, 2020. DOI: 10.3390/ijerph17051667.
- [4] Q. I. Cabrera, A. González-Ramírez, T. J. V. García e I. Martínez, «performance indicator selection using decision trees in elite handball; [selección de indicadores de éxito en balonmano de élite a través de árboles de decisión],» *Revista Internacional de Medicina y Ciencias de la Actividad Física y del Deporte*, vol. 22, n.º 88, pp. 753–764, 2022. DOI: 10.15366/rimcafd2022.88.003.
- [5] L. D. Isaac e I. Janani, «Team Sports Result Prediction Using Machine Learning and IoT,» *Lecture Notes in Electrical Engineering*, vol. 838, C. V.V., F.-F. W., B. V., B. V. e B. B.N., eds., pp. 305–314, 2022. DOI: 10.1007/978-981-16-8550-7_29.
- [6] B. Kitchenham, «Procedures for Performing Systematic Reviews,» *Keele, UK, Keele Univ.*, vol. 33, ago. de 2004.
- [7] M. Marquina, D. Lozano, C. García-Sánchez, S. Sánchez-López e A. de la Rubia, «Development and Validation of an Observational Game Analysis Tool with Artificial Intelligence for Handball: Handball.ai,» *Sensors*, vol. 23, n.º 15, 2023. DOI: 10.3390/s23156714.
- [8] M. Bassek, D. Raabe, A. Banning, D. Memmert e R. Rein, «Analysis of contextualized intensity in Men’s elite handball using graph-based deep learning,» *Journal of Sports Sciences*, 2023. DOI: 10.1080/02640414.2023.2268366.
- [9] N. Lentz-Nielsen, B. Hart e A. Samani, «Prediction of movement in handball with the use of inertial measurement units and machine learning,» *Sports Biomechanics*, 2023. DOI: 10.1080/14763141.2023.2224279.

- [10] M. Oytun, C. Tinazci, B. Sekeroglu, C. Acikada e H. U. Yavuz, «Performance Prediction and Evaluation in Female Handball Players Using Machine Learning Models,» *IEEE Access*, vol. 8, pp. 116 321–116 335, 2020. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3004182.
- [11] A. Bastida-Castillo, C. Gómez-Carmona, A. Belmonte e J. Pino Ortega, «validez y fiabilidad de un dispositivo inercial (wimu protm) para el análisis del posicionamiento en balonmano,» *RICYDE. Revista internacional de ciencias del deporte*, vol. 1, 2018.
- [12] B. Guignard, C. Karcher, X. Reche, R. Font e J. Komar, «Contextualizing Physical Data in Professional Handball: Using Local Positioning Systems to Automatically Define Defensive Organizations,» *Sensors (Basel)*, vol. 22, n.º 15, p. 5692, 2022. DOI: 10.3390/s22155692.
- [13] L. Forcher, T. Beckmann, O. Wohak, C. Romeike, F. Graf e S. Altmann, «Prediction of defensive success in elite soccer using machine learning - Tactical analysis of defensive play using tracking data and explainable AI,» *Science and Medicine in Football*, 2023. DOI: 10.1080/24733938.2023.2239766.
- [14] M. Rico-González, J. Pino-Ortega, A. Méndez, F. M. Clemente e A. Baca, «Machine learning application in soccer: a systematic review,» *Biology of Sport*, vol. 40, n.º 1, pp. 249–263, 2023. DOI: 10.5114/biolsport.2023.112970.
- [15] L. Galli, G. Galvan, T. Levato, C. Liti, V. Piccialli e M. Sciandrone, «Football: Discovering elapsing-time bias in the science of success,» *Chaos, Solitons and Fractals*, vol. 152, 2021. DOI: 10.1016/j.chaos.2021.111370.
- [16] S. Kusmakar, S. Shelyag, Y. Zhu, D. Dwyer, P. Gastin e M. Angelova, «Machine Learning Enabled Team Performance Analysis in the Dynamical Environment of Soccer,» *IEEE Access*, vol. 8, pp. 90 266–90 279, 2020. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2992025.
- [17] M. Zago, C. Sforza, C. Dolci, M. Tarabini e M. Galli, «Use of machine learning and wearable sensors to predict energetics and kinematics of cutting maneuvers,» *Sensors (Switzerland)*, vol. 19, n.º 14, 2019. DOI: 10.3390/s19143094.
- [18] T. Liu, P. Fournier-Viger e A. Hohmann, «Using Diagnostic Analysis to Discover Offensive Patterns in a Football Game,» T. M. e P. S., eds., Springer Science e Business Media B.V., 2018, pp. 381–386. DOI: 10.1007/978-3-319-72745-5_43.
- [19] L. Barnabé, A. Volossovitch, R. Duarte, A. P. Ferreira e K. Davids, «Age-related effects of practice experience on collective behaviours of football players in small-sided games,» *Hum Mov Sci*, vol. 48, pp. 74–81, 2016, Epub 2016 Apr 28. DOI: 10.1016/j.humov.2016.04.007.
- [20] D. Coutinho, B. Gonçalves, S. Santos, B. Travassos, W. Schöllhorn e J. Sampaio, «The effects of individual and collective variability on youth players' movement behaviours during football small-sided games,» *Res Sports Med*, vol. 31, n.º 6, pp. 756–771, 2023, Epub 2022 Feb 24. DOI: 10.1080/15438627.2022.2042293.

- [21] H. Folgado, K. A. P. M. Lemmink, W. Frencken e J. Sampaio, «Length, width and centroid distance as measures of teams tactical performance in youth football,» *Eur J Sport Sci*, vol. 14, n.º Suppl 1, S487–92, 2014, Epub 2012 Oct 12. DOI: 10.1080/17461391.2012.730060.
- [22] T. Frias e R. Duarte, «Man-to-man or zone defense? Measuring team dispersion behaviors in small-sided soccer games,» *Trends in Sport Sciences*, vol. 21, pp. 135–144, 2014.
- [23] P. Puram, S. Roy, D. Srivastav e A. Gurumurthy, «Understanding the effect of contextual factors and decision making on team performance in Twenty20 cricket: an interpretable machine learning approach,» *Annals of Operations Research*, vol. 325, n.º 1, pp. 261–288, 2023. DOI: 10.1007/s10479-022-05027-1.
- [24] G. Bhatambarekar e S. Rai, «Batsmen Performance Prediction Using Regression Models,» Institute of Electrical e Electronics Engineers Inc., 2022, pp. 80–85. DOI: 10.1109/AIDE57180.2022.10060071.
- [25] M. K. Mahbub, M. A. M. Miah, S. M. S. Islam, S. Sorna, S. Hossain e M. Biswas, «Best Eleven Forecast for Bangladesh Cricket Team with Machine Learning Techniques,» Institute of Electrical e Electronics Engineers Inc., 2021. DOI: 10.1109/ICEEICT53905.2021.9667862.
- [26] D. Sikka e D. Rajeswari, «Basketball Win Percentage Prediction using Ensemble-based Machine Learning,» Institute of Electrical e Electronics Engineers Inc., 2022, pp. 885–890. DOI: 10.1109/ICECA55336.2022.10009313.
- [27] R. M. Musa, A. P. Abdul Majeed, M. Z. Suhaimi et al., «Identification of high-performance volleyball players from anthropometric variables and psychological readiness: A machine-learning approach,» *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part P: Journal of Sports Engineering and Technology*, 2021. DOI: 10.1177/17543371211045451.
- [28] S. S. Tadanki, H. Sanjay, B. V. Hiremath e H. Kiran Kumar, «Anthropometric and Motor Fitness Based Assessment of Playing Positions in Volleyball Players with the AID of Predictive Machine Learning Models,» Institute of Electrical e Electronics Engineers Inc., 2018. DOI: 10.1109/CIMCA.2018.8739540.
- [29] M. Schmid, P. Blauburger e M. Lames, «Simulating Defensive Trajectories in American Football for Predicting League Average Defensive Movements,» *Frontiers in Sports and Active Living*, vol. 3, 2021. DOI: 10.3389/fspor.2021.669845.
- [30] A. Liu, R. P. Mahapatra e A. Mayuri, «Hybrid design for sports data visualization using AI and big data analytics,» *Complex and Intelligent Systems*, vol. 9, n.º 3, pp. 2969–2980, 2023. DOI: 10.1007/s40747-021-00557-w.
- [31] A. Karakaya, A. Ulu e S. Akleyek, «GOALALERT: A novel real-time technical team alert approach using machine learning on an IoT-based system in sports,» *Microprocessors and Microsystems*, vol. 93, 2022. DOI: 10.1016/j.micpro.2022.104606.

- [32] R. Bunker e T. Susnjak, «The Application of Machine Learning Techniques for Predicting Match Results in Team Sport: A Review,» *Journal of Artificial Intelligence Research*, vol. 73, pp. 1285–1322, 2022. DOI: 10.1613/jair.1.13509.
- [33] M. W. Y. Lam, «One-Match-Ahead Forecasting in Two-Team Sports with Stacked Bayesian Regressions,» *Journal of Artificial Intelligence and Soft Computing Research*, vol. 8, n.º 3, pp. 159–171, 2018. DOI: 10.1515/jaiscr-2018-0011.
- [34] R. Duarte, D. Araújo, V. Correia, K. Davids, P. Marques e M. J. Richardson, «Competing together: Assessing the dynamics of team-team and player-team synchrony in professional association football,» *Hum Mov Sci*, vol. 32, n.º 4, pp. 555–566, 2013. DOI: 10.1016/j.humov.2013.01.011. URL: <https://doi.org/10.1016/j.humov.2013.01.011>.
- [35] T. Frank e M. Richardson, «On a test statistic for the Kuramoto order parameter of synchronization: An illustration for group synchronization during rocking chairs,» *Physica D: Nonlinear Phenomena*, vol. 239, pp. 2084–2092, nov. de 2010. DOI: 10.1016/j.physd.2010.07.015.
- [36] J. Acebron, L. Bonilla, C. Pérez-Vicente, F. Farran e R. Spigler, «The Kuramoto model: A simple paradigm for synchronization phenomena,» *Reviews of Modern Physics*, vol. 77, abr. de 2005. DOI: 10.1103/RevModPhys.77.137.

ANEXO A

Implementação - Análise de Comportamento de Jogadores

A.1. Jogo 1: Sporting vs. Sassoeiros

TABELA A.1. Atributos Jogo 1: Sporting vs. Sassoeiros

Baliza 0	Baliza 1	Jogadores	Tarefa defensiva
Sassoeiros	Sporting	3vs3	Defesa individual

A.1.1. Análise via Mapas Térmicos

Adversários Diretos

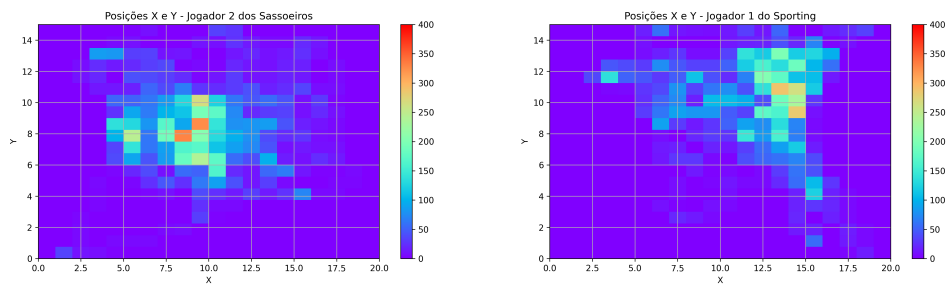


FIGURA A.1. Adversários Diretos - Sistema de Coordenadas X,Y

Na Figura A.1 encontram-se representados os mapas térmicos do sistema regular (X,Y) do jogador 2 dos Sassoeiros e do jogador 1 do Sporting, sendo que estes são adversários diretos.

É possível observar que o jogador 2 dos Sassoeiros apresenta uma concentração significativa de atividade entre as coordenadas X de 8 a 12 e Y de 6 a 10. Isto indica que este jogador passou grande parte do tempo numa zona central do campo, entre a área de baliza e a linha dos 12 metros, com uma atuação destacada em áreas de transição entre a defesa e o meio-campo. O calor mais intenso está concentrado nessas posições, sugerindo que o jogador desempenhou um papel relevante na contenção central ou na organização de transições defensivas.

Este jogador raramente se desloca para as laterais, mantendo-se mais focado nas zonas centrais. A sua distribuição de movimentos abrange tanto áreas próximas à baliza como zonas ligeiramente mais afastadas, mas sem se aproximar excessivamente das laterais. O pico de movimentação junto à linha dos 8 metros pode indicar uma participação ativa na zona defensiva, possivelmente contribuindo para travar possíveis ataques de adversários ou na construção de jogadas a partir da defesa.

Já o jogador 1 do Sporting apresenta uma concentração de movimentos mais deslocada para o lado direito do campo, com maior presença entre os 12 e 16 metros no eixo X e uma amplitude variável no eixo Y, abrangendo uma faixa de 7 a 12 metros. A sua atividade é igualmente concentrada na zona central, mas a distribuição mais ampla, especialmente ao longo do eixo X, sugere uma maior liberdade de movimentação em ações ofensivas ou transições. Este jogador move-se bastante nas proximidades da área de baliza, o que pode sugerir que esteve mais envolvido em ações de ataque.

Ambos os jogadores apresentam movimentações centradas, o que seria esperado, dado que são adversários diretos. No entanto, o jogador do Sporting cobre uma área ligeiramente mais ampla, especialmente em termos de longitude, estendendo-se mais para zonas ofensivas, enquanto o jogador dos Sasseiros parece atuar de forma mais conservadora, permanecendo em áreas mais defensivas e de contenção. Apesar destas diferenças, os dois jogadores demonstram uma boa adaptação à defesa individual, acompanhando o adversário em várias áreas do campo.

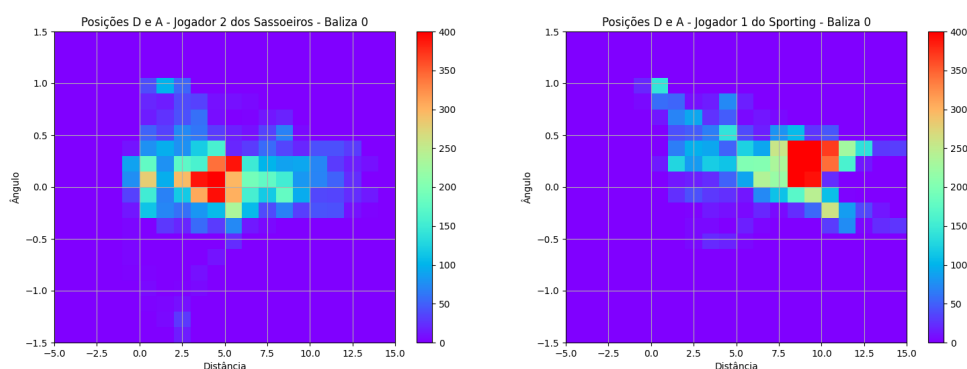


FIGURA A.2. Adversários Diretos (Baliza 0) - Novo Sistema

Na Figura A.2, observamos os dois jogadores em função da Baliza 0. O jogador 2 dos Sasseiros apresenta uma concentração significativa de movimentos entre os 3 e 6 metros em relação à área de baliza (o que corresponde a uma distância de 8 a 11 metros da baliza). Esta proximidade indica um papel defensivo, com o jogador a posicionar-se para proteger a sua baliza, mantendo-se nas zonas centrais do campo. O jogador movimenta-se principalmente em ângulos próximos dos 0 radianos, o que reforça a sua centralização e estabilidade na cobertura das áreas mais críticas, como já se tinha verificado na análise anterior com o sistema de coordenadas regular.

Por outro lado, o jogador 1 do Sporting tem a maior concentração de movimentos numa faixa mais afastada, entre os 7 e 10 metros da área de baliza (12 a 15 metros da baliza 0). Esta posição indica uma atuação mais ofensiva, com o jogador a deslocar-se procurando oportunidades para criar jogadas de ataque. A sua variação angular é mais extensa, destacando-se entre -0.5 e 0.5 radianos, com algumas incursões que se aproximam de 1 radiano, o que sugere que o jogador está a explorar diferentes ângulos de ataque,

particularmente no lado direito do campo, como já tinha sido observado na análise feita com o sistema de coordenadas regular.

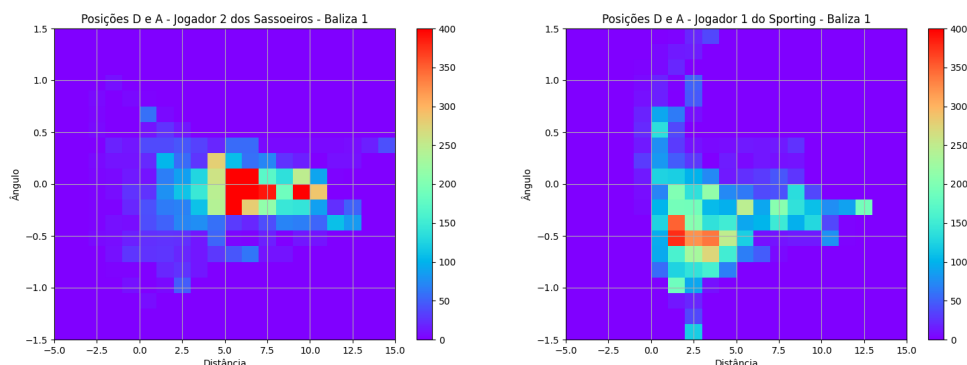


FIGURA A.3. Adversários Diretos (Baliza 1) - Novo Sistema

Na Figura A.3, os dois jogadores são analisados em relação à Baliza 1. É importante notar que, ao mudarmos de baliza, o ângulo se inverte, ou seja, o que anteriormente era o lado esquerdo em relação à baliza 0, passa a ser o lado direito em relação à baliza 1 e vice-versa.

O jogador 2 dos Sasseiros mantém-se predominantemente numa distância entre 5 e 10 metros da área de baliza, com um pico de concentração à volta dos 5 a 7 metros. Este comportamento sugere que o jogador se encontra a desempenhar funções defensivas ou a organizar ataques a partir de zonas recuadas. Em termos de ângulo, o jogador movimenta-se principalmente perto dos 0 radianos, cobrindo de forma equilibrada tanto o lado esquerdo como o direito da baliza, sem se afastar das zonas centrais.

Em contraste, o jogador 1 do Sporting apresenta uma distribuição de movimentos ligeiramente diferente. A maior concentração de ações ocorre entre os 1 e 7 metros de distância da área de baliza, com um pico mais acentuado entre os 1 e 4 metros. Esta proximidade sugere uma forte presença em zonas defensivas, possivelmente indicando uma participação mais ativa em ações de contenção ou transições rápidas para o ataque, uma vez que o mapa térmico revela uma dispersão ligeiramente maior em comparação com o seu adversário. Ou seja, o jogador do Sporting parece não se limitar tanto ao contexto defensivo como o seu oponente, possuindo mais liberdade de movimentos que utiliza para investidas ofensivas. No que toca ao ângulo, o jogador movimenta-se predominantemente entre 0 e -1 radianos, sugerindo uma presença mais destacada no lado direito da baliza, algo que já havia sido observado na análise anterior com o sistema de coordenadas regular.

Adversários Indiretos

Nesta análise será avaliado o mesmo jogador do Sporting do par anterior. No entanto, este será comparado com um jogador dos Sassoeiros que não é seu adversário direto.

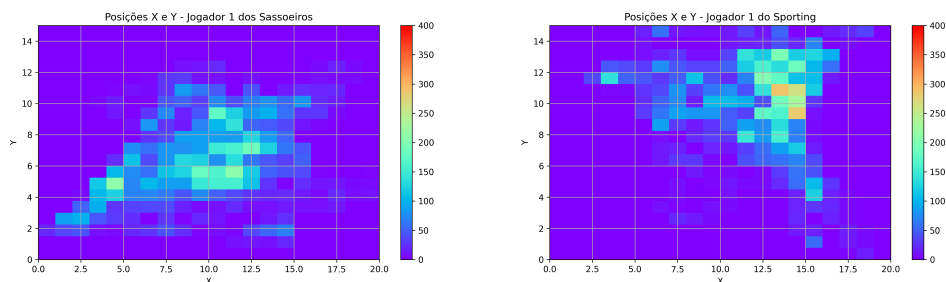


FIGURA A.4. Adversários Indiretos - Sistema Coordenadas (X,Y)

Na Figura A.4 encontram-se representados os mapas térmicos do sistema regular do jogador 1 dos Sassoeiros e do jogador 1 do Sporting, sendo que estes não são adversários diretos.

O jogador 1 dos Sassoeiros mostra uma concentração significativa de movimentação entre as coordenadas X de 7 a 13 metros e Y de 4 a 8 metros. Isto sugere que atuou principalmente em zonas centrais, mas ainda assim, com alguma presença do lado esquerdo do campo também, com destaque para as áreas intermédias entre a defesa e o meio-campo. As áreas de maior calor indicam uma presença ativa nas faixas de transição, apoiando tanto a defesa quanto o ataque, sem se deslocar frequentemente para as extremidades do campo.

Embora a função tática deste jogador não possa ser totalmente definida apenas pelos mapas térmicos, a sua presença constante em áreas mais centrais sugere um papel importante na organização de jogadas de transição ou na cobertura de zonas estratégicas na defesa. A sua ausência nas extremidades do campo indica que não atuou como um jogador lateral.

Por outro lado, o jogador 1 do Sporting, conforme descrito anteriormente, apresenta uma concentração de movimentos mais deslocada para o lado direito do campo e maior liberdade de movimentos.

A diferença entre os dois jogadores é clara. O jogador do Sporting cobre áreas mais distantes do meio-campo, posicionando-se frequentemente em zonas que favorecem a participação direta em jogadas ofensivas ou próximas da baliza adversária. Já o jogador dos Sassoeiros permanece em zonas centrais, tendendo a descair para o lado esquerdo do campo, enquanto o jogador do Sporting domina o lado direito. Este padrão é consistente com o facto de não serem adversários diretos, ocupando áreas distintas no campo.

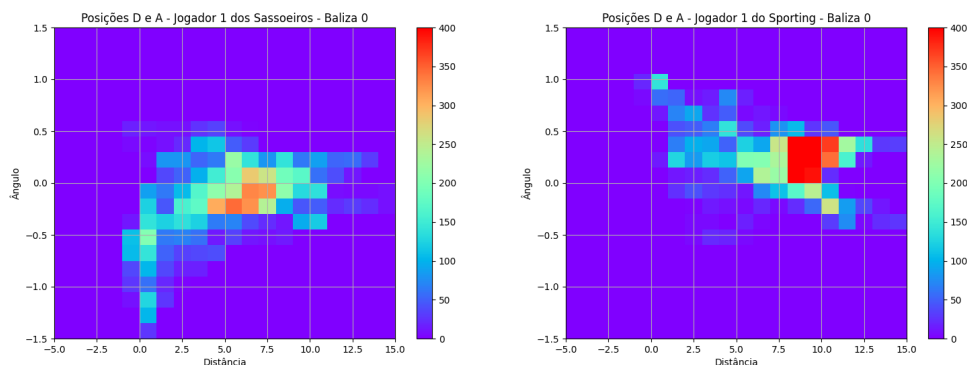


FIGURA A.5. Adversários Indiretos (Baliza 0) - Novo Sistema

Na Figura A.5, observamos os dois jogadores em função da Baliza 0. O jogador 1 dos Sasseiros apresenta uma concentração de movimentos numa faixa de distância entre os 3 e 8 metros em relação à área de baliza (8 a 13 metros da baliza). Esta proximidade indica uma atuação que pode estar relacionada com uma função tanto defensiva quanto de transição ofensiva, dado que o jogador parece ocupar posições mais centrais. A variação angular está maioritariamente entre -0.5 e 0.5 radianos, sugerindo que o jogador mantém uma cobertura relativamente centralizada em relação à baliza, focando-se em controlar a zona do meio campo.

O jogador 1 do Sporting apresenta uma concentração de calor entre os 7 e os 12 metros da área de baliza, com predominância entre os 8 e os 10 metros, o que é expectável, uma vez que defende a baliza 1. Este jogador demonstra um foco significativo nas ações ofensivas, movimentando-se em torno da área adversária para criar oportunidades de ataque. A variação angular desses movimentos ofensivos (entre os 0 e 4 metros de distância da área da baliza 0) oscila entre 0 e 1 radiano, sugerindo uma exploração de diferentes ângulos de ataque, especialmente no lado direito do campo, como já se verificou noutras análises deste jogador.

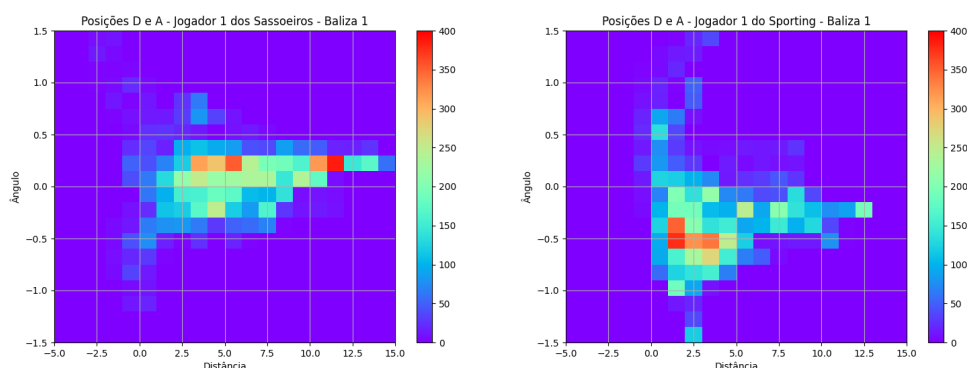


FIGURA A.6. Adversários Indiretos (Baliza 1) - Novo Sistema

Na Figura A.6, observamos os dois jogadores em função da Baliza 1. Em relação a esta baliza, o jogador 1 dos Sasseiros apresenta uma distribuição dispersa entre os 3 e

os 12 metros, com o pico de concentração a ocorrer entre os 10 e os 12 metros, embora também seja relevante a sua presença na faixa entre os 3 e os 6 metros. Esta distância à baliza sugere uma postura predominantemente defensiva, onde o jogador parece cobrir a área à frente da sua baliza, ou a organizar jogadas ofensivas a partir de posições mais recuadas, avançando até à zona de meio campo. Em termos de variação angular, o jogador movimenta-se entre -0.5 e 0.5 radianos, mantendo-se numa posição central, com pouca variação lateral. Este comportamento reforça a ideia de uma função mais estável e defensiva, focada no controlo das zonas centrais do campo.

O jogador 1 do Sporting, por outro lado, apresenta uma maior dispersão angular, com movimentos entre -1 e 0 radianos, sugerindo uma atuação mais deslocada para o lado direito do campo, tal como observado na análise relativa à Baliza 0. A concentração de calor está entre os 1 e 7 metros de distância em relação à área de baliza, com um pico entre os 1 e 4 metros, sugerindo uma participação em ações defensivas mas sempre com foco em iniciar transições ofensivas a partir da sua zona defensiva.

Em suma, observam-se diferenças claras entre as funções táticas dos dois jogadores, que não são adversários diretos. O jogador dos Sasseiros tem uma atuação mais estável e defensiva, com movimentos concentrados no centro do campo e pouca variação angular, refletindo uma postura equilibrada e passiva. Em contraste, o jogador do Sporting apresenta uma atuação mais ofensiva e dinâmica, explorando as laterais do campo e variando os ângulos de ataque, o que indica um papel mais ativo na criação de jogadas ofensivas.

A.1.2. Análise de Sincronismo

Adversários Diretos

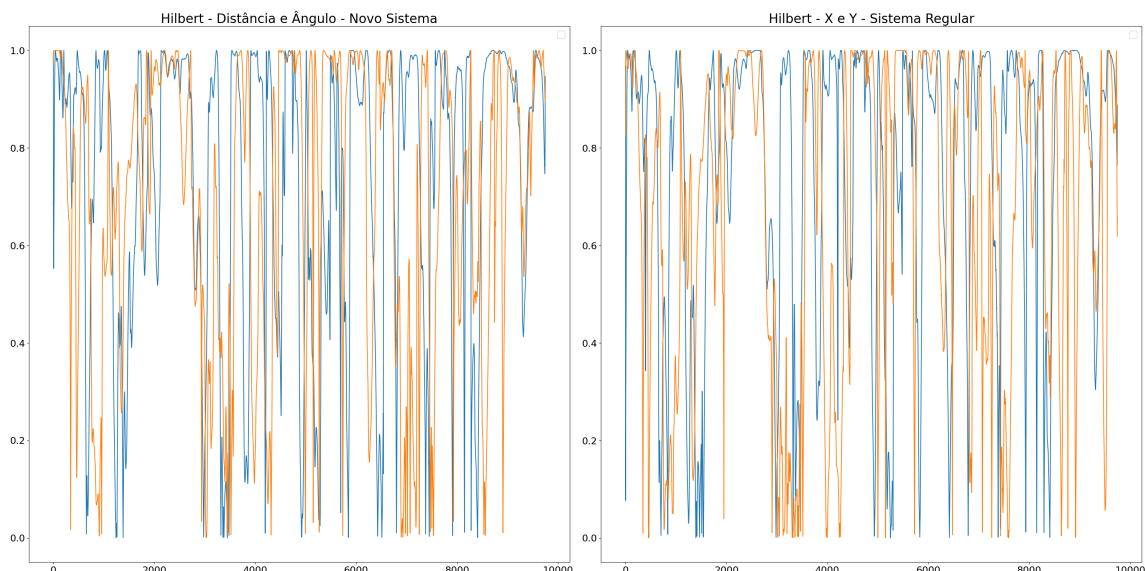


FIGURA A.7. Sincronismo Adversários Diretos - Baliza 0

No gráfico da esquerda na Figura A.7 utiliza-se a Transformada de *Hilbert* para calcular e comparar as fases das distâncias (linha azul) e dos ângulos (linha laranja) dos dois

jogadores em relação à baliza 0. Foi escolhida esta baliza para a análise, pois percebeu-se a partir da primeira iteração que seria a baliza onde grande parte do jogo acontece.

Nos primeiros 2000 *frames*, observamos uma elevada variabilidade tanto na linha azul (distância) como na linha laranja (ângulo). Ambas as linhas apresentam flutuações rápidas e intensas, sem uma diferença clara entre a variação de um parâmetro em relação ao outro. A distância e o ângulo parecem estar a oscilar de forma semelhante, sem que haja uma grande estabilidade em qualquer uma das métricas. Isto reflete um comportamento bastante irregular tanto na gestão da distância à baliza como na variação do ângulo.

A partir dos 2000 *frames*, o sincronismo entre os jogadores torna-se mais evidente, especialmente na linha azul (distância). A função *quof()* apresenta valores que oscilam entre 0.6 e 1, sugerindo que os dois jogadores estão a ajustar as suas distâncias à baliza de forma mais coordenada. Este comportamento mantém-se até cerca dos 3000 *frames*. A linha laranja, que representa o ângulo, também começa a apresentar valores mais elevados neste intervalo, indicando uma maior eficácia no alinhamento dos ângulos explorados pelos jogadores em direção à baliza.

No entanto, entre os 3000 e 4000 *frames*, o sincronismo já não é tão evidente. A linha azul (distância) continua a apresentar variações significativas, sugerindo que os jogadores deixaram de ajustar as suas distâncias de forma tão coordenada. A linha laranja (ângulo) mostra uma divergência mais clara, com flutuações mais acentuadas, sugerindo que os ângulos de ataque e defesa também se tornaram menos alinhados neste período.

No intervalo entre os *frames* 4000 e 6000, a linha azul (distância) continua a mostrar momentos de sincronismo, com valores próximos de 1 em várias ocasiões. Isto sugere que os jogadores estão a ajustar-se de forma eficaz à distância em relação à baliza, o que pode indicar que o jogador dos Sasseiros está a seguir de perto o movimento do atacante do Sporting. No entanto, a linha laranja (ângulo) mostra uma maior divergência, com os valores a variar mais acentuadamente.

Após os 6000 *frames*, não se observa uma convergência clara e prolongada entre a linha azul (distância) e a linha laranja (ângulo). Embora existam momentos pontuais em que ambas as linhas atingem valores próximos de 1, o padrão geral continua marcado por flutuações frequentes e divergências entre a distância e o ângulo. Este comportamento sugere que, mesmo nesta fase do jogo, não há um sincronismo consistente entre os jogadores, com ambos a ajustar a sua posição de forma mais independente, o que pode ser explicado pela dinâmica do jogo ou pelo cansaço acumulado, resultando numa menor coordenação e em movimentos menos intensos.

No gráfico da direita na Figura A.7, o processo é idêntico, mas desta vez em relação ao sistema regular.

Nos primeiros 2000 *frames*, tanto a linha azul (coordenadas X) quanto a linha laranja (coordenadas Y) mostram uma variação significativa, com valores da função *quof()* a variar, maioritariamente, entre 0.2 e 0.8. Isto sugere que, embora os jogadores estejam a

cobrir o campo de forma ativa, há pouca coordenação entre os seus movimentos nos eixos X e Y.

Entre os *frames* 2000 e 4000, observamos uma certa melhoria no sincronismo, especialmente na linha azul (coordenadas X), embora a variabilidade continue a ser significativa. A função *quof()* apresenta oscilações entre valores médios e altos, sugerindo que os jogadores estão a ajustar-se de forma mais coordenada em relação ao eixo horizontal do campo, mas ainda com alguma irregularidade. Isto pode indicar que o defensor está a tentar seguir o atacante, mas não de forma totalmente sincronizada. No entanto, a linha laranja (coordenadas Y) apresenta grandes flutuações, o que indica que os movimentos no eixo vertical continuam bastante desfasados.

No período entre os *frames* 4000 e 5000, a linha azul (coordenadas X) mantém-se em valores elevados, sugerindo um sincronismo mais forte no eixo horizontal. No entanto, após os 5000 *frames*, os valores da linha azul começam a cair, indicando uma diminuição temporária na coordenação dos movimentos horizontais entre os jogadores. Em relação à linha laranja (coordenadas Y), os valores são mais altos comparativamente ao início do jogo, o que indica uma melhoria na coordenação dos movimentos verticais. Ainda assim, a linha laranja continua a apresentar algumas oscilações, refletindo uma variação menos estável nos movimentos verticais dos jogadores durante este intervalo.

Após os *frames* 6000, o sincronismo melhora novamente, especialmente na linha azul (X), com a função *quof()* a aproximar-se de 1 em vários momentos. Isto sugere que o defensor está a seguir o atacante de forma mais eficaz ao longo do eixo X, talvez numa fase mais crítica do jogo. A linha laranja (Y) também apresenta momentos de maior alinhamento, indicando que os dois jogadores estão a ajustar a sua movimentação ao longo do campo de forma mais coordenada. Esta sincronização nos eixos X e Y pode refletir uma fase do jogo em que ambos os jogadores estão diretamente envolvidos numa jogada crítica, com o defensor a acompanhar de perto o atacante, tentando evitar uma possível finalização. Alternativamente, este alinhamento pode ser também consequência do cansaço acumulado, que, como já mencionado, pode estar a limitar a movimentação e a intensidade das ações de ambos.

Adversários Indiretos

O gráfico da esquerda na Figura A.8 avalia o que já analisámos anteriormente sobre o novo sistema, mas desta vez com um par de adversários indiretos.

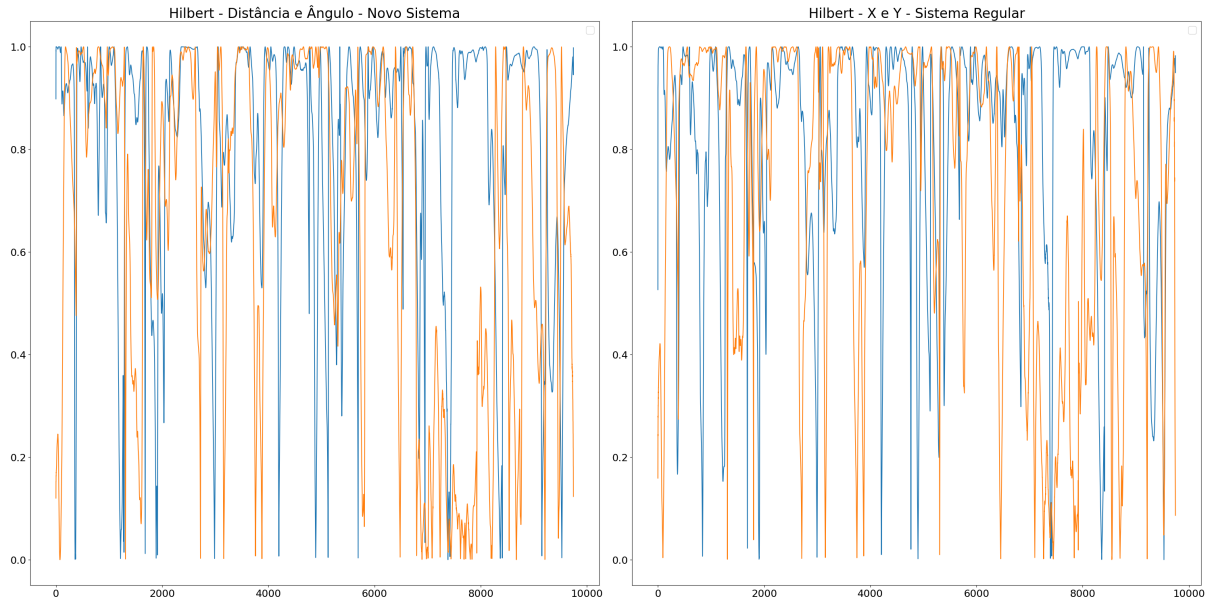


FIGURA A.8. Sincronismo Adversários Indiretos - Baliza 0

Nos primeiros 2000 *frames*, observamos uma significativa divergência nas fases de ambos os parâmetros. A linha azul, que corresponde à distância, mostra uma grande variação, com valores a oscilar entre 0.2 e 1, indicando uma falta de sincronização clara entre os jogadores no que diz respeito às distâncias à baliza. A linha laranja (ângulo) também varia, mas de forma menos drástica, sugerindo um ligeiro controlo sobre os ângulos, embora ainda assim com baixa sincronização em relação à distância.

Entre os 2000 e 4000 *frames*, a linha azul aproxima-se mais frequentemente de 1, sugerindo uma melhoria no sincronismo das distâncias entre os jogadores. Esta fase pode indicar que, apesar de não serem adversários diretos, os jogadores ajustaram as suas posições de forma mais coordenada, possivelmente como parte de uma jogada em que ambos se aproximam da baliza. No entanto, o sincronismo angular (linha laranja) continua a oscilar, mostrando que, embora as distâncias estejam mais alinhadas, o ajuste dos ângulos entre os dois jogadores ainda apresenta alguma descoordenação.

Após os 4000 *frames*, observa-se uma queda no sincronismo, tanto na linha azul como na laranja, especialmente entre os 5000 e 6000 *frames*, com o coeficiente a registar valores inferiores a 0.6 em vários momentos. Isto indica que, durante esta fase, a sincronização entre as fases dos jogadores diminui significativamente, sugerindo que ambos estão a ajustar as suas posições de forma mais independente, provavelmente em resposta a movimentações distintas no campo.

Após os 6000 *frames*, o sincronismo nas distâncias (linha azul) melhora de forma evidente, com vários momentos em que o coeficiente se aproxima de 1, sugerindo que os jogadores estão a alinhar-se em termos de distância à baliza. Isto pode indicar que ambos estão a atuar numa linha horizontal semelhante no campo, o que faz sentido num contexto onde os jogadores, mesmo não sendo adversários diretos, estão a atuar em zonas próximas, seja para defender ou atacar.

No entanto, o sincronismo em termos de ângulo (linha laranja) diminui drasticamente após os 6000 *frames*, atingindo valores próximos de 0 entre os 7000 e 9000 *frames*. Esta discrepância reflete uma grande divergência nas orientações angulares dos jogadores, o que sugere que, apesar de estarem alinhados em termos de distância à baliza, os ângulos que estão a cobrir são bastante diferentes. Esta diferença faz sentido, visto que os jogadores não são adversários diretos e, portanto, estarão a explorar diferentes áreas e ângulos no campo.

No gráfico da direita na Figura A.8 a avaliação é a mesma, mas desta vez, para o sistema de coordenadas regular.

Nos primeiros 2000 *frames*, tanto a linha azul (coordenadas X) quanto a linha laranja (coordenadas Y) mostram uma variação significativa. A função *quof()* varia, maioritariamente, entre 0.2 e 0.8, sugerindo pouca coordenação entre os movimentos dos jogadores nos eixos X e Y. Esta falta de sincronismo é expectável, uma vez que os dois jogadores não são adversários diretos e, portanto, não estão a mover-se em resposta um ao outro de forma sistemática.

Entre os 2000 e 4000 *frames*, nota-se uma melhoria no sincronismo, especialmente no eixo X (linha azul), onde a função *quof()* se aproxima de 1 em vários momentos. Isto sugere que os jogadores ajustaram melhor as suas posições horizontais, atuando de forma mais coordenada. No entanto, o eixo Y (linha laranja) continua a apresentar oscilações significativas, o que indica que a sincronização vertical não é tão forte, sugerindo que os movimentos ao longo do eixo Y permanecem mais independentes.

Entre os 4000 e 6000 *frames*, observamos um aumento no sincronismo ao longo do eixo Y, com vários momentos em que os valores se aproximam de 1, sugerindo uma coordenação mais consistente entre os jogadores nos seus movimentos verticais. Durante este período, os jogadores parecem estar mais alinhados em termos de deslocamento ao longo do eixo Y, o que pode indicar uma fase do jogo em que ambos estão a atuar em zonas semelhantes no campo, verticalmente falando.

Por outro lado, a linha azul, que representa o movimento no eixo horizontal, continua a mostrar flutuações acentuadas, sugerindo uma variação maior na sincronização dos movimentos horizontais. Isto indica que, embora haja uma maior coordenação no eixo Y, os jogadores estão a mover-se de forma mais independente no eixo X, provavelmente ocupando diferentes posições horizontais no campo. Esta descoordenação no eixo X pode ser justificada pelo facto de os jogadores estarem a focar-se em explorar diferentes áreas do campo, o que é comum quando não são adversários diretos.

Após os 6000 *frames*, observa-se uma queda significativa no sincronismo ao longo do eixo Y, com vários momentos em que o valor do coeficiente se aproxima de 0, especialmente entre os 7000 e 9000 *frames*. Isto sugere que os jogadores estão a mover-se de forma descoordenada no eixo vertical, provavelmente ocupando zonas diferentes do campo ou ajustando-se a situações de jogo distintas.

No entanto, ao longo do eixo X, ainda existem vários momentos de coordenação significativa, com o coeficiente a aproximar-se de 1 em várias ocasiões. Esta situação indica que, em termos de movimentação horizontal, os jogadores continuam relativamente alinhados.

A.1.3. Análise do Sincronismo via EMD

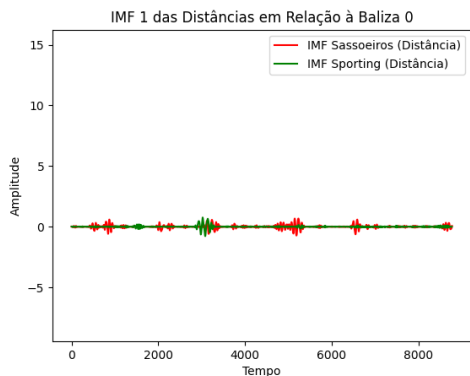
São comparados os dois sistemas de coordenadas para avaliar o sincronismo entre um par de adversários diretos, no contexto de um jogo de defesa individual. O primeiro sistema utiliza a distância e o ângulo em relação à baliza 0, que é a baliza para onde o jogador mais ofensivo, neste caso do Sporting, ataca. Como tal, esta baliza torna-se a mais interessante para analisar. O segundo sistema recorre às tradicionais coordenadas X e Y. A análise centra-se nos resultados obtidos a partir das decomposições de sinal (IMFs), das fases instantâneas (*Hilbert*) e do sincronismo medido pela função *quof()*, com o objetivo de avaliar como cada sistema capta a coordenação entre os jogadores.

Distância à Baliza 0

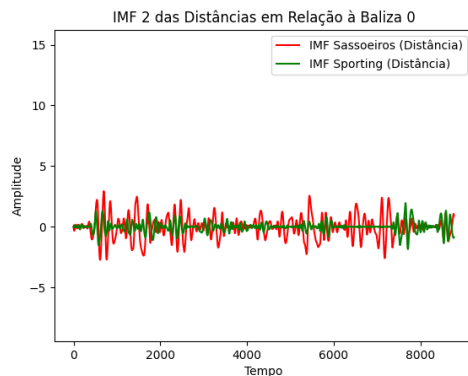
Os gráficos das IMFs para a distância à baliza 0 revelam que os sinais de ordem inferior captam movimentos rápidos e dinâmicos (Figura A.9b), especialmente do jogador do Sporting, que está a atacar. O defensor do Sassoeiros tenta acompanhar esses movimentos, mas de forma mais reativa. No entanto, as IMFs intermédias mostram uma maior estabilidade e coordenação entre os jogadores. Aqui, as oscilações tornam-se menos intensas, sugerindo uma fase do jogo em que o defensor consegue acompanhar de forma mais eficaz o atacante, à medida que os movimentos são mais controlados e menos imprevisíveis. Nas IMFs de ordens superiores, observa-se uma estabilização dos movimentos, com os jogadores a fazerem ajustes posicionais mais graduais (Figura A.9g).

As fases instantâneas mostram mais desfasamentos nos gráficos das IMFs de ordens inferiores, refletindo a dificuldade do defensor do Sassoeiros em acompanhar os movimentos rápidos e imprevisíveis do atacante do Sporting. No entanto, nas IMFs intermédias, há uma melhor correspondência entre as fases dos dois jogadores (Figura A.13a), sugerindo uma maior coordenação à medida que os movimentos se tornam menos imprevisíveis. Aqui, o defensor parece reagir de forma mais eficiente aos ajustes do atacante. Nas IMFs de ordens superiores, embora os movimentos sejam mais lentos, ainda existem alguns desfasamentos, indicando que a coordenação não é completamente estável (Figura A.15a).

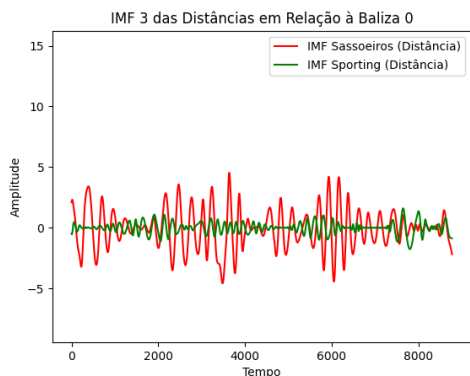
Os gráficos de sincronismo (*quof()*) refletem esta evolução. Nos gráficos das IMFs de ordens inferiores, o sincronismo é mais instável (Figura A.12b), com momentos de desfasamento notáveis. Nas IMFs intermédias, o sincronismo melhora, sugerindo uma maior coordenação entre os dois jogadores. Contudo, nas IMFs de ordens superiores, o sincronismo volta a diminuir em certos momentos (Figura A.15b), sugerindo que os jogadores, mesmo em movimentos mais lentos, continuam a ajustar-se de forma independente.



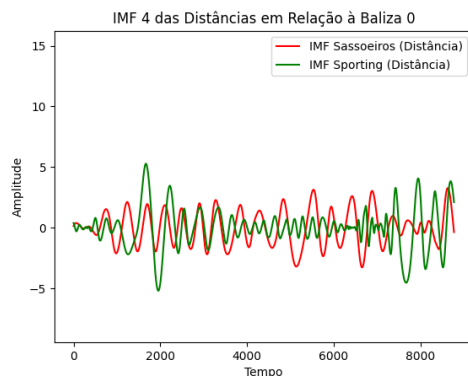
(A) IMF 1 - Distância Baliza 0



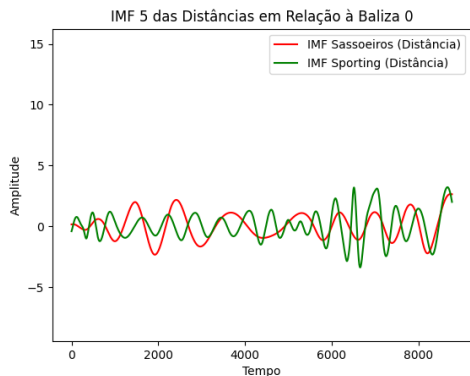
(B) IMF 2 - Distância Baliza 0



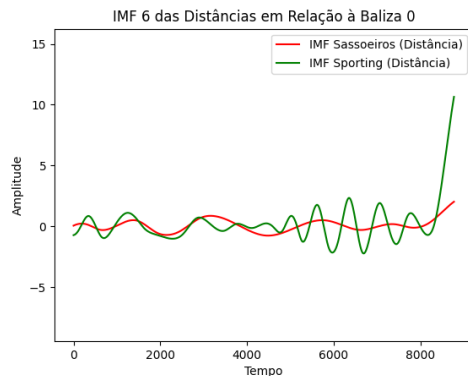
(C) IMF 3 - Distância Baliza 0



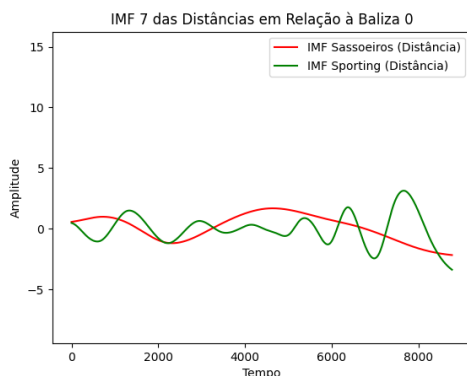
(D) IMF 4 - Distância Baliza 0



(E) IMF 5 - Distância Baliza 0



(F) IMF 6 - Distância Baliza 0



(G) IMF 7 - Distância Baliza 0

FIGURA A.9. IMF dos Diferentes Modos para Distância à Baliza 0

(A) Fase de Distância à Baliza 0 - IMF 1 1

(B) Sincronismo Distância à Baliza 0 - IMF

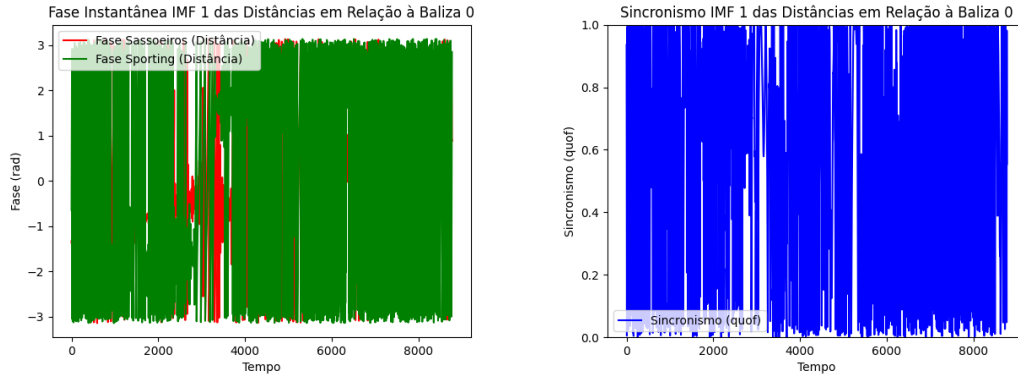


FIGURA A.10. Fase e Sincronismo Distância à Baliza 0 - IMF 1

(A) Fase de Distância à Baliza 0 - IMF 2 2

(B) Sincronismo Distância à Baliza 0 - IMF

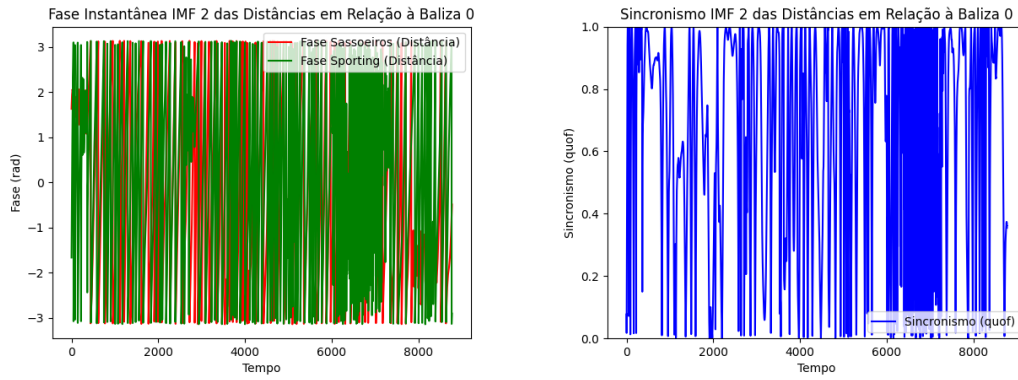


FIGURA A.11. Fase e Sincronismo Distância à Baliza 0 - IMF 2

(A) Fase de Distância à Baliza 0 - IMF 3 3

(B) Sincronismo Distância à Baliza 0 - IMF

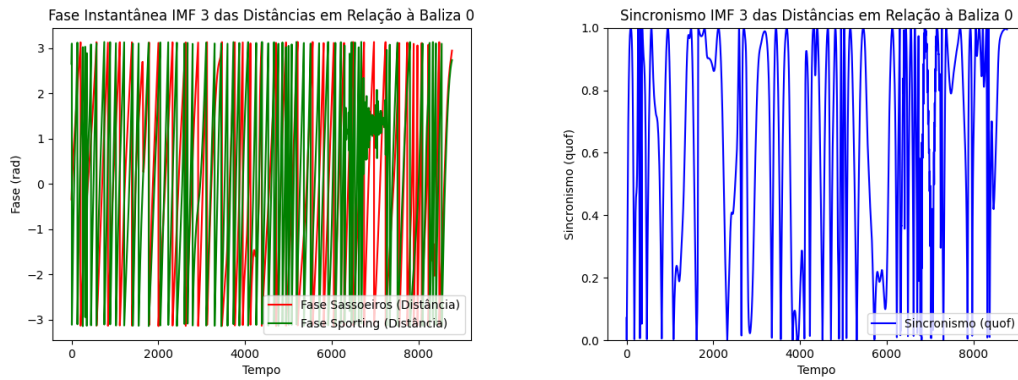


FIGURA A.12. Fase e Sincronismo Distância à Baliza 0 - IMF 3

(A) Fase de Distância à Baliza 0 - IMF 4 4 (B) Sincronismo Distância à Baliza 0 - IMF

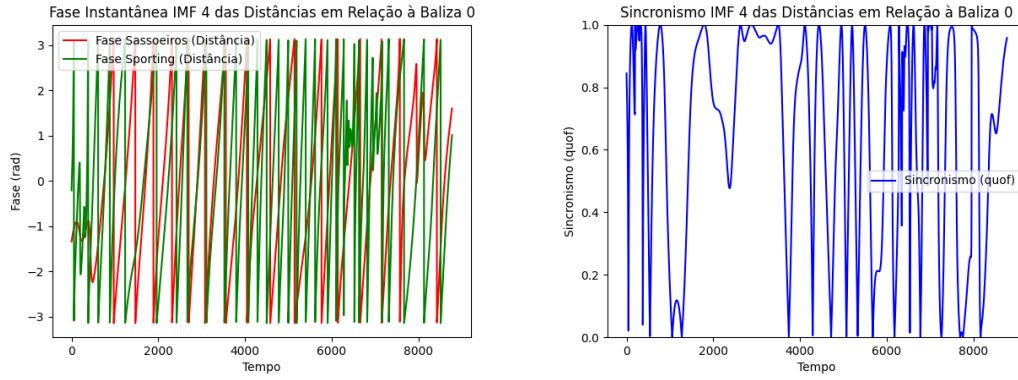


FIGURA A.13. Fase e Sincronismo Distância à Baliza 0 - IMF 4

(A) Fase de Distância à Baliza 0 - IMF 5 5 (B) Sincronismo Distância à Baliza 0 - IMF

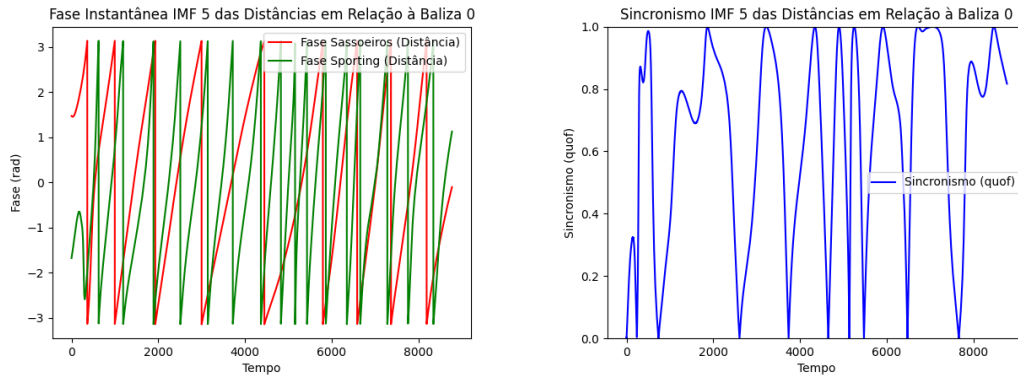


FIGURA A.14. Fase e Sincronismo Distância à Baliza 0 - IMF 5

(A) Fase de Distância à Baliza 0 - IMF 6 6 (B) Sincronismo Distância à Baliza 0 - IMF

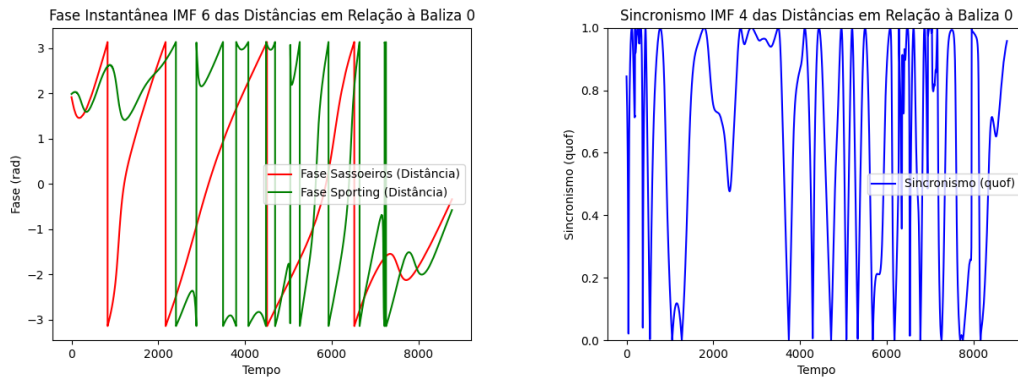


FIGURA A.15. Fase e Sincronismo Distância à Baliza 0 - IMF 6

- (A) Fase de Distância à Baliza 0 - IMF 7 7
- (B) Sincronismo Distância à Baliza 0 - IMF

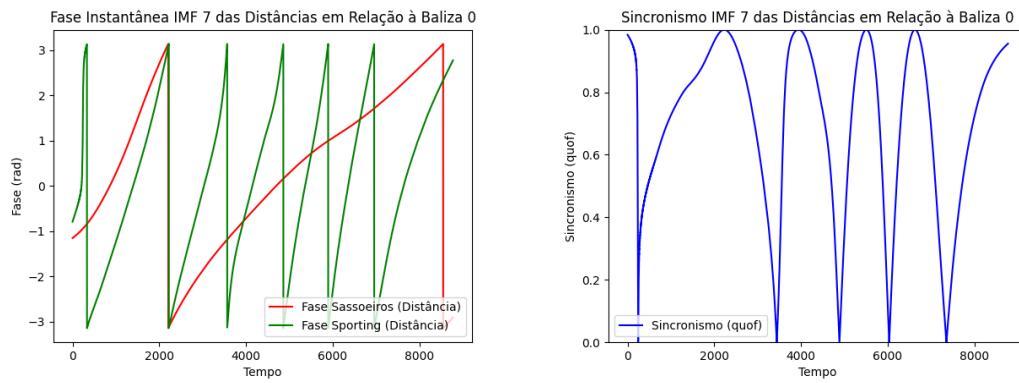


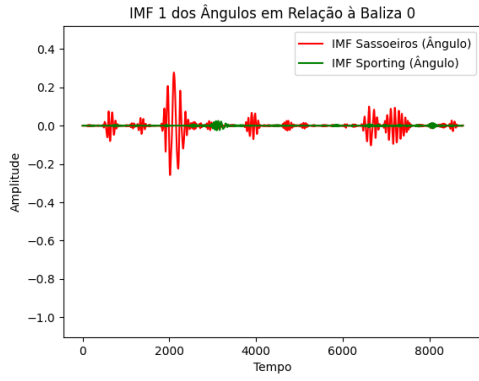
FIGURA A.16. Fase e Sincronismo Distância à Baliza 0 - IMF 7

Ângulo para a Baliza 0

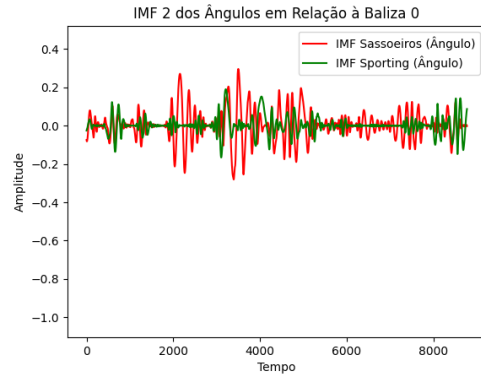
Nos gráficos das IMFs relativas ao ângulo em relação à baliza 0, vemos que as IMFs de ordens inferiores captam variações mais rápidas e intensas (Figura A.17a), especialmente no início. O jogador do Sporting, que está a atacar, parece apresentar uma maior estabilidade angular nas IMFs iniciais, enquanto o defensor do Sassoeiros tem uma maior variabilidade, tentando ajustar-se rapidamente às mudanças de direção do atacante. As IMFs iniciais, portanto, sugerem uma tentativa do defensor de acompanhar os movimentos rápidos do atacante, mas com alguma dificuldade para manter a consistência angular. Conforme avançamos para as IMFs de ordens superiores, os movimentos angulares tornam-se mais suaves e controlados, o que é típico de fases de jogo mais lentas e táticas. Aqui, tanto o jogador do Sporting como o defensor do Sassoeiros apresentam movimentos mais coordenados e previsíveis, com variações angulares menos acentuadas (Figura A.17e). O defensor parece conseguir prever melhor os movimentos do atacante, o que reduz a necessidade de ajustes rápidos de ângulo.

Nos gráficos das fases instantâneas, observamos um maior alinhamento nas IMFs de ordens superiores (Figura A.23a). Ou seja, nas fases mais estratégicas e lentas do jogo, os movimentos angulares entre o atacante e o defensor tornam-se mais sincronizados. Este comportamento é indicativo de um jogo mais calculado, onde o defensor consegue prever os movimentos do atacante e ajustar a sua posição angular de forma mais eficaz. Nas IMFs de ordens inferiores (Figura A.19a), há um maior desfasamento, refletindo a dificuldade do defensor em acompanhar as mudanças rápidas de ângulo por parte do atacante.

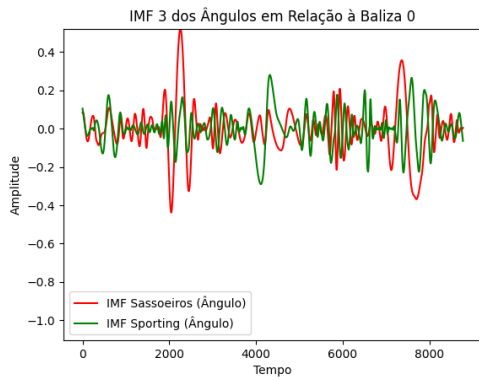
O gráfico de sincronismo (*quof()*) também reflete este padrão, com o sincronismo a ser mais elevado nas IMFs de ordens superiores (Figura A.22b), sugerindo que, nos momentos de ajustamentos mais lentos, o defensor consegue manter um maior grau de coordenação angular em relação ao atacante. Nas IMFs iniciais, o sincronismo é mais baixo, o que é coerente com a natureza mais imprevisível dos movimentos angulares rápidos (Figura A.19b).



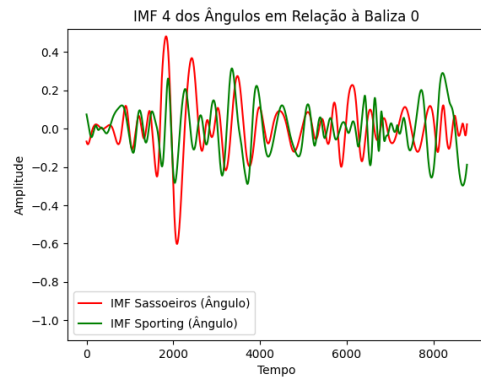
(A) IMF 1 - Ângulo Baliza 0



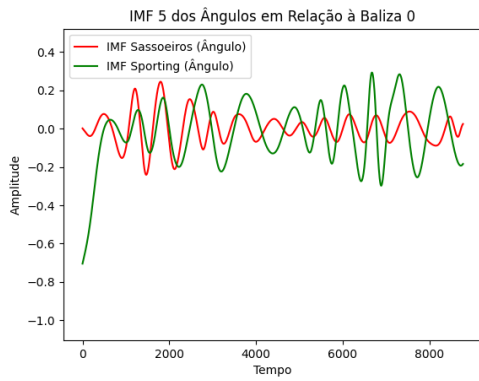
(B) IMF 2 - Ângulo Baliza 0



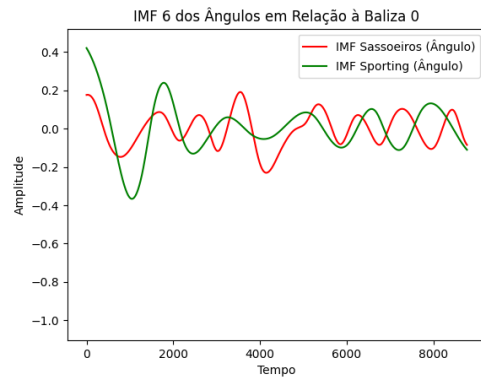
(C) IMF 3 - Ângulo Baliza 0



(D) IMF 4 - Ângulo Baliza 0



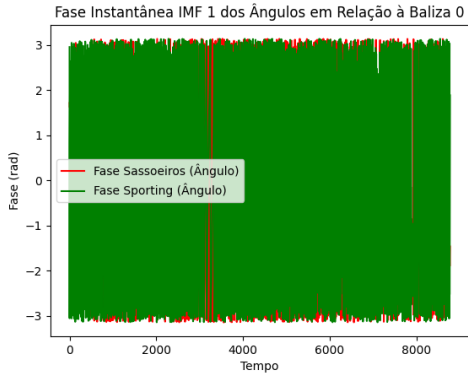
(E) IMF 5 - Ângulo Baliza 0



(F) IMF 6 - Ângulo Baliza 0

FIGURA A.17. IMF dos Diferentes Modos para Ângulo à Baliza 0

(A) Fase do Ângulo à Baliza 0 - IMF 1 1



(B) Sincronismo do Ângulo à Baliza 0 - IMF 1

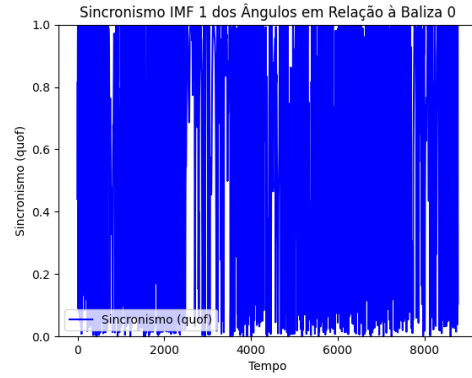
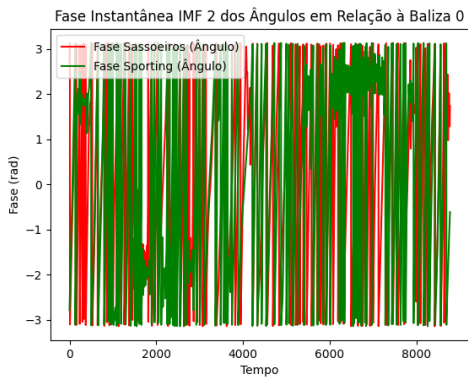


FIGURA A.18. Fase e Sincronismo Ângulo à Baliza 0 - IMF 1

(A) Fase do Ângulo à Baliza 0 - IMF 2 2



(B) Sincronismo do Ângulo à Baliza 0 - IMF 2

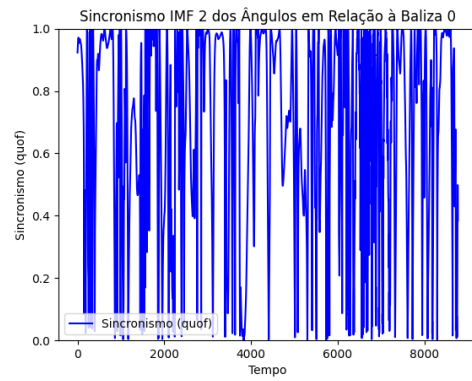
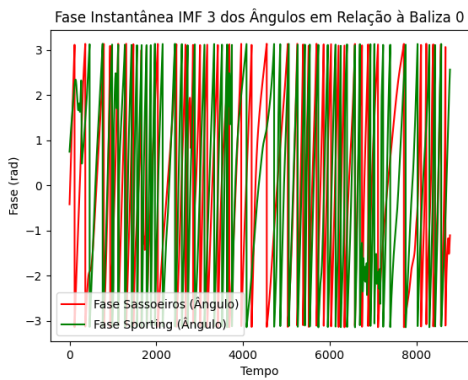


FIGURA A.19. Fase e Sincronismo Ângulo à Baliza 0 - IMF 2

(A) Fase do Ângulo à Baliza 0 - IMF 3 3



(B) Sincronismo do Ângulo à Baliza 0 - IMF 3

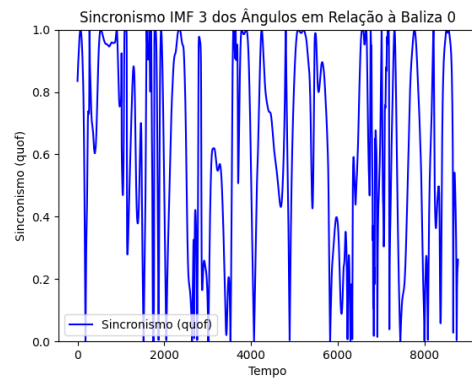


FIGURA A.20. Fase e Sincronismo Ângulo à Baliza 0 - IMF 3

(A) Fase do Ângulo à Baliza 0 - IMF 4 4 (B) Sincronismo do Ângulo à Baliza 0 - IMF

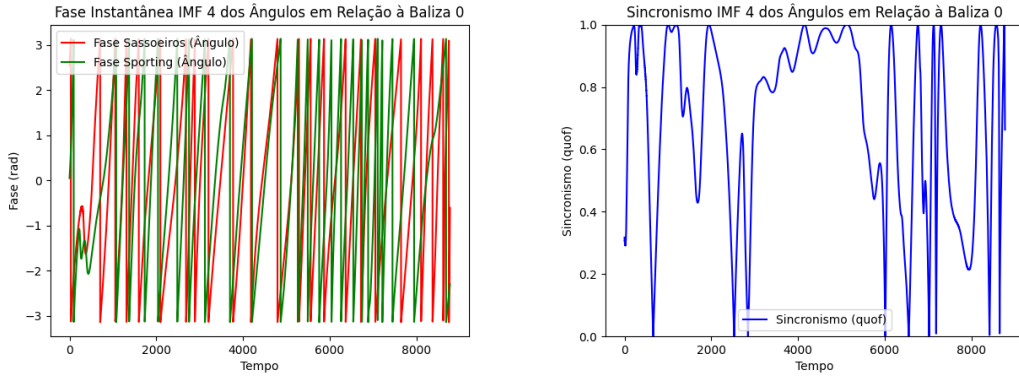


FIGURA A.21. Fase e Sincronismo Ângulo à Baliza 0 - IMF 4

(A) Fase do Ângulo à Baliza 0 - IMF 5 5 (B) Sincronismo do Ângulo à Baliza 0 - IMF

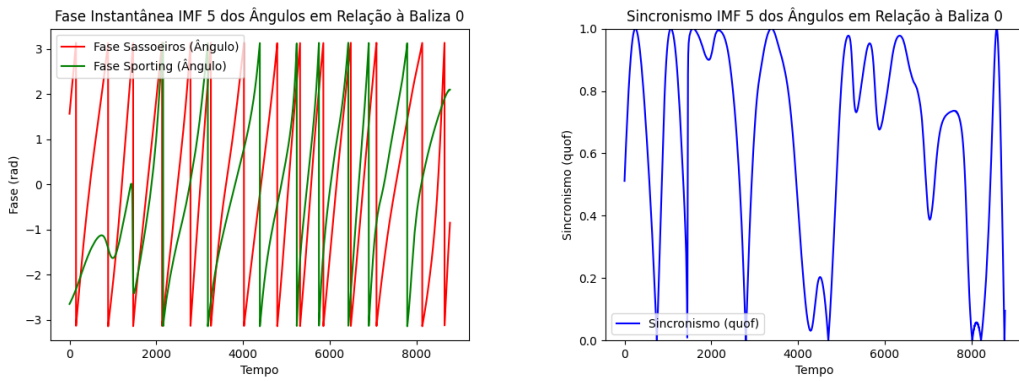


FIGURA A.22. Fase e Sincronismo Ângulo à Baliza 0 - IMF 5

(A) Fase do Ângulo à Baliza 0 - IMF 6 6 (B) Sincronismo do Ângulo à Baliza 0 - IMF

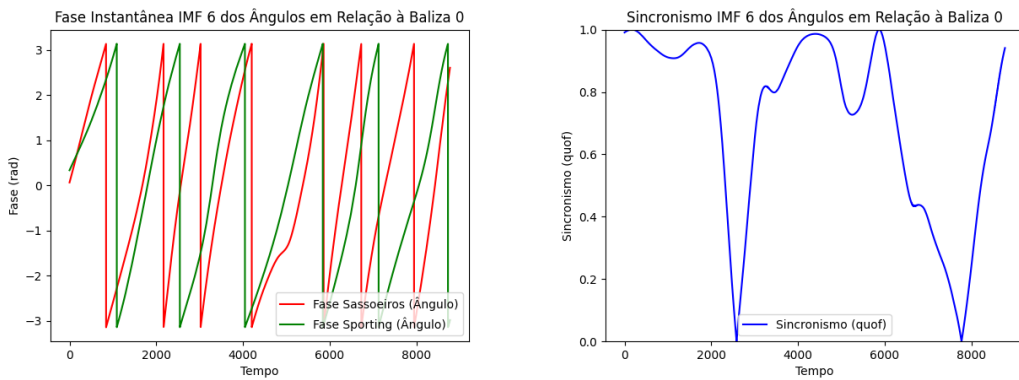


FIGURA A.23. Fase e Sincronismo Ângulo à Baliza 0 - IMF 6

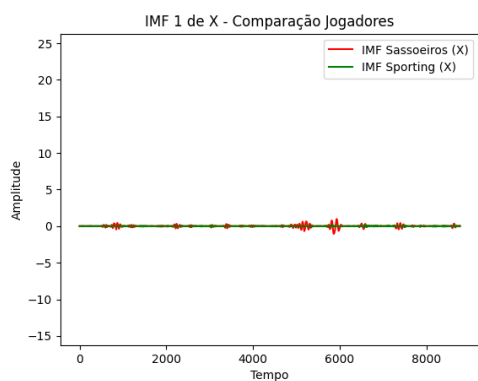
Coordenada Longitudinal - X

Nos gráficos de IMF da coordenada X, observa-se que tanto o jogador do Sporting como o jogador do Sasseiros apresentam oscilações com amplitudes relativamente semelhantes. As IMFs de ordens inferiores (Figura A.24a) captam variações mais rápidas e de menor amplitude, enquanto as IMFs de ordens superiores exibem movimentos mais lentos e suaves. No entanto, a diferença de comportamento entre os dois jogadores não é tão pronunciada como noutras coordenadas, o que sugere que ambos se mantêm relativamente alinhados em termos de movimentação horizontal ao longo do campo.

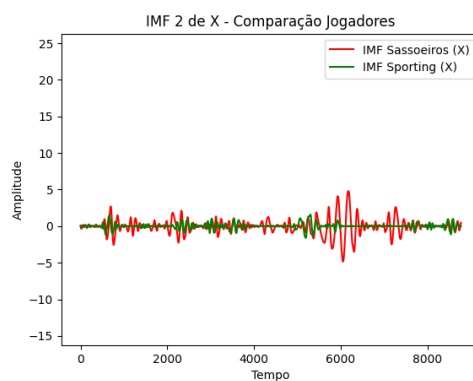
A análise das fases instantâneas mostra um padrão relativamente desfasado nas IMFs de ordens inferiores, o que indica que os jogadores apresentam momentos de descoordenação nos movimentos rápidos ao longo do eixo X (Figura A.26a). No entanto, à medida que analisamos as IMFs intermédias e superiores, as fases tornam-se mais alinhadas, sugerindo uma melhor coordenação entre os jogadores em movimentos mais lentos e estratégicos.

Nos gráficos de sincronismo (*quof()*) para a coordenada X, o sincronismo entre os jogadores não é tão evidente em comparação com a distância no novo sistema de coordenadas. Embora existam picos de sincronismo, a variação do coeficiente é frequente, sugerindo que os movimentos horizontais dos jogadores ao longo do campo não são tão bem coordenados, e que há momentos consideráveis de desfasamento.

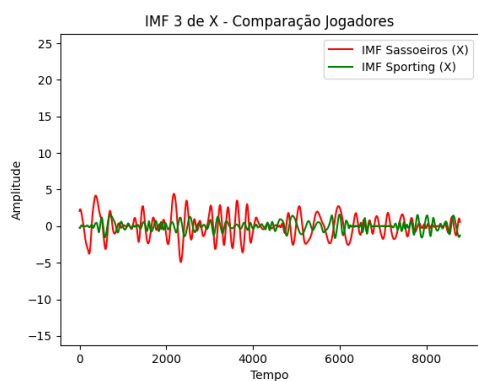
(A) Coordenada X - IMF 1



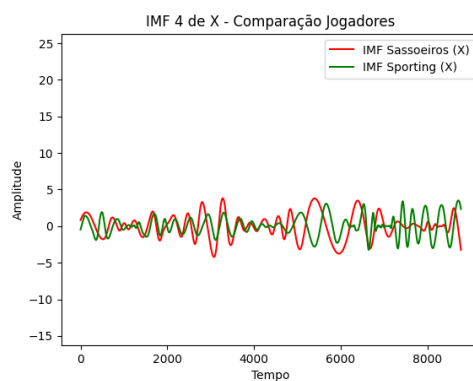
(B) Coordenada X - IMF 2



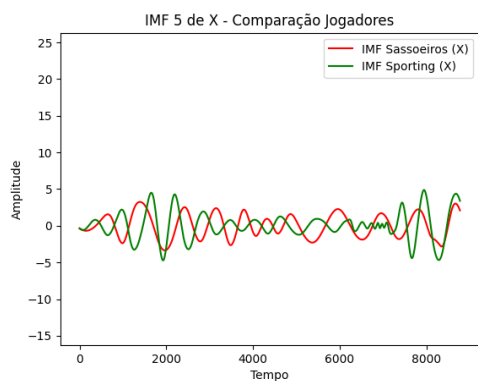
(C) Coordenada X - IMF 3



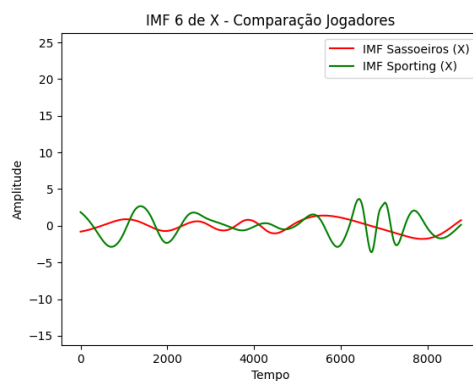
(D) Coordenada X - IMF 4



(E) Coordenada X - IMF 5



(F) Coordenada X - IMF 6



(G) Coordenada X - IMF 7

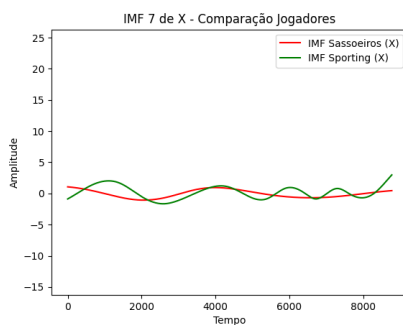
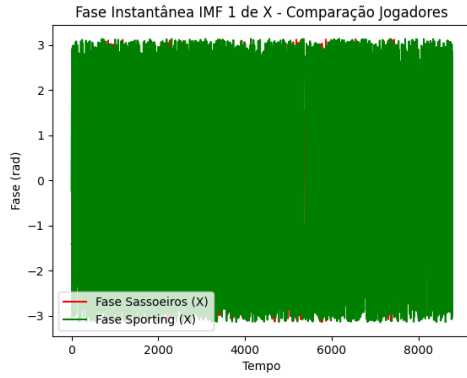


FIGURA A.24. IMF dos Diferentes Modos para Coordenada Longitudinal (X)

(A) Fase - X - IMF 1



(B) Sincronismo - X - IMF 1

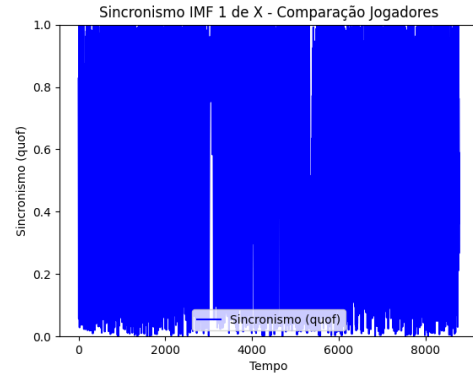
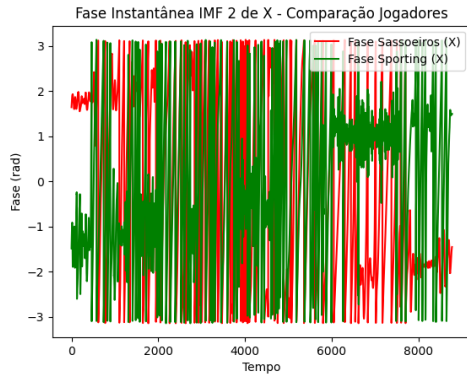


FIGURA A.25. Fase e Sincronismo Coordenada Longitudinal (X) - IMF 1

(A) Fase - X - IMF 2



(B) Sincronismo - X - IMF 2

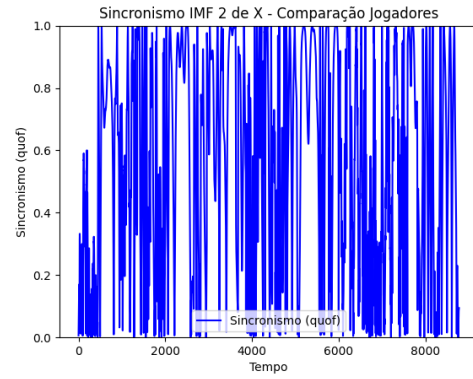
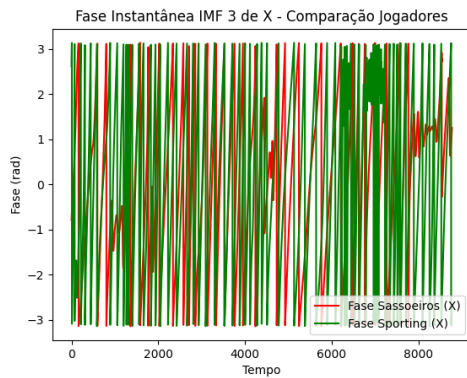


FIGURA A.26. Fase e Sincronismo Coordenada Longitudinal (X) - IMF 2

(A) Fase - X - IMF 3



(B) Sincronismo - X - IMF 3

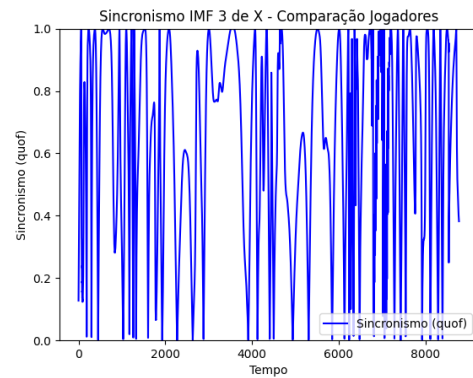
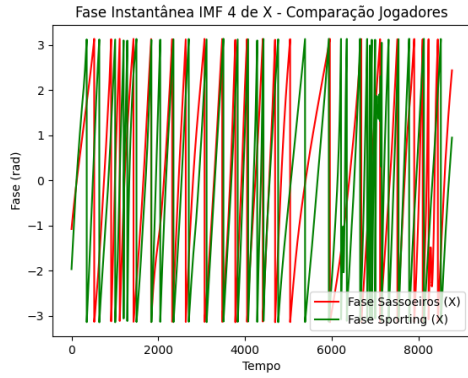


FIGURA A.27. Fase e Sincronismo Coordenada Longitudinal (X) - IMF 3

(A) Fase - X - IMF 4



(B) Sincronismo - X - IMF 4

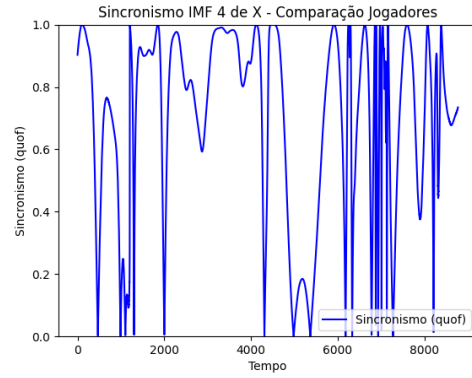
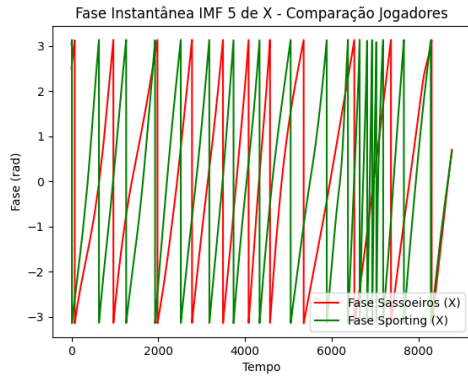


FIGURA A.28. Fase e Sincronismo Coordenada Longitudinal (X) - IMF 4

(A) Fase - X - IMF 5



(B) Sincronismo - X - IMF 5

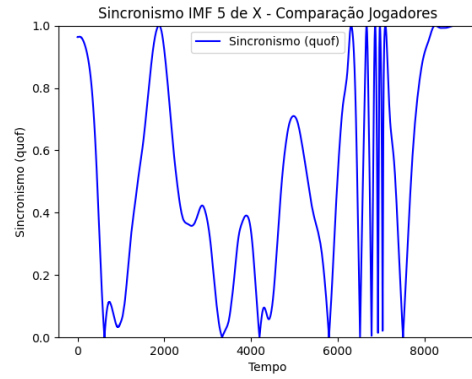
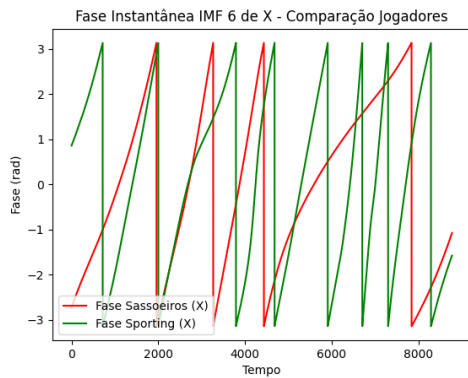


FIGURA A.29. Fase e Sincronismo Coordenada Longitudinal (X) - IMF 5

(A) Fase - X - IMF 6



(B) Sincronismo - X - IMF 6

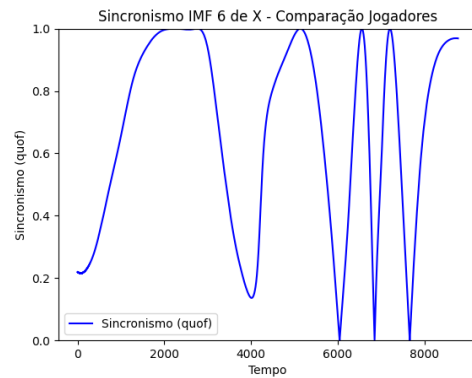
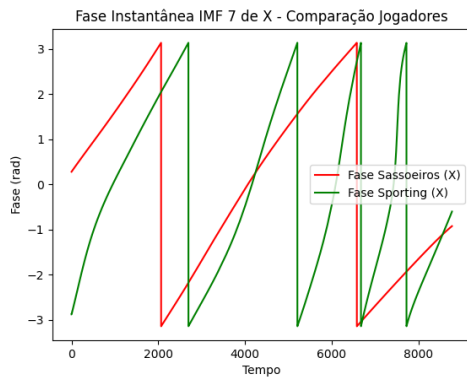


FIGURA A.30. Fase e Sincronismo Coordenada Longitudinal (X) - IMF 6

(A) Fase - X - IMF 7



(B) Sincronismo - X - IMF 7

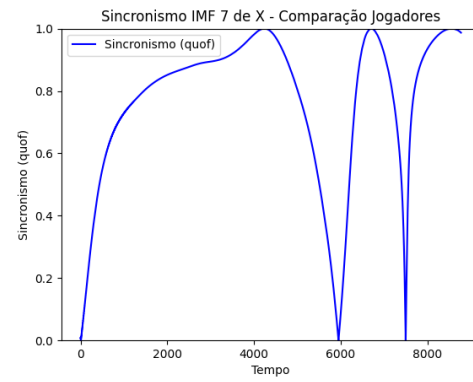


FIGURA A.31. Fase e Sincronismo Coordenada Longitudinal (X) - IMF 7

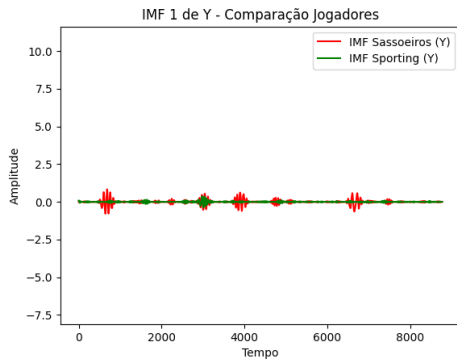
Nos gráficos de IMF para a coordenada Y, observa-se que as oscilações são menos acentuadas em comparação com a coordenada X, refletindo uma movimentação vertical mais contida. O jogador do Sporting apresenta variações ligeiramente mais acentuadas nas IMFs de ordens inferiores, sugerindo tentativas de desmarcação e movimentações verticais rápidas, enquanto o jogador do Sassoeiros responde com movimentos mais contidos, mas com oscilações próximas em amplitude (Figura A.32c).

Os gráficos de fase instantânea para o eixo Y mostram uma maior dispersão nas fases das IMFs de ordens inferiores, indicando momentos de descoordenação nos movimentos verticais rápidos. À medida que progredimos para as IMFs intermédias e superiores, o alinhamento de fases melhora, com ambos os jogadores a ajustarem as suas posições de forma mais coordenada (Figura A.38a).

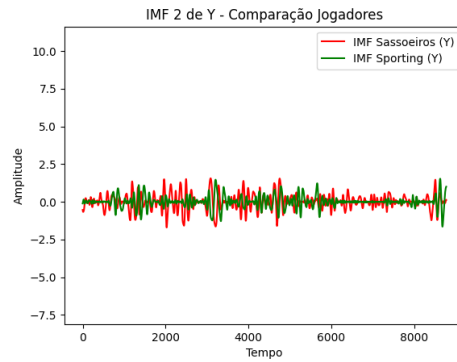
O sincronismo entre os jogadores ao longo da coordenada Y, que apreende os movimentos laterais, apresenta uma variação significativa entre as diferentes IMFs. Nos primeiros gráficos de IMFs de ordens inferiores, o sincronismo oscila bastante, com picos que atingem valores próximos de 1, mas também com muitos momentos de descoordenação, sugerindo que os jogadores ajustam os seus posicionamentos laterais de forma relativamente independente nas escalas de movimentos mais rápidos (Figura A.35b).

À medida que se avança para as IMFs de ordens superiores, especialmente nas IMFs 6 e 7 (Figuras A.38b e A.39b), o sincronismo atinge níveis mais consistentes e elevados, com o gráfico do IMF 7 a mostrar uma grande parte do tempo com valores muito próximos de 1, indicando uma coordenação bastante elevada. Isso sugere que, para movimentos mais lentos e prolongados, os jogadores estão mais sincronizados em termos de posicionamento lateral.

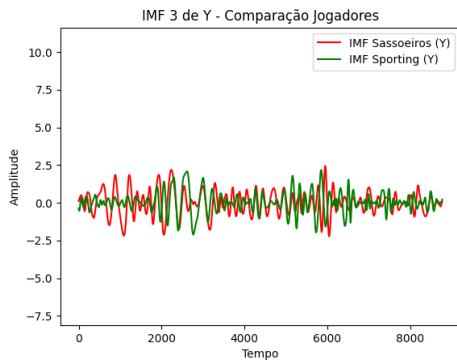
(A) Coordenada Y - IMF 1



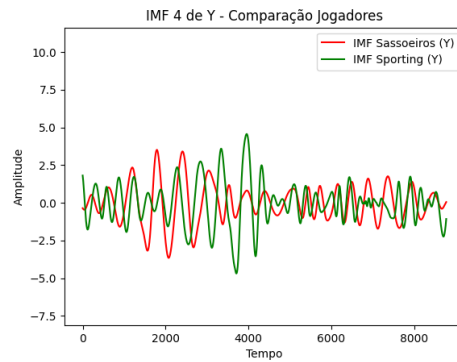
(B) Coordenada Y - IMF 2



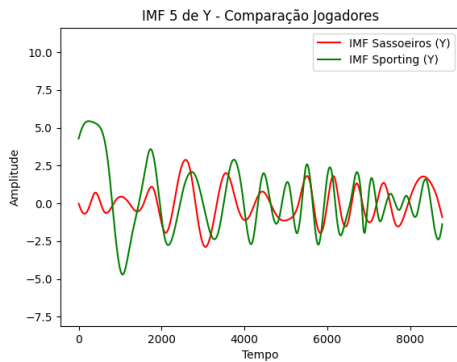
(C) Coordenada Y - IMF 3



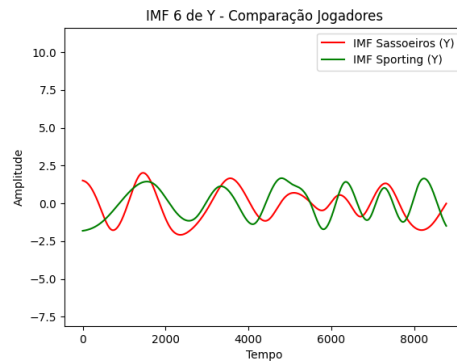
(D) Coordenada Y - IMF 4



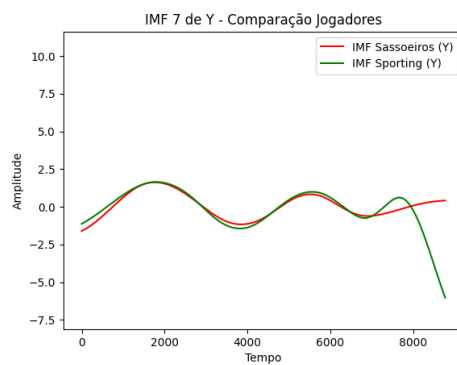
(E) Coordenada Y - IMF 5



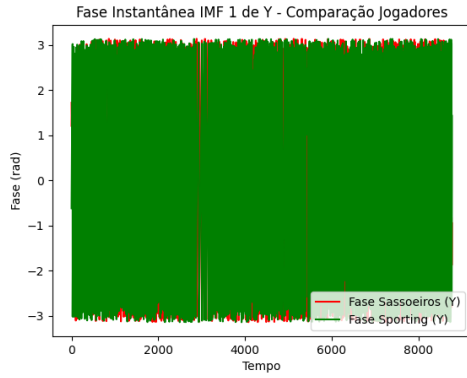
(F) Coordenada Y - IMF 6



(G) Coordenada Y - IMF 7



(A) Fase - Y - IMF 1



(B) Sincronismo - Y - IMF 1

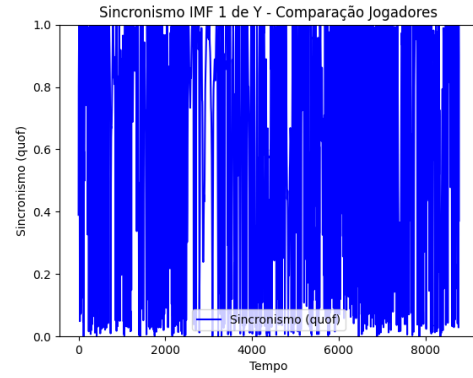
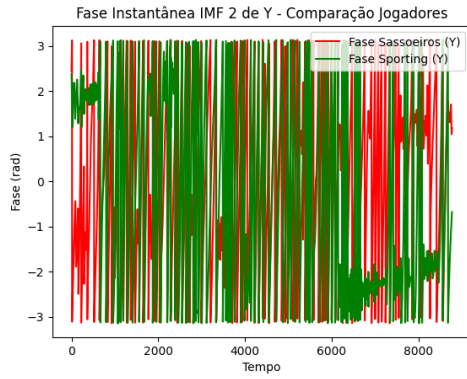


FIGURA A.33. Fase e Sincronismo Coordenada Lateral (Y) - IMF 1

(A) Fase - Y - IMF 2



(B) Sincronismo - Y - IMF 2

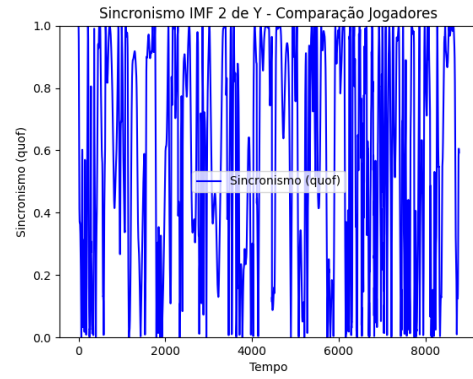
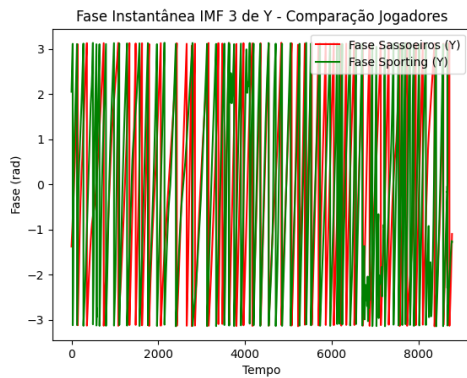


FIGURA A.34. Fase e Sincronismo Coordenada Lateral (Y) - IMF 2

(A) Fase - Y - IMF 3



(B) Sincronismo - Y - IMF 3

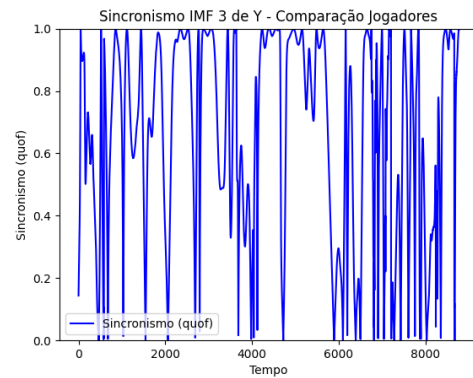
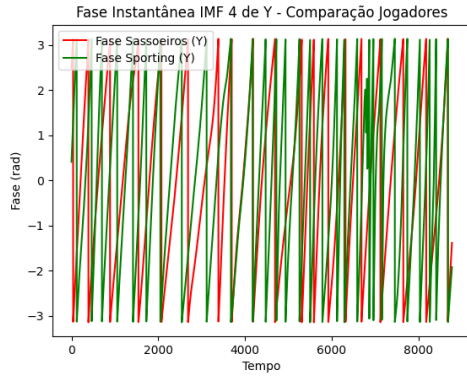


FIGURA A.35. Fase e Sincronismo Coordenada Lateral (Y) - IMF 3

(A) Fase - Y - IMF 4



(B) Sincronismo - Y - IMF 4

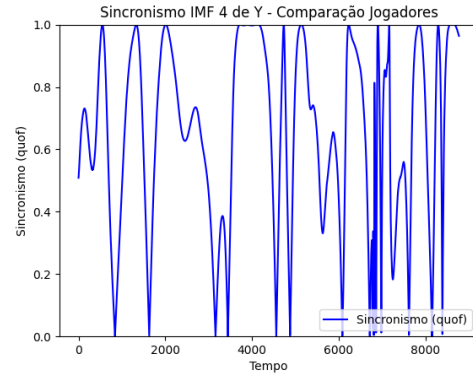
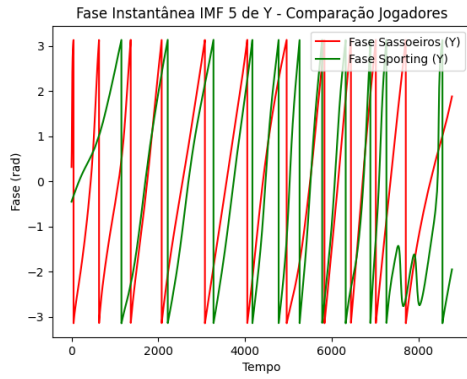


FIGURA A.36. Fase e Sincronismo Coordenada Lateral (Y) - IMF 4

(A) Fase - Y - IMF 5



(B) Sincronismo - Y - IMF 5

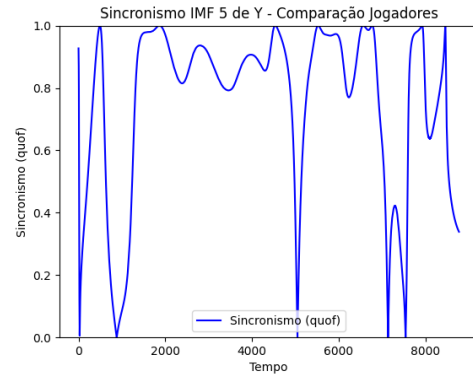
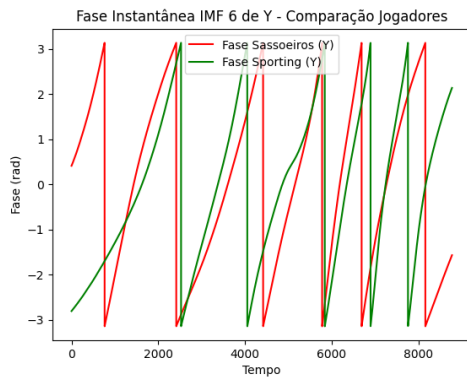


FIGURA A.37. Fase e Sincronismo Coordenada Lateral (Y) - IMF 5

(A) Fase - Y - IMF 6



(B) Sincronismo - Y - IMF 6

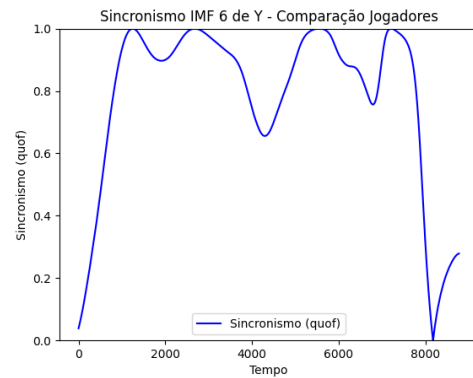
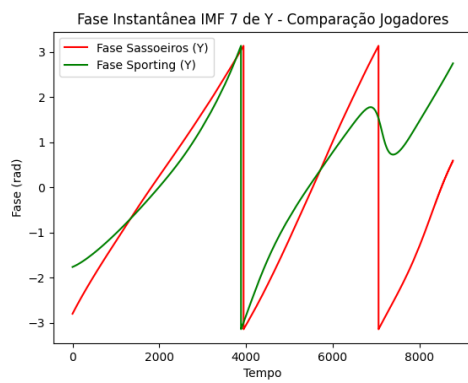


FIGURA A.38. Fase e Sincronismo Coordenada Lateral (Y) - IMF 6

(A) Fase - Y - IMF 7



(B) Sincronismo - Y - IMF 7

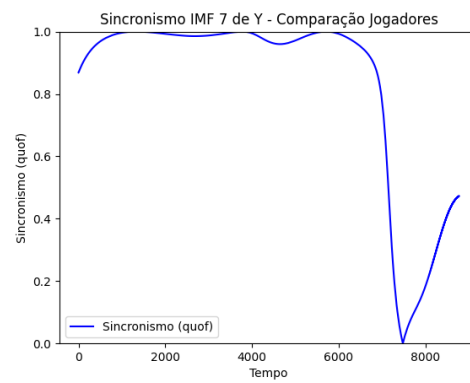


FIGURA A.39. Fase e Sincronismo Coordenada Lateral (Y) - IMF 7

A.2. Jogo 2: Sporting vs. Queijas

TABELA A.2. Atributos Jogo 2: Sporting vs. Queijas

Baliza 0	Baliza 1	Jogadores	Tarefa defensiva
Sporting	Queijas	3vs3	Defesa zonal

A.2.1. Análise via Mapas Térmicos

Par Próximo

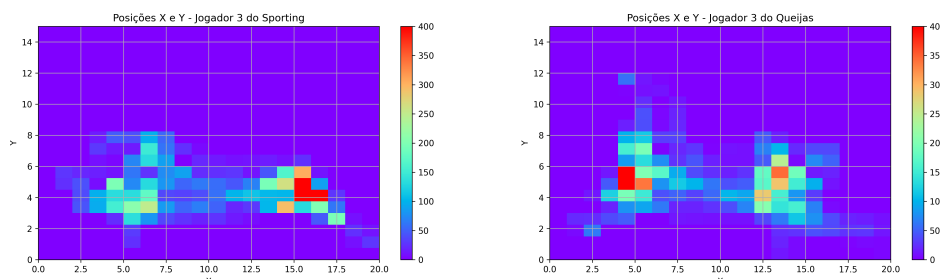


FIGURA A.40. Par Próximo - Sistema de Coordenadas X,Y

Na Figura A.40 encontram-se representados os mapas térmicos do jogador 3 do Sporting e do jogador 3 do Queijas no sistema de coordenadas regular para um jogo de defesa zonal.

O jogador 3 do Sporting apresenta uma concentração de movimentos entre as coordenadas X de 11 a 17 metros e Y de 2 a 6 metros, indicando uma atuação principalmente no lado direito do campo, em áreas próximas da baliza. Além disso, existe uma presença relevante entre os 5 e 7 metros no eixo X, sugerindo que o jogador esteve ativo tanto em zonas mais recuadas como em zonas avançadas. A maior concentração de calor está entre os 15 e 17 metros, o que pode indicar uma maior frequência de participação em jogadas ofensivas ou aproximações à baliza adversária. Importa ainda destacar que o jogador pisa a área de baliza várias vezes, o que sugere uma movimentação intensa em zonas próximas da baliza, quer seja para rematar ou defender.

O jogador 3 do Queijas apresenta uma concentração de movimentos mais acentuada entre as coordenadas X de 5 a 8 e de 12 a 15 metros, e no eixo Y de 2 a 8 metros, o que indica que também está mais descaído para o lado direito do campo. No entanto, encontra-se ligeiramente mais próximo do centro em comparação com o jogador do Sporting, com maior intensidade de movimentação entre os 5 e 7 metros no eixo X. Tal como o seu adversário, este jogador aproxima-se frequentemente da área de baliza, chegando a pisá-la várias vezes, o que pode sugerir uma participação tanto em momentos de transição defensiva como ofensiva. Dado o sistema de coordenadas utilizado, não é possível afirmar com certeza se o jogador está a atacar ou a defender, contudo, o posicionamento próximo da área de baliza indica uma presença significativa em momentos decisivos do jogo, seja em ações de ataque ou de defesa.

Embora não sejam adversários diretos, uma vez que se trata de um jogo com defesa à zona, ambos os jogadores estão bastante próximos em campo e concentram os seus movimentos no mesmo lado do campo. Com base nos dados analisados, parece que o jogador do Sporting está mais descaído para o lado direito (em relação à baliza que ataca), enquanto o jogador do Queijas está mais descaído para o lado esquerdo (em relação à baliza que ataca). No entanto, esta interpretação não pode ser feita com total certeza, uma vez que o sistema de coordenadas regular não oferece clareza absoluta sobre se os jogadores estão a atacar ou a defender.

Contudo, podemos supor que, devido ao facto de ambos pisarem várias vezes as áreas de baliza, estes jogadores estarão provavelmente a atacar para o lado em que realizam estas ações. Este comportamento é característico dos jogadores laterais, que muitas vezes realizam movimentações entre o centro e a lateral do campo, culminando em remates em suspensão no ar, o que pode resultar em quedas dentro da área de baliza. Assim, parece razoável assumir que os jogadores em questão estão a desempenhar funções laterais e a explorar estas zonas durante as suas ações ofensivas.

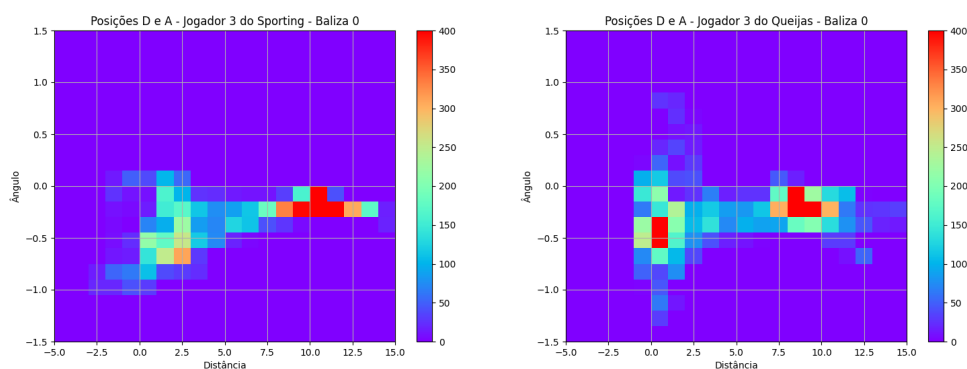


FIGURA A.41. Par Próximo (Baliza 0) - Novo Sistema

Na Figura A.41, observamos os dois jogadores em função da Baliza 0 no novo sistema de coordenadas. O jogador 3 do Sporting apresenta uma concentração significativa de movimentos entre os 7 e 13 metros de distância da baliza, com uma variação angular entre os -0.5 e 0 radianos. Este padrão sugere que o jogador está a assumir um papel ofensivo, explorando diferentes ângulos para criar oportunidades de ataque em direção à Baliza 1. A maior dispersão angular nas proximidades da Baliza 0 reforça a ideia de que este jogador está a atacar a Baliza 1, enquanto defende a Baliza 0. A sua movimentação é característica de um lateral, que tem uma maior liberdade de movimento ofensivo. Mesmo em missão defensiva à zona, o jogador parece cobrir uma área mais alargada, o que pode indicar que procura oportunidades para transições rápidas e sair a jogar. Tal como observado anteriormente no sistema de coordenadas regular, este jogador parece preferir o lado direito do campo, o que reforça a ideia de que desempenha o papel de lateral, com maior liberdade de movimentos no ataque.

Em contraste, o jogador 3 do Queijas apresenta uma movimentação distinta em relação à Baliza 0. A sua concentração de calor encontra-se bastante dispersa nas proximidades da baliza, o que é característico de ações ofensivas, onde os jogadores tendem a explorar mais o espaço e variar os ângulos de ataque. Como já observado no sistema regular, este jogador também atua como lateral, com incursões pontuais na zona central do campo. A movimentação do jogador do Queijas sugere que está a atacar a Baliza 0, utilizando uma maior variação angular à medida que se aproxima dessa baliza. No entanto, em zonas mais afastadas da Baliza 0, ou seja, mais próximas da sua área defensiva, a variação angular do jogador é bastante reduzida, o que reflete uma postura mais estável e defensiva típica de uma estratégia de defesa à zona.

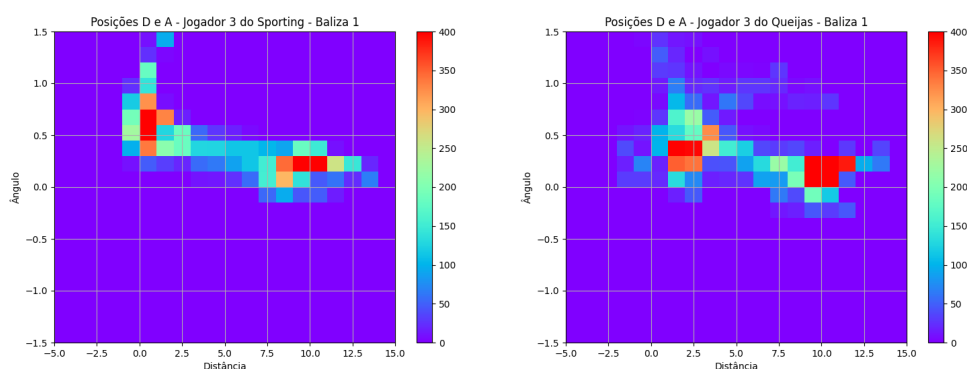


FIGURA A.42. Par Próximo (Baliza 1) - Novo Sistema

Na Figura A.42, observamos os dois jogadores em função da Baliza 1. Agora, ao observar os mesmos jogadores em relação à Baliza 1, verificamos uma dinâmica similar, mas inversa no que toca à dispersão angular (é importante voltar a salientar que, ao mudarmos da Baliza 0 para a Baliza 1 o ângulo inverte-se, assim, o que anteriormente correspondia ao lado esquerdo em relação a uma baliza passa a ser o lado direito).

O jogador 3 do Sporting, ao aproximar-se da Baliza 1, demonstra uma maior dispersão angular, particularmente entre os 0 e 1 radianos. Esta dispersão é mais notória nas zonas próximas da baliza, sugerindo que o jogador tem maior liberdade para explorar diferentes ângulos, algo típico de ações ofensivas. Isto reforça a ideia de que o jogador do Sporting está a atacar a Baliza 1. Como já observado no sistema regular, o jogador apresenta uma tendência para descair para a direita, o que sugere que este é o seu lado preferencial de ataque, possivelmente por ser lateral direito. Nas zonas mais afastadas da Baliza 1 (ou seja, mais próximas da sua própria área), o jogador apresenta uma variação angular mais limitada, o que faz sentido num contexto defensivo, onde os jogadores devem manter-se mais fixos a defender uma zona específica.

Por outro lado, o jogador 3 do Queijas, em relação à Baliza 1, concentra uma quantidade significativa de movimentos entre os 2 e 5 metros e os 8 e 12 metros de distância da área de baliza. Tal como observado com o jogador do Sporting em relação à Baliza 0,

nota-se que, apesar de defender numa zona entre os 2 e 4 metros da área de baliza, o jogador do Queijas realiza algumas movimentações adicionais, provavelmente com o intuito de intercetar passes ou recuperar a bola, características típicas de um lateral. A sua forte presença em zonas mais afastadas da Baliza 1 também reflete o seu potencial ofensivo, algo que já havia sido identificado na análise do sistema de coordenadas regular.

De forma geral, os mapas térmicos sugerem que o jogador 3 do Sporting está a atacar para a Baliza 1 e a defender a Baliza 0, enquanto o jogador 3 do Queijas está a atacar para a Baliza 0 e a defender a Baliza 1. Esta conclusão é corroborada pelo padrão de dispersão angular de ambos: observamos uma maior variação angular nas zonas próximas das balizas que atacam, o que é típico de ações ofensivas, e uma variação angular mais reduzida nas áreas mais distantes das balizas adversárias, onde assumem um papel mais defensivo. Esta interpretação está em concordância com a informação fornecida pela especialista aquando da entrega dos dados.

Par Afastado

Nesta análise será avaliado o mesmo jogador do Sporting do par anterior. No entanto, este será comparado com um jogador dos Queijas que não ocupa posições próximas no campo.

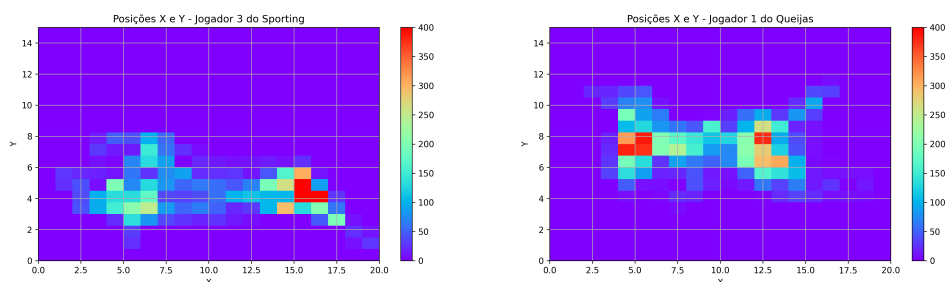


FIGURA A.43. Par Afastado - Sistema de Coordenadas X,Y

Na Figura A.43 encontram-se representados os mapas térmicos do jogador 3 do Sporting e do jogador 1 do Queijas no sistema de coordenadas regular.

O jogador 3 do Sporting, como já analisado anteriormente, concentra a sua movimentação principalmente entre os 15 e 17 metros, próximo da baliza adversária, com alguma atividade também em zonas mais recuadas, mas sempre do lado direito do campo. A sua proximidade à área de baliza reforça a sua participação significativa em ações ofensivas.

Por outro lado, o jogador 1 do Queijas apresenta uma movimentação mais centralizada no campo, com duas zonas de elevada concentração de calor: uma entre os 4 e 8 metros e outra entre os 11 e 14 metros no eixo X, e com Y a variar entre os 4 e 11 metros. Esta disposição sugere uma atuação que cobre áreas centrais do campo, tanto em posições mais defensivas como em zonas mais avançadas, mas sempre mantendo uma presença significativa ao longo do eixo central do campo. A sua movimentação reflete uma possível

função de transição, cobrindo tanto áreas defensivas como ofensivas, com menor presença nas laterais. A variação entre estas duas áreas de concentração pode sugerir que o jogador do Queijas participa ativamente em ações defensivas e também em apoio ao ataque, com um papel mais abrangente.

As movimentações deste par de adversários revelam contrastes significativos. O jogador do Sporting está mais posicionado no lado direito do campo, concentrando-se em zonas próximas da baliza, o que sugere um papel ofensivo. Já o jogador do Queijas ocupa uma posição mais central, com movimentações distribuídas entre áreas defensivas e ofensivas, o que indica um papel mais equilibrado, focado em transições e apoio em várias fases do jogo.

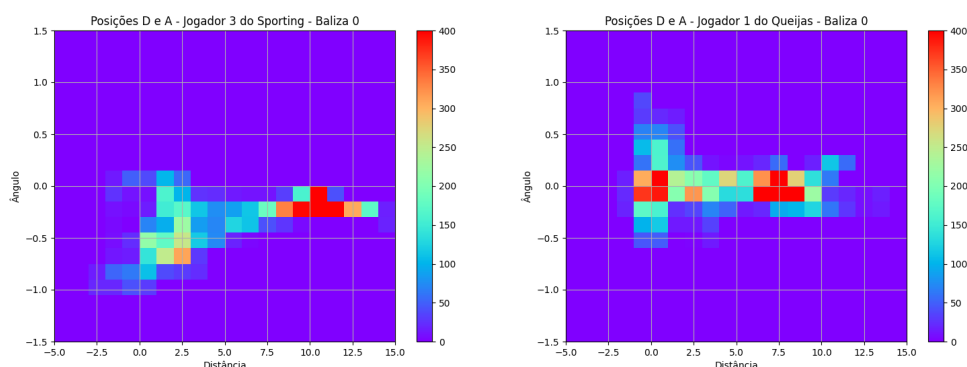


FIGURA A.44. Par Afastado (Baliza 0) - Novo Sistema

Na Figura A.44, observamos os dois jogadores em função da Baliza 0. Como já analisado no primeiro par, a movimentação do jogador 3 do Sporting reflete um papel ofensivo em direção à baliza 1, com tendência para descair para a lateral direita. Ao mesmo tempo, o jogador mantém uma postura dinâmica na defesa da baliza 0, sugerindo ser um lateral ágil e versátil, capaz de cobrir várias zonas do campo.

Já o jogador 1 do Queijas mostra uma distribuição mais centralizada, com picos de movimentação entre os 0 e 3 e 6 a 8 metros de distância à área de baliza e uma variação angular entre -0.5 e 0.5 radianos. Este padrão sugere que o jogador está mais equilibrado em termos de funções, cobrindo tanto a defesa quanto o ataque. A sua concentração em zonas mais próximas da baliza reforça a ideia de que o jogador está a atacar a Baliza 0, chegando mesmo a pisar a área (distância inferior a 0 no ângulo 0). A dispersão angular significativa nas zonas mais próximas da baliza sugere que o jogador está a explorar diferentes ângulos de ataque, algo típico de ações ofensivas. No entanto, à medida que se afasta da baliza, a variação angular reduz, indicando uma função mais estável em áreas defensivas, como seria de esperar numa defesa zona.

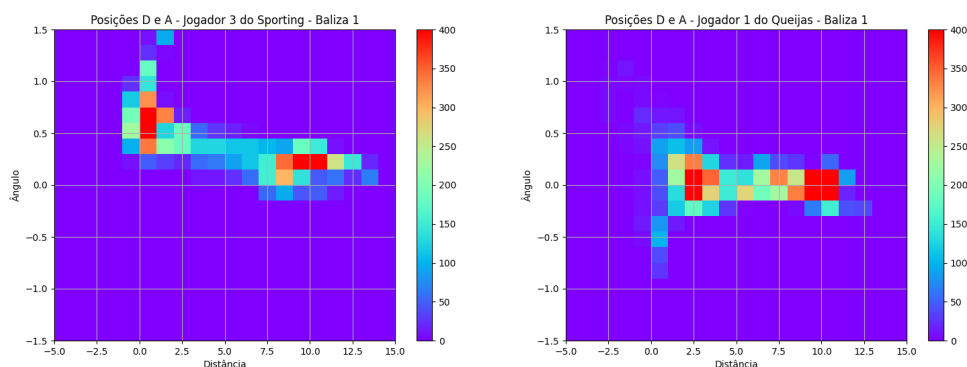


FIGURA A.45. Par Afastado (Baliza 1) - Novo Sistema

Na Figura A.45, observamos os dois jogadores em função da Baliza 1. O jogador 3 do Sporting, ao aproximar-se da Baliza 1, apresenta uma dispersão angular mais ampla, o que sugere um comportamento mais ofensivo, como já observado na análise em relação à Baliza 0. Já nas zonas mais afastadas da baliza, a variação angular é bastante reduzida, o que reforça a ideia de que o jogador assume uma postura defensiva mais estática quando se afasta da área adversária.

Por outro lado, o jogador 1 do Queijas, em relação à Baliza 1, apresenta uma concentração significativa de movimentos entre os 2 e 5 metros de distância da área de baliza e dos 8 aos 11 metros. A análise sugere que este jogador passa uma parte considerável do tempo em zonas mais afastadas da baliza que defende, o que é típico de um papel de pivô, permanecendo durante bastante tempo no ataque num mesmo bloco espacial. A sua presença constante nestas zonas reflete uma função ofensiva de apoio, em que o jogador se posiciona estrategicamente para receber a bola ou criar oportunidades de finalização.

No que diz respeito à defesa, observa-se que o jogador assume um papel mais central, o que sugere que ocupa uma posição importante na cobertura do centro da defesa. No entanto, as variações angulares registadas (principalmente entre os -0.25 e 0.5 radianos) indicam que, embora se foque no meio, este jogador tende a cobrir uma área maior dentro da sua zona defensiva, adaptando-se conforme as necessidades da equipa. Isto é especialmente relevante no contexto de uma defesa zona, onde cada jogador deve cobrir uma área mais extensa, ainda mais considerando que há apenas três jogadores de campo. Este facto implica que os jogadores tenham de ser mais flexíveis e ocupar espaços maiores, garantindo uma defesa mais abrangente e adaptável.

A.2.2. Análise de Sincronismo

Par Próximo

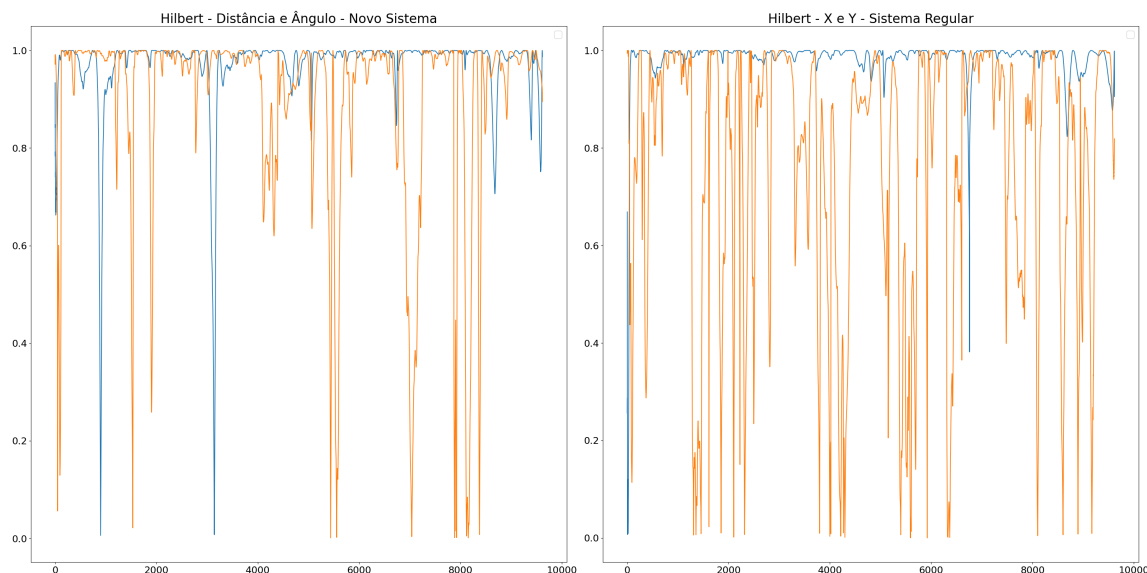


FIGURA A.46. Comparação de Sistemas - Jogo 2 - Par Próximo

No gráfico da esquerda na Figura A.46, observamos a sincronização entre a distância (linha azul) e o ângulo (linha laranja) dos dois jogadores em relação à baliza 1, onde o Sporting está a atacar. Desta vez, a análise foi realizada num jogo de defesa zona, e a baliza 1 foi escolhida por se ter verificado na primeira iteração que a equipa mais ofensiva, neste caso o Sporting, estava a atacar nesse sentido.

O gráfico revela uma sincronização muito forte nas distâncias (linha azul) ao longo de quase todo o período, com o coeficiente frequentemente próximo de 1. Isso sugere que os dois jogadores, apesar de não serem adversários diretos no sentido tradicional, estão a ajustar-se de forma muito coordenada em termos de distância à baliza. Esta coordenação é esperada numa defesa em zona, onde os jogadores ocupam espaços semelhantes no campo e mantêm uma proximidade constante.

Em relação aos ângulos (linha laranja), a sincronização é, de facto, menor quando comparada à distância, mas ainda assim bastante significativa em largos períodos. Os valores mantêm-se altos em muitos momentos, mostrando que, em geral, os jogadores também estão coordenados nos ângulos que estão a cobrir. No entanto, há momentos específicos em que essa sincronização se perde abruptamente, como em torno dos 5000, 7000, e 8000 *frames*. Nessas alturas, o valor do coeficiente para o ângulo cai significativamente, sugerindo que os jogadores divergem na cobertura dos ângulos. Estas quebras pontuais no sincronismo angular indicam que, embora exista uma boa coordenação na maior parte do tempo, há momentos em que os jogadores tomam decisões mais independentes ou focam-se em diferentes áreas do campo, o que resulta nessas divergências temporárias. No entanto,

estas quebras não comprometem totalmente a coordenação, pois a sincronização angular é retomada rapidamente em vários pontos ao longo do jogo.

No período após os 8000 *frames*, a linha laranja recupera, aproximando-se novamente de 1 em vários momentos, indicando uma maior coordenação nos ângulos nesta fase. Esta situação pode refletir um ajuste final das posições dos jogadores ou uma maior concentração defensiva no fim do jogo por se tratar de um momento crucial para o resultado final.

No gráfico da direita na Figura A.46, o par avaliado é o mesmo, mas desta vez, no sistema de coordenadas regular.

O gráfico do sistema regular revela uma sincronização bastante consistente no eixo X (linha azul), com o coeficiente frequentemente próximo de 1. Isto reflete uma boa coordenação horizontal entre os jogadores, indicando que ajustam as suas posições de forma alinhada ao longo do comprimento do campo, algo essencial numa defesa em zona.

No eixo Y (linha laranja), apesar das frequentes quedas abruptas, há vários momentos em que o coeficiente se mantém elevado, indicando uma boa coordenação vertical em certas fases do jogo. Entre os 0 e 2000 *frames*, perto dos 3000, e novamente por volta dos 7000 *frames*, a sincronização ao longo do eixo Y é notória, sugerindo que, nestes períodos, os jogadores ajustam as suas posições verticais de forma mais coordenada. No entanto, há momentos de quebra significativa, como em torno dos 2000, 4000 e 6000 *frames*, onde o sincronismo no eixo Y diminui drasticamente.

Essas flutuações no eixo Y sugerem que, embora também haja momentos de boa coordenação vertical, a flexibilidade da defesa zona permite que os jogadores se ajustem a diferentes necessidades táticas, o que explica as quedas pontuais na sincronização.

Par Afastado

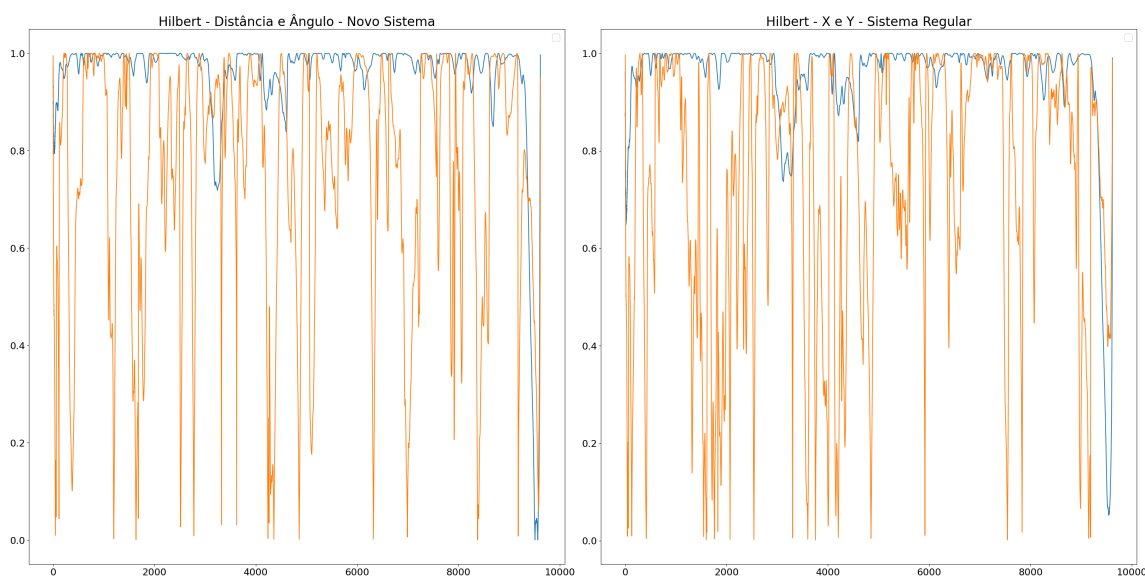


FIGURA A.47. Comparação de Sistemas - Jogo 2 - Par Afastado

No gráfico da esquerda na Figura A.47, voltamos a avaliar o novo sistema de coordenadas numa defesa zona, mas desta vez com um par que não se posiciona nas mesmas zonas do campo.

Verificamos que a linha azul (distância) se mantém frequentemente elevada, com valores do coeficiente próximos de 1 em muitos momentos. Isto indica que, mesmo não estando próximos no campo, os jogadores conseguem manter uma certa coordenação na distância à baliza. Este comportamento faz sentido, uma vez que, numa defesa zona, mesmo jogadores distantes devem manter variações curtas no eixo X (distância horizontal), assegurando uma cobertura coesa ao longo do campo. No entanto, existem várias quedas ao longo do tempo, sugerindo que a sincronização na distância, embora geralmente alta, é menos consistente do que seria para jogadores que ocupam áreas mais próximas. Essas quebras refletem momentos em que os jogadores ajustam a sua proximidade à baliza de forma independente, de acordo com suas zonas de atuação específicas.

Por outro lado, a linha laranja (ângulo) apresenta uma sincronização significativamente mais baixa. Ao longo do gráfico, os valores oscilam bastante, com quedas frequentes para valores próximos de 0. Isto indica que os jogadores estão a cobrir ângulos muito diferentes, o que é esperado, dado que estão a ocupar diferentes partes do campo e não precisam de se coordenar diretamente em termos de cobertura angular. Numa defesa zona, é natural que haja uma maior variação no eixo Y (distância vertical), visto que estes jogadores não estão a atuar nas mesmas áreas do campo. Apesar de alguns momentos em que o coeficiente do ângulo sobe, a sincronização angular permanece fraca, refletindo a falta de alinhamento natural entre jogadores distantes.

Por fim, no gráfico da direita na Figura A.47, que representa o coeficiente no sistema regular para o eixo X (linha azul) e o eixo Y (linha laranja), a sincronização entre os dois jogadores apresenta diferenças notórias, particularmente devido ao facto de estarem distantes no campo.

A linha azul (X) mantém-se elevada durante grande parte do tempo, com o coeficiente frequentemente próximo de 1. Esta situação indica uma boa sincronização ao longo do eixo X, apesar de os jogadores não estarem próximos fisicamente. Este comportamento, como já referido anteriormente, é esperado numa defesa zona, onde mesmo jogadores distantes no campo devem manter uma variação relativamente curta no eixo horizontal para assegurar uma cobertura eficiente. No entanto, existem algumas quedas no sincronismo ao longo do gráfico, como em torno dos 3000 e 9000 *frames*, o que sugere que, em certos momentos, os jogadores ajustam as suas posições horizontais de forma mais independente, possivelmente em resposta a mudanças táticas.

Por outro lado, a linha laranja (Y) apresenta uma maior variabilidade, com frequentes descidas para valores próximos de 0, o que reflete uma descoordenação nos movimentos verticais. Dado que estes jogadores não estão próximos no campo, é natural que exista uma maior variação ao longo do eixo Y, com cada jogador a cobrir zonas diferentes e a ajustar a sua posição vertical de acordo com as necessidades específicas de cada espaço,

como já verificámos também no outro sistema de coordenadas. No entanto, também há momentos em que o coeficiente no eixo Y sobe, indicando uma sincronização razoável em determinados períodos, como por volta dos 1000 e 7000 *frames*.

ANEXO B

Comentários dos Especialistas ao Anexo A

O texto que se segue é uma reprodução exata dos comentários dos especialistas Anna Volossovitch, professora da Faculdade de Motricidade Humana, e Diogo Marques, mes-trando da mesma faculdade.

O trabalho é inovador e propõe o uso das técnicas e métricas nunca antes utilizadas na análise do desempenho dos jogadores de andebol.

Os resultados são úteis e interessantes porque permitem identificar os espaços pre-dominantemente ocupados por cada jogador, registar o acoplamento/sincronia entre os adversários diretos e ter noção dos deslocamentos individuais dos jogadores em relação à baliza. Todas estas informações são importantes para avaliar o comportamento tático individual e representam o primeiro passo para a análise do comportamento coletivo.

Como seria de esperar, é difícil interpretar os resultados sem saber em que períodos os jogadores atacam e defendem, mas isso não retira o mérito ao tratamento de dados proposto. A descrição do comportamento dos jogadores com base na informação disponível parece bastante lógica.

Na análise do sincronismo é importante ter em conta que no andebol as trocas das responsabilidades defensivas são frequentes e acontecem tanto na defesa individual como zonal. Quando no ataque os jogadores utilizam as trocas de posições, isso leva à troca das responsabilidades defensivas e pode explicar a falta de sincronismo entre os adversários diretos registada durante vários períodos de jogo. Para além disso, o comportamento dos jogadores jovens tende a ser menos regular, o que também pode explicar os resultados obtidos.

As oscilações menos acentuadas para a coordenada Y fazem sentido não só pelo formato retangular do campo, mas também pela tentativa dos jogadores de explorar e pro-teger mais as zonas centrais do campo, consideradas mais eficazes.

Do ponto de vista de estudos futuros, poderia ser interessante estudar a sincro-nia/assincronia dos dados em função do esforço do atleta. Poderemos eventualmente detetar um padrão de comportamento (e.g., maior cansaço implicar maior estabilidade de movimentações)

Em síntese, o trabalho abre novas possibilidades para o uso dos dados posicionais na análise do desempenho individual e coletivo no andebol. Não duvido que depois de distinguir as fases ofensiva e defensiva, será mais fácil justificar os resultados obtidos.