



ANÁLISE DE CONCEITOS TÁTICOS DO FUTEBOL  
POR MEIO DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Alexandre Tadeu Rossini da Silva

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Sistemas e Computação, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia de Sistemas e Computação.

Orientador: Luís Alfredo Vidal de Carvalho

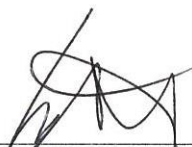
Rio de Janeiro  
Setembro de 2015

ANÁLISE DE CONCEITOS TÁTICOS DO FUTEBOL  
POR MEIO DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

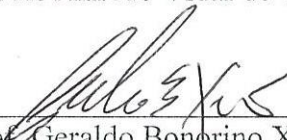
Alexandre Tadeu Rossini da Silva

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ  
COIMBRA DE POS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS  
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM  
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA DE SISTEMAS E COMPUTAÇÃO.

Examinada por:



Prof. Luís Alfredo Vidal de Carvalho, D.Sc.



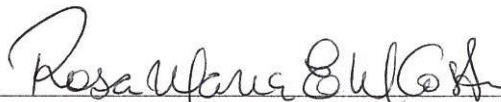
Prof. Geraldo Bonorino Xexéo, D.Sc.



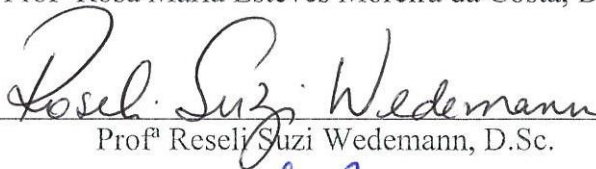
Prof. Valmir Carneiro Barbosa, D.Sc.



Prof. Carlos Eduardo Pedreira, D.Sc.



Profª Rosa Maria Esteves Moreira da Costa, D.Sc.



Profª Reseli Suzi Wedemann, D.Sc.



Prof. Sergio Manuel Serra da Cruz, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

SETEMBRO DE 2015

Silva, Alexandre Tadeu Rossini da

Análise de conceitos táticos do futebol por meio de simulação computacional/Alexandre Tadeu Rossini da Silva. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2015.

XVI, 144 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Luís Alfredo Vidal de Carvalho

Tese (doutorado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia de Sistemas e Computação, 2015.

Referências Bibliográficas: p. 135-144.

1. Simulação computacional de futebol. 2. Sistema multiagente. 3. Futebol de robôs. 4. Teoria de futebol. I. Carvalho, Luís Alfredo Vidal de. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia de Sistemas e Computação. III. Título.

Este trabalho é dedicado ao meu filho Paulo José,  
à minha esposa Fabiana, e aos meus pais  
José Gerci e Elisabete.

# Agradecimentos

À Deus pela vida e por me guiar por caminhos desconhecidos que percorri de maneira ativa e serena.

Ao estimado professor Luís Alfredo, pela paciência e pelo tempo dedicado nesta pesquisa, mas principalmente por acreditar e confiar nos caminhos que nortearam este trabalho até sua conclusão.

À minha amada esposa, Fabiana, pelo incentivo nos momentos difíceis, que pareciam intransponíveis, e, principalmente, pela compreensão de minhas ausências, mesmo quando dos momentos em que estive presente apenas fisicamente.

Ao meu filho, Paulo José, uma brisa que diariamente, mesmo que ainda ele não sabia disto pela sua tenra idade, me trouxe calma e possibilitou recarregar minhas “baterias” para conseguir caminhar incessantemente em busca da conclusão desta pesquisa.

Ao meu pai José Gerçi, meu maior incentivador nos estudos e fonte de inspiração, e à minha mãe Elisabete, de quem “herdei” desde cedo o gosto pelos esportes. Quando menino eu não fazia ideia, mas carregaria comigo, por toda a vida pessoal e acadêmica, o interesse e entusiasmo pelos esportes que aprendi a apreciar com minha mãe.

Ao meu irmão Leonardo, que muitas vezes me ajudou silenciosamente e serviu de exemplo e modelo de dedicação aos estudos, à profissão e à família.

Aos voluntários, especialistas em futebol, que dedicaram tempo na participação da pesquisa realizada neste trabalho.

Aos queridos amigos Marco Antonio Firmino e André Pugliese, pessoas compreensivas e que foram fundamentais na realização deste trabalho, e à Magda, pessoa de confiança e que me possibilitou tempo livre com seus serviços eficientemente prestados.

Ao professor Paulo Rosa, meu orientador no mestrado, um exemplo acadêmico e, provavelmente, a pessoa que mais me incentivou ao doutoramento. Ao professor Almir Joaquim de Sousa, minha primeira referência acadêmica na graduação e quem me despertou o gosto pela ciência. Se o professor Paulo Rosa foi importante para eu ir em busca do título de doutor, o professor Almir foi o responsável na caminhada em direção ao título de mestre.

Aos meus grandes amigos Fabrício Nogueira e Fábio Vidal e ao reverendo padre Helenes, que me acolheram em suas residências durante a realização deste trabalho.

Aos colegas de doutorado Ary e Rafael, pelo convívio e pela colaboração. Aos colegas Edcarlos, Guilherme, Horiano, Nilo, Ruben, Savio, Tanilson e Vitor, pessoas que contribuíram indiretamente neste trabalho.

A todos os docentes do Programa de Engenharia de Sistemas e Computação. Em especial aos professores Ivan Marques e Henrique Cukierman, que durante suas aulas permitiram expandir meu interesse pela ciência e, assim, fizeram com que eu passasse a contemplar o horizonte de modo a apreciar nuances antes ignoradas.

A todos os colaboradores do Programa de Engenharia de Sistemas e Computação, mas principalmente ao Gutierrez pelo apoio e serviços prestados sempre de forma cortês e eficiente.

À Universidade Federal do Tocantins, local onde trabalho, por acreditar em minha pesquisa e, principalmente, ao colegiado do curso de bacharelado em ciência da computação.

Por fim, agradeço, de coração, a todas as pessoas que me incentivaram, apoiaram e possibilitaram a conclusão deste trabalho. Uma frase atribuída a Rabindranath Tagore, polímata bengali, sintetiza meu profundo agradecimento a todos vocês, "a noite abre as flores em segredo e deixa que o dia receba os agradecimentos".

Muito obrigado!

*Alexandre Tadeu Rossini da Silva*

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

ANÁLISE DE CONCEITOS TÁTICOS DO FUTEBOL  
POR MEIO DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Alexandre Tadeu Rossini da Silva

Setembro/2015

Orientador: Luís Alfredo Vidal de Carvalho

Programa: Engenharia de Sistemas e Computação

Este trabalho teve como objetivo analisar conceitos táticos do futebol por meio de simulação computacional, os conceitos da Teoria do Futebol verificados foram Modelo Dualista e Modelo de Quatro Momentos. Fez parte intrínseca do objetivo propor um conjunto de métodos capazes de verificar a validade do modelo matemático-computacional do simulador. Além disso, foi apresentado estudo demonstrando a influência de outras componentes de rendimento sobre a dimensão tática, que não pode ser isolada em humanos, o que justifica o uso de simulação computacional. O simulador adotado foi o *Soccer Server* da categoria *Simulation 2D* de futebol de robôs da RoboCup. O modelo implementado no simulador mostrou-se promissor para simular partidas de futebol uma vez que obteve resultados próximos aos esperados em partidas de futebol. Para realizar simulações foi necessário implementar uma equipe, composta por agentes virtuais, capaz de jogar contra outras equipes no *Soccer Server*. A equipe desenvolvida foi nomeada iBots e usou como base de desenvolvimento o time-base Agent2D versão 3.1.1. Foram propostas alterações no Modelo de Quatro Momentos e, como resultado, surgiu o conceito original de Modelo de Quatro Estados, principal contribuição desta tese. Os algoritmos propostos neste trabalho foram testados e validados por meio de especialistas do futebol. Os resultados dos testes em simulação permitiram comparar os modelos objetos de estudo desta tese e concluir que taticamente é mais adequado tratar o futebol como a interação de quatro estados, proposta do Modelo de Quatro Estados, do que de apenas dois estados, que é a proposta do Modelo Dualista.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

ANALYSIS OF TACTICAL CONCEPTS OF SOCCER  
BY COMPUTER SIMULATION

Alexandre Tadeu Rossini da Silva

September/2015

Advisor: Luís Alfredo Vidal de Carvalho

Department: Computer and System Engineering

This work proposes to analyze tactical soccer concepts through computer simulation, the Soccer Theory concepts analyzed were the Dualist Model and the Model of Four Moments. It is intrinsic to the objective propose a set of methods to verify the validity of the mathematical-computer model of the simulator. Additionally, was presented a study showing that other dimensions of performance change the tactical dimension, that can not be isolated in humans, justifying the use of computer simulation. The simulator used in this work was the RoboCup Soccer Server Simulation 2D, which is used to simulate robot soccer. The model implemented in the simulator showed promising to simulate human soccer matches because results are similar to soccer matches. For the simulations was necessary to develop a team of virtual agents able to play in the Soccer Server. A team was developed in this work with the Agent2D version 3.1.1 and was named iBots. Changes were proposed in Four Moments Model and it originated the concept of Four States Model, the main contribution of this thesis. The algorithms proposed in this work have been verified and validated by soccer experts. Test results allow to compare the objects of study of this thesis and conclude that tactically it is more appropriate to consider soccer as the interaction of four states, that is the proposal of the Four States Model, of which only two states, that is the proposal of Dualist Model.



# Sumário

Lista de figuras .....	xii
Lista de tabelas .....	xv
1. Introdução .....	1
1.1 Objetivo .....	2
1.2 Delimitação do problema .....	3
1.3 Contribuições originais .....	6
1.4 Justificativa .....	7
1.5 Organização do trabalho .....	10
2. Teoria do futebol .....	11
2.1 Posições no futebol .....	11
2.2 Sistemas táticos .....	12
2.3 Princípios táticos .....	14
2.3.1 Princípios fundamentais defensivos .....	15
2.3.2 Princípios fundamentais ofensivos .....	17
2.4 Tipos de marcação e <i>pressing</i> .....	18
2.5 Modelo do jogo .....	19
2.5.1 Modelo dualista .....	21
2.5.2 Modelo de quatro momentos .....	22
2.6 Componentes de rendimento .....	23
2.6.1 Psicológico/social: a força emocional .....	23
2.6.2 Físico: o atributo da motricidade .....	25
2.6.3 Técnica: a habilidade individual .....	27
2.6.4 Tática: o jogo coletivo .....	28
3. Simulador <i>Soccer Server</i> da RoboCup .....	30
3.1 A arquitetura do simulador .....	31
3.2 O futebol de robôs do <i>Soccer Server</i> como sistema multiagentes .....	34
3.3 Times-base .....	39
3.4 Agent2D .....	40
3.4.1 Modelo de mundo .....	42
3.4.2 <i>Formation Editor</i> .....	44
3.5 Validação do <i>Soccer Server</i> como simulador de futebol .....	46

3.5.1 Aleatoriedade de eventos e resultados das partidas simuladas .....	46
3.5.2 Desempenho físico .....	49
3.5.3 Eficiência nos chutes .....	50
3.5.4 Qualidade dos passes.....	51
3.5.5 Gols durante uma partida .....	52
3.5.6 Contra-ataques.....	53
3.5.7 Relação entre passes e chutes.....	53
3.5.8 Supremacia em posse e passe e sua implicação nos chutes .....	54
3.5.9 Aproveitamento de passes .....	55
3.5.10 Considerações do modelo matemático/computacional do <i>Soccer Server</i> ....	55
4. Solução proposta .....	56
4.1 Modelo de jogo .....	57
4.1.1 Modelo Dualista .....	57
4.1.2 Modelo de Quatro Momentos .....	59
4.1.3 Modelo de Quatro Estados .....	61
4.2 <i>Soccer Scenes</i> .....	80
4.2.1 Do <i>Soccer Scenes</i> para o Agent2D.....	82
4.3 Equipe desenvolvida: iBots .....	84
4.3.1 Táticas defensivas da equipe iBots.....	84
4.3.2 Tática ofensiva da equipe iBots .....	87
4.3.3 Resolução de conflitos entre agentes .....	88
4.3.4 Movimentação dos agentes robóticos .....	90
4.3.5 Planejamento de trajetória dos agentes .....	90
4.3.6 Tomada de decisão do agente com a posse de bola .....	95
4.3.7 Sistema tático adotado pela equipe .....	97
4.3.8 Modelagem da compactação do futebol.....	98
4.3.9 Princípios técnicos desenvolvidos.....	99
5. Testes e resultados .....	107
5.1 Testes do simulador <i>Soccer Server</i> com a equipe iBots .....	107
5.2 Contenção .....	110
5.3 Cobertura defensiva .....	112
5.4 Concentração .....	113
5.5 Equilíbrio .....	115

5.6 Unidade defensiva.....	116
5.7 Organização defensiva.....	117
5.8 Modelo de jogo.....	124
5.9 Mapa de calor.....	129
6. Conclusões.....	131
6.1 Sugestões para trabalhos futuros.....	133
Referências .....	135

# Lista de figuras

Figura 1 - Distribuição em campo do sistema tático 4-5-1.....	13
Figura 2 - Exemplo de <i>pressing</i> : (a) situação hipotética de jogo; (b) possíveis linhas de passe para o portador da bola; (c) <i>pressing</i> em ação.....	20
Figura 3 - Representação do Modelo Dualista .....	21
Figura 4 - Modelo de Quatro Momentos .....	22
Figura 5 - Cinco <i>sprints</i> de 30m separados por um período de 25s de recuperação antes do jogo (círculos cheios), após o primeiro tempo (círculos abertos) e após o segundo tempo (triângulos cheios) de uma partida (BANGSBO <i>et al.</i> , 2006) .....	25
Figura 6 - Frequência de gols por minuto em uma partida de futebol (PALOMINO <i>et al.</i> , 2000) .....	26
Figura 7 - Frequência dos gols no decorrer do tempo total de jogo em intervalo de 15 minutos (SILVA, 2007) .....	26
Figura 8 - Arquitetura de Simulação <i>Soccer Server</i> (adaptado de REIS, 2003) .....	31
Figura 9 - Soccer Monitor 2D da RoboCup .....	32
Figura 10 - Acesso ao quadro de mensagens (ALMEIDA, 2008) .....	33
Figura 11 - Execução de um agente do Agent2D .....	41
Figura 12 - Campo virtual do <i>Soccer Server</i> (REIS, 2003).....	43
Figura 13 - Coordenadas e ângulos do campo de jogo.....	44
Figura 14 – Triangulação de Delaunay no <i>Formation Editor</i> . .....	45
Figura 15 - Cinco <i>sprints</i> de 30m separados por um período de 25s de recuperação antes do jogo (círculos cheios), após o primeiro tempo (círculos abertos) e após o segundo tempo (triângulos cheios) de uma partida (BANGSBO <i>et al.</i> , 2006) .....	49
Figura 16 - Cinco <i>sprints</i> de 30m separados por um período de 28 ciclos de recuperação antes do jogo (círculos cheios), após o primeiro tempo (círculos abertos) e após o segundo tempo (triângulos cheios) de uma partida .....	50
Figura 17 - Frequência dos gols no decorrer do tempo total de jogo em intervalo de 15 minutos. Adaptado de SILVA (2007) .....	52
Figura 18 - Frequência de gols por minuto em uma partida de futebol. Adaptado de PALOMINO <i>et al.</i> (2000).....	52
Figura 19 - Incidência de gols na RoboCup 2012 e LARC 2012.....	53
Figura 20 - Máquina de estados que define que equipe tem a posse da bola .....	57

Figura 21 - Fluxograma do Modelo Dualista .....	58
Figura 22 - Jogada que resultou em gol da partida entre Barcelona e PSG ocorrida no dia 21 de abril de 2015, válida pela UEFA Champions League, é um contraexemplo ao Modelo de Quatro Momentos.....	61
Figura 23 - Comparação entre o Modelo de Quatro Momentos (a) e o Modelo de Quatro Estados (b) .....	62
Figura 24 - Fluxograma do Modelo de Quatro Estados .....	63
Figura 25 – Cenário de exemplo da variável $d_1$ da contenção. Quanto mais clara a região em que o jogador ser encontra, maior a relevância do defensor. ....	64
Figura 26 – Cenário de exemplo da variável $d_2$ da contenção. Quanto mais clara a região em que o jogador ser encontra, maior a relevância do defensor. ....	65
Figura 27 – Exemplo de pontos $p_1$ e $p_2$ na variável $d_3$ da contenção. ....	66
Figura 28 – Exemplo da aplicação da equação da reta sob os pontos $p_1$ e $p_2$ na variável $d_3$ da contenção. ....	67
Figura 29 – Cenário de exemplo da variável $d_3$ da contenção. Quanto mais clara a região em que o jogador ser encontra, maior a relevância do defensor. ....	68
Figura 30 – Cenário de exemplo da contenção. Quanto mais clara a região em que o jogador ser encontra, maior a relevância do defensor.....	69
Figura 31 – Cenário do primeiro exemplo do equilíbrio. A linha tracejada indica o limite do centro de jogo ampliado. ....	73
Figura 32 – Cenário do segundo exemplo do equilíbrio. A linha tracejada indica o limite do centro de jogo ampliado. ....	74
Figura 33 – Exemplo de cenário para o cálculo da unidade defensiva.....	76
Figura 34 – Exemplo de cenário com o centroide defensivo indicado com um “X” ....	77
Figura 35 – Exemplo de cenário com a área da unidade defensiva calculada.....	77
Figura 36 – Variável linguística de entrada com três conjuntos.....	79
Figura 37 – Variável linguística de entrada com cinco conjuntos.....	79
Figura 38 – Função de pertinência de um conjunto linear decrescente.....	79
Figura 39 – Função de pertinência de um conjunto linear crescente.....	80
Figura 40 – Função de pertinência de um conjunto triangular .....	80
Figura 41 – Aplicativo <i>Soccer Scenes</i> .....	81
Figura 42 - Exemplo de situação que motivou a adoção de ponto de corte no ranqueamento dos jogadores: (a) ciclo anterior; (b) ciclo atual. ....	83
Figura 43 - Execução de um agente da equipe iBots.....	84

Figura 44 - Numeração da camisa dos agentes de linha da equipe iBots no sistema tático 4-4-2 .....	89
Figura 45 - Exemplo de campo potencial: (a) ambiente, com dois obstáculos, visto por cima; (b) força de atração exercida pelo objetivo; (c) forças de repulsão decorrentes dos obstáculos; (d) resultado final das forças de atração e repulsão (LATOMBE, 1991) .....	92
Figura 46 – Exemplo de cenário gerado pelo aplicativo <i>Soccer Scenes</i> e as trajetórias planejadas .....	94
Figura 47 – Destaque ampliado da trajetória do jogador dez da equipe amarela para o cenário da Figura 46.....	94
Figura 48 – Exemplo de mínimo local no cálculo do campo potencial artificial.....	95
Figura 49 - Pontos considerados pelo método <i>DistanciaDoGol()</i> para quantificar o posicionamento de um companheiro de equipe .....	97
Figura 50 – Exemplo de modelagem do sistema 4-4-2 no <i>Formation Editor</i> .....	98
Figura 51 – Exemplos de passe no vazio: (a) <i>leading pass</i> e (b) <i>through pass</i> .....	102
Figura 52 – Pontos candidatos para passe .....	103
Figura 53 – Exemplo de ponto eleito para passe .....	103
Figura 54 – Exemplo de aplicação do algoritmo de passe .....	105
Figura 55 - Distância média percorrida pelos jogadores da equipe iBots: (a) contra a equipe Agent2D; (b) contra a equipe WrightEagle; (c) contra a equipe FC Portugal; (d) todas as partidas.....	108
Figura 56 - Distância média percorrida pelos jogadores .....	108
Figura 57 – Gráfico com velocidade média obtidas nos testes dos jogadores de linha: (a) defesa; (b) meio de campo; (c) ataque.....	109
Figura 58 - Gráfico com resultado do teste de equilíbrio defensivo .....	116
Figura 59 - Gráfico com resultado do teste de unidade defensiva.....	117
Figura 60 - Melhores resultados obtidos pelos sistemas inteligentes utilizados no algoritmo de organização defensiva.....	119
Figura 61 - Mapa de calor da movimentação da bola da equipe iBots contra as equipes: (a) Agent2D; (b) WrightEagle; e (c) FC Portugal.....	129

# Lista de tabelas

Tabela 1 - Proporção de gols marcados em casa e fora de casa, como visitante. Adaptado de PALOMINO <i>et al.</i> (2000) .....	24
Tabela 2 - Instruções do Soccer Server .....	41
Tabela 3 - Principais comportamentos de alto nível do Agent2D .....	42
Tabela 21 - Resultado dos testes de classificação da qualidade de concentração com rede neuronal .....	114
Tabela 22 - Resultado dos testes de classificação da qualidade de concentração com sistema de inferência <i>fuzzy</i> .....	114
Tabela 23 - Médias aritméticas e desvios padrões dos exemplos classificados pelos especialistas das classes Forte, Média e Fraca do princípio de equilíbrio. ....	115
Tabela 24 - Médias aritméticas e desvios padrões dos exemplos classificados pelos especialistas das classes Forte, Média e Fraca do princípio de unidade defensiva. ....	116
Tabela 25 - Resultado dos testes de classificação de organização defensiva com sistema de inferência <i>fuzzy</i> .....	118
Tabela 26 - Resultado dos testes de classificação de organização defensiva com rede neuronal com taxa de aprendizado 0.01 .....	120
120	
Tabela 27 - Resultado dos testes de classificação de organização defensiva com rede neuronal com taxa de aprendizado 0.05 .....	121
Tabela 28 - Resultado dos testes de classificação de organização defensiva com rede neuronal com taxa de aprendizado 0.1 .....	122
122	
Tabela 29 - Resultado dos testes de classificação de organização defensiva com rede neuronal com taxa de aprendizado 0.2 .....	123
Tabela 30 - Resultados das partidas realizadas contra a equipe Agent2D 3.1.1 .....	125
Tabela 31 - Resultados das partidas realizadas contra a equipe <i>WrightEagle</i> 2009.....	126
Tabela 32 - Resultados das partidas realizadas contra a equipe FC Portugal 2010.....	126
Tabela 33 – Média de gols marcados pelas equipes iBots e Agent2D .....	127
Tabela 34 – Média de gols marcados pelas equipes iBots e <i>WrightEagle</i> .....	127
Tabela 35 – Média de gols marcados pelas equipes iBots e FC Portugal .....	127
Tabela 36 - Posse de bola média referente às partidas entre iBots e Agent2D .....	128

Tabela 37 - Posse de bola média referente às partidas entre iBots e WrightEagle..... 128

Tabela 38 - Posse de bola média referente às partidas entre iBots e FC Portugal..... 128



# 1. Introdução

O futebol é o esporte mais popular do mundo e serviu de modelo para a criação de um desafio padrão de investigação internacional da Inteligência Artificial e da Robótica: o futebol de robôs. Os problemas de investigação contidos no futebol de robôs cobrem uma área mais ampla do que aparentam, já que o jogo pode ser visto apenas como uma simples brincadeira. Dentre os problemas explorados, podem ser citados a coordenação, cooperação, comunicação, aprendizagem, planejamento em tempo real, decisão estratégica, comportamento, visão, controle, locomoção e sistemas sensoriais.

O futebol de humanos é uma referência no processo decisório envolvendo o futebol de robôs, isto porque conceitos da Ciência do Esporte<sup>1</sup>, mais especificamente da Teoria do Futebol<sup>2</sup>, são incorporados às equipes robóticas para se tornarem mais eficientes taticamente. No entanto, as iniciativas que fazem o movimento contrário, de levar soluções do futebol de robôs para o futebol de humanos, são praticamente inexistentes. Essa é a motivação deste trabalho.

Apesar do crescimento das pesquisas em Ciência do Esporte, o futebol muitas vezes ainda continua sendo observado empiricamente por observadores humanos e que, com frequência, são enganados por algum fenômeno psicológico que atrapalha a compreensão do jogo. Por exemplo, em senso comum há uma visão de que no futebol o ataque suplanta a defesa, embora não suplante (ANDERSON e SALLY, 2013). O psicólogo HEARST (1991) expressa que “em muitas situações, animais e seres humanos têm dificuldade de perceber e usar informações fornecidas pela falta ou pela não ocorrência de alguma coisa (...) A não ocorrência de eventos é, em geral, menos perceptível, memorável ou informativa que a ocorrência”. Sobre isso, ANDERSON e SALLY (2013) afirmam que as pessoas consideram os gols que o time marcou mais importante do que os gols que não tomou; dá-se mais valor aos carrinhos dados do que aos desarmes onde o senso de posicionamento e a inteligência tornaram o carrinho desnecessário.

Para citar um exemplo real, ANDERSON e SALLY (2013) apresentam o caso em que sir Alex Ferguson, treinador escocês multicampeão, decidiu, em agosto de 2001,

---

<sup>1</sup> Ciência do esporte - área do conhecimento humano ligadas aos estudos das técnicas e métodos usados no treinamento e na preparação indivíduos e equipes para competições esportivas

<sup>2</sup> Teoria do futebol - é uma subárea da Ciência do Esporte que trata especificamente sobre o futebol.

vender o zagueiro holandês Jaap Stam para a Lazio, equipe italiana. A venda foi, em parte, motivada pelas estatísticas de partidas. Ferguson percebeu que Stam estava realizando menos carrinhos do que antes. Então, Ferguson inferiu que o zagueiro, de 29 anos, estava em declínio. No entanto, Stam estava realizando menos carrinhos não por sinal de fraqueza, mas por sinal de sua qualidade. Ferguson deu mais valor aos carrinhos, ou a falta deles, do que aos desarmes onde o senso nato de posicionamento e a inteligência tornaram o carrinho desnecessário. Anos depois, Ferguson qualificou sua decisão como o pior erro de sua carreira.

Atualmente, os estudos que lançam mão de análises estatísticas, apesar de estarem contribuindo enormemente na evolução do jogo e no modo de se enxergar o futebol, ainda não conseguem verificar a validade de conceitos táticos e nem capturar a qualidade dos eventos. A estatística hoje é usada nas dimensões física e técnica, ou seja, trata a distância percorrida, quantidade de chutes, chutes a gol, assistências, impedimentos, etc.; não há atualmente métodos para quantificar a qualidade do posicionamento dos zagueiros e a influência disso nos desarmes, a estatística atualmente quantifica carrinhos, quantidade de faltas, etc. Enfim, a dimensão tática não tem parâmetros de referência para aferir a qualidade de decisões. Para que isso seja possível, são necessários algoritmos projetados a partir de conceitos táticos da Teoria do Futebol, que é o foco deste trabalho.

Em suma, esta pesquisa foi realizada a fim de verificar a validade de dois Modelos de Jogo (Modelo Dualista e Modelo de Quatro Momentos), que é o conceito norteador da tática das equipes de futebol. Para implementar computacionalmente esses modelos e analisar suas validades, foi necessário, como pré-requisito, o desenvolvimento de algoritmos para os princípios fundamentais defensivos (descritos detalhadamente na seção 4.1.3). Para implementar os algoritmos desenvolvidos neste trabalho foi desenvolvida a aplicação *Soccer Scenes* (descrita na seção 4.2.1), que visou facilitar o desenvolvimento de algoritmos usados no simulador. O simulador adotado foi o *Soccer Server* da liga de simulação 2D da RoboCup. Adicionalmente, o *Soccer Scenes*, por se tratar de uma ferramenta visual, também poderá ser adotado por comissões técnicas a fim de apresentar conceitos e direcionar treinamentos táticos.

## **1.1 Objetivo**

O objetivo que norteou este trabalho foi analisar conceitos táticos do futebol por meio de simulação computacional. Os conceitos da Teoria do Futebol verificados foram Modelo Dualista e Modelo de Quatro Momentos.

É importante simular condições muito próximas às encontradas em campo durante as tomadas de decisões dos jogadores para que os conceitos táticos que forem validados em simulação possam migrar de forma natural para os jogadores de futebol. O intuito foi construir um arcabouço de comportamentos táticos a partir de princípios atômicos do jogo (conceitos difundidos e aceitos) e que estes princípios, quando combinados, possam eclodir táticas de jogo mais elaboradas. Nesse sentido, a interpretação dos agentes sobre os Modelos de Jogo estudados foram implementados a partir dos conceitos da Teoria do Futebol expostos no capítulo dois.

GABBETT (2011) alerta que a Ciência do Esporte tem o potencial de melhorar o desempenho da equipe através da inovação e melhores práticas. Por outro lado, se usado incorretamente, a ciência do esporte tem o potencial de aumentar as demandas de atenção de treinadores (e jogadores), e, paradoxalmente, reduzir o desempenho. Por isso, a preocupação de os algoritmos serem construídos a partir de conceitos já constituídos e amplamente conhecidos/aceitos no futebol foi constante ao longo da pesquisa.

## **1.2 Delimitação do problema**

O escopo deste trabalho centrou-se em verificar se conceitos táticos da Teoria do Futebol podem ser simulados computacionalmente a fim de fornecerem conclusões acerca de suas validades. Os conceitos definidos para estudo foram os Modelos de Jogo Dualista e de Quatro Momentos. O conceito de Modelo de Jogo foi escolhido por ser primaz na elaboração de qualquer tática de uma equipe de futebol, afinal é ele quem, por um processo de abstração, ignora o que é irrelevante e concentra-se as atenções no que de fato é relevante, resultando na redução de conteúdo e do fenômeno observável.

Para analisar os Modelos de Jogo foi necessário verificar se o modelo matemático-computacional do simulador utilizado é adequado para simular futebol. O modelo de simulador foi avaliado a partir de dados extraídos de partidas de importantes campeonatos oficiais de futebol. Esses dados representam características que tendem a acontecer no futebol e foi verificado se estas características tendem a ser reproduzidas em partidas realizadas pelo simulador *Soccer Server*. Não foram consideradas peculiaridades estatísticas de equipes e jogadores uma vez que o objetivo não foi simular equipes ou jogadores.

A implementação computacional de uma equipe de futebol simulado é indissociável do objetivo deste trabalho uma vez que é necessária para as simulações e o simulador deve permitir que conceitos da Teoria do Futebol possam ser implementados

computacionalmente por meio de algoritmos. Implementar uma equipe de futebol de robôs, composta de agentes robóticos, é uma tarefa ampla e complexa, afinal se trata de um sistema multiagentes onde cada agente tem um objetivo individual, todavia os agentes devem cooperar visando um objetivo global. Por isso, muitas vezes os agentes podem entrar em conflito por competirem por um mesmo recurso.

Existem ainda problemas básicos de natureza operacional e que são compartilhados com a robótica, entre eles: planejamento de trajetória dos jogadores, planejamento de movimento, construção de modelos de mundo, cooperação entre agentes, etc. Foi necessário implementar computacionalmente um repertório de habilidades técnicas razoavelmente abrangente: domínio de bola, passes, chute e desarme. A descrição detalhada da equipe implementada neste trabalho encontra-se no capítulo quatro.

Com o modelo matemático-computacional do simulador não contradizendo os dados extraídos de partidas de futebol e uma equipe de robôs simulados implementada no *Soccer Server*, o problema central deste trabalho, de verificar a validade dos Modelos de Jogo Dualista e de Quatro Momentos, pôde ser enfrentado. Até início dos anos 2000, o Modelo Dualista era o Modelo de Jogo mais aceito e trabalhado na literatura. Nessa organização, o jogo apresenta dois estados opostos e complementares: ofensivo e defensivo. Uma equipe encontra-se no estado ofensivo se ela tiver a posse de bola e está no estado defensivo quando está sem a bola, mas à procura da sua posse. Como consequência do Modelo Dualista, uma equipe no estado ofensivo deve atacar por ter a posse de bola e não ter a bola implica em defender (BAYER, 1994).

Porém, nos últimos anos um outro modelo passou a ser mais aceito do que o Modelo Dualista. Vários autores e treinadores de sucesso consideram o futebol como tendo quatro momentos, ampliando o Modelo Dualista. Os quatro momentos nessa visão são: organização defensiva, transição ataque/defesa, organização defensiva e transição defesa-ataque (FRADE, 1985; OLIVEIRA, 2003b; AMIEIRO, 2005). Note que no Modelo de Quatro Momentos há dois momentos defensivos, quando a equipe está sem a posse de bola, e dois momentos ofensivos, quando a equipe está com a posse de bola.

Para verificar qual dos dois Modelos de Jogo responde mais adequadamente ao futebol, foi elaborada a estratégia de, a partir de definições da literatura da Teoria do Futebol, projetar e desenvolver algoritmos capazes de implementar os modelos Dualista e de Quatro Momentos (vide seção 4.1). Se o Modelo de Quatro Momentos representar o Modelo de Jogo do futebol mais adequadamente do que o Modelo Dualista, então é

esperado que a equipe tenha desempenho otimizado ao tratar taticamente de maneira distinta cada um dos quatro momentos, ou seja, uma estratégia para cada momento. Por outro lado, é aguardado no Modelo Dualista que o desempenho tático da equipe seja otimizado quando é considerado o futebol como resultado da alternância de dois estados. Assim, este trabalho realizou testes para verificar se a atuação de uma equipe é superior ao considerar dois estados ou quatro momentos e, por consequência, fornecer uma resposta à Teoria do Futebol via contribuição por simulação computacional. Neste trabalho a simulação é particularmente importante para isolar as dimensões psicologia/social, física e técnica (sempre presentes em seres humanos) e, assim, não contaminar os resultados dos comportamentos táticos observados, algo discorrido com mais profundidade na seção 2.6.

No entanto, ao longo dos estudos em Teoria do Futebol, foi verificado que o Modelo de Quatro Momentos não fornece informações suficiente para sua implementação. Classificar uma equipe em relação à sua organização defensiva é ponto central na mudança de momentos desse modelo, mas a literatura especializada não é específica em conceituar defesas organizadas e desorganizadas, o que impossibilita a implementação do Modelo de Quatro Momentos. Por isso, foi necessário, com a ajuda de especialistas do futebol, propor soluções algorítmicas, modeladas em sistemas inteligentes de tomada de decisão (Rede Neuronal e Sistema de Inferência Fuzzy), capazes de aprender a classificar defesas em organizadas e desorganizadas a partir dos princípios fundamentais defensivos. Além disso, foi necessário propor alterações no Modelo de Quatro Momentos que permitissem sua implementação computacional e, como resultado, surgiu o conceito original de Modelo de Quatro Estados, principal contribuição desta tese.

Por fim, foi necessário propor um teste capaz de analisar e comparar os Modelos Dualista e de Quatro Estados. Desse modo, foram projetados algoritmos para a implementação computacional de duas estratégias defensivas, utilizadas de forma independente nos testes do Modelo Dualista, afinal neste modelo há somente um estado defensivo, e alternadas, uma para cada estado defensivo, nos testes do Modelo de Quatro Estados. Os resultados demonstraram que o Modelo de Quatro Estados obteve resultados superiores ao do Modelo Dualista.

### 1.3 Contribuições originais

Atualmente, no meio profissional, alguns esportes coletivos têm simuladores para auxiliar a análise e a preparação tática de equipes, pode-se citar: futebol americano (LAVIERS e SUKTHANKAR, 2010) (DOI *et al.*, 2000) e basquete (COVACI *et al.*, 2012). No entanto, trabalhos recentes, no estado da arte, que unem Ciência do Esporte e Ciência da Computação não fazem análise da qualidade das decisões do comportamento tático dos jogadores de futebol. Especificamente nesse ponto, há uma lacuna uma vez que não há parâmetros estabelecidos sobre o que esperar do comportamento dos jogadores.

A primeira contribuição deste trabalho foi validar ou pelo menos identificar um simulador computacional que não contradiga o modelo do futebol. Validar o modelo de um simulador é importante porque permite realizar simulações acerca de diferentes situações táticas. Serve ainda de referência para aperfeiçoar o simulador ou para implementar novos simuladores para outros esportes coletivos, o que demonstra a relação deste problema com outros.

Este trabalho contribui ainda com algoritmos desenvolvidos sobre conceitos da Teoria do Futebol e validados por especialistas em testes que poderão ser utilizados como parâmetro para determinar a qualidade do desempenho tático dos jogadores de forma automatizada e em tempo real por ferramentas como a de SANTIAGO (2015). Ferramentas de monitoramento *on-line* em esportes têm se tornado cada vez mais comum e são o estado da arte da Ciência do Esporte. No entanto, as ferramentas existentes atualmente no futebol se preocupam com estatísticas de desempenho da equipe ou de jogadores sem analisar a qualidade da tomada de decisão dos atletas ou ainda o desempenho tático da equipe. Adicionalmente, ao demonstrar viabilidade, este trabalho contribui para que outros conceitos da Teoria do Futebol possam ser traduzidos em algoritmos e fornece subsídios para, no futuro, obter modelos computacionais de equipes baseados não somente em estatísticas, mas em estilo de jogo fundamentados pela teoria desse esporte.

No domínio de sistemas multiagentes, os principais pontos que dificultam o processo de depuração são (LACERDA JÚNIOR, 2004): a não previsibilidade do comportamento de uma sociedade de agentes; a dependência entre os agentes na execução das funcionalidades do sistema; a grande variedade de dados a serem analisados durante a depuração (regras disparadas, mensagens trocadas, modelos de mundo e a própria informação processada pelo sistema). Para facilitar a depuração e o desenvolvimento de algoritmos, neste trabalho foi desenvolvida a aplicação *Soccer Scenes*, que permite a

migração de algoritmos para o *Soccer Server* via Agent2D<sup>3</sup>. O *Soccer Scenes* poderá ser utilizado por outras equipes da categoria RoboCup Simulation 2D e, assim, acelerar o desenvolvimento de soluções, que podem ser extensíveis a outros problemas uma vez que o futebol de robôs é um problema padrão de investigação internacional.

Adicionalmente, o *Soccer Scenes* é uma contribuição para a Ciência do Esporte Computacional, que é uma disciplina interdisciplinar que tem o objetivo de combinar aspectos teórico, práticos e métodos das áreas de Computação com a Ciência do Esporte (LINK e LAMES, 2009). Infelizmente, talvez pelo caráter competitivo, as equipes de futebol de robôs não publicam integralmente seus algoritmos, tornando necessário o desenvolvimento de algoritmos próprios pelas equipes, o que demanda tempo. Os algoritmos utilizados neste trabalho estão publicados na íntegra e são contribuições para que novas pesquisas em futebol de robôs possam ser desenvolvidas.

Na Teoria do Futebol, este trabalho estabeleceu, a partir de algoritmos, critérios e métodos para determinar se o sistema defensivo de uma equipe de futebol está organizado ou não, algo não especificado em literatura especializada. Além disso, contribuiu ao verificar, em simulação, que o Modelo Dualista, ainda em uso por equipes profissionais, representa os estados táticos do futebol de maneira menos adequada do que o Modelo de Quatro Estados, resultado das observações realizadas nos testes. Este, aliás, é a principal contribuição desta tese uma vez que é um conceito original resultante desta pesquisa e desenvolvido a partir do Modelo de Quatro Momentos. Adicionalmente, a metodologia utilizada neste trabalho poderá ser adotada em outros esportes ou em outros jogos similares ao estudados no futebol, de acordo com a teoria dos jogos.

#### **1.4 Justificativa**

Software de simulação é um método eficaz de observar os resultados em curso e resultados finais de uma hipótese esperada. A simulação não é uma ferramenta estritamente de otimização, mas também de análise de cenários. É um método de modelagem que visa imitar procedimentos reais, durante um determinado período de tempo, e tem como vantagem ser realizado em menor tempo e menor custo, permitindo um estudo detalhado de acontecimentos passados, presentes e servir de inferência para acontecimentos futuros (LAW e KELTON, 1991). Para DOS SANTOS (1999, pp.1), o uso de simulação se justifica porque um modelo, uma vez construído e validado, “pode

---

<sup>3</sup> Agent2D – Time-base utilizado neste trabalho para desenvolvimento da equipe iBots, utilizada nos testes.

ser usado para investigar uma grande quantidade de questões do tipo ‘e se...’ sobre o sistema do mundo real. Alterações no sistema podem ser inicialmente simuladas para se prever as consequências no mundo real”.

O uso de simulação para validar concepções táticas do futebol se justifica uma vez que as dimensões psicológica/social, física e técnica têm influência no desempenho da equipe. Assim, para os resultados dos testes com concepções táticas não serem contaminados pelas demais componentes de rendimento, é necessário isolar a dimensão tática. Isso não é possível através de jogadores humanos já que neles sempre estão presente as demais dimensões. Além de isolar a dimensão tática, é possível simular de maneira controlada a influência de alguns aspectos das demais dimensões sobre um conceito tático. Conceitos táticos ao serem simulados permitem observar suas nuances de forma como não podem ser observadas em uma partida de futebol.

RAMOS (2009) alerta que muitas das pesquisas realizadas no futebol foi, e continua a ser, orientada para a descrição e explicação de aspectos relacionados com parâmetros de ordem física e fisiológica, menorizando-se, por outro lado, aspectos relativos à ação de jogo em geral e à tática em particular (SILVA, 2004). Esse fato pode ser explicado pela dificuldade que o seu estudo envolve do ponto de vista científico. BARREIRA (2006) alerta que os pesquisadores usam processos metodológicos divergentes para compreender a lógica que governa o jogo de futebol. Por causa disso, avanços táticos ocorrem muito devagar no futebol e a simulação se justifica para acelerar os avanços.

Trabalhos que usam simulação com intuito de fazer algum estudo tático no futebol são recentes na literatura. O estado da arte das pesquisas no futebol, e em outros esportes, se encontra em métodos de aquisição automática (invasivos ou não) de dados estatísticos para analisar, em tempo real ou *offline*, o desempenho de atletas e equipes. Trabalhos deste tipo podem ser citados no futebol americano (WISBEY *et al.*, 2010), basquete (BOGDANIS *et al.*, 2007), no hóquei (SPENCER *et al.*, 2005) e tênis (CONAIRE *et al.*, 2009). Os sistemas invasivos fazem uso de sensores e *tags* sem fio, que os tornam sensíveis à degradação e a interferências, entre outros. As *tags* devem ser pequenas e leves o suficiente para permitir o bom desempenho e o conforto do jogador. Nesses sistemas, a principal dificuldade parece ser mais o hardware do que o software. Várias tecnologias têm sido utilizadas, a seguir são apresentadas as principais.

- Identificadores por Rádiofrequência (RFID) em trabalhos como os de OTTO (2010) e BEETZ *et al.* (2005);



- *Ultra Wide Band (UWB)* em trabalhos como os de HANSER *et al.* (2008) e CONAIRE *et al.* (2009);
- *Local Position Measurement (LPM)* em trabalhos como os de STELZER *et al.* (2004);
- Sistemas de Posicionamento Globais (GPS) em trabalhos como os de MADDISON e MHURCHU (2009) e WISBEY *et al.* (2010).

Contudo, sistemas invasivos frequentemente não são permitidos em competições esportivas, caso do futebol, e, por isto, é necessário o desenvolvimento de sistemas não invasivos como os que fazem uso de câmeras. Para obtenção de melhores resultados, é necessário que os sistemas tenham múltiplas câmeras dedicadas com imagens diferentes das fornecidas por câmeras destinadas às transmissões de TV. VIOLA e JONES (2001) desenvolveram um método automático de detecção e rastreamento. A Copa do Mundo Fifa de 2006 foi a sua plataforma de teste e obteve alta precisão, cerca de 90%. Trabalhos semelhantes a esse podem ser citados: IWASE e SAITO (2003), FIGUEROA *et al.* (2006) e LIU *et al.* (2009).

No entanto, os trabalhos citados não fazem análise da qualidade das decisões do comportamento tático dos jogadores uma vez que não há um parâmetro sobre o que esperar deles em cada situação de jogo que se apresenta. Não foram encontrados trabalhos que validem conceitos táticos e analisem suas implicações sem que a dimensão tática seja dissociada das demais dimensões.

Conceitos táticos ao serem simulados permitem observar suas nuances de forma como não podem ser observadas em uma partida de futebol. Espera-se com isso que os conceitos táticos atuais e a participação individual dos jogadores no contexto coletivo sejam melhores compreendidos e possam ser validados/refutados ou ainda que surjam novas teorias. Conhecer melhor aspectos táticos do jogo permitirá, no futuro, treinamentos táticos mais eficientes e, com isto, melhorar a capacitação dos jogadores. Afinal, o futebol é predominantemente um jogo de julgamentos e decisões (HUGHES, 1994) e exige dos jogadores uma adequada capacidade de decisão, que é precedida de uma ajustada leitura do jogo (AZEVEDO, 2009). A movimentação/posicionamento de um jogador interfere na tomada de decisão do outro.

Este foi trabalho de baixo custo financeiro e se tornou viável uma vez que foram utilizadas apenas ferramentas gratuitas.

## 1.5 Organização do trabalho

Este trabalho foi organizado no intuito de permitir maior entendimento do escopo do trabalho e de facilitar a compreensão do que foi desenvolvido. O capítulo dois apresenta a Teoria do Futebol e é feita uma revisão de literatura sobre as ideias e conceitos que são discutidos neste trabalho.

O capítulo três é destinado ao Simulador *Soccer Server* da liga de Simulação 2D da RoboCup, simulador adotado nesta pesquisa. São apresentadas a arquitetura do simulador, o futebol de robôs como sistema multiagentes e os *frameworks* – equipes com código-fonte aberto – que podem ser usados como time-base para implementação computacional de uma equipe de futebol simulada, com ênfase no Agent2D, time-base utilizado neste trabalho. São discutidas ainda características inerentes ao futebol, algo vislumbrado a fim verificar a validade do modelo matemático-computacional implementado no simulador. Para isso, são apresentados dados estatísticos do futebol e comparados com *scouts* de partidas simuladas de campeonatos oficiais.

O capítulo quatro apresenta os detalhes de implementação computacional da equipe iBots, desenvolvida com a finalidade de ser utilizada nos testes deste trabalho. São explanados os princípios técnicos implementados nos agentes virtuais e o sistema tático desenvolvido.

Já no capítulo cinco são apresentados os testes realizados e são discutidos os seus resultados. Conclusões acerca da pesquisa fazem parte desse capítulo.

Por fim, no capítulo seis são apresentadas as considerações finais, bem como propostas de pesquisas futuras.

## 2. Teoria do futebol

A Teoria do Futebol é uma subárea da Ciência do Esporte que estuda técnicas e métodos usados no treinamento e na preparação de indivíduos e equipes de futebol. A seguir são apresentados os tópicos sobre futebol relacionados ao escopo deste trabalho.

### 2.1 Posições no futebol

No futebol entram em campo 11 jogadores por equipe, sendo um o goleiro. Entre os jogadores de linha é feita divisão de tarefas, que determina funções específicas para cada jogador. Assim, os jogadores não precisam compreender os comportamentos ofensivos e defensivos de jogo em qualquer situação ou posição no campo. Cada jogador passa a ser especializado e, com isto, espera-se que a produtividade coletiva aumente. No futebol, as tarefas costumam ser divididas em três grupos: defensivo, meio de campo e ofensivo. Conhecer as posições no futebol é importante para determinar a função e o comportamento dos jogadores em um sistema tático, algo necessário neste trabalho uma vez que é preciso indicar a posição tática dos agentes no time-base (Agent2D) adotado neste trabalho para implementação.

As principais posições defensivas são explanadas a seguir.

- Zagueiro – atua na defesa, próximo ao goleiro. Sua função é evitar que os jogadores adversários criem oportunidades de gol. Deve se posicionar "sempre para defender o campo e o gol ocupado pelo goleiro" (PARREIRA, 2005, p.11);
- Lateral – é uma espécie de zagueiro que atua próximo às linhas laterais do campo de jogo. Sua preocupação é eminentemente defensiva. Posição muito usada no futebol argentino e italiano. No Brasil há uma confusão entre lateral e ala uma vez que, na prática, as equipes usam alas, apesar de os chamarem de laterais;
- Líbero – conceito de posição criado no futebol italiano, “libero” significa livre e, por isto, é um jogador sem função definida, que joga explorando os espaços vazios e se fazendo presente onde é preciso (CAPINUSSÚ e REIS, 2004). Apesar de ser originalmente um jogador de defesa, "o líbero pode aparecer em várias situações do jogo espalhadas pelos quatro cantos do campo" (PARREIRA, 2005, pp.58).

Os jogadores de meio de campo são muito importantes em uma equipe de futebol porque são eles que dão ritmo e cadência ao time. A seguir são apresentadas as principais posições de meio-campo.

- Volante – sua função é marcar adversário e realizar a ligação entre a defesa e os meias armadores ou jogadores ofensivos. Deve ter boa capacidade de marcação, mas também possuir algumas qualidades ofensivas;
- Ala – sua área de atuação abrange a profundidade do campo, entre a linha de fundo defensiva e ofensiva. Eles atuam na defesa e apoiam o time nas jogadas de ataque, sempre próximo às linhas laterais do campo de jogo. É um misto de lateral e ponta;
- Meia armador – atua na zona de meio de campo e é responsável pela criação das jogadas, é quem distribui a bola aos jogadores de posições ofensivas tentando os colocar em posição de finalização.

As principais posições ofensivas estão listadas na sequência.

- Ponta – sua principal atribuição é penetrar a defesa adversária, normalmente pelas laterais, criando oportunidades de gol;
- Atacante – geralmente é um jogador rápido, importante para o contra-ataque e para atrair defesas adversárias para fora da grande área. Tem bom chute de fora da área e cria jogadas para o centroavante;
- Centroavante – é o finalizador, com bom posicionamento dentro da grande área adversária e tem como maior característica a precisão nos chutes.

## 2.2 Sistemas táticos

Uma equipe ao ser implementada computacionalmente no simulador *Soccer Server* deve obedecer pelo menos a um sistema tático. Por isso, a seguir são apresentados os principais sistemas táticos. A diagramação normalmente utilizada para representar os sistemas táticos consiste em descrever a quantidade de jogadores que ocupam cada um dos três setores do campo (defensivo, meio-campo e ofensivo). Apenas os jogadores de linha entram nessa contagem. Por exemplo, o sistema tático 4-5-1 (Figura 1a) tem quatro jogadores defensivos, cinco meio-campistas e um jogador ofensivo.

As funções para os jogadores de cada uma das áreas do campo podem apresentar variação em um mesmo sistema tático. Assim, um mesmo sistema tático pode ter distribuição espacial diferente alterando-se a função de algum dos jogadores, algo feito com o intuito de tornar a formação mais ofensiva ou defensiva. A Figura 1b e a Figura 1c apresentam variações do sistema tático 4-5-1, a primeira com três jogadores de meio-campo mais recuados e dois mais avançados; a segunda com dois jogadores meio-campo mais recuados e três mais avançados.

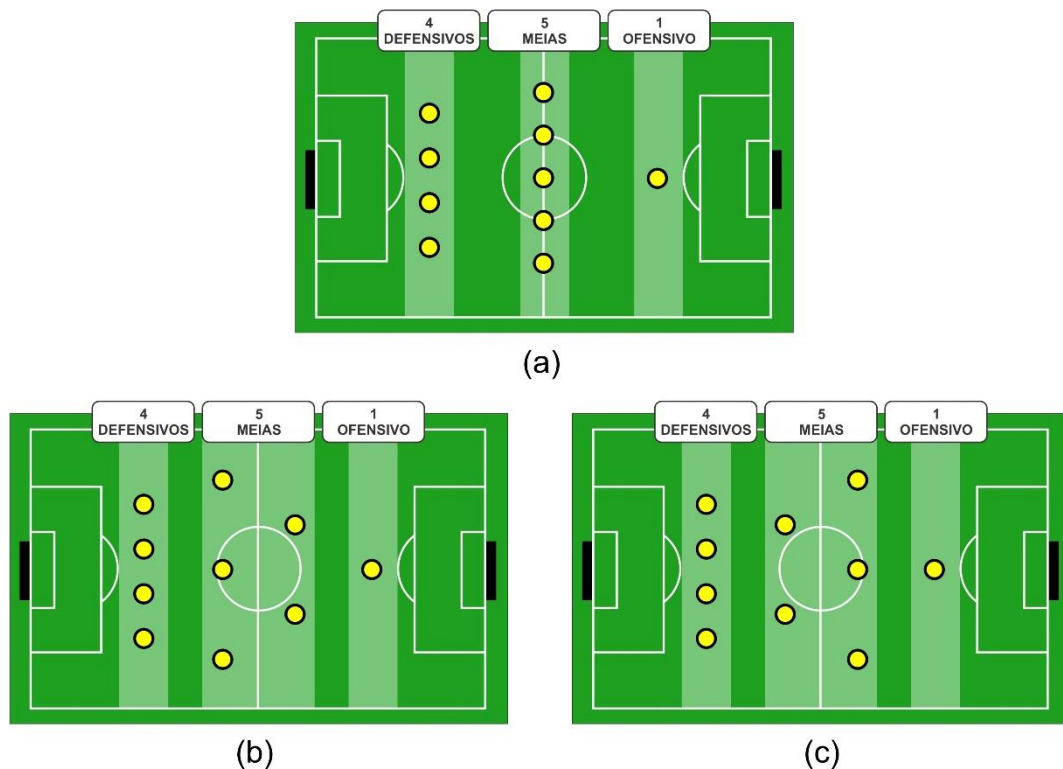


Figura 1 - Distribuição em campo do sistema tático 4-5-1

Por causa da existência de duas linhas de jogadores de meio-campo, as variações de um mesmo sistema tático criaram, recentemente, uma nova nomenclatura. Passou a ser comum a divisão dos jogadores de meio-campo em duas áreas diferentes. Um exemplo disso é o sistema 4-2-3-1, que nada mais é do que uma variação do 4-5-1, apresentada na Figura 1c.

Outros sistemas táticos são apresentados a seguir. É importante ressaltar que dentro de cada um deles há variações, nem todas apresentadas a seguir.

- 3-4-3 - possui zagueiros (central, esquerdo e direito), volantes (esquerdo e direito), meias (esquerda e direita), atacantes (esquerdo, direito) e centroavante. Também pode utilizar dois pontas no lugar dos atacantes;
- 3-5-2 - possui zagueiros (central, esquerdo e direito), volantes (esquerdo e direito), laterais (esquerdo e direito), meia-armador e atacantes (esquerdo e direito). Como variação, no setor de meio-campo, pode-se utilizar três volantes. Uma variação comum no setor ofensivo é utilizar um atacante e um centroavante ao invés de dois atacantes;
- 4-3-3 - possui zagueiros (esquerdo e direito), laterais (esquerdo e direito), volante central, meias (esquerda e direita), atacantes (esquerdo, direito) e centroavante. Como variação, pode-se utilizar dois volantes e um meio-campista. Os laterais

podem jogar mais recuados, para tornar o jogo mais defensivo ou mais avançando, quando da posse de bola da equipe, para tornar o jogo mais ofensivo;

- 4-4-2 - possuir zagueiros (esquerdo e direito), laterais (esquerdo e direito), volantes (esquerdo e direito), meias (esquerda e direita), atacantes (esquerdo e direito). No meio-campo pode-se usar três volantes e um meio-campista ou, ainda, um volante e três meio-campistas. Uma variação comum no setor ofensivo é utilizar um atacante e um centroavante ao invés de dois atacantes;
- 4-5-1 – é um sistema tático mais defensivo e com a maioria dos jogadores distribuídos no meio de campo permite maior eficiência na marcação dos jogadores adversários. A sua variação mais comum é com zagueiros (esquerdo e direito), laterais (esquerdo e direito), volantes (esquerdo e direito), meia-armador, pontas (esquerda e direita) e centroavante;
- 5-4-1 - este esquema é extremamente defensivo e pode ser usado quando há necessidade de segurar o resultado atual de um jogo difícil. Esta formação geralmente possui zagueiros (central, esquerdo e direito), laterais (esquerdo e direito), volantes (esquerdo, central e direito), meia-armador e atacante.

### **2.3 Princípios táticos**

Princípios táticos são normas que os jogadores devem seguir para, rapidamente, atingir soluções táticas (GARGANTA e PINTO, 1994). Em outras palavras, são ideias organizacionais do futebol que formam uma espécie de política de trabalho. De acordo com ZERHOUNI (1980) e ABOUTOIH (2006), a aplicação dos princípios táticos ofensivos auxilia a equipe no melhor controle do jogo, a manter a posse de bola, a realizar variações na sua circulação, a alterar o ritmo de jogo e a concretizar ações táticas visando romper o equilíbrio da equipe adversária e, conseqüentemente, a alcançar mais facilmente o gol. Por outro lado, os princípios táticos defensivos permite reduzir espaço ao adversário, distribuir de maneira otimizada os jogadores em campo e direcionar o jogo para as zonas com menor risco.

Neste trabalho os princípios táticos têm importância maior do que possibilitar os jogadores (agentes) atingirem soluções táticas de maneira rápida e organizada. Particularmente, os princípios fundamentais defensivos foram utilizados como entrada pelos sistemas inteligentes de tomada de decisão (Rede Neuronal e Sistema de Inferência Fuzzy) para classificar as defesas em organizadas ou desorganizadas, algo necessário para

o Modelo de Quatro Momentos e fundamental para implementar o Modelo de Quatro Estados, proposto neste trabalho.

### 2.3.1 Princípios fundamentais defensivos

Os princípios fundamentais defensivos são (WORTHINGTON, 1974; HAINAUT e BENOIT, 1979; QUEIROZ, 1983; GARGANTA e PINTO, 1994; CASTELO, 1996):

- **Contenção** (em inglês *delay*) - caracteriza-se pela rápida realização de oposição ao portador da bola. O defensor deve se aproximar o mais rápido possível do portador da bola na tentativa de induzir o adversário ao erro e, por consequência, sua equipe recuperar a posse de bola. Em termos operacionais, a contenção tem como objetivo (COSTA et al., 2011a): impedir o chute a gol; impedir a progressão; retardar ação do oponente; direcionar o jogo para as zonas com menor risco;
- **Cobertura defensiva** (em inglês *defensive coverage*) - o objetivo é oferecer apoio defensivo ao jogador de contenção. Para COSTA et al. (2009), a cobertura defensiva visa servir de novo obstáculo ao portador da bola (segunda contenção ou obstruir possíveis linhas de passe), caso ele passe pelo jogador de contenção, e transmitir segurança e confiança ao jogador de contenção para que ele tenha iniciativa de combate às ações ofensivas do portador da bola. Operacionalmente, o jogador que faz cobertura defensiva deve procurar se posicionar, preferencialmente, entre a contenção e a baliza (COSTA et al., 2011a);
- **Equilíbrio** (em inglês *balance*) - pauta-se na premissa de possuir superioridade, ou no mínimo garantir igualdade, numérica setorial de jogadores nas relações de oposição no Centro de Jogo, espaço de jogo entre a bola e a própria baliza (COSTA, 2010) (COSTA et al., 2011b). O equilíbrio setorial é necessário para não deixar jogador(es) adversário(s) sem marcação, para isso pode-se dividir o campo em setores imaginários (com quantidade e tamanho variados). Em linhas gerais, visa assegurar a estabilidade defensiva na região de disputa da bola;
- **Concentração** (em inglês *concentration*) - objetiva aumentar a proteção defensiva na zona de maior risco à baliza (COSTA et al., 2011c). Visa diminuir a profundidade adversária, direcionar a bola para zonas de menor risco, marcar adversários que buscam aumentar o espaço de jogo ofensivo e aumentar o número de jogadores entre a bola e o gol (COSTA et al., 2011a) (COSTA et al., 2011c);

- **Unidade defensiva** (em inglês *defensive unit*) - tem como objetivo a redução do espaço de jogo efetivo da equipe adversária. A unidade defensiva permite à equipe defender em unidade ou em bloco, reduzindo o espaço de jogo, com diminuição da amplitude defensiva da equipe na sua largura e profundidade. Assim, a equipe que se defende em bloco reduz os espaços livres que o time adversário poderia utilizar para dar penetração às suas ações ofensivas e, com isto, conseguir se defender de forma mais eficiente.

A Unidade Defensiva é o princípio fundamental defensivo responsável pela criação do conceito de compactação, que é o resultado de manobras coletivas coordenadas com a finalidade de diminuir o espaço de jogo. Uma equipe que joga compacta é uma equipe que joga junto, aproximando seus setores, e tem como referência a bola (NUNES, 2013). A compactação é um conceito que foi implementado na defesa da equipe desenvolvida para este trabalho e presente nas principais equipes de futebol do mundo.

A compactação no futebol surgiu porque, de acordo com as regras do futebol estabelecidas pela FIFA (Fifa, 2015), um campo oficial de futebol pode variar de tamanho. Isso porque a entidade que rege o futebol internacionalmente determina, na regra um do futebol, as medidas mínimas e máximas de um campo de futebol. De acordo com a Fifa, um campo oficial deve ter comprimento mínimo de 90m e máximo de 120m; a largura deve ter no mínimo 45m e no máximo 90m. Assim, uma partida de futebol pode variar de 4.050m<sup>2</sup> a 10.800m<sup>2</sup> de área de campo de jogo.

No entanto, nos últimos anos a Fifa resolveu padronizar algumas normas e procedimentos, o chamado padrão Fifa. Especificamente sobre campo de jogo, a Fifa recomenda que uma partida de futebol internacional, como ocorre na Copa do Mundo de futebol, seja jogada em um campo com 105m de comprimento por 68m de largura (mesmas medidas utilizadas no *Soccer Server*). Nesse caso, a área de jogo é de 7.140m<sup>2</sup>, o que representa 714m<sup>2</sup> para cada jogador de linha de uma equipe. É uma área muito grande para ser "coberta" por um único jogador, o que resultará em uma ocupação pouco eficiente de espaço pela equipe.

A fim de minimizar esse problema surge o conceito da compactação. Em profundidade a compactação vai ser o resultado da aproximação das linhas de jogadores. Em largura os jogadores de uma mesma linha se aproximam. Defensivamente a compactação é importante porque diminui os espaços livres que a equipe adversária poderia utilizar para dar penetração às suas ações ofensivas e, com isto, conseguir se



defender de forma mais eficiente. É importante expressar que a compactação se torna ainda mais relevante por causa da normativa do impedimento, estabelecida na lei 11 das regras do futebol. Isso significa que sempre que a linha de defesa de uma equipe avançar, a equipe adversária é obrigada a recuar jogadores para recolocá-los novamente em condição de jogo. Todavia, a linha defensiva de uma equipe avançar sobre a metade adversária do campo de jogo anula o objetivo da compactação porque a lei 11 do futebol expressa que “um jogador não está em posição de impedimento se ele estiver em sua própria metade do campo de jogo” (FIFA, 2015).

### 2.3.2 Princípios fundamentais ofensivos

Os princípios fundamentais ofensivos são (WORTHINGTON, 1974; HAINAUT e BENOIT, 1979; QUEIROZ, 1983; GARGANTA e PINTO, 1994; CASTELO, 1996):

- **Penetração** (em inglês *penetration*) - é a condução de bola pelo espaço disponível (com ou sem defensores à frente) em direção à linha de fundo ou ao gol adversário. Dribles são realizados a fim de colocar a equipe em superioridade numérica em ações de ataque ou propiciar condições favoráveis a um passe/assistência para o companheiro dar sequência ao jogo. Em outras palavras, visa reduzir a distância entre o portador da bola e a linha de fundo adversária (COSTA *et al.*, 2011c);
- **Cobertura ofensiva** (em inglês *offensive coverage*) - nada mais é que o oferecimento de apoios ofensivos, disponibilizando linhas de passe, ao portador da bola. Posiciona-se próximo ao portador da bola a fim de manter a posse de bola da equipe e, para isso, costuma realizar tabelas<sup>4</sup> ou triangulações<sup>5</sup> com o portador da bola (COSTA *et al.*, 2011c);
- **Mobilidade** (em inglês *mobility*) - caracteriza-se por movimentações em profundidade ou em largura, “nas costas” do último defensor em direção à linha de fundo ou ao gol adversário. Visa ganhar espaço ofensivo e propiciar ao jogador receber a bola a fim de criar oportunidades na sequência ofensiva do jogo (COSTA *et al.*, 2011c);
- **Espaço** (em inglês *width and length*) - visa procurar espaços na amplitude do campo de jogo não ocupados pelos adversários a fim de obter superioridade numérica posicional. Inclui movimentações que permitem (re)iniciar o processo

---

<sup>4</sup> Tabela - jogada envolvendo dois jogadores executada em grande velocidade e a curta distância, Um jogador A realiza um passe para um jogador B e corre para receber novamente a bola em outra posição.

<sup>5</sup> Triangulação - é uma espécie de tabela envolvendo três jogadores.

ofensivo conduzindo a bola para trás ou para próximo à linha lateral. Em outras palavras, é a utilização e ampliação do espaço de jogo efetivo em largura e profundidade (COSTA *et al.*, 2011c);

- **Unidade ofensiva** (em inglês *offensive unity*) - os jogadores devem se agrupar para a equipe poder atacar em bloco, permitindo assim que mais jogadores participem no processo ofensivo. Algo parecido com o princípio fundamental defensivo da unidade defensiva, só que referente ao ataque.

## 2.4 Tipos de marcação e *pressing*

Referente aos tipos de marcações no futebol, existem quatro formas predominante de aplicação (LEITÃO, 2009):

- individual – cada jogador marca um adversário previamente estabelecido, é pouco utilizada no futebol moderno. A referência é um jogador adversário;
- por zona – os jogadores defendem um determinado espaço do campo, ou seja, a equipe busca ter superioridade numérica em determinada região do campo. São utilizadas como referência o local em que a bola se encontra e o posicionamento dos demais colegas da mesma equipe;
- mista – utiliza marcação individual e por zona em situações diferentes e específicas do jogo, alternando-as com estas situações;
- híbrida – apresenta características de marcação individual e por zona ao mesmo tempo. É um tipo de marcação utilizada quando a equipe adversária possui um ou dois atletas tecnicamente muito superiores aos demais jogadores da própria equipe e marcação individual sobre eles pode ser interessante.

Há ainda, para cada uma das marcações anteriores, duas formas de recuperação de bola (LEITÃO, 2009):

- passiva – tem como objetivo levar a equipe adversária ao erro sem “atacar” a bola com muita intensidade;
- ativa – busca "atacar" a bola na tentativa de recuperá-las mais rapidamente.

*Pressing*, também conhecido no Brasil como defesa pressionante ou defesa por zona pressionante, é baseada em recuperação de bola ativa. É, ainda, um subtipo de defesa por zona, isto significa que o *pressing* não diverge da marcação por zona, mas tem características que o tornam importante ao ponto de ser tratado de maneira isolada. O

*pressing* serviu de inspiração para implementação de uma das duas estratégias defensivas implementadas neste trabalho.

O *pressing* tem como origem o Futebol Total holandês, comentado na seção 4.3, e, de acordo com SÁNCHEZ e FRISA (2006), é uma ação tática defensiva e coletiva com a finalidade de não deixar liberdade alguma de ação ao adversário e, por tanto, trata de romper sua zona de interesse do jogo ofensivo. Para BONIZZONI (1988), no *pressing* os jogadores da equipe realizam uma ação de opressão nos jogadores adversários, em particular ao portador da bola. Limitam-lhe espaço de ação e o tempo de reação, impedem-no de atuar com tranquilidade e tentam recuperar a posse de bola ou, caso não seja possível, evitar a progressão da equipe adversária. Para ROMERO (2004), o *pressing* é a ação de marcação coletiva de toda a equipe, caracterizada pela intensidade defensiva, pela redução do tempo e do espaço ao adversário e objetiva rápida recuperação da posse de bola. Para RAMOS (2005), o cerne do *pressing* está na ocupação racional de espaços, ou seja, escondendo os espaços de jogo de maior valor do adversário.

Considere uma situação hipotética de jogo apresentada na Figura 2a. A Figura 2b destaca as possíveis linhas de passe para o jogador portador da bola. A fim de impedir a progressão da equipe adversária, o *pressing* tenta reduzir espaço de ação e tempo de reação ao adversário. Como resultado, o *pressing* realiza recuperação de bola ativa não somente com o jogador de contenção, mas de toda equipe (vide Figura 2c). Contudo, para funcionar, o *pressing* necessita de ações coordenadas de ocupação de espaços dos jogadores. Note que no *pressing* todos os jogadores atuam defensivamente e têm papel importante para a eficácia desta estratégia tática defensiva.

## **2.5 Modelo do jogo**

José Mourinho, um dos treinadores mais vencedores dos últimos anos no futebol, citado por AMIEIRO *et al.* (2006, pp.98), externa que "a interpretação de um Modelo de Jogo, não de uma forma individual mas sim coletiva, é a base de sustentação da forma da equipe e das oscilações individuais da forma de cada jogador". GAITERO (2006) expressa que é necessário invocar um Modelo de Jogo porque é impossível agir de forma coerente se não existir um objetivo futuro, que conduz os jogadores. Expressa ainda que o futuro já existe, só que visto agora apresenta-se impreciso e obscuro, sendo que à medida que nos aproximamos dele, os seus contornos tornam-se mais nítidos, o Modelo de Jogo permite traçar com rigor a direção que conduz a esse futuro. Gaitero finaliza

dizendo que a existência de um modelo de mundo adequado, permite que os jogadores aprendam com antecedência antes de serem obrigados a agir.

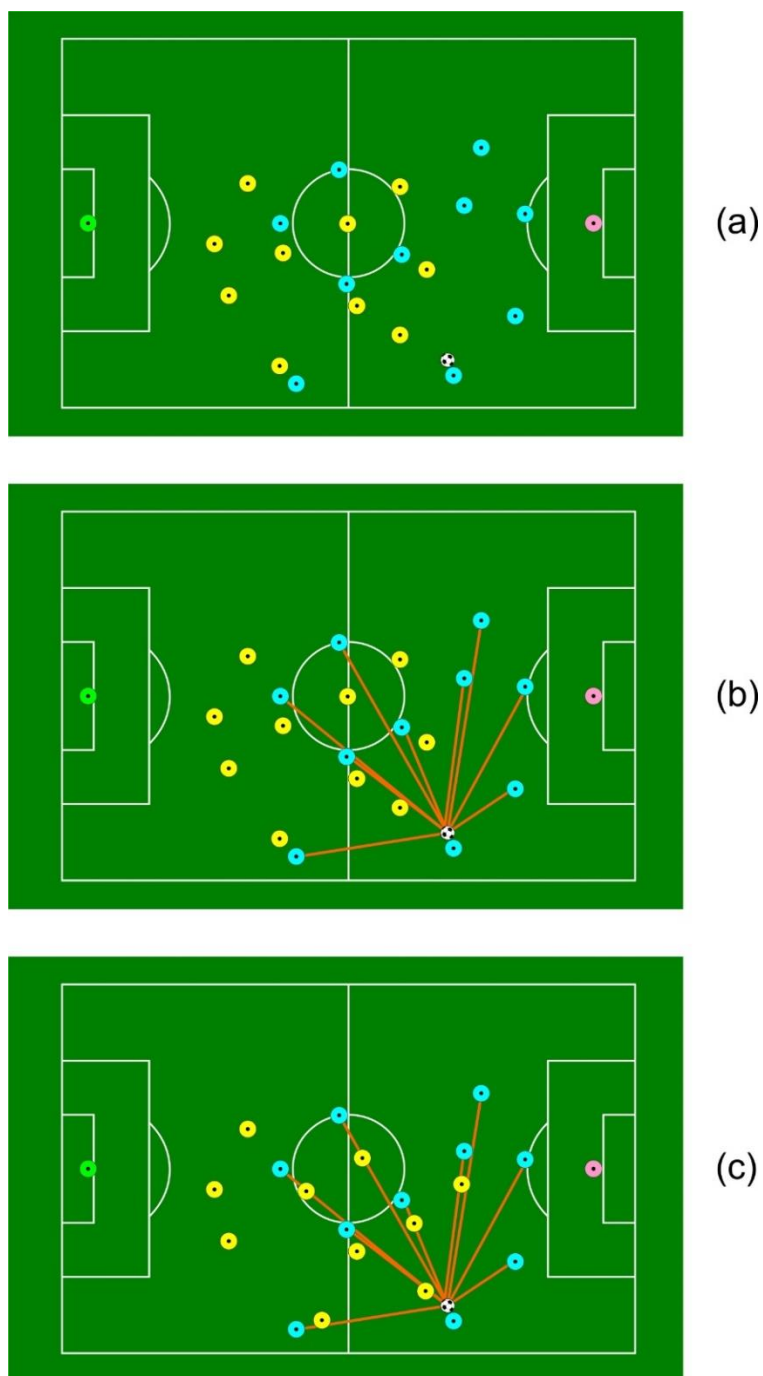


Figura 2 - Exemplo de *pressing*: (a) situação hipotética de jogo; (b) possíveis linhas de passe para o portador da bola; (c) *pressing* em ação.

O Modelo de Jogo é constituído, essencialmente, por princípios que se articulam entre si e que dão uma certa forma de jogar, com determinados padrões de comportamento em diferentes momentos tanto ofensivos, como defensivos (OLIVEIRA, 2003a).

Assim, para facilitar a compreensão do futebol em nível tático, é importante

realizar um processo de abstração, que é o processo no qual concentram-se as atenções no que de fato é relevante para o problema e ignora o que é irrelevante. A abstração resulta na redução de conteúdo ou do fenômeno observável. Isso significa representar o problema com o que é importante "sem que lhe sejam retiradas as interações que lhe conferem a essência" (RAMOS, 2009, pp.22). Pela abstração, surgiram diferentes concepções do andamento do jogo para as equipes, nas quais as principais são Modelo Dualista e Modelo de Quatro Momentos (objeto de estudo desta tese).

### 2.5.1 Modelo dualista

Até início dos anos 2000, o Modelo Dualista era mais aceito e trabalhado na literatura. Nessa organização, o jogo apresenta dois estados opostos e complementares: ofensivo e defensivo. RAMOS (2009, pp.22) expressa que sob essa visão, "o jogo desenvolve-se segundo um quadro de luta permanente pela posse de bola". Uma equipe encontra-se no estado ofensivo se ela tiver a posse de bola e está no estado defensivo quando está sem a bola mas à procura da sua posse. Como consequência do Modelo Dualista, uma equipe no estado ofensivo deve atacar por ter a posse de bola e não ter a bola implica em defender (BAYER, 1994). A Figura 3 apresenta o Modelo Dualista por meio de uma Máquina de Estados<sup>6</sup>. Observa-se na Figura 3 que uma equipe fica no estado defensivo enquanto a posse de bola for da equipe adversária e só há transição para o estado ofensivo quando a equipe passa a ter a posse de bola, que permanece neste último estado enquanto a bola estiver em sua posse.

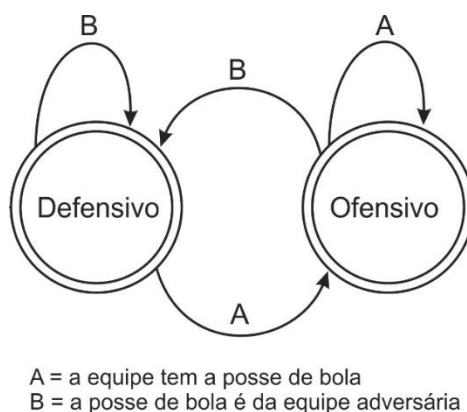


Figura 3 - Representação do Modelo Dualista

<sup>6</sup> Máquina de estados: é um modelo matemático de sistema com entradas e saídas discretas. Pode assumir um número finito e pré-definido de estados. Cada estado resume somente as informações do passado necessárias para determinar as ações para a próxima entrada.

### 2.5.2 Modelo de quatro momentos

Nos últimos anos um outro modelo passou a ser mais aceito do que o Modelo Dualista. Vários autores e treinadores consideram o futebol como tendo quatro momentos, ampliando o Modelo Dualista. Os quatro momentos nessa visão são: organização defensiva, transição ataque/defesa, organização defensiva e transição defesa-ataque (FRADE, 1985; OLIVEIRA, 2003b; AMIEIRO, 2005). Veja Figura 4.

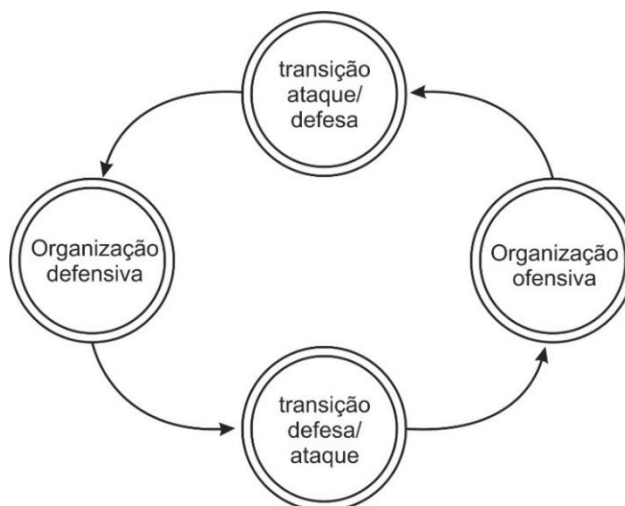


Figura 4 - Modelo de Quatro Momentos

O momento de transição defesa-ataque é caracterizado pelos comportamentos que se devem adotar durante os segundos imediatos à conquista da bola (mudança de atitude defensiva para ofensiva), estando às equipes desorganizadas para as novas funções, sendo o objetivo aproveitar a desorganização adversária e arranjar espaço para proveito próprio (AZEVEDO, 2011). O Modelo de Quatro Momentos tem, atualmente, bastante aceitação. AZEVEDO (2011) cita que diversos treinadores (Van Gall, J. Mourinho, J. Ferreira, V. Frade, J. Valdano, entre outros) evidenciem o Modelo de Quatro Momentos no futebol, que abriu uma nova perspectiva tática para analisar e atuar no jogo.

Observe que o estado ofensivo do Modelo Dualista foi dividido em dois momentos, chamados “organização ofensiva” e “transição defesa/ataque”; assim como o estado defensivo do modelo dualista foi dividido nos momentos “transição ataque/defesa” e “organização defensiva”. Se uma equipe tem a posse de bola ela estará ou no momento de “organização ofensiva” ou de “transição defesa/ataque”. Analogamente, se a posse de bola é da equipe adversária, a equipe estará ou no momento de “organização defensiva” ou de “transição ataque/defesa”.

FERREIRINHA (2008) expõe que, em termos táticos, a transição defesa-ataque tem de ter uma relação íntima com a organização ofensiva, assim como a transição ataque-

defesa tem que ter uma relação próxima com a organização defensiva. Nesse sentido, GARGANTA e PINTO (1998) expressam que todos os jogadores devem participar das transições, por meio de uma rápida mudança de atitude mental. Quando a equipe perde a posse de bola, os jogadores devem converter-se imediatamente em defensores, independentemente de estar no momento “organização defensiva” ou “transição ataque-defesa”; quando a equipe recupera a posse de bola, os jogadores devem converter-se em atacantes, independentemente de estar no momento “organização ofensiva” ou “transição defesa-ataque”.

CARVALHAL (2006) afirma que é no aproveitamento de transições, bem como das bolas paradas, que ocorrem grande parte dos gols. OLSEN (1988) analisou cinquenta e dois jogos da Copa do Mundo FIFA de 1986 e verificou que 50% dos gols resultaram de recuperação da posse de bola, ou seja, foram feitos durante uma fase de transição. OLIVEIRA (2006) afirma que muitas das sequências ofensivas positivas e gols acontecem nos momentos de transição e identifica o porquê: as equipes não estão organizadas defensivamente.

## **2.6 Componentes de rendimento**

O futebol conta com quatro dimensões/fatores/componentes de rendimento: psicológica/social, física, técnica e tática (QUEIROZ, 1986; PINTO, 1988; GARGANTA, 1997; CASTELO, 2002, BANGSBO, 2006). A seguir é apresentado um estudo bibliográfico identificando correlação entre a tática e as demais componentes de rendimento, o que visa justificar o uso de simulação computacional para isolar a tática das demais componentes de rendimento uma vez que não é possível em humanos.

### **2.6.1 Psicológico/social: a força emocional**

Relaciona-se com os aspectos associados ao comportamento e estado emocional inseridos no contexto individual do atleta e social da equipe. De acordo com ROCHA *et al.* (2010), quando um patamar físico ótimo é alcançado, em situações em que a tática de jogo é equivalente entre adversários, o fator decisivo para a vitória consiste em como o atleta percebe e se comporta frente ao ambiente competitivo.

Cada atleta responde às diferentes situações estressantes de maneira distinta, afinal são seres constituídos de diferentes histórias de vida. Enquanto alguns podem reagir de forma positiva, impulsionando o desempenho ou incentivando companheiros, outros

podem incurrir respostas inadequadas, reduzindo desempenho individual ou mobilizando negativamente companheiros.

Existem alguns trabalhos sobre o componente psicológico no esporte, autores atribuem aos fatores psicológicos um peso considerável em lesões esportivas (JOHNSON, 1997; HARDY *et al.*, 1991; PETRIE, 1993; WILLIAMS e ROEPKY, 1993). Para exemplificar, WEINBERG e GOULD (2003) indicam o *stress* como um dos fatores psicológicos mais relacionados às lesões. FORD *et al.* (2000) descobriram que atleta com baixa autoestima, pessimistas, baixo vigor ou níveis elevados de ansiedade sofrem mais lesões ou demoram mais tempo na recuperação.

PALOMINO *et al.* (2000) analisaram, entre 1995 e 1998, o resultado de 2885 partidas da primeira divisão de alguns dos principais campeonatos nacionais do mundo. Foram observados 1044 jogos da Itália, 999 jogos da Inglaterra e 842 jogos da Espanha. Observa-se na Tabela 1 que a maioria dos gols foi marcada por equipes que jogavam em casa.

Tabela 1 - Proporção de gols marcados em casa e fora de casa, como visitante.

Adaptado de PALOMINO *et al.* (2000)

	Itália (1044 jogos)		Inglaterra (999 jogos)		Espanha (842 jogos)	
	Gols	%	Gols	%	Gols	%
<b>Em casa</b>	1620	60,4	1539	58,9	1629	60,0
<b>Visitante</b>	1061	39,6	1076	41,1	1086	40,0

Na mesma direção, CUNHA (2003) analisou 239 partidas de diversos campeonatos profissionais de futebol no mundo. Foi identificado que, jogando em casa, as equipes venceram, aproximadamente, 54,8% das partidas (131 jogos); empatou cerca de 20% das partidas (48 jogos); e perdeu, aproximadamente, 25,1% das partidas (60 jogos).

SILVA *et al.* (2005) analisaram 9037 partidas de nove campeonatos nacionais (alemão, argentino, brasileiro, espanhol, francês, holandês, inglês, italiano e português) das temporadas de 2002 a 2005. Verificou-se haver predominância de vitórias na ordem de, aproximadamente, 47,93% das equipes que jogavam em casa; cerca de 27,38% de empates; e, aproximadamente, 25,52% das equipes visitantes.

Os resultados apresentados anteriormente indicam que o fator psicológico afeta o desempenho individual dos jogadores e coletivo da equipe.



## 2.6.2 Físico: o atributo da motricidade

Um jogador demanda de energia para realizar atividades como, por exemplo, dar combate, pular, correr, etc. O condicionamento físico dos atletas é composto pelas capacidades físicas de força, velocidade, resistência aeróbica, resistência anaeróbica e flexibilidade.

BANGSBO (1994) expressa que condicionamento físico é um pré-requisito para o desempenho técnico, tático e psíquico. Isso significa que a falta de preparação física adequada fará com que um jogador diminua seu desempenho coletivo e individual, físico e mental, à medida que o jogo se desenvolve. Em outras palavras, a qualidade do desempenho dos atletas na execução de jogadas é afetada pelo aspecto físico.

Vários estudos têm fornecido evidências de que a capacidade dos jogadores para realizar exercícios de alta intensidade é reduzida no final dos jogos de futebol (KRUSTRUP *et al.*, 2006; MOHR *et al.*, 2003; MOHR *et al.*, 2005; REILLY e THOMAS, 1979). Tem sido demonstrado que, em *sprints* (corrida de alta intensidade), distância são percorridas em maiores tempos ao término da primeira metade do jogo se comparadas ao desempenho do jogador antes de uma partida e ao término da segunda metade se comparadas à primeira metade (vide Figura 5).

Também tem sido observado que a quantidade de corridas de alta intensidade é reduzida nos 15 minutos finais de um jogo de futebol de profissional de primeira divisão (MOHR *et al.*, 2003) e que o desempenho em saltar, correr e realizar exercícios intermitentes reduz se comparado a resultados obtidos antes de uma partida de futebol (MOHR *et al.*, 2004, 2005; REBELO, 1999).

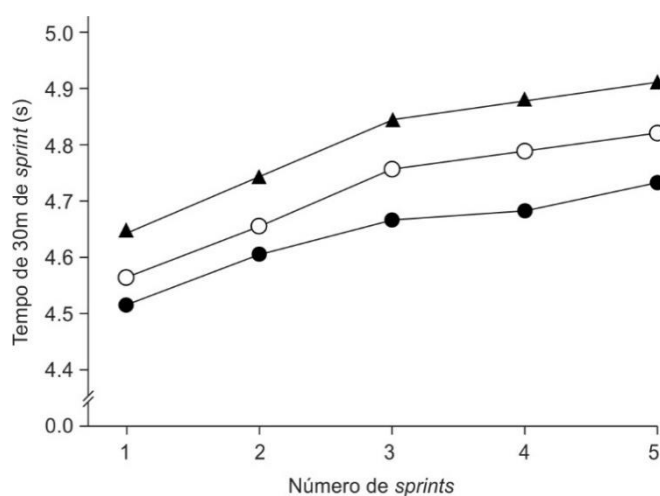


Figura 5 - Cinco *sprints* de 30m separados por um período de 25s de recuperação antes do jogo (círculos cheios), após o primeiro tempo (círculos abertos) e após o segundo tempo (triângulos cheios) de uma partida (BANGSBO *et al.*, 2006)

PALOMINO *et al.* (2000) analisaram, entre 1995 e 1998, o resultado de 2885 partidas da primeira divisão dos principais campeonatos nacionais do mundo. Foram observados 1044 jogos da Itália e 999 jogos da Inglaterra, entre 1995 e 1998, e 842 jogos da Espanha, entre 1995 e 1998. Observa-se, na Figura 6, que são marcados mais gols nos finais de cada metade de uma partida, a redução do desempenho físico ao longo do tempo e a pressão psicológica por resultado que fazem que equipes partam para o tudo ou nada podem explicar esse fato.

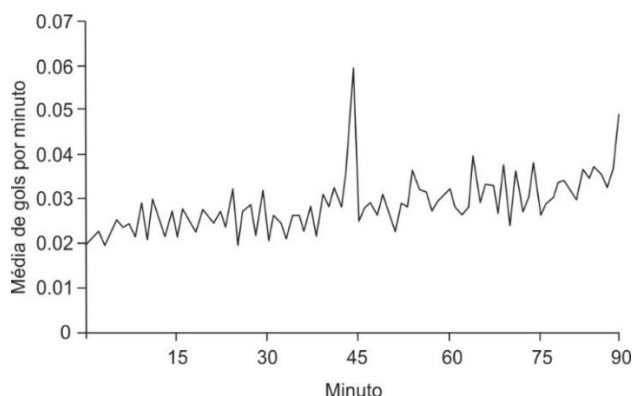


Figura 6 - Frequência de gols por minuto em uma partida de futebol (PALOMINO *et al.*, 2000)

SILVA (2007) analisou os dados 2.902 partidas de oito dos principais campeonatos nacionais profissionais de futebol (alemão, argentino, brasileiro, espanhol, francês, holandês, inglês e italiano). Como resultado, descobriu-se que, ao longo tempo de uma partida, a incidência de gols tende a aumentar (Figura 7), o que corrobora com a aparente relação inversamente proporcional entre redução de condicionamento físico e aumento de incidência de gols, afetando o desempenho individual dos jogadores e coletivo da equipe.

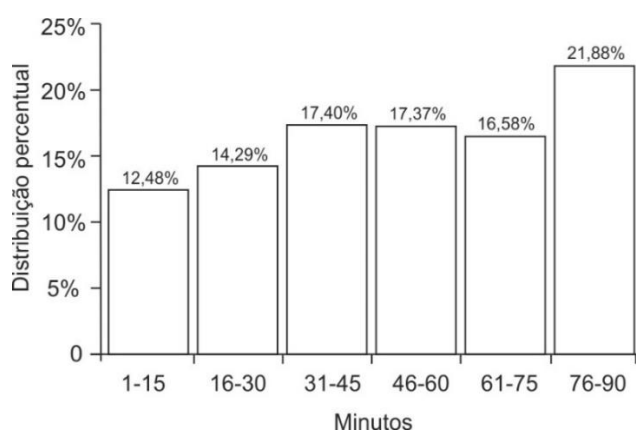


Figura 7 - Frequência dos gols no decorrer do tempo total de jogo em intervalo de 15 minutos (SILVA, 2007)

### 2.6.3 Técnica: a habilidade individual

A técnica pode ser definida como um conjunto de respostas motoras dos jogadores ao problema, que é jogar coletivamente futebol. Isso significa que a técnica nada mais é do que recursos específicos para realizar uma ação. O conjunto de respostas motoras é compreendido por habilidades como: passe, drible, chute, cabeceio, condução, etc. Há ainda habilidades sem bola, como roubada de bola ou desarme, por exemplo.

A técnica é individual, cada jogador tem características específicas para cada uma das habilidades. Ter alto aproveitamento de passes corretos (passes no qual a bola chega com sucesso a outro jogador da sua equipe), de gols em relação ao número de chutes, entre outros, indica que o jogador é bom tecnicamente. No jargão do futebol, esse jogador é classificado como habilidoso.

Dentre os fundamentos técnicos mais importantes, o passe merece destaque por ser executado diversas vezes ao longo de uma partida e a qualidade dele pode definir partidas uma vez que passes errados fornecem ao adversário a possibilidade de contra-ataque, que tem papel central na estratégia ofensiva atual das equipes. Em suma, o contra-ataque procura aproveitar rapidamente a desorganização defensiva adversária. BARBOSA (2009) realizou um estudo sobre o processo ofensivo analisando as equipes classificadas nos dois primeiros lugares de algumas das principais ligas nacionais na temporada 2008/2009. As equipes selecionadas foram: Real Madrid, F. C. Barcelona (Espanha); Inter de Milão e A. S. Roma (Itália); Manchester United e Chelsea (Inglaterra) e F. C. Porto e Sporting C. P. (Portugal).

BARBOSA (2009) apurou que o método de jogo ofensivo que levou a um maior número de sequências ofensivas positivas, que resultaram em finalização, foi o contra-ataque para quase todas as equipes observadas, excetuando a equipe Sporting. Sequência Ofensiva Positiva é toda sequência ofensiva onde existe finalização (chute a gol). Barbosa considerou finalização sempre que: a bola ultrapassou completamente a linha da baliza (gol); foi defendida pelo goleiro; ou bateu em algum dos postes da trave adversária.

TEODORESCU (1984) define contra-ataque como um método de jogo ofensivo, caracterizado por uma grande velocidade de circulação de bola e dos jogadores, no intuito de chegar o mais rapidamente possível à baliza adversária, através de um número reduzido de passes e contatos com a bola. De acordo com a definição, o contra-ataque tem um número reduzido de contatos com a bola, o que indica que os resultados de BARBOSA (2009) vão ao encontro do que REINA *et al.* (1997) e CASTELO (1994) verificaram, que a maior parte das sequências ofensivas positivas tiveram a participação

de menos de quatro jogadores. GARGANTA *et al.* (2002) também observaram, em um estudo sobre os campeonatos do Mundo e da Europa, que o maior número de sequências ofensivas positivas tinha a participação de um reduzido número de jogadores.

Se passes errados resultam em contra-ataque, que se apresentam como a forma ofensiva mais efetiva, então isso implica que habilidades técnicas individuais (ou a falta de qualidade delas) influenciam o desempenho tático de uma equipe. Em outras palavras, equipes com qualidade de passe baixa são mais suscetíveis a serem contra-atacadas e, proporcionalmente ao número de finalizações, tendem a levar mais gols. No entanto, realizar um estudo mais profundo sobre a dimensão técnica foge ao escopo deste trabalho.

#### **2.6.4 Tática: o jogo coletivo**

Em seus primórdios, o futebol foi um jogo anárquico e sem método, onde a soma das individualidades ainda não chegava a construir uma equipe (PARREIRA, 2005). O ex-treinador da seleção brasileira, Carlos Alberto Parreira, expõe que "sem um esforço coordenado e comum, a eficácia (de um time) torna-se muito reduzida" (PARREIRA, 2005, pp.10). Nesse sentido, José Mourinho, importante treinador português, citado por AMIEIRO *et al.* (2006), complementa "o que mais forte uma equipe pode ter é jogar como uma equipe. Para mim isto é muito claro: a melhor equipe não é a que tem os melhores jogadores, mas aquela que joga como uma equipe". A tática se desenvolve pela inteligência dos homens a fim de organizar e coordenar equipes.

Para FESTA (2009, pp.16-17) a

tática não significa uma organização em função do espaço de jogo e das missões específicas dos jogadores, esta pressupõe, em última análise, a existência de uma concepção unitária para o desenrolar do jogo, ou por outras palavras, o tema geral sobre o qual os jogadores concordam e que lhes permite estabelecer uma linguagem comum.

A tática deve ser entendida não apenas como uma das dimensões tradicionais do jogo, mas como a dimensão unificadora que dá sentido e lógica a todas as outras. É o princípio diretor da organização do jogo (AZEVEDO, 2009). GRECO e BENDA (1998) apresentam que as ações táticas podem ser classificadas como:

- tática individual - ação isolada do jogador e capacidade de percepção da situação de jogo visando atingir um objetivo individual (drible ou para quem passar a bola, por exemplo);
- tática de grupo - ações coordenadas entre dois ou três jogadores proporcionando a continuidade da ação (tabela ou marcação por zona, por exemplo);

- tática coletiva - ações simultâneas de três ou mais jogadores estabelecida previamente por um plano de ação determinado, de acordo com as regras do jogo, relacionando as ações do adversário e as respostas como situações ofensivas para atingir o objetivo pretendido (compactação ou *pressing*, por exemplo).

Diante das classificações das ações táticas, o escopo deste trabalho atua somente sobre a tática coletiva, ou seja, no posicionamento e movimento coordenado de três ou mais jogadores. Isso significa que a criatividade individual do atleta não sofrerá intervenção com a proposta deste trabalho, afinal a ideia não é robotizar o futebol de humanos, mas organizá-lo no contexto coletivo a partir de simulações feitas em futebol de robôs.

### 3. Simulador *Soccer Server* da RoboCup

Para BERENDS e ROMME (1999), simulação é definida como a construção de um modelo de processo e a experimentação com a replicação deste processo pela manipulação das variáveis e suas inter-relações dentro do modelo. O termo simulação pode ser classificado em duas categorias: simulação computacional e não computacional. O objeto de estudo deste trabalho está inserido na simulação computacional. Por isso, o termo simulação computacional é tratado simplesmente por simulação neste trabalho.

Software de simulação é um método eficaz de observar os resultados em curso e resultados finais de uma hipótese. Uma variedade de entradas alimenta a simulação para refletir uma situação real ou esperada. No caso de futebol, as entradas podem ser um conjunto de estatísticas de jogadores, estratégias de jogo, eventos e diferentes ambientes. A simulação visa representar uma verdadeira situação do mundo e o resultado é afetado por vários fatores, o que o torna um sistema altamente complexo.

O futebol de robôs é um problema padrão de investigação internacional de Inteligência Artificial e Robótica organizado por federações, sendo a RoboCup a principal. As federações dividem o futebol de robôs em categorias. A RoboCup tem diferentes categorias, algo importante porque expande a gama de desafios, além de permitir o foco em problemas específicos. Cada categoria possui suas próprias regras e muitas vezes trabalham em cenários completamente diferentes. Dentre as categorias de futebol de robôs da RoboCup ([www.robocup.org/robocup-soccer](http://www.robocup.org/robocup-soccer)), a que mais se aproxima do futebol é a RoboCup *Simulation* 2D (simulada com robôs virtuais) e, por isto, utilizada neste trabalho.

A categoria RoboCup *Simulation* 2D começou com Itsuki Noda, do centro de pesquisa governamental do Japão ElectroTechnical Laboratory (ETL), iniciou o desenvolvimento de um simulador dedicado para jogos de futebol. Noda e sua equipe no ETL anunciaram o *Soccer Server* versão 0, o primeiro sistema de simulação de código aberto para o domínio do futebol que habilitava pesquisa em sistemas multiagentes. Inicialmente programado na linguagem LISP, foi sucedido pela versão 1.0, desenvolvida em C++. A primeira demonstração pública do *Soccer Server* foi executada na International Joint Conference on AI 95 (IJCAI-95). Atualmente o *Soccer Server* encontra-se na versão 15.2.2 (<http://sourceforge.net/projects/sserver/files/rcssserver/>).

O simulador da RoboCup tem alguns comandos básicos sobre os quais as equipes devem ser projetadas. São eles:

- movimentação - *dash* (faz o jogador correr), *turn* (gira o jogador) e *move* (movimenta o jogador);
- interação com a bola - *kick* (chuta a bola), *tackle* (tenta roubar a bola) e *catch* (pega a bola - somente o goleiro);
- percepção e controle - *turn\_neck* (gira o pescoço do jogador), *attentionto* (foca a atenção de um jogador para um ponto) e *change\_view* (define o modo de visão do jogador);
- comunicação - *say* (emite mensagem sonora), *hear* (ouve uma mensagem sonora) e *pointto* (aponta para uma posição).

### 3.1 A arquitetura do simulador

Uma partida de futebol de robôs é disputada por dois times. No simulador da liga RoboCup *Simulation 2D* cada time é composto por 12 agentes (11 jogadores e um treinador) que se conectam ao servidor, em uma arquitetura cliente-servidor, através de *sockets* UDP/IP. Cada cliente tem um *socket* dedicado, ligado diretamente ao *Soccer Server*, veja Figura 8.

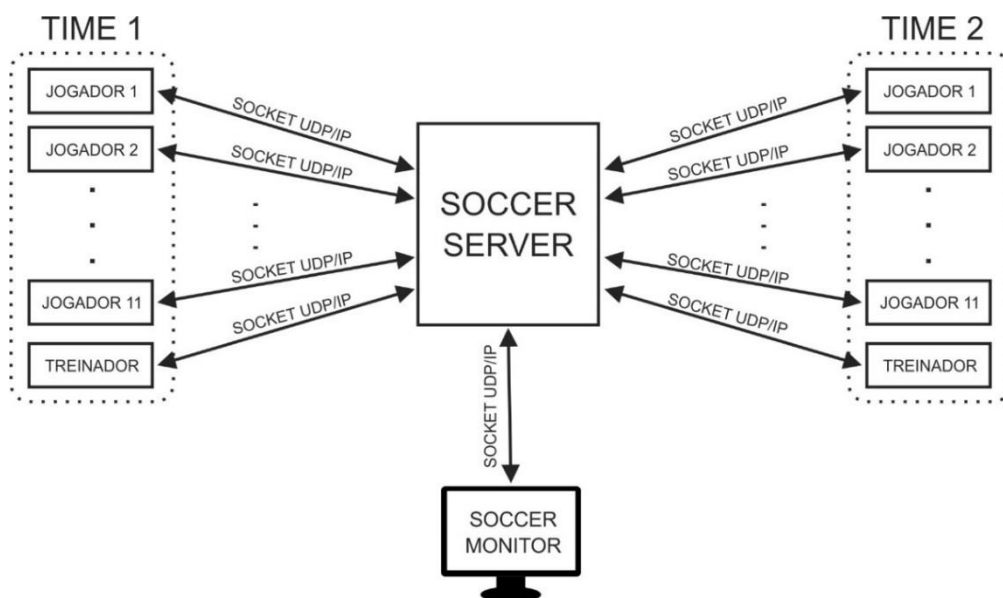


Figura 8 - Arquitetura de Simulação *Soccer Server* (adaptado de REIS, 2003)

O simulador da RoboCup é composto pelos seguintes módulos:

- *soccer server* - módulo responsável por gerenciar o ambiente de jogo (condições ambientais, cumprimento das regras, etc.). Recebe e envia informações (posição

da bola, posição dos agentes jogadores, tempo decorrido, entre outras) do ambiente simulado para os clientes;

- times - módulo responsável por atuar no ambiente simulado, cada time é composto por agentes, programas autônomos que controlam cada um dos jogadores e o treinador. Um agente, ao receber informações do servidor, analisa as informações e toma uma decisão, enviando uma resposta ao servidor na forma de um comando para ser executado;
- *soccer monitor* - módulo responsável por exibir o que acontece no jogo através de interface gráfica do campo virtual (Figura 9), também chamado de *rcssmonitor*. Por meio desta interface é possível ver os agentes interagindo.



Figura 9 - Soccer Monitor 2D da RoboCup

É importante ressaltar que a comunicação verbal no futebol de humanos é praticamente inexistente por causa das distâncias envolvendo os jogadores, pelos ruídos emitidos pelas torcidas no estádio e pela restrição de tempo na tomada de decisões dos jogadores. Assim, o simulador, para ser mais fidedigno ao modelo do mundo real, incorpora essas características. As condições adversas de comunicação fazem parte do modelo implementado no simulador *Soccer Server*.

A comunicação entre agentes deve ser realizada exclusivamente via troca de mensagens. O quadro de mensagens, submódulo do *Soccer Server*, é o local onde ficam armazenadas as requisições enviadas pelos clientes e as respostas enviadas pelo servidor. Existe um nível de acesso regulado ao quadro de mensagens. O árbitro, outro submódulo



do *Soccer Server*, é o único que pode acessar diretamente o quadro de mensagens do *Soccer Server*, os agentes jogadores/treinadores só podem acessar as mensagens armazenadas depois de elas serem analisadas pelo árbitro, ver Figura 10. É o árbitro quem define o que pode ou não ser executado.

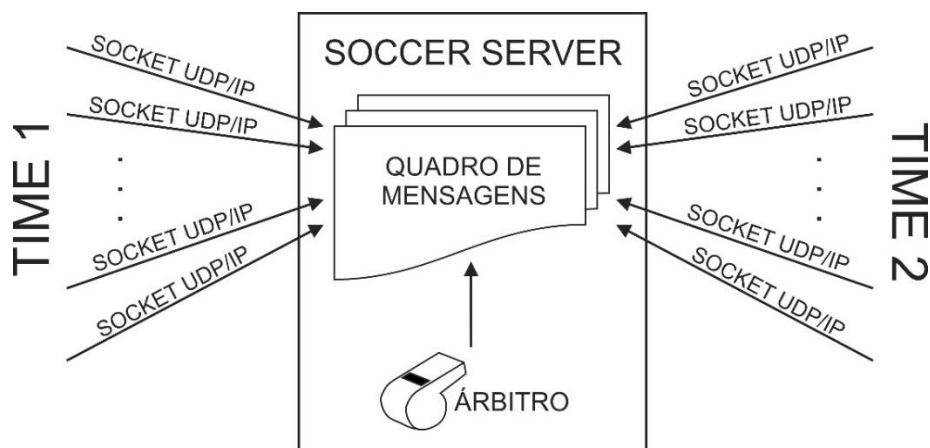


Figura 10 - Acesso ao quadro de mensagens (ALMEIDA, 2008)

O simulador é um sistema de tempo real que trabalha com intervalos de tempo discretos, ou ciclos. Cada ciclo corresponde a 100ms e uma partida tem intervalo quando completa 3.000 ciclos. Segundo XAVIER *et al.* (2006), a cada ciclo de simulação existe uma sequência lógica de passos, apresentados a seguir, que se repetem até que sejam alcançados 6.000 ciclos, quando termina uma partida.

1. O servidor envia aos clientes e ao monitor informações sobre posições dos agentes, bola, *flags*<sup>7</sup>, condições do próprio agente, entre outras;
2. Quando o monitor recebe as informações do servidor, ele as interpreta de forma visual para que o ser humano possa visualizar o que acontece;
3. Um cliente, ao receber informações do servidor, analisa e toma uma decisão, enviando uma resposta ao servidor na forma de um comando para ser executado;
4. O servidor calcula a nova situação do ambiente de acordo com as condições anteriores e aos comandos enviados pelos clientes.

Além dos três módulos descritos anteriormente, existe ainda o *Log Player*, que tem função parecida com a do monitor. No entanto, o *Log Player* é utilizado para exibir uma partida que já tenha ocorrido, por meio de arquivos de *log* do servidor. Pode ser utilizado para análise posterior do jogo e realização de *data mining* para extração de padrões.

<sup>7</sup> *Flags* são bandeiras virtuais distribuídas no campo de jogo em posições previamente conhecidas a fim de possibilitar que os robôs se posicionem e se orientem.

O *Soccer Server* provê diversas complexidades do mundo real como ruído em sensores e atuadores (BOER e KOK, 2002). Para aproximar o jogo simulado do jogo de futebol de humanos, o simulador inclui ruídos nas mensagens enviadas aos agentes jogadores e em algumas ações executadas por eles. A visão dos agentes é imprecisa devido aos ruídos causados pelo servidor, quanto mais distante menos precisa é a visão. A trajetória da bola após um chute também é passível de interferência, ela pode ou não sofrer com a ação do vento. As mensagens trocadas pelos jogadores também estão sujeitas a ruídos sonoros acrescidos pelo simulador, somente os agentes treinadores têm o privilégio de acessar a informação sem ruídos, ou seja, diretamente do quadro de mensagens.

A fim de manter alto nível de fidelidade aos acontecimentos relacionados ao futebol, o *Soccer Server* encarrega-se de limitar a distância que uma determinada mensagem fonética enviada por um jogador pode ser ouvida. Há limitações também no que diz respeito à consistência das mensagens, já que quanto maior a distância que o jogador que ouve a mensagem está do jogador que fala, pior será a qualidade da mensagem recebida (BOER e KOK, 2002).

Segundo REIS (2003), uma mensagem só pode ser escutada por jogadores que estejam a uma distância máxima definida pela variável *audio\_cut\_dist* do emissor. A distância máxima utilizada em competições oficiais tem sido de 50m. Ressalta-se que as mensagens enviadas pelos treinadores e árbitro não têm limitações de alcance. O simulador envia também, aos agentes, informações de percepção física, entre elas: *stamina*, indicações da velocidade absoluta e respectiva direção e do ângulo relativo entre a cabeça e o corpo do agente.

### **3.2 O futebol de robôs do *Soccer Server* como sistema multiagentes**

Para simular conceitos táticos do futebol deve ser feita uma síntese e análise crítica dos conceitos mais relevantes da Ciência do Esporte, especificamente da Teoria do Futebol, e associá-los a conceitos de agentes, sistemas multiagentes e coordenação em sistemas multiagentes. Afinal, o futebol simulado de robôs é um problema de execução de tarefas cooperativas por meio de equipes de agentes com mobilidade espacial.

RUSSEL e NORVIG (1995) definem um agente como tudo o que pode ser considerado capaz de perceber seu ambiente por meio de sensores e de agir sobre este ambiente por intermédio de atuadores. Note que essa é uma definição ampla, que atende não somente ao contexto computacional. Russel e Norvig exemplificam, um agente

humano tem olhos, ouvidos e outros órgãos como sensores, e tem mãos, pernas, boca e outras partes do corpo que servem como atuadores. Um Agente computacional pode ser entendida como uma entidade computacional, vulgarmente *software*. Um agente robótico poderia ter câmeras e detectores da faixa de infravermelho funcionando como sensores e vários motores como atuadores.

Genericamente, em futebol de robôs os sensores são muito diversificados e dependendo da categoria podem variar, mas comumente são utilizados sensores de distância (infravermelho, ultrassom, entre outros), câmeras, sensores de aceleração, etc. Exemplos de atuadores são motores associados às rodas omnidirecionais ou utilizados para controlar pernas em robôs humanoides para se movimentarem, dispositivo de chute/passe/lançamento, etc.

Especificamente na categoria RoboCup *Simulation 2D*, os sensores do *Soccer Server* são de ordem visual, acústico e físico. Os sensores dos agentes recebem informações do árbitro, treinador ou dos demais jogadores. Os atuadores são controlados pelos comandos básicos do *Soccer Server* e permitem um robô virtual, que é uma agente, de se movimentar no ambiente (*move*), correr (*dash*), chutar a bola (*kick*), executar carrinho (*tackle*), pegar a bola (*catch*, somente o goleiro), virar o corpo (*turn*) ou o pescoço (*turn\_neck*) e se comunicar (*say* e *hear*).

As tarefas de um agente são muito vastas e podem ser classificadas de acordo com as propriedades dos ambientes, descritas a seguir (RUSSEL e NORVIG, 1995).

- Completamente observável *versus* parcialmente observável – se os sensores de um agente permitem acesso ao estado completo do ambiente em cada instante, então o ambiente de tarefa é classificado como completamente observável;
- Determinístico *versus* estocástico – se o próximo estado do ambiente é completamente determinado pelo estado atual e pela ação executada pelo agente, dizemos que o ambiente é determinístico;
- Episódico *versus* sequencial – Em um ambiente de tarefa episódico, a experiência do agente é dividida em episódios atômicos. Cada episódio consiste na percepção do agente, e depois na execução de uma única ação. É crucial que o episódio seguinte não dependa das ações executadas em episódios anteriores. Em ambientes episódicos, a escolha da ação em cada episódio só depende do próprio episódio;

- Estático *versus* dinâmico – se o ambiente puder se alterar enquanto um agente está deliberando, o ambiente é classificado como dinâmico, caso contrário é chamado de estático;
- Discreto *versus* contínuo – distinção feita pelo estado do ambiente, modo como o tempo é tratado ou sobre as percepções e ações do agente. O futebol de robôs é um problema de estado contínuo e tempo contínuo: a velocidade e a posição de um robô e dos outros robôs passam por um intervalo de valores contínuos e fazem isso suavemente ao longo do tempo, apesar de a entrada proveniente dos sensores ser discreta;
- Agente único *versus* multiagente – diferenciado pela quantidade de agentes no ambiente, em sistemas multiagentes o processamento é distribuído entre dois ou mais agentes sem que haja um controle centralizado, isto é, os agentes trabalham em conjunto de forma a desempenhar determinadas tarefas ou satisfazer um conjunto de objetivos da sociedade de agentes.

O caso mais difícil de tratamento é o parcialmente observável, estocástico, sequencial, dinâmico, contínuo e multiagente (RUSSEL e NORVIG, 1995). Esse é o caso do futebol de robôs. No simulador *Soccer Server*, cada jogador em campo é considerado um agente e deve ser controlado por uma instância exclusiva de um programa, de modo que um programa não pode controlar mais de um jogador. Também não é permitido o uso de técnicas de compartilhamento de memória nem qualquer tipo de comunicação entre os agentes que não seja aquela implementada no simulador. Desse modo, um agente não pode deduzir diretamente as intenções dos demais. Essas restrições garantem uma ambientação de um sistema multiagente distribuído.

De acordo com conceitos de Teoria dos Jogos, FIANI (2002, pp.2) define jogo como “situações que envolvam interações entre agentes racionais que se comportam estrategicamente”. Ainda de acordo com Fiani, interação significa que as ações de cada agente, consideradas individualmente, afetam os demais; assumir que os agentes são racionais significa supor que os indivíduos empregam os meios mais adequados aos objetivos que almejam, sejam quais forem esses objetivos.

Assim, sob a ótica da Teoria dos Jogos, o futebol é um esporte que tem dois jogos dentro de si: um jogo de competição (aqui denominado jogo entre equipes), onde cada agente racional é um time composto por um conjunto de jogadores; e um de cooperação

(denominado jogo entre os jogadores de uma mesma equipe), onde cada agente racional é um companheiro de equipe (SILVA, 2006).

O jogo entre equipes é de soma zero, ou seja, a recompensa que um jogador/agente ganha é exatamente o que o outro perde, por isto ocorre competição. Havendo empate, nenhum agente ganha e nem mesmo perde, ou seja, um agente não obtém vantagem sobre o outro e, assim, a soma dos resultados é zero. O jogo entre equipe ocorre sempre entre dois agentes, que são as duas equipes. No entanto, uma equipe é composta por 11 agentes com objetivos individuais. No futebol, o treinador estabelece, previamente, um conjunto de estratégias, ou táticas, que, sob determinados estados e circunstâncias, será utilizado pelos atletas. No futebol de robôs é a programação quem determina um conjunto de táticas que será utilizado pelos agentes.

Para que os agentes saibam as circunstâncias que as táticas serão utilizadas, é necessário conhecer o Modelo de Jogo do futebol porque ele indica os diferentes estados da partida e estes estados, por serem distintos, implicam em estratégias específicas para otimizar o desempenho do time. Vale lembrar que o objetivo deste trabalho é verificar, via simulação, a validade dos conceitos de Modelo Dualista e Modelo de Quatro Momento, que são diferentes visões acerca do Modelos de Jogo. O modelo que melhor responder às diferentes situações do jogo contribuirá para as equipes se organizarem taticamente de maneira mais eficiente a partir de um conjunto de estratégias pensadas para cada estado de jogo. Em suma, a ideia do Modelo de Jogo é abstrair o jogo entre equipes em estados.

O outro jogo, entre jogadores de uma mesma equipe, é de soma não-zero cooperativo. Jogo de soma não-zero é um jogo em que os agentes podem sair ganhando ou perdendo (a soma pode ser neutra, positiva ou negativa). São exatamente nesses jogos que pode emergir cooperação, visto que a rivalidade não é direta. Em jogos cooperativos os agentes são estimulados a adotarem ações que retornam boas recompensas a todos os envolvidos, ou seja, são incentivados a retornar boas recompensas aos demais companheiros de equipe. O jogo entre jogadores de uma mesma equipe ocorre entre 11 agentes, que são os jogadores de uma mesma equipe (sistema multiagentes), e cada agente tem seu objetivo individual, mas a cooperação social entre agentes emerge da estratégia coletiva da equipe, que é determinada pelo estado corrente do Modelo de Jogo do jogo entre equipes. Todavia, isso não significa que no jogo entre jogadores de uma mesma equipe não haja conflitos entre os agentes.

Conflitos entre agentes em uma equipe de futebol de robôs ocorrem quando dois ou mais agentes competem pelo mesmo recurso. Por exemplo, defensivamente dois ou mais agentes decidem assumir a marcação de um mesmo adversário e ofensivamente dois ou mais companheiros de equipe tentarem ocupar uma mesma região do campo a fim de receber um passe. De acordo com REIS (2003), a resolução de conflitos entre agentes tem como objetivo permitir a modificação dos planos locais de agentes autônomos, no caso de interações entre eles, e a identificação de situações onde essas interações são possíveis.

A fim de mediar conflitos, a Resolução Distribuída e Cooperativa de Problemas (SMITH e DAVIS, 1980; DURFEE e LESSER, 1987; REIS, 2003) estuda o modo como entidades computacionais podem trabalhar em conjunto de maneira a resolver problemas que são demasiado complexos para suas capacidades individuais. Cada agente possui capacidade de operar dentro do seu domínio de especialidade e é capaz de operação autônoma e independente. No entanto, o problema global a ser resolvido por este conjunto de entidades, não é passível de ser resolvido completamente sem cooperação. A Resolução Distribuída e Cooperativa de Problemas apresenta dois cenários possíveis:

- partilha de tarefas – ocorre quando um dado problema é decomposto e as suas diferentes partes alocadas a agentes distintos;
- partilha de resultados – implica a troca de informação de forma proativa ou reativa entre os agentes que seja relevante para a resolução do problema global.

No futebol de robôs, o cenário deve ser tratado sob a perspectiva da partilha de resultados porque não é possível decompor o problema do jogo entre jogadores de uma mesma equipe, afinal ele é de natureza distribuída. Um agente envia informações autonomamente de forma proativa quando acredita que algo pode ser útil para os demais agentes, a partir de representações de seu modelo de mundo<sup>8</sup>, e de forma reativa mediante uma solicitação de outro agente. O envio de informações visa auxiliar os outros agentes, companheiros de equipe, na resolução dos seus problemas individuais. A restrição temporal e a limitação da comunicação impõem restrições na negociação entre agentes, todavia essas informações permitem que os conflitos sejam resolvidos por negociação automática por meio de normas e leis sociais definidas na equipe. Assim, cada agente deve identificar seu papel dentro da ação tática a ser realizada, deve reconhecer sua importância e evitar a competição de recursos (espaços) com companheiros de equipe.

---

<sup>8</sup> As informações sensoriais, obtidas por um robô, são interpretadas a fim de gerar um modelo do ambiente de modo que possa tomar decisões sobre este modelo. Também chamado de visão de mundo.

Os sistemas multiagentes incluem diversos agentes que interagem ou trabalham em conjunto, podendo compreender agentes homogêneos ou heterogêneos. Na versão 7 do *Soccer Server* foi introduzido o conceito de jogadores heterogêneos (KLAUS, 2003), o que fez com que os agentes passassem a ter características distintas. Nas versões seguintes estas características foram aprimoradas e passaram a ter maior relevância no jogo. A seguir são apresentadas as descrições dos atributos heterogêneos da versão 7.

- Index – identificação do perfil heterogêneo;
- PlayerSpeedMax – velocidade máxima do jogador (invariável);
- StaminaIncMax – incremento máximo de estamina para o jogador;
- PlayerDecay – decaimento da velocidade do jogador;
- InertiaMoment – quanto maior o Momento de Inércia, mais difícil alterar sua direção;
- DashPowerRate – força de arrancada;
- PlayerSize – tamanho do jogador (invariável);
- KickableMargin – tamanho (raio) da área de chute;
- KickRand – ruído adicionado ao chute;
- ExtraStamina – quantidade de estamina extra que o jogador receberá;
- EffortMax – esforço máximo;
- EffortMin – esforço mínimo;
- MaximalKickDist – raio máximo da área de chute;
- KickPowerRate – força do chute (invariável);
- FoulDetectProbability – probabilidade de cometer falta (invariável).

A atual versão do servidor envia uma lista com 18 perfis heterogêneos. O valor de cada uma das características é gerado aleatoriamente no início de cada partida. Algumas características são invariáveis e não se altera ao longo de uma partida (KLAUS, 2003).

### **3.3 Times-base**

Alguns times da categoria de *Simulation 2D* da RoboCup fornecem uma versão básica de seu próprio código fonte, disponibilizado sob licença livre. Essas versões são chamadas times-base e são utilizadas por outras equipes como *frameworks*. A utilização de times-base fornecidos por outras equipes permite que o foco do trabalho se concentre no comportamento dos agentes e na estratégia a ser utilizada, uma vez que não é necessário se preocupar com o desenvolvimento de habilidades básicas do agente

(percepção espacial, chute, etc.) e com a comunicação com o servidor via conexão UDP ou com a interpretação das mensagens recebidas pelo servidor. Os *frameworks* mais conhecidos, atualmente, são UvaTrilearn, Agent2D e WE-Base.

O UvaTrilearn, desenvolvido pela Universidade de Amsterdã (BOER e KOK, 2002), é um time-base escrito em C++ com farta documentação, o que o torna bastante utilizado como ponto de partida por muitas equipes iniciantes. É distribuído sob a licença GPL (*General Public Licence*), no entanto ele não é atualizado desde 2003. Por isso, não incorpora recursos surgidos posteriormente no simulador da RoboCup. Neste trabalho é importante usufruir dos recursos existentes na versão mais atual do simulador uma vez que eles surgiram para tornar o simulador com uma modelagem mais próxima à do futebol de humanos.

O Agent2D é também distribuído sob licença GPL e foi desenvolvido em C++ por Hidehisa Akiyama (AKIYAMA *et al.*, 2009). Esse time-base é atualizado com certa frequência e possui mais ampla cobertura com relação às habilidades básicas se comparado ao UvaTrilearn, o que permite ao desenvolvedor centrar seu trabalho na construção de habilidades mais complexas. Ao contrário do *framework* UvaTrilearn, a documentação do Agent2D é escassa em inglês e se restringe a algumas poucas em japonês (incluindo um manual), o que dificulta o entendimento da estrutura de seu funcionamento.

O time WE-Base é escrito em C++ e pertence ao Laboratório de Sistemas Multi-agente da Universidade de Ciência e Tecnologia da China (USTC, 2014). É a escola oficial da equipe WrightEagle, que foi criada em 1999 e ganhou quatro campeonatos mundiais. Tem bastante habilidades básicas implementadas, mais do que o UvaTrilearn mas menos do que o Agent2D. Por isso, é um time-base menos usado do que o Agent2D. A documentação do WE-Base é bastante escassa.

### **3.4 Agent2D**

O Agent2D foi escolhido como time-base deste trabalho por possuir ampla cobertura com relação a habilidades básicas, o que permite desenvolver com mais agilidade comportamentos mais complexos.

O Agent2D oferece comandos básicos de comunicação com o simulador e traz uma inovação que outras ferramentas de times-base não haviam trabalhado ainda que é a existência de uma memória de áudio, descrita por uma classe que se encontra no arquivo *audio\_memory.cpp*. A memória de áudio guarda as últimas mensagens de áudio em uma



lista para cada tipo de mensagem. O tipo da mensagem, ou seja, o assunto do qual ela trata é definido pelo seu cabeçalho. As mensagens incluídas na lista de mensagens de áudio são separadas de acordo com seus respectivos tipos que estão definidos no mesmo arquivo como *structs*, ou seja, estruturas de dados compostas.

A Figura 11 apresenta, sucintamente, a execução de um agente do Agent2D. Um agente deve enviar uma mensagem informando o time a qual ele pertence para estabelecer conexão com o servidor, o que ocorre somente uma vez em uma partida. Após se conectar ao servidor, o agente recebe do simulador informações do ambiente a fim de atualizar seu modelo de mundo. Então, o agente define um comportamento de alto nível para ser executado. A fim de controlar o robô ao qual foi designado, o agente deve enviar comandos básicos ao simulador, ou seja, instruções de baixo nível que são interpretadas pelo *Soccer Server*. Essas instruções, classificadas por tipo, estão apresentadas na Tabela 2.

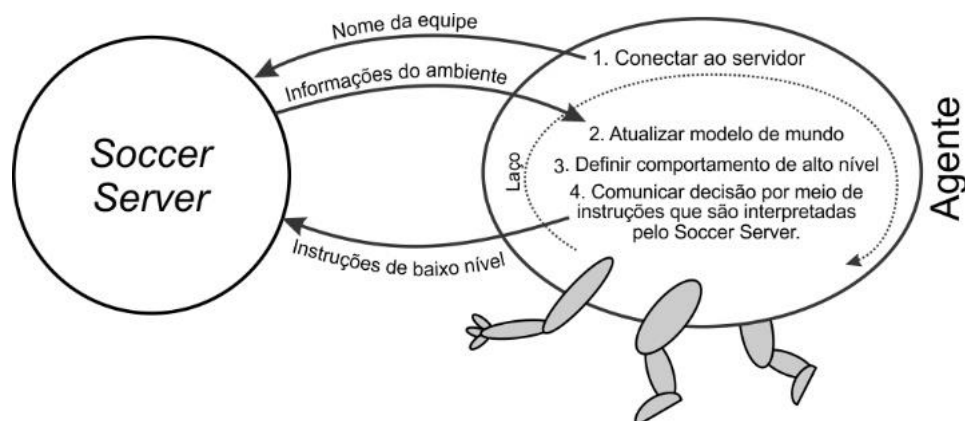


Figura 11 - Execução de um agente do Agent2D

Tabela 2 - Instruções do Soccer Server

Instrução baixo nível	Tipo de ação	Descrição
<i>doDash()</i>	Movimentação	Realiza <i>sprint</i> (corre)
<i>doTurn()</i>	Movimentação	Gira o corpo
<i>doMove()</i>	Movimentação	Move o jogador
<i>doKick()</i>	Interação com a bola	Chuta a bola
<i>doTackle()</i>	Interação com a bola	Carrinho, usado para roubar a bola
<i>doCatch()</i>	Interação com a bola	Pega a bola, usado somente pelo goleiro
<i>doTurnNeck()</i>	Percepção e controle	Gira o pescoço
<i>doAttentionto()</i>	Percepção e controle	Concentra a atenção em um jogador
<i>doChangeView()</i>	Percepção e controle	Determina o modo de visão
<i>doSay()</i>	Comunicação	Emite mensagem sonora
<i>doHear()</i>	Comunicação	Ouve mensagem sonora
<i>doPointto()</i>	Comunicação	Jogador aponta para uma localização

Para desenvolver jogadas mais complexas como drible e passe, instruções do *Soccer Server* devem ser combinadas. Por exemplo, um drible pode ser realizado aplicando-se chutes fracos sobre a bola e movendo o robô em sua direção para manter o controle da bola. O Agent2D tem algumas jogadas implementadas que é o resultado da combinação dos comandos básicos do *Soccer Server*.

O Agent2D chama as ações de alto nível de comportamentos. Existem vários comportamentos implementados no Agent2D. A seguir, na Tabela 3, são apresentados os principais.

Tabela 3 - Principais comportamentos de alto nível do Agent2D

Comportamento alto nível	Descrição
<i>Bhv_BasicMove()</i>	Movimentação básica do agente
<i>Bhv_GoalieBasicMove()</i>	Movimentação básica do goleiro
<i>Bhv_GoToStaticBall()</i>	Movimentação do agente até a bola
<i>Bhv_GoalieChaseBall()</i>	Movimentação do goleiro a fim de perseguir a bola
<i>Bhv_GoToPointLookBall()</i>	Movimentação do agente olhando para a bola
<i>Bhv_ScanField()</i>	Mapeia o campo de jogo a fim de atualizar o modelo de mundo
<i>Bhv_BodyNeckToBall()</i>	Gira o corpo e o pescoço em direção à bola
<i>Bhv_BodyNeckToPoint()</i>	Gira o corpo e o pescoço para um determinado ponto
<i>Bhv_BasicTackle()</i>	Carrinho, mais elaborado do que a instrução tackle do simulador
<i>Bhv_NormalDribble()</i>	Drible, avança em uma direção do campo coma bola sob controle
<i>Bhv_PassKickFindReceiver()</i>	Passe para um companheiro de equipe
<i>Bhv_Shoot()</i>	Chuta a bola com o intuito de marcar um gol

A qualidade e quantidade de informações que um agente possui influencia diretamente as decisões tomadas por ele. Quando a percepção do ambiente pelo agente é imprecisa ou incompleta, as suas tarefas tornam-se bastante complexas de serem realizadas e a qualidade delas é reduzida. Por isso, é necessário que os agentes compartilhem informações e as armazenem historicamente consigo para que possam ter uma percepção mais acurada do ambiente, algo que é tratado individualmente pelos agentes em seus modelos de mundo.

### 3.4.1 Modelo de mundo

Para que uma equipe de futebol de robôs consiga realizar comportamento tático eficiente, é necessário que seus agentes tenham uma mesma percepção de situação/estado de jogo (ou grande parte dos jogadores tenham a mesma percepção), apesar de terem informações diferentes do ambiente por estarem dispostos em locais distintos do campo. O Agent2D tem implementado seu próprio modelo de mundo, que é onde todas as

observações dos sensores são fundidas a fim de formar uma representação do ambiente onde o robô está operando, e que pode ser acessado no arquivo *world\_model.h*. O modelo de mundo de cada agente do Agent2D armazena as posições e velocidades históricas dos agentes, companheiros de equipe e adversários e da bola. As informações armazenadas historicamente são utilizadas para calcular previsão de movimento e posição futura (*inertiaPoint()* e *inertiaFinalPoint()*) da bola e dos demais robôs.

O modelo de mundo de cada agente é constituído a partir de informações sensoriais da visão e da audição de cada robô. O sensor visual (*visual\_sensor.h*) trabalha com posição e orientação de objetos limitados à área de visão de cada robô, ou seja, um agente não enxerga o que acontece às suas costas, por exemplo. A audição (*audio\_sensor.h*) refere-se à troca de mensagens sonoras entre agentes com informações que visam completar e atualizar a informação visual, o que visa aumentar a precisão das representações do ambiente nos modelos de mundo dos companheiros de equipe. Entretanto, vale acrescentar que o simulador restringe as mensagens a 10 bytes. A quantidade de ruídos que o *Soccer Server* insere na mensagem é diretamente proporcional à distância entre os agentes.

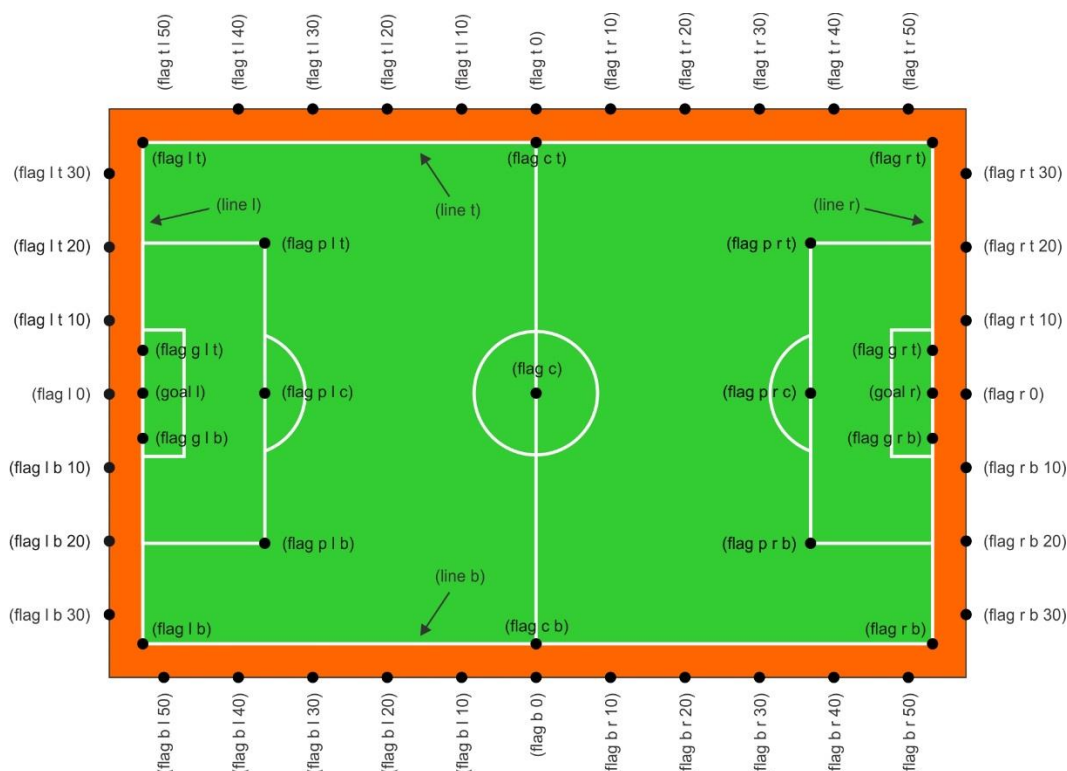


Figura 12 - Campo virtual do *Soccer Server* (REIS, 2003)

Os jogos de futebol simulados no *Soccer Server* são realizados em um campo virtual de 105 x 68 m composto por bandeiras virtuais (do inglês *flags*), que são utilizadas

na representação do ambiente contida no modelo de mundo dos agentes. As bandeiras virtuais são fixas e posicionadas em pontos previamente conhecidos, apresentadas na Figura 12. As bandeiras virtuais são visualizadas pelos agentes robóticos a partir do sensor visual. Cada agente mapeia o ambiente obtendo as posições dos objetos e sua própria posição e orientação a partir da triangulação das bandeiras virtuais.

No modelo de mundo do Agent2D, as posições dos diversos objetos no campo ficam armazenadas em coordenadas  $(x, y)$ , como exposto na Figura 13. O centro do campo de jogo é o centro do sistema de coordenadas e o comprimento do campo (entre balizas) corresponde ao eixo  $x$  e a largura ao eixo  $y$ . O sentido positivo do eixo  $x$  contido no modelo de mundo obedece à direção em que a equipe ataca, independente do lado no ambiente. O ângulo referente à orientação de movimento é dado em grau e é definido no intervalo  $[-180^\circ, 180^\circ]$ , de forma que  $0^\circ$  está na direção positiva do eixo  $x$  e  $90^\circ$  na direção positiva do eixo  $y$ .

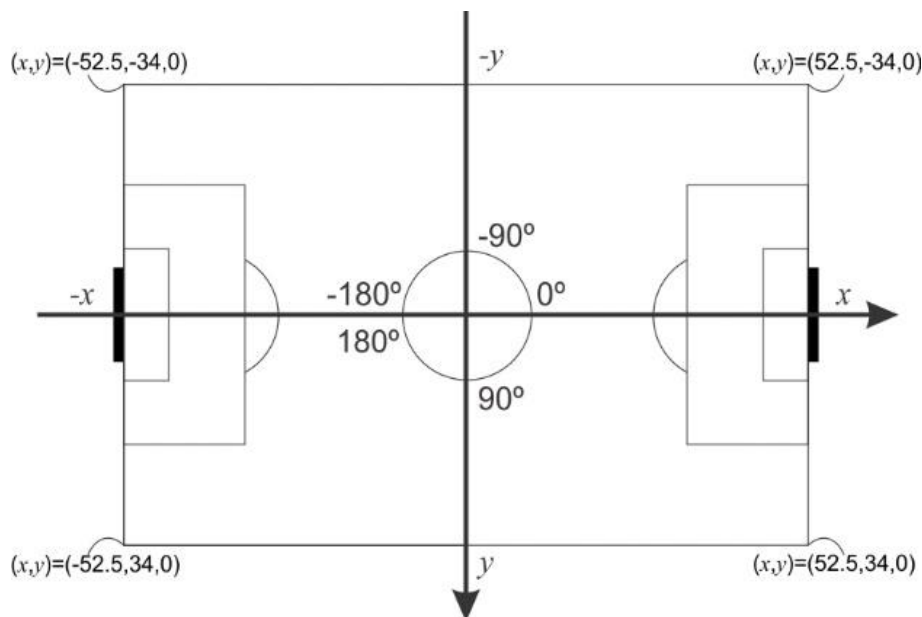


Figura 13 - Coordenadas e ângulos do campo de jogo

### 3.4.2 Formation Editor

O *Formation Editor (fedit)* é uma ferramenta de código aberto desenvolvida dentro do projeto RCTools (<http://rctools.sourceforge.jp>) e consiste em uma aplicação importante para a criação e edição de formações táticas para o Agent2D. O modelo de posicionamento utilizado no Agent2D é composto por um conjunto de arquivos. Cada arquivo contém uma postura de posicionamento a ser adotada durante diferentes situações de jogo. A relação dos principais arquivos que compõem o posicionamento tático do Agent2D está expressa na Tabela 4.

Tabela 4 - Arquivos utilizados pelo Agent2D no *Formation Editor*

Arquivo	Descrição
<i>before-kick-off.conf</i>	Formação da equipe antes de iniciar a partida
<i>defense-formation.conf</i>	Formação da equipe quando está sem posse de bola
<i>goal-kick-opp.conf</i>	Formação da equipe em tiro de meta adversário
<i>goal-kick-our.conf</i>	Formação em tiro de meta da própria equipe
<i>goalie-catch-opp.conf</i>	Formação da equipe quando o goleiro adversário está com a bola
<i>goalie-catch-our.conf</i>	Formação da equipe quando seu goleiro está com a bola
<i>indirect-freekick-opp-formation.conf</i>	Formação da equipe em uma falta indireta adversária
<i>indirect-freekick-our-formation.conf</i>	Formação da equipe em uma falta indireta da equipe
<i>kickin-our-formation.conf</i>	Formação da equipe
<i>normal-formation.conf</i>	Formação normal da equipe
<i>offense-formation.conf</i>	Formação da equipe quando está com posse de bola

O *Formation Editor* permite interação humana intuitiva de forma visual para modificar formações de sistemas táticos a partir da distribuição espacial dos jogadores em campo. Adicionalmente, é possível também definir as posições táticas dos jogadores: *Goalie* (goleiro), *CenterBack* (zagueiro), *SideBack* (lateral), *DefensiveHalf* (voltante), *OffensiveHalf* (meia-armador), *SideForward* (atacante) e *CenterForward* (centroavante). Cada uma das posições determina diferentes comportamentos de tomadas de decisão no Agent2D. O modelo de posicionamento tático dos jogadores utilizado pelo *Formation Editor* ocorre em função da posição da bola. Para isso, o aplicativo faz uso da triangulação de Delaunay para abstrair, por meio de interpolações, um conjunto representativo de posições da bola no campo de jogo. Veja exemplo na Figura 14.

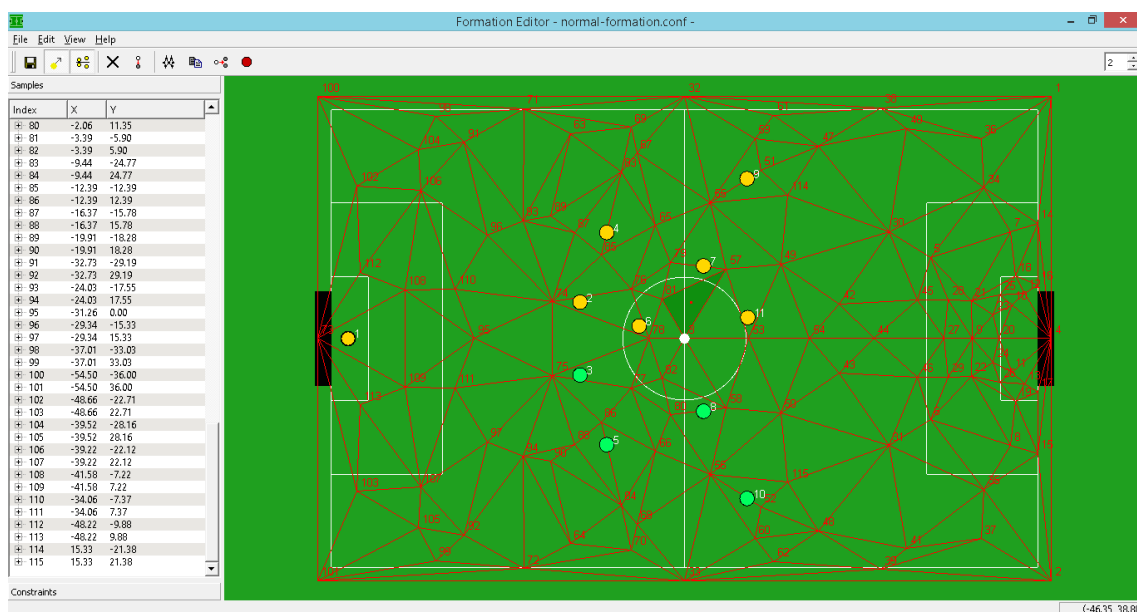


Figura 14 – Triangulação de Delaunay no *Formation Editor*.

### **3.5 Validação do *Soccer Server* como simulador de futebol**

Nesta seção é apresentado um levantamento feito em literatura especializada e estudos próprios acerca de características que, aparentemente, tendem a ocorrer em partidas de futebol e comparadas com dados obtidos de competições de robôs simulados. Essas características são importantes para investigar a validade do modelo matemático/computacional implementado no simulador *Soccer Server* da RoboCup.

OLIVEIRA (2001) expressa que o futebol é um esporte cuja complexidade radica fundamentalmente na existência de múltiplas fontes de incerteza, que têm origem tanto nos dez companheiros do portador da bola, como nos 11 adversários. Pode-se acrescentar ainda outros fatores como vento, diferenças de gramados, árbitro e árbitros auxiliares, etc. Isso indica que a análise do futebol, a fim de encontrar padrões para serem reproduzidos em simulação, não é simples e dificilmente poderá firmar-se sobre os alicerces de um modelo matemático/computacional altamente confiável. No entanto, é tarefa da ciência investigar e caminhar sempre em direção de encontrar melhores modelos que representem um problema.

#### **3.5.1 Aleatoriedade de eventos e resultados das partidas simuladas**

Foram analisadas as partidas do Mundial 2012 da RoboCup (denominado RoboCup 2012) e os jogos da edição 2012 do Competição Latino Americano de Robótica (denominado LARC 2012), ambos na categoria RoboCup *Simulation* 2D, a fim de verificar nos resultados finais se há aleatoriedade de eventos no simulador.

Alguns confrontos merecem ser destacados. Sobre os jogos da RoboCup 2012, a equipe WrightEagle jogou três vezes contra a equipe GDUT e venceu todas as três. No entanto, ressalta-se que em uma partida o placar final ficou apertado (5 a 4) enquanto nas demais a equipe WrightEagle goleou GDUT (10 a 0 e 5 a 1). Algo parecido ocorreu no confronto entre WrightEagle e MarliK, a equipe WrightEagle venceu as duas partidas (5 a 1; 2 a 1) mas de maneiras bem distintas. Ainda, a equipe GDUT jogou três vezes contra a equipe YuShan e venceu duas vezes (6 a 3; 3 a 2) e perdeu uma (1 a 2). Já contra a equipe ITAndroids, a equipe GDUT perdeu uma e venceu outra (2 a 4; 4 a 1). Algo parecido ocorreu nos confrontos entre Axiom e AUT, quando cada equipe venceu um confronto (2 a 1; 1 a 2), e Axiom e UaiSoccer (1 a 2; 2 a 0). Os confrontos entre FCPortugal e robOTTO também merecem ser mencionados, a primeira equipe venceu uma vez (1 a 0) e a segunda duas vezes (0 a 3; 0 a 2). Esses resultados mostram que

quando duas equipes se confrontam, nem sempre a mesma vence em partidas disputadas pelo simulador da RoboCup e indica que há eventos aleatórios ocorrendo.

Na LARC 2012 também ocorreram fatos semelhantes aos relatados anteriormente nos jogos da RoboCup 2012. A Tabela 5 apresenta confrontos entre mesmas equipes e o placar das partidas representado na quantidade de gols que cada time marcou.

Tabela 5 - Confrontos entre mesmas equipes na LARC 2012

Equipe 1	Gols da equipe 1	Gols da equipe 2	Equipe 2
ITAndroids	2	1	GPR
ITAndroids	2	0	GPR
GPR	2	0	UaiSoccer
GPR	1	0	UaiSoccer
GPR	0	3	UaiSoccer
Warthog	3	4	UaiSoccer
Warthog	4	1	UaiSoccer
ITAndroids	5	3	Warthog
ITAndroids	3	2	Warthog
ITAndroids	2	2	Warthog
ITAndroids	3	7	Warthog
UaiSoccer	1	3	ITAndroids
UaiSoccer	0	3	ITAndroids
iBots	0	10	Warthog
iBots	2	8	Warthog
Warthog	2	0	GPR
Warthog	4	1	GPR

Nas partidas da LARC 2012 é interessante observar os confrontos entre ITAndroids e Warthog. Em quatro partidas disputadas, a equipe ITAndroids venceu duas (5 a 3 e 3 a 2), empatou uma (2 a 2) e perdeu uma de goleada (3 a 7). Na fase de grupos da competição a equipe UaiSoccer venceu a equipe Warthog (4 a 3), mas na semi-final perdeu (1 a 4). Acrescenta-se ainda que na LARC 2012 observou-se que a equipe iBots (quinta colocada na competição) venceu a equipe GPR (terceira colocada) durante o *warm up* por 2 a 0 e perdeu para a equipe UaiSoccer (quarta colocada) por 3 a 2. No entanto, a equipe GRP venceu a equipe UaiSoccer na disputa da terceira posição (2 a 0). Fatos esses que corroboram com os apresentados da RoboCup 2012 sobre a influência de eventos aleatórios existentes no simulador sobre os resultados das partidas.

Adicionalmente, foi colocado em confronto duas equipes exatamente iguais (mesmo código-fonte) mas com nomes distintos a fim de diferenciá-las: equipe A e equipe B. O código-fonte usado nesse teste foi a equipe base Agent2D 3.1.1 (AKIYAMA, 2012a), que depende da biblioteca *librcsc* – a versão usada foi 4.1.0 (AKIYAMA, 2012b).

Foram realizados 20 confrontos e os resultados desses confrontos são apresentados na Tabela 6. Nos testes ocorreram quatro empates, nove vitórias da equipe A e sete vitórias da equipe B com os mais diversos placares, ou seja, não foi identificada a ocorrência de um padrão aparente no resultado das partidas.

Tabela 6 - Resultados dos testes uma mesma equipe jogando contra si própria

<b>Número da partida</b>	<b>Gols da equipe A</b>	<b>Gols da equipe B</b>
1	3	1
2	5	4
3	1	1
4	0	1
5	3	1
6	4	0
7	1	4
8	3	0
9	2	2
10	3	6
11	3	1
12	2	3
13	4	3
14	1	2
15	1	7
16	1	1
17	2	4
18	2	1
19	4	3
20	2	2

A fim de identificar se outras características do futebol se fazem presente no modelo do simulador, um levantamento bibliográfico acerca dessas características e o estudo estatístico de partidas de futebol foi necessário visando a validação do simulador. PORTUGAL (2005) expressa que a validação do simulador deve feita por comparações, com base em testes estatísticos, entre os resultados produzidos com os medidos de um sistema já existente, um parecido ou proveniente de um modelo analítico. Para isso, foram assistidas partidas de competições de futebol de robôs e levantadas suas estatísticas a fim de serem comparadas com estatísticas provenientes de partidas de futebol. Os campeonatos de futebol de robôs assistidos foram: RoboCup 2012 e *Latin American Robotics Competition 2012* (LARC 2012).



### 3.5.2 Desempenho físico

Estudos demonstra que há diminuição do desempenho físico de atletas durante partidas de futebol. BANGSBO *et al.* (2006) identificaram, por meio do estudo de *sprints* (corrida de alta intensidade com alta velocidade em um curto período de tempo), que uma mesma distância é percorrida em maior tempo ao término da primeira metade do jogo do que se comparada ao desempenho do jogador antes de uma partida e ao término da segunda metade se comparadas à primeira metade (vide Figura 15). Outros estudos corroboram com comportamentos semelhantes (KRUSTRUP *et al.*, 2006; MOHR *et al.*, 2003; MOHR *et al.*, 2005; REILLY e THOMAS, 1979).

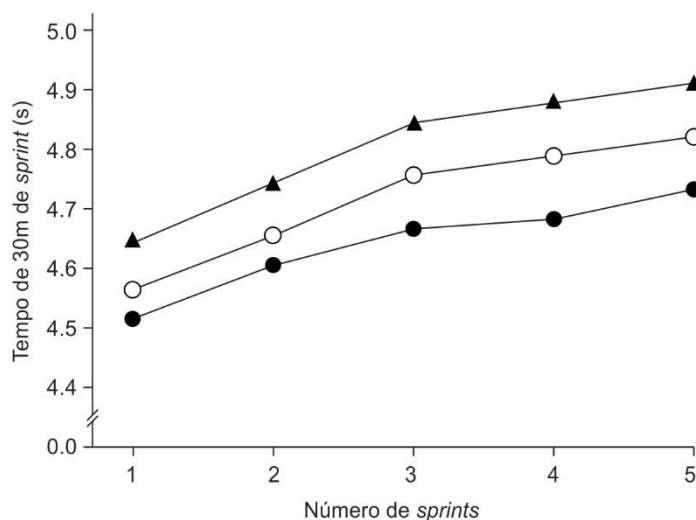


Figura 15 - Cinco *sprints* de 30m separados por um período de 25s de recuperação antes do jogo (círculos abertos), após o primeiro tempo (círculos cheios) e após o segundo tempo (triângulos cheios) de uma partida (BANGSBO *et al.*, 2006)

O manual do *Soccer Server* descreve que o desempenho físico do jogador é simulado por meio de uma variável denominada *stamina*. Também informa que no término do primeiro tempo a *stamina* é recarregada por completa. Assim, os comportamentos físicos dos jogadores simulados são semelhantes em cada metade do jogo. Foram realizadas dez partidas entre as equipes A e B (descritas na sessão anterior), que têm um mesmo código-fonte (Agent2D), e reproduzidos os testes de BANGSBO *et al.* (2006) com cinco *sprints* separados por um período de 28 ciclos de recuperação. O intervalo de 28 ciclos entre os *sprints* foi definido uma vez que uma partida de futebol tem 5400 segundos, que equivale a 90 minutos, e as partidas simuladas ocorrem em 6000 ciclos. Logo, cada segundo equivale a 1,11 ciclo. Assim, 25 segundos correspondem a, aproximadamente, 28 ciclos ( $25 * 1,11 = 27,75$ ). O resultado está expresso na Figura 16.

Verifica-se na Figura 16 que nos *sprints* antes da partida não foi observada perda de desempenho físico. No entanto, nos *sprints* realizados após o primeiro tempo e

segundo tempo, o comportamento de perda de desempenho físico é observada. A perda de desempenho físico entre o primeiro tempo e o segundo tempo é muito próximo e já esperado porque a *stamina* dos jogadores é recuperada integralmente ao término do primeiro tempo. Todavia, foram usadas as configurações padrões do simulador mas existem cinco variáveis de ambiente do simulador, encontradas no arquivo *server.conf*, que podem ser alteradas para que se possa obter resultados ainda mais próximos dos observados por BANGSBO *et al.* (2006). Essas variáveis são: *stamina\_max* (máximo de *stamina* do jogador); *stamina\_inc\_max* (recuperação de *stamina* do jogador); *recover\_dec\_thr* (limiar de decremento do jogador); *recover\_dec* (passo de decremento do jogador); *recover\_min* (mínimo de recuperação do jogador). Vale acrescentar que, além das cinco variáveis que exercem influência sobre o desempenho físicos dos jogadores virtuais, existem outras variáveis de ambiente no simulador.

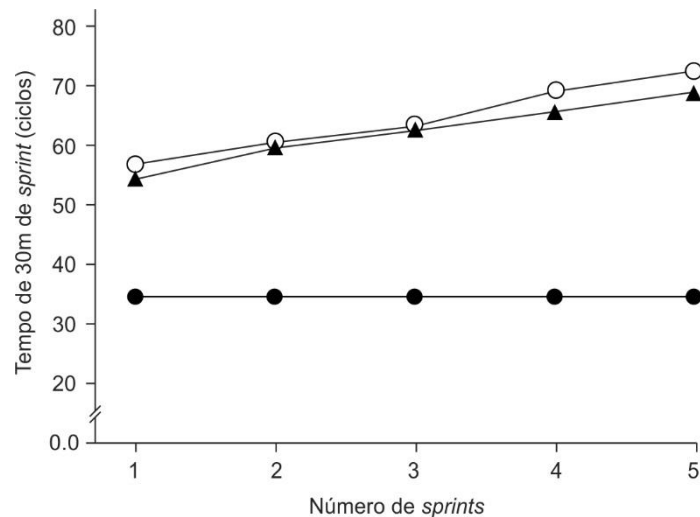


Figura 16 - Cinco *sprints* de 30m separados por um período de 28 ciclos de recuperação antes do jogo (círculos cheios), após o primeiro tempo (círculos abertos) e após o segundo tempo (triângulos cheios) de uma partida

### 3.5.3 Eficiência nos chutes

Outra característica observada na análise de competições de futebol (Copa do Mundo FIFA 2010, UEFA Euro 2012, Conmebol Copa América 2011 e UEFA Champions League 2012/2013) é que equipes que tiveram maior eficiência nos chutes (quantidade de gols dividida pelo total de chutes) geralmente venceram suas partidas e predominantemente não perderam (Tabela 7).

Nas competições analisadas de futebol de robôs simulados, RoboCup 2012 e LARC 2012, também foi constatado que as equipes que tiveram maior eficiência nos chutes tenderam a vencer e perderam poucas vezes (Tabela 8).

Tabela 7 - Relação de eficiência dos chutes e o resultado da partida em competições de futebol

<b>Competição</b>	<b>Venceu</b>	<b>Não perdeu</b>
Copa do Mundo FIFA 2010	70,31%	84,38%
UEFA Euro 2012	70,97%	87,10%
Conmebol Copa América 2011	53,85%	76,92%
UEFA Champions League 2012/2013	72,50%	87,50%

Tabela 8 - Relação de eficiência dos chutes e o resultado da partida em competições de futebol de robôs

<b>Competição</b>	<b>Venceu</b>	<b>Não perdeu</b>
RoboCup 2012	76,00%	80,00%
LARC 2012	66,67%	72,22%

### 3.5.4 Qualidade dos passes

Em relação à posse de bola, as partidas da Copa do Mundo FIFA 2010 e da UEFA Euro 2012 não foram utilizadas uma vez que não foram encontrados dados estatísticos dos passes por partida nestas competições. Assim, foram somente consideradas as partidas das duas primeiras rodadas da fase de grupos da UEFA Champions League 2012/2013 e as partidas da Conmebol Copa América 2011.

Foi identificado que as equipes que tiveram maior aproveitamento proporcional de passes (passes completos divididos pelo total de passes) também tiveram maior posse de bola, Tabela 9. Isso pode ser explicado uma vez que quanto melhor a qualidade do passe, menor a probabilidade de perder a bola e, assim, uma equipe fica com ela mais tempo.

Tabela 9 - Maior aproveitamento de passes e posse de bola em competições de futebol

<b>Competição</b>	<b>Maior aproveitamento de passes e posse de bola</b>
Conmebol Copa América 2011	65,38%
UEFA Champions League 2012/2013	80,00%

Foi observado ainda tendência de equipes com maior aproveitamento proporcional de passes também terem maior posse de bola, algo que também ocorreu nas competições observadas de futebol de robôs (Tabela 10).

Tabela 10 - Maior aproveitamento de passes e posse de bola em competições de futebol de robôs

<b>Competição</b>	<b>Maior aproveitamento de passes e posse de bola</b>
RoboCup 2012	80,00%
LARC 2012	72,22%

### 3.5.5 Gols durante uma partida

SILVA (2007) analisou dados de 2.902 partidas de oito dos principais campeonatos nacionais profissionais de futebol (alemão, argentino, brasileiro, espanhol, francês, holandês, inglês e italiano). Como resultado, foi descoberto que, ao longo de uma partida a incidência de gols tende a aumentar (Figura 17). Conclusão que também chegaram PALOMINO *et al.* (2000) ao analisarem, entre 1995 e 1998, o resultado de 2.885 partidas da primeira divisão dos principais campeonatos nacionais do mundo (Itália, Inglaterra e Espanha), Figura 18.

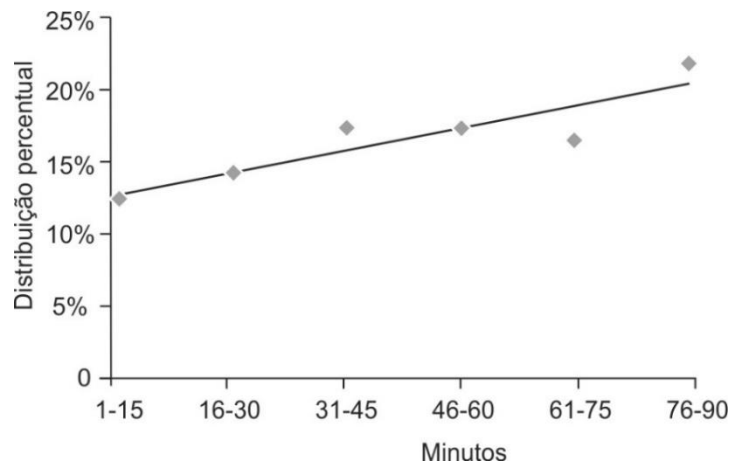


Figura 17 - Frequência dos gols no decorrer do tempo total de jogo em intervalo de 15 minutos. Adaptado de SILVA (2007)

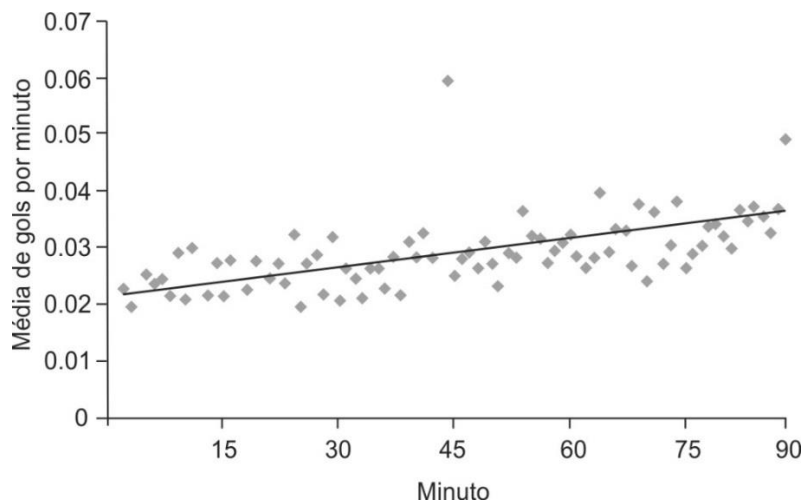


Figura 18 - Frequência de gols por minuto em uma partida de futebol. Adaptado de PALOMINO *et al.* (2000)

Comportamento similar também aparenta ocorrer nos jogos simulados de futebol de robôs. A Figura 19 apresenta a incidência de gols na RoboCup 2012 e na LARC 2012 em intervalos de 200 ciclos. Observa-se, na Figura 19, que a incidência de gols tende a aumentar à medida que uma metade de jogo se desenvolve.

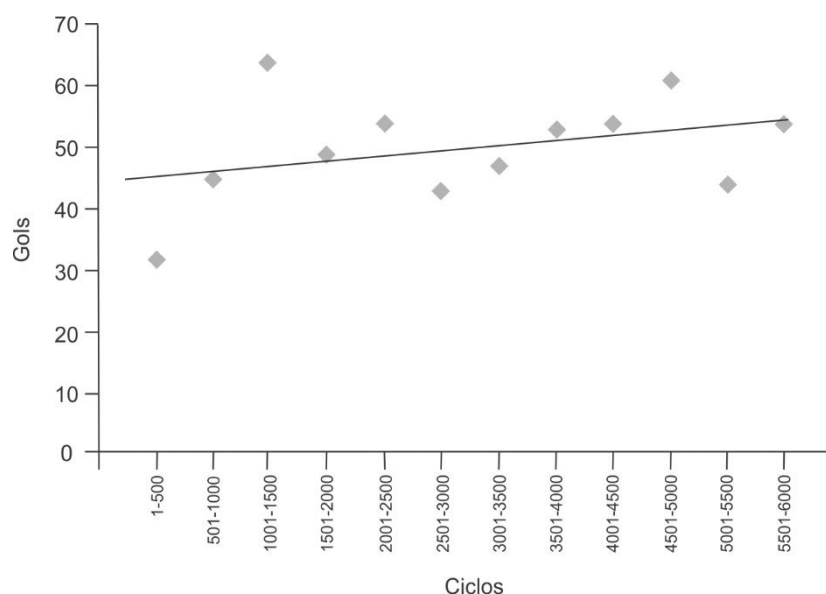


Figura 19 - Incidência de gols na RoboCup 2012 e LARC 2012

### 3.5.6 Contra-ataques

BARBOSA (2009) apurou que o método de jogo ofensivo que leva a um maior número de sequências ofensivas positivas, que resultaram em finalização, é o contra-ataque. Esse resultado é corroborado por REINA *et al.* (1997), CASTELO (1994) e GARGANTA *et al.* (2002).

De modo similar, no simulador identificou-se que, na RoboCup 2012, 56% dos chutes em contra-ataques resultaram em gols, contra o aproveitamento de 42,18% das outras formas de finalização (ataque posicional, ataque rápido e bolas paradas). Já na LARC 2012, 60,53% dos chutes em contra-ataques resultaram em gols, contra o aproveitamento de 47,46% das outras formas de finalização. Veja Tabela 11.

Tabela 11 - Gols proporcionais aos chutes em competições de futebol de robôs

Competição	Gols em chutes de contra-ataque	Gols em chutes que não em contra-ataque
RoboCup 2012	56,00%	42,18%
LARC 2012	60,53%	47,46%

### 3.5.7 Relação entre passes e chutes

Foi observado, a partir das partidas analisadas da Conmebol Copa América 2011 e da UEFA Champions League 2012/2013 que aparenta haver relação entre equipes que têm maior aproveitamento proporcional de passes (número de passes certos divididos pelo total de passes) e as equipes que chutam mais. Foi observado que em 61,54% das partidas da Conmebol Copa América 2011 a equipe que teve maior aproveitamento

proporcional de passes também chutou mais; em 60,26% das partidas da UEFA Champions League 2012/2013 também foi observado esse fenômeno. Veja Tabela 12.

Tabela 12 - Equipes de futebol que têm maior aproveitamento de passes chutam mais

<b>Competição</b>	<b>Maior aproveitamento de passes chuta mais</b>
Conmebol Copa América 2011	61,54%
UEFA Champions League 2012/2013	60,26%

Nas competições de futebol de robôs analisadas (RoboCup 2012 e LARC 2012) também ocorreu, na maioria das partidas, o fato de equipes que tiveram maior aproveitamento proporcional de passes também chutaram mais (68,00% na RoboCup 2012 e 66,67% na LARC 2012). Vide Tabela 13.

Tabela 13 - Equipes de futebol de robôs que têm maior aproveitamento de passes chutam mais

<b>Competição</b>	<b>Maior aproveitamento de passes chuta mais</b>
RoboCup 2012	68,00%
LARC 2012	66,67%

### 3.5.8 Supremacia em posse e passe e sua implicação nos chutes

Identificou-se que em jogos da primeira fase da UEFA Champions League 2012/2013 que quando uma equipe teve posse de bola superior ao adversário e maior aproveitamento de passes (quantidade de passes certos divididos pelo total de passes) do que o oponente, esta equipe chutou menos em, aproximadamente, 28,12% dos casos (18 jogos de 64). Esse dado é representativo uma vez que em quase 3/4 (três quartos) dos casos, cerca de 71,88% (46 jogos de 64), não chutou menos que o adversário e vai ao encontro dos dados estatísticos da Copa América 2011 (Tabela 14).

Tabela 14 - Relação posse de bola e aproveitamento de passes sobre a incidência de chutes em competições de futebol

<b>Competição</b>	<b>Maior posse de bola e aproveitamento de passes então não chutou menos</b>
Conmebol Copa América 2011	88,24%
UEFA Champions League 2012/2013	71,88%

Na Copa América 2011, quando uma equipe teve posse de bola superior ao oponente e maior aproveitamento de passes, esta equipe chutou menos em cerca de 11,76% dos casos (dois jogos de 17). Complementarmente, isso significa que em cerca de 88,24% (15 jogos de 17) dessas partidas a equipe não chutou menos que o adversário. Nas competições de futebol de robôs (RoboCup 2012 e LARC 2012) essa tendência

também esteve presente (Tabela 15). Em partidas da RoboCup 2012, quando uma equipe teve posse de bola superior ao oponente e maior aproveitamento de passes, ela não chutou menor que o adversário em 70% dos casos. Na LARC 2012 esse fenômeno chegou em 77,78%.

Tabela 15 - Relação posse de bola e aproveitamento de passes sobre a incidência de chutes em competições de futebol de robôs

Competição	Maior posse de bola e aproveitamento de passes então não chutou menos
RoboCup 2012	70,00%
LARC 2012	77,78%

### 3.5.9 Aproveitamento de passes

Por fim, tanto nas competições de futebol (Conmebol Copa América 2011 e UEFA Champions League 2012/2013) quanto nas competições de futebol de robôs (RoboCup 2012 e LARC 2012), foi observado que quanto maior a diferença do aproveitamento de passes (quantidade de passes certos divididos pelo total de passes), as equipes que acertaram proporcionalmente mais passes não perderam (Tabela 16).

Tabela 16 - Relação de eficiência dos passes e o resultado da partida em competições de futebol e futebol de robôs

Competição	Diferença do aproveitamento de passes		
	Menor que 5	Maior ou igual a 5 e menor que 10	Maior que 10
Conmebol Copa América 2011	55,56%	80,00%	83,33%
UEFA Champions League 2012/2013	66,67%	75,00%	75,00%
RoboCup 2012	57,14%	90,00%	100,00%
LARC 2012	33,33%	100,00%	100,00%

### 3.5.10 Considerações do modelo matemático/computacional do *Soccer Server*

A partir das estatísticas levantadas, foi verificado que o simulador tende a obter resultados similares ou próximos das partidas de futebol, ou seja, o modelo matemático-computacional do simulador se mostrou promissor para simular partidas de futebol. Modelar é traduzir os aspectos mais importantes dos sistemas físicos para a matemática, não é fazer um retrato completo da realidade. Vale acrescentar que o intuito deste trabalho não é de simular jogadores ou equipes, mas simular conceitos táticos em diferentes circunstâncias a fim de analisar a relevância deles.

## 4. Solução proposta

Este capítulo descreve detalhadamente todas as soluções implementadas computacionalmente necessárias para o cumprimento dos objetivos deste trabalho e, para facilitar sua compreensão, foi dividido em três partes.

Na primeira parte, seção 4.1, é explanado sobre a transcrição em algoritmos dos conceitos de Modelo Dualista e Modelo de Quatro Momentos, que são Modelos de Jogo. Para implementar computacionalmente o Modelo Dualista foi necessário desenvolver algoritmo capaz de determinar a equipe detentora da posse de bola. Já para o Modelo de Quatro Momentos, foi identificado um contraexemplo que demonstrar a incompletude desse modelo. Assim, foi proposto um modelo original fortemente inspirado no Modelo de Quatro Momentos, denominado Modelo de Quatro Estados. Para implementar o Modelo de Quatro Estados foi utilizado o algoritmo de posse de bola, utilizado no Modelo Dualista, e ainda foi necessário desenvolver algoritmo capaz de determinar se uma defesa está ou não organizada, afinal esta informação é importante para determinar em qual estado se encontra o jogo uma vez que existem dois estados para quando uma equipe se encontra com posse de bola e dois estados sem posse de bola. Para isso, os Princípios Fundamentais Defensivos, apresentados na seção 2.3.1, foram utilizados. Para cada princípio foi projetado um algoritmo e as saídas dos algoritmos serviram de entrada para um sistema inteligente de tomada de decisão, Rede Neuronal e Sistema de Inferência Fuzzy, que classifica as defesas das equipes quanto à sua organização. Testes verificando a validade da solução são apresentados no capítulo cinco.

A segunda parte, seção 4.2, apresenta o aplicativo *Soccer Scenes*, desenvolvido para gerar cenários de jogos aleatoriamente e facilitar a implementação e validação, via testes, de algoritmos para a equipe iBots a partir da análise estática de cenários do futebol. Também é explicado como um algoritmo desenvolvido em cenários estáticos foi utilizado para ser executado em um ambiente dinâmico, caso do futebol de robôs.

Já na terceira parte, seção 4.3, está detalhada a implementação computacional da equipe iBots, que foi desenvolvida neste trabalho uma vez que era necessária para realização dos testes. São descritos os algoritmos implementados: estratégias defensivas e ofensivas em âmbito tático, resolução de conflitos entre agentes, movimentação dos agentes com algoritmo de planejamento de trajetória, sistema tático, compactação da



Teoria do Futebol, política de tomada de decisão do agente com posse de bola e os princípios técnicos (domínio de bola, passes, chute e desarme).

#### 4.1 Modelo de jogo

O Modelo de Jogo é constituído, essencialmente, por princípios que se articulam entre si e que dão uma certa forma de jogar, com determinados padrões de comportamento em diferentes momentos tanto ofensivos, como defensivos (OLIVEIRA, 2003). Com o tempo surgiram diferentes concepções de modelo de mundo, que classificam o andamento do jogo por um processo de abstração ao reduzir o conteúdo e o fenómeno observável. Atualmente, os principais modelos são o Modelo Dualista e o Modelo de Quatro Momentos, objetos de estudo desta tese. Nesta seção são descritos como foram transcritos esses conceitos em algoritmos.

##### 4.1.1 Modelo Dualista

No Modelo Dualista, uma equipe ao estar no estado ofensivo deve atacar por ter a posse de bola e não ter a bola implica em defender (BAYER, 1994). Como o próprio nome indica, o Modelo Dualista trata o futebol como tendo dois estados: ofensivo e defensivo. Isso significa que para um agente identificar o estado do jogo basta que ele saiba qual time tem a posse de bola. Assim, foi implementado o método *PosseDeBola()* que, a partir de informações do modelo de mundo de cada agente, retorna se a equipe tem ou não a posse de bola, que está expresso na máquina de estados da Figura 20. O algoritmo é apresentado no Quadro 1, o atributo *estado* armazena o estado corrente da partida (zero representa uma situação indefinida, +1 posse de bola da equipe do agente e -1 posse de bola da equipe adversária).

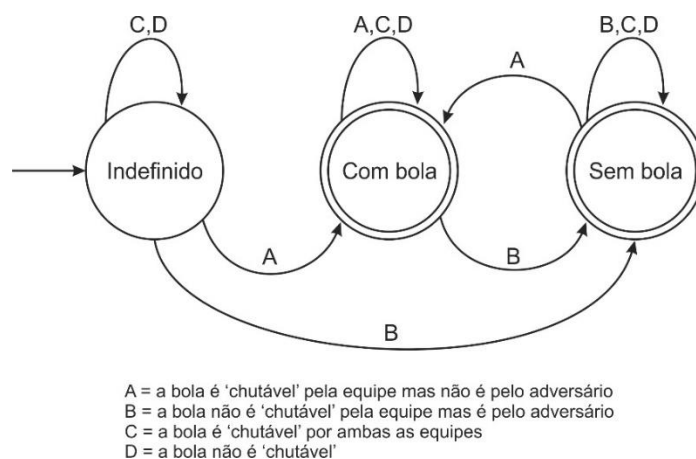


Figura 20 - Máquina de estados que define que equipe tem a posse da bola

Quadro 1 - Algoritmo de posse de bola

```
void SamplePlayer::PosseDeBola() {  
    if(estado==-1 && world().existKickableTeammate())  
        estado=1;  
    else if (estado==0 && world().existKickableOpponent())  
        estado=-1;  
    else if (estado==1) {  
        if(world().existKickableTeammate())  
            estado=1;  
        else if(world().existKickableOpponent())  
            estado=-1;  
        else  
            estado=1;  
    }  
    else if(estado==-1) {  
        if(world().existKickableOpponent())  
            estado=-1;  
        else if(world().existKickableTeammate())  
            estado=1;  
        else  
            estado=-1;  
    }  
}
```

O fluxograma da Figura 21 apresenta como o algoritmo de posse de bola é utilizado por uma equipe para indicar qual estratégia utilizar sob a ótica do Modelo Dualista. Se a posse de bola for da equipe, então o jogo entre equipes encontra-se no estado ofensivo na perspectiva da equipe controlada, que deve atacar orientada por uma tática ofensiva; se a posse de bola for da equipe adversária, então o jogo entre equipes encontra-se no estado defensivo na perspectiva da equipe controlada, que deve se defender orientada por uma tática defensiva.

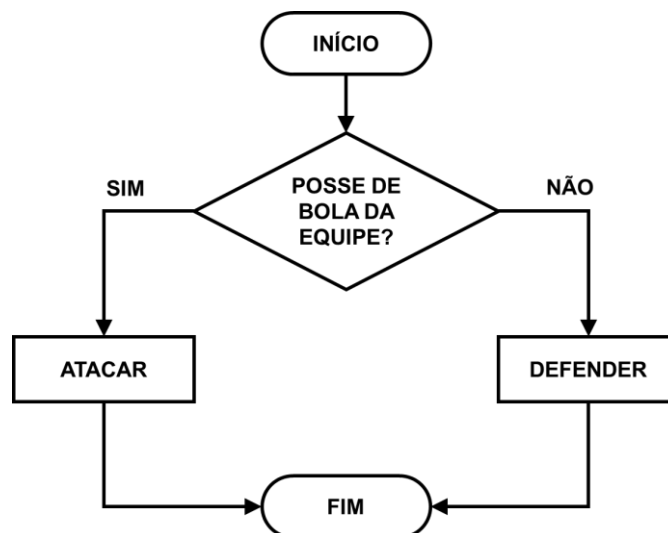


Figura 21 - Fluxograma do Modelo Dualista

#### 4.1.2 Modelo de Quatro Momentos

O Modelo de Quatro Momentos considera que no futebol uma equipe necessita tratar taticamente de maneira diferente quatro situações do jogo. Este modelo expressa que dois momentos são referentes à quando a equipe está sem a posse de bola e dois quando a equipe está com a posse de bola. Logo, o algoritmo de posse de bola (Quadro 1) também é necessário na implementação do Modelo de Quatro Momentos. Contudo, somente a posse de bola não é suficiente para distinguir os momentos com ou sem posse de bola. Se a equipe está com a posse de bola ela pode estar no momento de Organização Ofensiva ou na Transição Defesa-Ataque; se a equipe está sem a posse de bola ela pode estar no momento de Organização Defensiva ou de Transição Ataque-Defesa. Assim, em termos operacionais do Modelo de Quatro Momentos, também é necessário classificar uma defesa como estando ou organizada ou desorganizada.

Isso porque, de acordo com QUEIROZ (2003) e FESTA (2009), o objetivo do momento de Transição Defesa-Ataque é o de aproveitar a desorganização posicional do adversário e progredir em direção à baliza adversária para criar, o mais rápido possível, situações de gol. Complementarmente, entende-se que o objetivo da Transição Ataque-Defesa é, de maneira rápida, obter organização posicional defensiva da equipe a fim de evitar progressão do adversário em direção ao gol. Para corroborar, GARGANTA (2005) diz que as transições (defesa-ataque e ataque-defesa) são momentos de desequilíbrios que se constituem fases críticas do jogo. Entende-se que uma equipe ao atacar tende a se desorganizar defensivamente e ao defender tende a se desorganizar ofensivamente, que são o que ocasionam os desequilíbrios constituintes das fases críticas do jogo. Logo, a mudança de um momento a outro está intimamente associada ao conceito de organização posicional defensiva. Organização posicional se refere ao posicionamento esperado pela equipe quando ela está organizada.

Isso significa que, de acordo com o Modelo de Quatro Momentos, uma equipe ao recuperar a posse de bola, entra no momento Transição Defesa-Ataque e mudará para o momento Organização Ofensiva assim que o time adversário passar a ter organização posicional defensiva. Somente sai do momento Organização Ofensiva se a equipe perder a posse de bola, vai para o momento Transição Ataque-Defesa e saindo deste para o momento Organização Defensiva quando sua defesa estiver com organização posicional defensiva.

Note que não existe mudança do momento Organização Defensiva para o momento Transição Ataque-Defesa; do mesmo modo não existe transição do momento

Organização Ofensiva para o momento Transição Defesa-Ataque. Pode até parecer racional a ausência das mudanças desses momentos uma vez que uma equipe não deve se desorganizar defensivamente uma vez que já se encontra organizada. Mas será que isso não ocorre em campo? Se ocorrer, então o Modelo de Quatro Momentos será refutado por meio de um contraexemplo, que é uma exceção, ou seja, um caso particular que falseia um conceito.

Como contraexemplo é apresentada a jogada que resultou no primeiro gol do confronto entre FC Barcelona e Paris Saint-Germain FC (PSG), que ocorreu no dia 21 de abril de 2015, válido pelas quartas de finais da UEFA Champions League 2014/2015. Aos 12 minutos e 40 segundos do primeiro tempo, o Barcelona estava com a posse de bola no campo de ataque e a defesa do PSG encontrava-se em organização posicional (momento Organização Ofensiva para o Barcelona e momento Organização Defensiva para o PSG), vide Figura 22a (para melhor visualização, o jogador portador da bola está destacado com uma elipse). Na sequência, o FC Barcelona voltou a bola para seu campo de defesa uma vez que a equipe parisiense estava organizada defensivamente e, com isto, esperava se reorganizar ofensivamente para obter maior penetração do seu ataque, a Figura 22b ilustra esta ocorrência ao tempo 12'48". Então, o PSG sai para pressionar a defesa do Barcelona. Dez segundos depois (12'58"), o que se observa na Figura 22c é a defesa do PSG em desorganização posicional, o que não é esperado pelo Modelo de Quatro Momentos. A equipe catalã aproveitando-se da desorganização defensiva do PSG faz um gol, Andrés Iniesta dá assistência para Neymar Jr finalizar aos 13 minutos e 1 segundo (Figura 22d).

Diante do contraexemplo apresentado, conclui-se que o Modelo de Quatro Momentos é incapaz de representar completamente o futebol. Todavia, seu uso recorrente nas principais equipes do mundo e seu relativo sucesso indica que esse modelo não deve estar de todo errado e alterações no Modelo de Quatro Momentos podem fazer com que ele passe a responder mais adequadamente ao futebol. Logo, ou há quatro momentos distintos e faltam mudanças entre alguns momentos ou as ausências das mudanças entre momentos ocorrem entre momentos que são equivalentes, o que reduziria o Modelo de Quatro Momentos ao Modelo Dualista. Diante da primeira possibilidade, de realizar alterações no Modelo de Quatro Momentos, surgiu um modelo original proposto nesta tese, que é o Modelo de Quatro Estados.

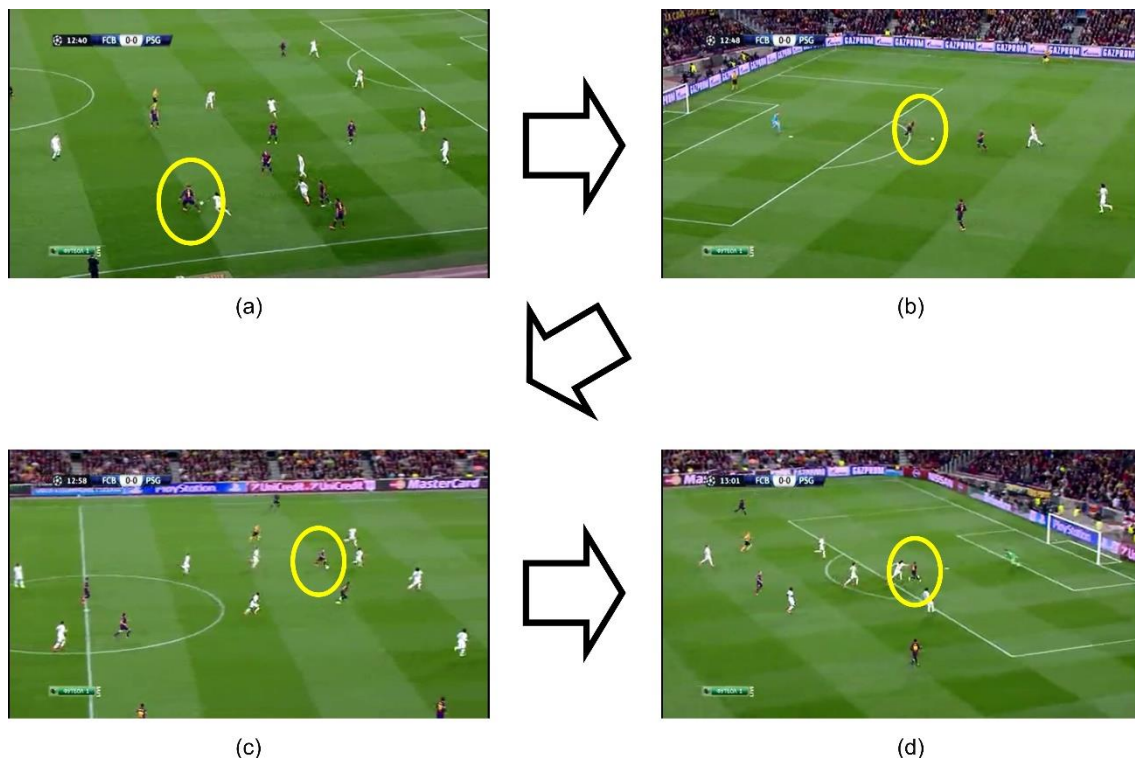


Figura 22 - Jogada que resultou em gol da partida entre Barcelona e PSG ocorrida no dia 21 de abril de 2015, válida pela UEFA Champions League, é um contraexemplo ao Modelo de Quatro Momentos.

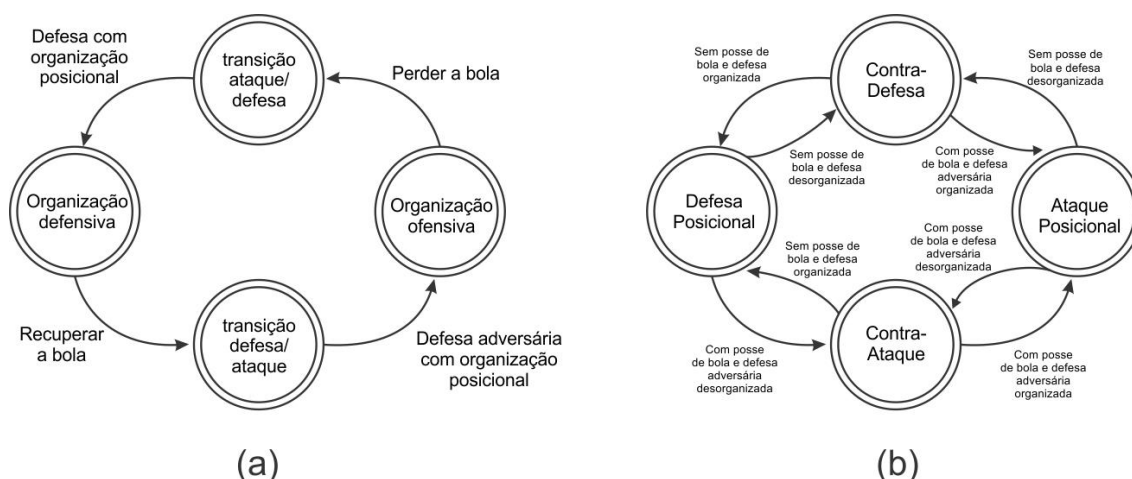
#### 4.1.3 Modelo de Quatro Estados

Este trabalho propõe um modelo original fortemente inspirado no Modelo de Quatro Momentos, denominado Modelo de Quatro Estados. O termo estado, ao invés de momento, passa a representar uma situação específica que compõe o Modelo de Jogo do futebol e difere do termo transição, que no Modelo de Quatro Momentos adota transição como sendo um momento do jogo. Assim, no Modelo de Quatro Estados, transição é a mudança de um estado a outro, conceito utilizado no mesmo sentido das máquinas de estados.

Quais são os estados do Modelo de Quatro Estados e o que eles representam? Dois estados são os caracterizados pelos momentos Organização Defensiva (equipe sem posse de bola e com organização posicional) e Organização Ofensiva (equipe com posse de bola e defesa adversária com organização posicional) do Modelo de Quatro Momentos, estados estes que foram chamados, no Modelo de Quatro Estados, de Defesa Posicional e Ataque Posicional, respectivamente. Os outros dois estados representam: equipe com posse de bola e defesa adversária em desorganização posicional, denotado estado Contra-Ataque (equivalente ao momento Transição Defesa-Ataque); equipe sem posse de bola e

com desorganização posicional, nomeado estado Contra-Defesa (equivalente ao momento Transição Ataque-Defesa).

Pode parecer preciosismo ou apenas mudança de terminologia, mas não é. Essa sutil distinção resulta em diferente sequência linear do andamento de uma partida de futebol. Veja a comparação entre os modelos de Quatro Momentos (Figura 23a) e de Quatro Estados (Figura 23b). Note que o estado sem posse de bola e com desorganização posicional, que seria equivalente ao momento Transição Ataque-Defesa, não é mais o tempo necessário para a defesa da equipe passar a ter organização posicional defensiva, mas a situação em que a equipe está sem posse de bola e não está com a defesa posicionada; do mesmo modo que o estado com posse de bola e defesa adversária em desorganização posicional (que seria equivalente ao momento Transição Defesa-Ataque) não é mais o tempo necessário para a defesa do time adversário se organizar posicionalmente, a situação em que a equipe está com posse de bola e a defesa adversária não está posicionada.



(a) (b)  
 Figura 23 - Comparação entre o Modelo de Quatro Momentos (a) e o Modelo de Quatro Estados (b)

Como visto na Figura 23, com o Modelo de Quatro Estados surgiram as quatro transições ausentes do Modelo de Quatro Momentos e que foram evidenciadas no contraexemplo apresentado na seção 4.1.2. Em suma, essas transições indicam que, mesmo após se organizar defensivamente, uma equipe pode se desorganizar.

Como já mencionado, para diferenciar os estados defensivos (Organização Defensiva e Contra-defesa) e os estados ofensivos (Organização Ofensiva e Contra-ataque), é necessário um algoritmo capaz de classificar as defesas como ou organizadas ou desorganizadas. O fluxograma da Figura 24 apresenta como uma equipe define qual estratégia utilizar sob a ótica do Modelo de Quatro Estados.

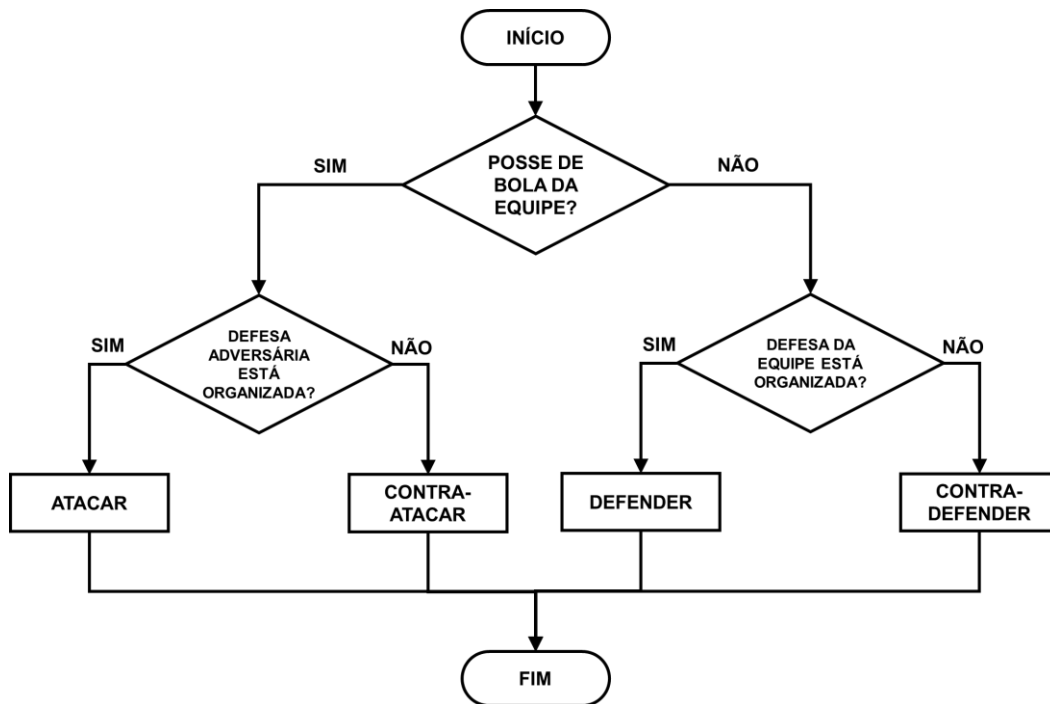


Figura 24 - Fluxograma do Modelo de Quatro Estados

Contudo, em literatura especializada não foram encontradas informações sobre o que determina uma defesa desorganizada. Todavia, é descrito o que é uma defesa organizada, que é uma defesa que obedece aos princípios fundamentais defensivos: contenção, cobertura defensiva, concentração, equilíbrio e unidade defensiva. O problema é que a definição de uma defesa organizada não é suficiente para definir uma defesa desorganizada. Qual a tolerância da organização defensiva sobre cada uma dessas variáveis? Algumas dessas variáveis podem ser flexibilizadas e mesmo assim a defesa continuar organizada? Essas perguntas estão sem respostas.

Foi decidido, então, pelo desenvolvimento de algoritmos para quantificar a qualidade de cada um dos princípios fundamentais defensivos. Posteriormente, com ajuda de especialistas da área, esses algoritmos foram avaliados e combinados para tentar determinar de forma eficiente a organização/desorganização defensiva de um time. Nas próximas seções são descritos, detalhadamente, os algoritmos desenvolvidos.

#### 4.1.3.1 Contenção

A contenção caracteriza-se pela rápida realização de oposição ao portador da bola na tentativa de induzir o adversário ao erro e, por consequência, sua equipe recuperar a posse de bola. Assim, a contenção deve ser feita pelo defensor com maiores condições de se opor ao jogador com a posse de bola. Em termos operacionais, a contenção tem como

objetivo (COSTA *et al.*, 2011a): impedir o chute a gol; impedir a progressão; retardar ação do oponente; direcionar o jogo para as zonas com menor risco.

Para identificar o defensor com maiores condições de se opor ao portador da bola foram utilizadas três variáveis. A primeira é a distância euclidiana entre a bola  $b$  e um jogador  $j_i$ , onde  $i$  é a identificação de um defensor  $j$ . Sejam  $A(x_1, y_1)$  e  $B(x_2, y_2)$  dois pontos quaisquer plano, a distância entre os pontos  $A$  e  $B$  coincide com o módulo do vetor  $\overline{AB}$  (equação um).

$$d_{AB} = |\overline{AB}| = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad (1)$$

Foi adotado que, se a distância é maior do que 68m, que é a largura do campo de jogo, então a distância considerada passa a ser 68m (equação dois).

$$d'_{AB} = \begin{cases} d_{AB} & \text{se } d \leq 68 \\ 68 & \text{se } d > 68 \end{cases} \quad (2)$$

Posteriormente, como uma distância menor é mais relevante do que uma distância maior, é feita a transformação matemática da equação três e obtém-se a variável  $d_1$ .

$$d_1 = 1 - \frac{d'_{AB}}{68} \quad (3)$$

Para exemplificar o resultado da variável  $d_1$ , um cenário é apresentado na Figura 25. Na figura, quanto mais clara a região em que o jogador se encontra, maior a relevância do defensor sob a ótica da variável  $d_1$ .

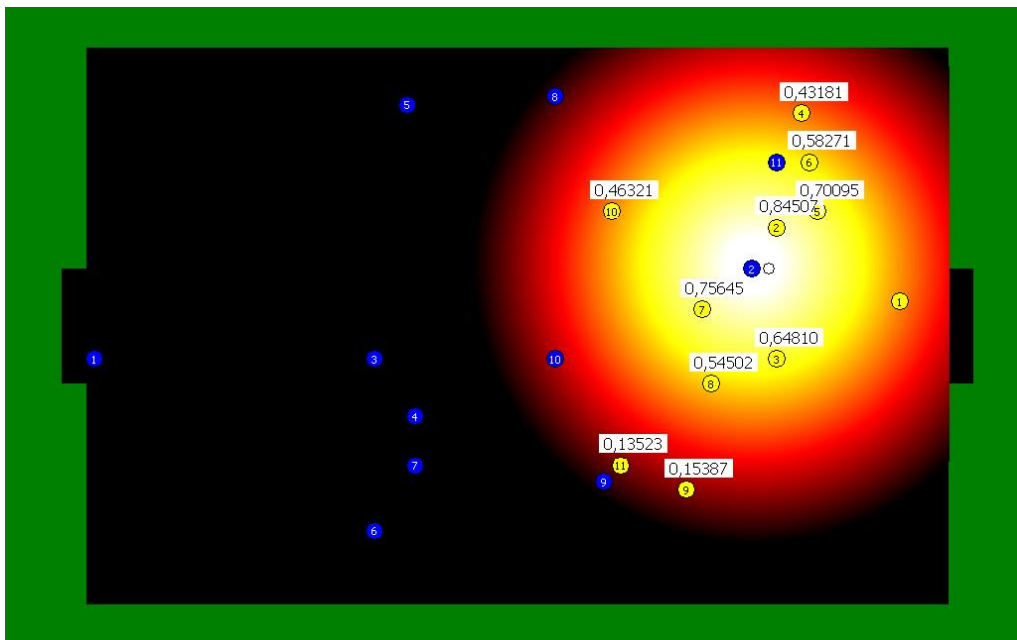


Figura 25 – Cenário de exemplo da variável  $d_1$  da contenção. Quanto mais clara a região em que o jogador se encontra, maior a relevância do defensor.



A segunda variável é resultante do ângulo entre os vetores  $\overrightarrow{b_{j_i}}$  e  $\overrightarrow{b_g}$ , onde  $b$  é a posição da bola,  $i$  é a identificação de um defensor  $j$  e  $g$  é o centro do gol da equipe que se defende. O ângulo entre dois vetores  $\vec{u} = \overrightarrow{b_{j_i}}$  e  $\vec{v} = \overrightarrow{b_g}$ , não nulos, é o ângulo  $\theta = \text{ang}(\vec{u}, \vec{v}) = j_i \hat{P} g$  entre os segmentos orientados que representam os vetores, com a restrição  $0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$ , quando os vetores são transportados para um mesmo ponto de origem  $p$ . Se o ângulo  $\text{ang}(\vec{u}, \vec{v})$  for maior do  $90^\circ$ , então é feita a transformação matemática apresentada na equação quatro.

$$\text{ang}'(\vec{u}, \vec{v}) = \begin{cases} \text{ang}(\vec{u}, \vec{v}) & \text{se } \text{ang}(\vec{u}, \vec{v}) \leq 90 \\ 180 - \text{ang}(\vec{u}, \vec{v}) & \text{se } \text{ang}(\vec{u}, \vec{v}) > 90 \end{cases} \quad (4)$$

Em seguida, a partir da equação cinco, obtém-se a variável  $d_2$ .

$$d_2 = 0.7 + \left(1 - \frac{\text{ang}'(\vec{u}, \vec{v})}{90}\right) * 0.3 \quad (5)$$

Com o mesmo cenário apresentado na Figura 25, é exemplificado o resultado da variável  $d_2$ . Assim como na Figura 26, quanto mais clara a região em que o jogador ser encontra, maior a relevância do defensor.

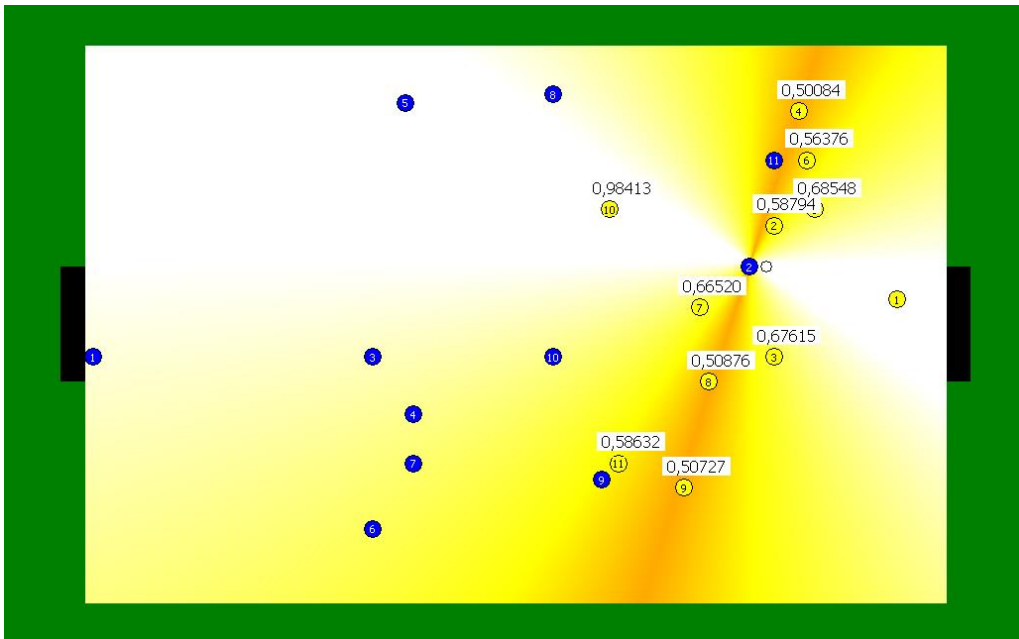


Figura 26 – Cenário de exemplo da variável  $d_2$  da contenção. Quanto mais clara a região em que o jogador ser encontra, maior a relevância do defensor.

Como é mais relevante defensivamente um defensor que se encontra no centro de jogo (entre a bola e a baliza defensiva), a terceira variável se encarrega de realizar este tratamento. Todavia, adicionalmente quanto mais próximo um defensor se encontra da baliza defensiva, mais relevante ele é defensivamente. Assim, na variável  $d_3$  do algoritmo de contenção, o centro de jogo sofre uma leve modificação.

Para isso, como primeira parte é calculado o ângulo entre os vetores  $\overrightarrow{bo_i}$  e  $\overrightarrow{bg}$ , onde  $b$  é a posição da bola,  $i$  é a identificação de um oponente  $o$  e  $g$  é o centro do gol da equipe que se defende. Como já expressado, o ângulo entre dois vetores  $\vec{t} = \overrightarrow{bo_i}$  e  $\vec{v} = \overrightarrow{bg}$ , não nulos, é o ângulo  $\theta = \text{ang}(\vec{t}, \vec{v}) = o_i \hat{P} g$  entre os segmentos orientados que representam os vetores, com a restrição  $0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$ , quando os vetores são transportados para um mesmo ponto de origem  $p$ .

Se o resultado de  $\text{ang}(\vec{t}, \vec{v})$  para um oponente  $o_i$  for menor ou igual do que  $90^\circ$ , então significa que oponente  $i$  está no centro de jogo e, neste caso, o valor da variável  $d_3$  será um; se não, está fora do centro de jogo e, neste caso, são necessários outros recursos matemáticos para obtenção do valor da variável  $d_3$ .

O algoritmo proposto determina a equação da reta que passa pela bola com  $\text{ang}(\vec{t}, \vec{v}) = 90^\circ$ . Para isso, é necessário descobrir a posição no plano cartesiano dos pontos  $p_1$  (equação seis) e  $p_2$  (equação sete), que são posições fora do campo de jogo e que o segmento de reta entre elas cruza toda a largura do campo. Veja exemplo na Figura 27.

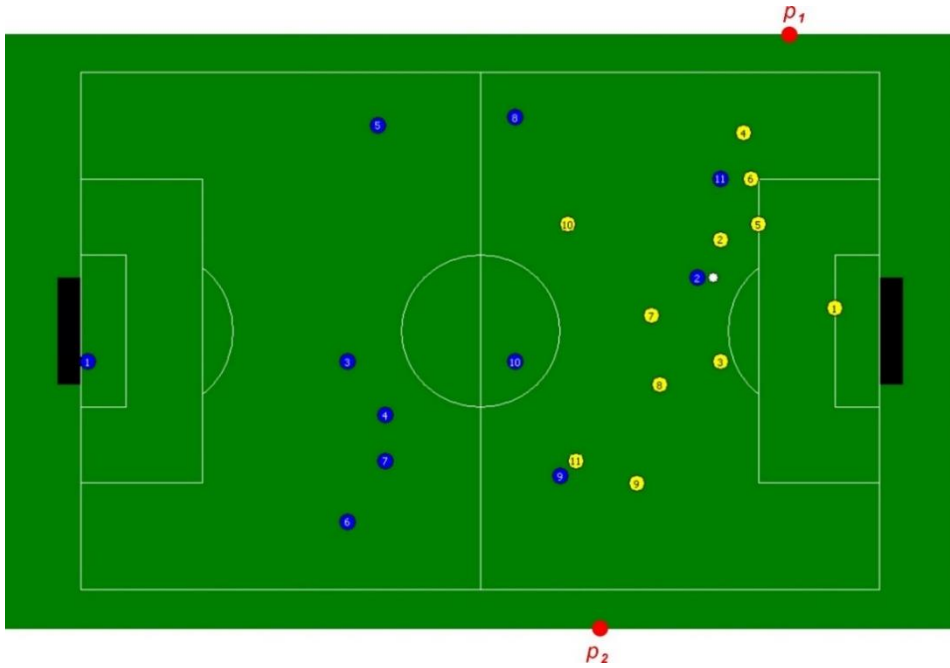


Figura 27 – Exemplo de pontos  $p_1$  e  $p_2$  na variável  $d_3$  da contenção.

$$\begin{aligned} p1_x &= bola_x + \cos(\text{ang}(\vec{t}, \vec{v}) + 90) * \infty \\ p1_y &= bola_y + \text{sen}(\text{ang}(\vec{t}, \vec{v}) + 90) * \infty \end{aligned} \tag{6}$$

$$\begin{aligned} p2_x &= bola_x + \cos(\text{ang}(\vec{t}, \vec{v}) - 90) * \infty \\ p2_y &= bola_y + \text{sen}(\text{ang}(\vec{t}, \vec{v}) - 90) * \infty \end{aligned} \tag{7}$$

Onde  $\infty$  é um valor suficientemente grande para garantir que os pontos  $p_1$  e  $p_2$  estejam fora do campo de jogo.

Agora é possível determinar a equação da reta dos pontos  $p_1$  e  $p_2$  (vide equação oito). Exemplo apresentado na Figura 28.

$$\begin{aligned}
 ax + by + c &= 0 \\
 a &= p_{1y} - p_{2y} \\
 b &= p_{2x} - p_{1x} \\
 c &= p_{1x} * p_{2y} - p_{2x} * p_{1y}
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

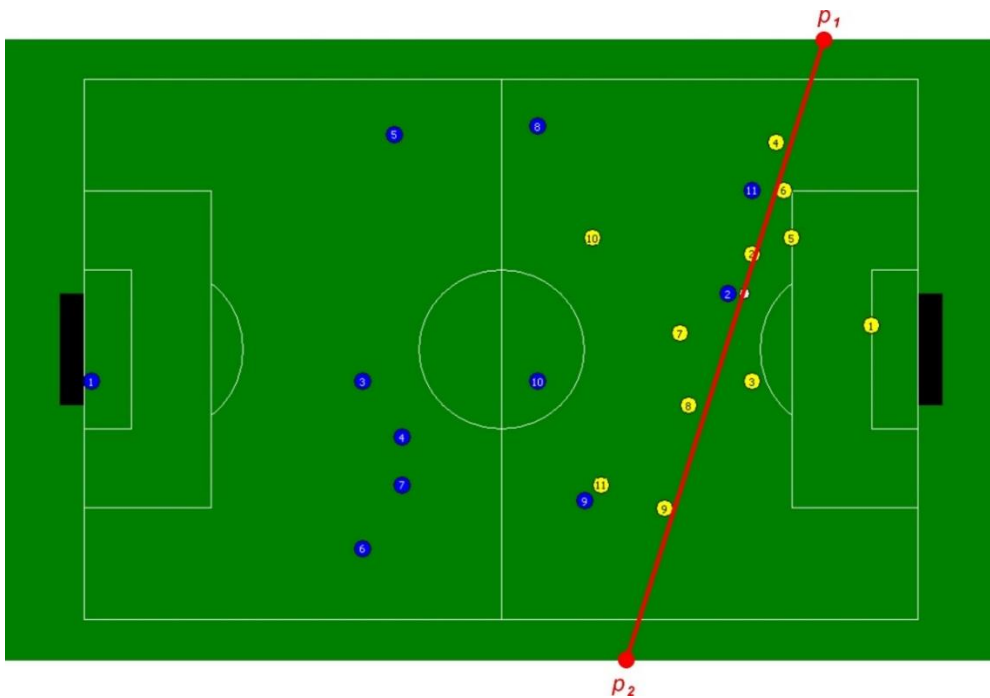


Figura 28 – Exemplo da aplicação da equação da reta sob os pontos  $p_1$  e  $p_2$  na variável  $d_3$  da contenção.

Em seguida é determinada a equação da reta para cada posição de um oponente  $o_i$  e o centro do gol  $g$ . Então, para cada oponente  $o_i$  determina-se a interseção entre os segmentos de reta  $\overline{p_1p_2}$  e  $\overline{o_i g}$ . O sistema formado com as equações gerais das retas terá como solução o par ordenado  $(x_0, y_0)$  que representa o ponto de interseção. Como as retas  $\overline{p_1p_2}$  e  $\overline{o_i g}$  são perpendiculares (o ponto de interseção das retas formam um ângulo de  $90^\circ$ ), a interseção das retas será sempre a menor distância entre as duas retas. Calcula-se, então, pela equação nove, a distância euclidiana de cada oponente  $o_i$  em relação à sua posição  $x_0$  e  $y_0$ , ponto de interseção entre os segmentos de reta  $\overline{p_1p_2}$  e  $\overline{o_i g}$ .

$$d_{o_i} = \sqrt{(o_{ix} - x_{0i})^2 + (o_{iy} - y_{0i})^2}
 \tag{9}$$

Se  $d_{o_i}$  for maior do que 15 (constante que determina a distância máxima de influência na contenção de um jogador que está fora do centro de jogo) então  $d_3$  recebe o valor zero; se não, normaliza o resultado de  $d_{o_i}$  para o intervalo  $[0,1]$  de modo que quanto mais próximo  $d_{o_i}$  for de  $o_i$  maior será o valor de  $d_3$ . Assim, a variável  $d_3$  é obtida e apresentada na equação 10:

$$d_3 = \begin{cases} 0 & \text{se } d_{o_i} > 15 \text{ e } \text{ang}(\vec{t}, \vec{v}) < 90^\circ \\ \frac{15 - d_{o_i}}{15} & \text{se } d_{o_i} \leq 15 \text{ e } \text{ang}(\vec{t}, \vec{v}) < 90^\circ \\ 1 & \text{se } \text{ang}(\vec{t}, \vec{v}) \geq 90^\circ \end{cases} \quad (10)$$

A Figura 29 apresenta, como exemplo de uso da variável  $d_3$ , o cenário utilizado para exemplificar as variáveis  $d_1$  e  $d_2$ . Quanto mais clara a região em que o jogador ser encontra, maior a relevância do defensor.

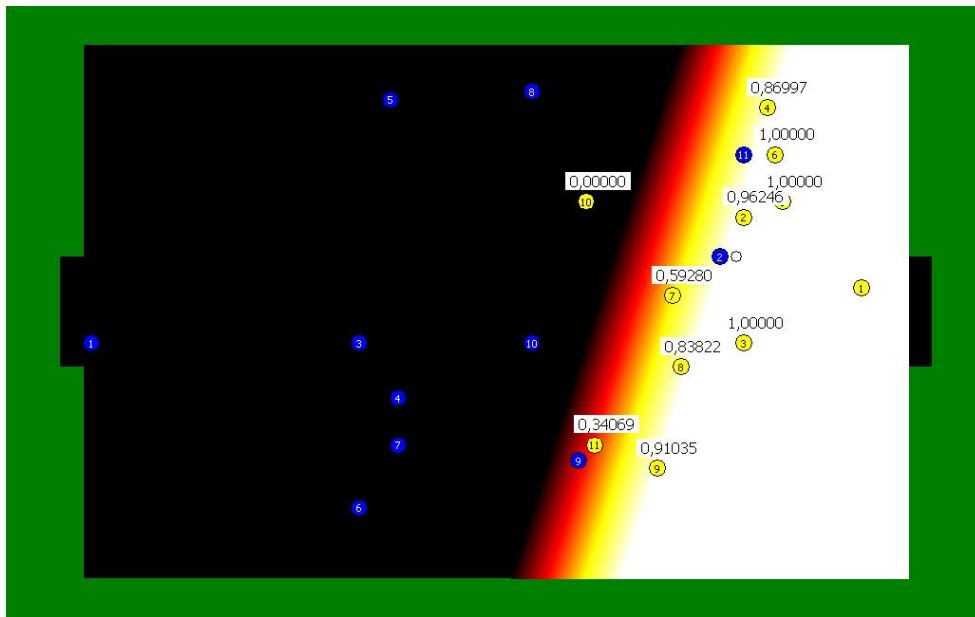


Figura 29 – Cenário de exemplo da variável  $d_3$  da contenção. Quanto mais clara a região em que o jogador ser encontra, maior a relevância do defensor.

Note que as três variáveis foram normalizadas, ou seja, estão no domínio  $[0,1]$ , para que ambas tenham pesos iguais na etapa final, onde é quantificada a contenção. Por fim, em posse das variáveis  $d_1$ ,  $d_2$  e  $d_3$ , obtém-se o valor de contenção de cada defensor identificado por  $i$ , equação 11.

$$\text{contencao}_i = d_1 * d_2 * d_3 \quad (11)$$

O defensor  $j_i$  com maior valor  $\text{contencao}_i$  é o escolhido para realizar contenção sobre o portador da bola.

Seguindo o exemplo, as multiplicações das variáveis  $d_1$ ,  $d_2$  e  $d_3$  resultam na situação expressa na Figura 30. Como resultado,  $contencao_i$  tem como maior valor 0,63614 em  $i=2$ . Logo, o defensor de número dois é determinado como o responsável por realizar contenção sobre o portador da bola.

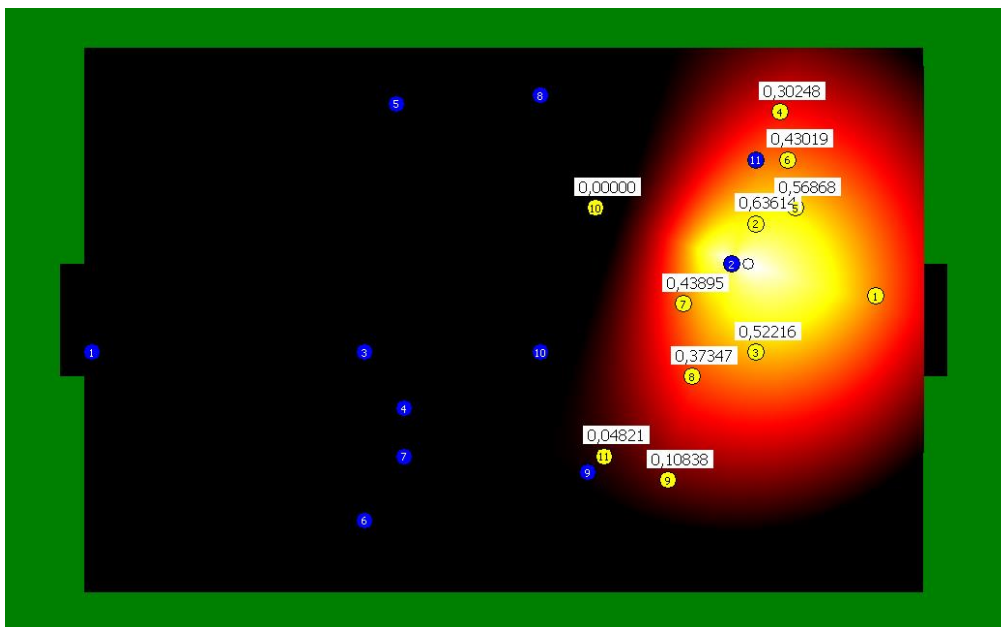


Figura 30 – Cenário de exemplo da contenção. Quanto mais clara a região em que o jogador ser encontra, maior a relevância do defensor.

#### 4.1.3.2 Cobertura defensiva

O objetivo da cobertura defensiva é oferecer apoio defensivo ao jogador de contenção. Para COSTA *et al.* (2009), a cobertura defensiva visa servir de novo obstáculo ao portador da bola (segunda contenção ou obstruir possíveis linhas de passe), caso ele passe pelo jogador de contenção, e transmitir segurança e confiança ao jogador de contenção para que ele tenha iniciativa de combate às ações ofensivas do portador da bola. Operacionalmente, o jogador que faz cobertura defensiva deve procurar se posicionar, preferencialmente, entre a contenção e a baliza (COSTA *et al.*, 2011a).

O algoritmo de cobertura defensiva deste trabalho só é chamado se a qualidade da contenção, resultante de uma rede neuronal que classifica a contenção em três classes, for FORTE ou MÉDIA. Isso significa que se a contenção é FRACA, é considerado que não há contenção. Logo, não havendo contenção, não há cobertura defensiva. O treinamento dessa rede neuronal é descrito nos testes da seção 5.2.

Se a contenção for FORTE ou MÉDIA, é calculado o valor da cobertura defensiva a fim de identificar o defensor com maiores condições de fazer cobertura defensiva ao jogador de contenção. Para isso, foram utilizadas as mesmas três variáveis utilizadas na

contenção (equações três, cinco e dez, unificadas pela equação 11). Essa estratégia foi adotada porque a cobertura defensiva é uma espécie de segunda contenção.

#### 4.1.3.3 Concentração

A concentração objetiva aumentar a proteção defensiva na zona de maior risco à baliza. Visa concentrar os jogadores em regiões do campo que ocorram maiores finalizações e, com isto, proteger a baliza defensiva e, de acordo com DIAS (2009), direcionar o jogo ofensivo adversário para zonas menos vitais do campo de jogo.

As ações de concentração podem ser feitas em qualquer zona do campo de jogo. Para isso, os jogadores se aglutinam adotando posicionamentos mais próximos entre si, de forma a limitar as opções ofensivas mais relevantes do adversário.

O algoritmo de concentração proposto neste trabalho analisa o grau de concentração defensiva da equipe nos eixos  $x$  e  $y$ . O algoritmo determina, inicialmente, o centroide dos jogadores de linha da equipe que está sem a bola, o goleiro fica de fora deste algoritmo. Centroide é o ponto no interior de uma forma geométrica que define o seu centro geométrico. Para isso, tira-se a média aritmética da posição dos jogadores nos eixos  $x$  e  $y$  (equação 12), representando  $x_m$  e  $y_m$  respectivamente.

$$\begin{aligned} m_x &= \frac{\sum_{i=2}^{11} x_i}{n} \\ m_y &= \frac{\sum_{i=2}^{11} y_i}{n} \end{aligned} \quad (12)$$

Onde  $n$  é a quantidade de jogadores considerada no cálculo;  $x_i$  é a posição no eixo  $x$  do jogador  $i$ ;  $y_i$  é a posição no eixo  $y$  do jogador  $i$ .

Na sequência são calculados os desvios em cada um dos eixos do plano cartesiano, ou seja, os módulos das distâncias  $d_i$  de cada um dos defensores em relação ao centroide calculado anteriormente (equação 13).

$$\begin{aligned} d_{x_i m_x} &= \sqrt{(x_i - m_x)^2} \\ d_{y_i m_y} &= \sqrt{(y_i - m_y)^2} \end{aligned} \quad (13)$$

Então, calcula-se, pela equação 14, a média aritmética  $media_x$  e  $media_y$  da soma das distâncias euclidianas de cada um dos defensores em relação ao centroide para os eixos  $x$  e  $y$ , respectivamente. É importante acrescentar que nesse cálculo são considerados os dez jogadores de linha, por isto a divisão pela constante dez. Assim, quanto menor a

distância média dos jogadores em relação ao centroide, mais concentrada tende a equipe a estar em campo.

$$\begin{aligned} media_x &= \frac{\sum_{i=2}^{11} d_{x_i m_x}}{10} \\ media_y &= \frac{\sum_{i=2}^{11} d_{y_i m_y}}{10} \end{aligned} \quad (14)$$

Também são calculados os desvios padrões  $\sigma_x$  e  $\sigma_y$  da soma das distâncias euclidianas de cada um dos defensores em relação ao centroide, equação 15.

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \sqrt{\frac{\sum_{i=2}^{11} (d_{x_i m_x} - m_x)^2}{10}} \\ \sigma_y &= \sqrt{\frac{\sum_{i=2}^{11} (d_{y_i m_y} - m_y)^2}{10}} \end{aligned} \quad (15)$$

Por fim, é feita a multiplicação da média aritmética  $m$  com o desvio padrão  $\sigma$  e, com isto, é obtido o grau de concentração da equipe em cada um dos eixos do sistema de coordenadas do plano cartesiano (equação 16).

$$\begin{aligned} concentracao_x &= media_x * \sigma_x \\ concentracao_y &= media_y * \sigma_y \end{aligned} \quad (16)$$

Contudo, ainda é necessário saber se a equipe está concentrada em zonas vitais do campo de jogo. Para isso, são utilizadas outras quatro variáveis: distância do centroide defensivo  $m$  em relação à bola  $b$  no eixo  $x$  ( $d_{m_x bola_x}$ ); distância do centroide defensivo  $m$  em relação à bola  $b$  no eixo  $y$  ( $d_{m_y bola_y}$ ), equação 17; distância da bola  $b$  em relação ao centro do gol no eixo  $x$  ( $d_{gol_x bola_x}$ ); distância da bola  $b$  em relação ao centro do gol no eixo  $y$  ( $d_{gol_y bola_y}$ ), equação 18.

$$\begin{aligned} d_{m_x bola_x} &= m_x - bola_x \\ d_{m_y bola_y} &= m_y - bola_y \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} d_{gol_x bola_x} &= gol_x - bola_x \\ d_{gol_y bola_y} &= gol_y - bola_y \end{aligned} \quad (18)$$

Assim, o algoritmo para quantificar a concentração faz uso de seis variáveis:  $concentracao_x$ ,  $concentracao_y$ ,  $d_{m_x bola_x}$ ,  $d_{m_y bola_y}$ ,  $d_{gol_x bola_x}$  e  $d_{gol_y bola_y}$ .

#### 4.1.3.4 Equilíbrio

Taticamente pauta-se na premissa de possuir superioridade, ou no mínimo garantir igualdade, numérica setorial de jogadores nas relações de oposição no Centro de Jogo, que é o espaço de jogo entre a bola e a própria baliza (COSTA, 2010) (COSTA *et al.*, 2011b). O equilíbrio setorial é necessário para não deixar jogadores adversários sem marcação. Em linhas gerais, visa assegurar a estabilidade defensiva na região de disputa da bola.

Para quantificar a qualidade do equilíbrio defensivo, o algoritmo aqui proposto utiliza para cálculo os jogadores que estão no centro de jogo, mais especificamente os jogadores que estão entre a bola (no eixo  $x$ ) e a baliza defensiva. No entanto, a fim de garantir maior segurança foi considerado como centro de jogo o que está entre 10m atrás da bola e a baliza, o que, deste modo, sempre irá incluir no cálculo o portador da bola e tratar jogadas de linha de fundo.

Para cada adversário que está no centro de jogo verifica-se a qualidade da marcação. Essa verificação é feita analisando a capacidade da equipe que se defende realizar contenção nos jogadores adversários caso algum deles venha a receber a bola. Para verificar a qualidade de marcação sobre um adversário é utilizada a rede neuronal treinada para analisar a qualidade da contenção, descrita na seção 5.2.

Para cada adversário fora do centro de jogo, a variável  $adv_i$ , onde  $i$  é a identificação (número da camisa) do adversário, recebe o valor zero; para cada adversário no centro de jogo, o contador  $cont_{adv}$  é incrementado e a rede neuronal da contenção classifica a qualidade da marcação:

- se a marcação sobre um adversário é FORTE, então ao adversário é atribuído o valor zero à variável  $adv_i$ , significando que ele está, naquele momento, anulado ofensivamente;
- Se a marcação sobre um adversário é MÉDIA, então ao adversário é atribuído o valor um à variável  $adv_i$ , significando que ele está, naquele momento, desmarcado e livre para receber a bola;
- Se a marcação sobre um adversário  $adv_i$  é FRACA, então ao adversário é atribuído o valor 0,5 à variável  $adv_i$ , significando que ele está, naquele momento, parcialmente marcado.

Por fim, somam-se os valores da variável  $adv_i$  e divide-se pela quantidade de jogadores no centro de jogo, determinada pela variável  $cont$ . Em seguida multiplica-se



por -1 para indicar que o equilíbrio é desfavorável, naquele momento, para a defesa. Veja equação 19.

$$adv = \frac{\sum_{i=2}^{11} adv_i * (-1)}{cont_{adv}} \quad (19)$$

No entanto, se o valor da variável  $adv$  for igual a zero, então é atribuído o valor zero para cada defensor  $def_i$ , onde  $i$  é a identificação do defensor (número da camisa), que está exercendo marcação FORTE ou MÉDIA sobre um adversário no centro de jogo; o defensor  $def_i$  que está no centro de jogo e está exercendo marcação RUIM ou não está marcando recebe valor um. A variável  $cont_{def}$  armazena a quantidade de defensores no centro de jogo.

A fim de calcular o equilíbrio defensivo, ainda é calculada a variável  $def$  (equação 20), que é o valor referentes à situação onde o valor da variável  $adv$  é igual a zero, ou seja, quando os adversários no centro de jogo então devidamente marcados.

$$def = \frac{\sum_{i=2}^{11} def_i}{cont_{def}} \quad (20)$$

Por fim, a variável equilíbrio quantifica o equilíbrio defensivo, equação 21.

$$equilíbrio = \begin{cases} adv & \text{se } adv < 0 \\ def & \text{se } adv = 0 \end{cases} \quad (21)$$

Para exemplificar o princípio do equilíbrio, considere o cenário apresentado na Figura 31. Os jogadores à esquerda da linha tracejada são descartados do cálculo.

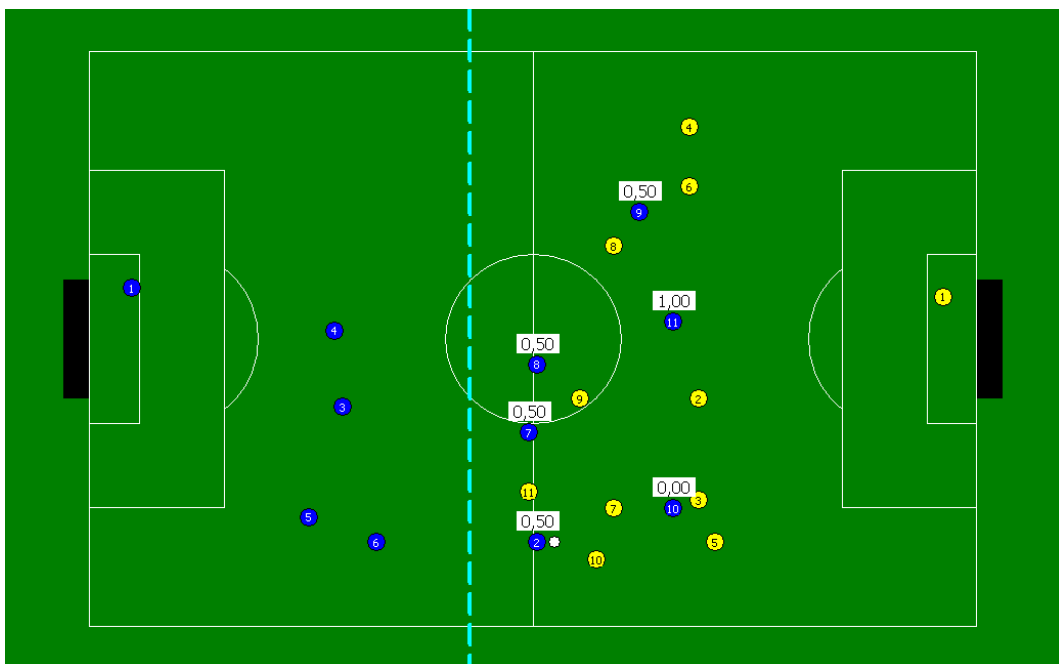


Figura 31 – Cenário do primeiro exemplo do equilíbrio. A linha tracejada indica o limite do centro de jogo ampliado.

Percebe-se que o jogador de número 11 da equipe azul é classificado como recebendo marcação FRACA, por isso  $adv_{11}$  é igual um; os jogadores de números dois, sete, oito e nove encontram-se parcialmente marcados (marcação MÉDIA), por isto, respectivamente,  $adv_2$ ,  $adv_7$ ,  $adv_8$  e  $adv_9$  têm valor 0,5; o jogador de número dez está recebendo marcação FORTE,  $adv_{10}$  recebe valor zero. Os jogadores de números três, quatro, cinco e seis estão fora do centro de jogo (representado pela linha tracejada), por isso seus valores são iguais a zero ( $adv_3$ ,  $adv_4$ ,  $adv_5$  e  $adv_6$ ). Verifica-se que são seis os jogadores no centro de jogo, logo  $cont$  tem valor seis. De posse desses valores, quantifica-se o equilíbrio:

$$adv = \frac{0,5 + 0 + 0 + 0 + 0 + 0,5 + 0,5 + 0,5 + 0 + 1}{6} = -0,5$$

Como o valor de  $adv$  é menor do que zero, então:

$$equilibrio = adv = -0,5$$

Como segundo exemplo, considere o cenário apresentado na Figura 32. Nesse caso, somente o adversário dois está no centro de jogo e recebe marcação FORTE do defensor de número cinco, então o valor de  $adv$  vai ser igual a zero. Então, é calculado o valor de  $def$ , que é +0,75, neste caso, o valor do equilíbrio.

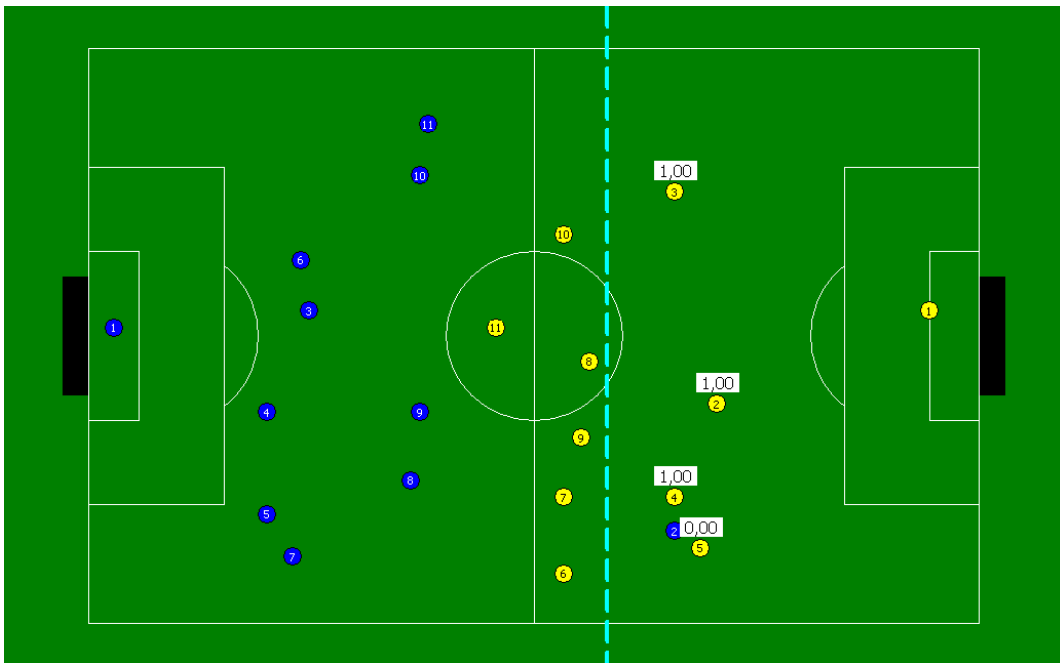


Figura 32 – Cenário do segundo exemplo do equilíbrio. A linha tracejada indica o limite do centro de jogo ampliado.

#### 4.1.3.5 Unidade defensiva

A unidade defensiva está diretamente relacionada à compactação da Teoria do Futebol, afinal a compactação é fundamentada neste princípio defensivo. A unidade

defensiva permite à equipe defender em unidade ou em bloco, reduzindo o espaço de jogo, com diminuição da amplitude defensiva da equipe na sua largura e profundidade. Assim, a equipe que se defende em bloco reduz os espaços livres que o time adversário poderia utilizar para dar penetração às suas ações ofensivas e, com isto, conseguir se defender de forma mais eficiente.

A fim de quantificar o princípio de unidade defensiva, decidiu-se por descartar o goleiro e os jogadores da linha ofensiva do cálculo. Os jogadores da linha ofensiva foram descartados uma vez que podem estar voltando de um ataque ou contra-ataque e ainda não estarem posicionados defensivamente, o que pode implicar em ruído ao cálculo.

Para descartar os jogadores da linha ofensiva, basta conhecer o sistema tático da equipe que se controla. A partir dos jogadores a serem considerados no cálculo da unidade defensiva, encontra-se o centroide da defesa. Centroide é o ponto no interior de uma forma geométrica que define o seu centro geométrico. Para isso, tira-se a média aritmética da posição dos jogadores nos eixos  $x$  e  $y$  (equação 22), representando  $x_m$  e  $y_m$  respectivamente.

$$\begin{aligned} m_x &= \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \\ m_y &= \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} \end{aligned} \quad (22)$$

Onde  $n$  é a quantidade de jogadores considerada no cálculo;  $x_i$  é a posição no eixo  $x$  do jogador  $i$ ;  $y_i$  é a posição no eixo  $y$  do jogador  $i$ .

Posteriormente encontra-se o desvio padrão para os eixos  $x$  e  $y$ . No entanto, antes disso devem ser determinados os quadrados dos desvios (equação 23), que é a diferença de cada nota em relação à média elevado ao quadrado.

$$\begin{aligned} D_x &= \sum_{i=1}^n (x_i - m_x)^2 \\ D_y &= \sum_{i=1}^n (y_i - m_y)^2 \end{aligned} \quad (23)$$

A soma dos quadrados dos desvios dividida pelo número de ocorrências é chamada de variância, equação 24.

$$\begin{aligned} V_x &= \frac{D_x}{n} \\ V_y &= \frac{D_y}{n} \end{aligned} \quad (24)$$

Finalmente o desvio padrão pode ser encontrado com a raiz quadrada da variância, equação 25.

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \sqrt{V_x} \\ \sigma_y &= \sqrt{V_y}\end{aligned}\tag{25}$$

Por fim, calcula-se a área da unidade defensiva, determinada pelo centroide e seus desvios padrões. Como resultado obtém-se um retângulo, que tem sua área calculada pela multiplicação da base pela altura. Nesse caso, a base é igual ao desvio padrão de  $x$  multiplicado por 2 e a altura igual ao desvio padrão de  $y$  multiplicado por 2. Essa área ficou chamada de retângulo defensivo, equação 26.

$$A_{Unidade\ Defensiva} = \sigma_x * 2 * \sigma_y * 2\tag{26}$$

Optou-se por calcular a área de um retângulo determinado pelo centroide e desvios padrões uma vez que o custo computacional é bastante reduzido se comparado com o cálculo da área de formas irregulares, a otimização é necessária por causa da restrição temporal imposto por cada ciclo de simulação. Além disso, um jogador estando bastante afastado pode implicar em contaminar a qualidade da unidade defensiva, o que reduz com o uso do desvio padrão.

Para exemplificar, considere o cenário gerado pelo *Soccer Scenes* e apresentado na Figura 33. O sistema tático adotado pela equipe amarelo é o 5-4-1, indicando que há um jogador na linha ofensiva da equipe, que será desconsiderado no algoritmo de unidade defensiva.

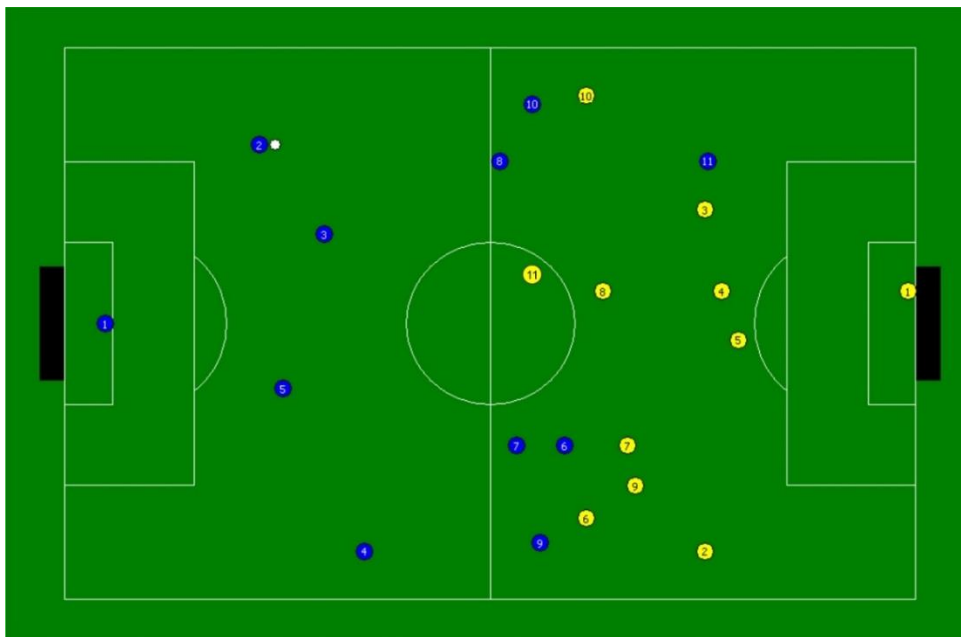


Figura 33 – Exemplo de cenário para o cálculo da unidade defensiva

A Figura 34 ilustra o centroide defensivo da equipe com um “X”. Então são calculados os desvios padrões para os eixos  $x$  e  $y$ . Como resultado, obtém-se o que foi nomeado de retângulo defensivo (Figura 35). A área do retângulo defensivo do exemplo é de  $502,40\text{m}^2$ . Observa-se, como já descrito anteriormente, a importância do uso do desvio padrão uma vez que o jogador de número dez da equipe amarela foi considerado no cálculo, mas não afetou sobremaneira o resultado.

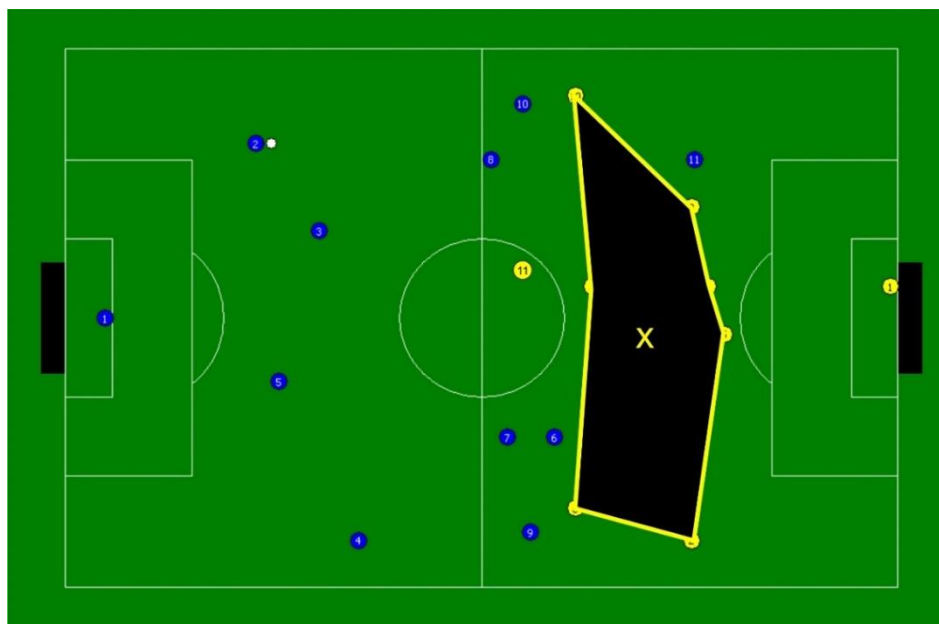


Figura 34 – Exemplo de cenário com o centroide defensivo indicado com um “X”.

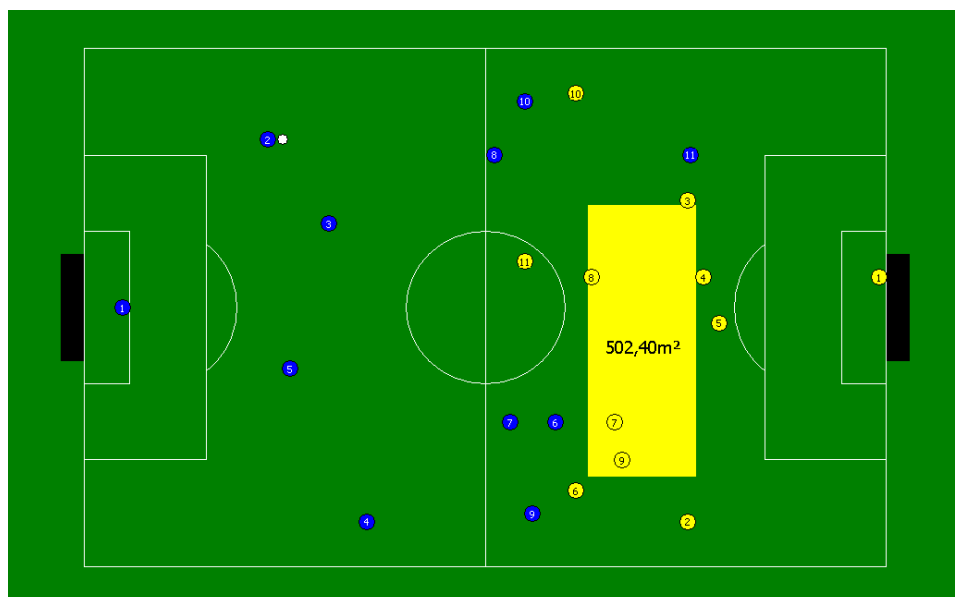


Figura 35 – Exemplo de cenário com a área da unidade defensiva calculada.

#### 4.1.3.6 Organização defensiva

A fim de classificar a defesa, foi utilizada uma rede neuronal Perceptron de Múltiplas Camadas e um sistema de inferência *fuzzy* Mamdani (MAMDANI, 1974) com aprendizado de regras feito pelo algoritmo Wang-Mendel (WANG e MENDEL, 1992). A classificação defensiva foi realizada com a entrada de cinco variáveis (contenção, cobertura defensiva, concentração, equilíbrio e unidade defensiva) e dez valores, sendo que seis valores são referentes à concentração (descritos na seção 4.1.3.3). Na prática a rede neuronal possui dez entradas e o sistema de inferência *fuzzy* tem dez variáveis linguísticas.

Com o objetivo de normalizar as entradas no domínio  $[-1,+1]$  para a rede neuronal e para o sistema de inferência *fuzzy*, foi feito pré-processamento na base de treinamento. Para isso, em cada uma das entradas/variáveis foi identificado o domínio, valor máximo menos o valor mínimo, e realizado decréscimo e acréscimo de 10% do valor do domínio nos valores mínimo e máximo, respectivamente. Veja equação 27.

$$\begin{aligned} \text{mín}'(var) &= \text{mín}(var) - [\text{máx}(var) - \text{mín}(var)] * 0.1 \\ \text{máx}'(var) &= \text{máx}(var) + [\text{máx}(var) - \text{mín}(var)] * 0.1 \end{aligned} \quad (27)$$

Assim, para as entradas serem utilizadas como entradas na rede neuronal e do sistema de inferência *fuzzy*, utilizou-se da transformação matemática a seguir a fim de os valores ficarem normalizados no intervalo  $[-1,+1]$ , equação 28.

$$x' = \begin{cases} -1 & \text{se } x < \text{mín}'(var) \\ \frac{(x - \text{mín}'(var))}{(\text{máx}'(var) - \text{mín}'(var))} * 2 - 1.0 & \text{se } \text{mín}'(var) \leq x \leq \text{máx}'(var) \\ +1 & \text{se } \text{máx}'(var) < x \end{cases} \quad (28)$$

A arquitetura da rede neuronal foi composta por três camadas: camada de entrada; uma camada oculta; camada de saída com dois neurônios artificiais. A saída é maximamente esparsa, ou seja, com um neurônio para cada classe a ser reconhecida. Nesse caso, foram utilizados dois neurônios artificiais, cada um representando uma classe (defesa organizada e desorganizada).

O sistema de inferência *fuzzy* Mamdani adotado neste trabalho teve 11 variáveis linguísticas, dez na entrada e uma saída. Para a extração de regras pelo algoritmo de Wang-Mendel, as entradas foram mapeadas em conjuntos de formatos lineares e triangulares, igualmente adotados no sistema de inferência. As Figura 36 e Figura 37 apresentam, respectivamente, três e cinco conjuntos de uma variável linguística de entrada. Os conjuntos das extremidades são lineares, decrescente e crescente, e o(s)

central(is) é(são) triangular(es). Nas figuras os conjuntos foram nomeados pelas primeiras letras do alfabeto e a entrada  $x$  está no domínio  $[-1,+1]$ .

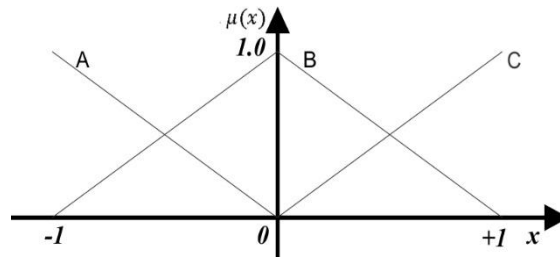


Figura 36 – Variável linguística de entrada com três conjuntos

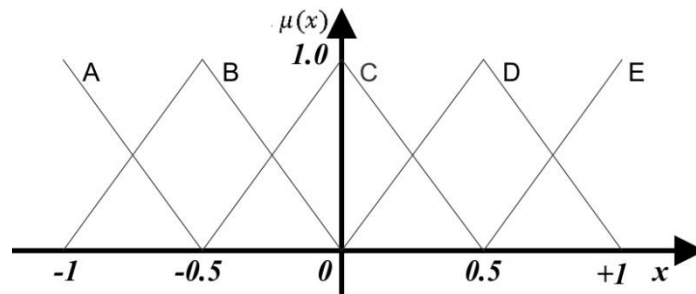
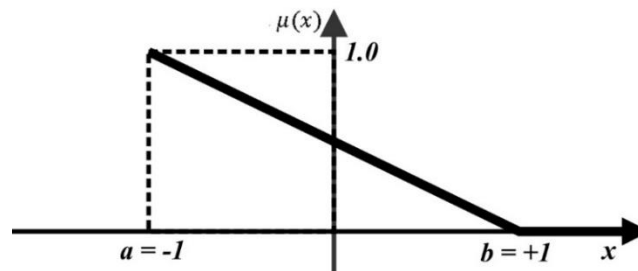


Figura 37 – Variável linguística de entrada com cinco conjuntos

A saída tem dois conjuntos representando defesa organizada, no formato linear decrescente, e desorganizada, no formato linear crescente. A seguir são apresentadas as funções que determinam o grau de pertinência  $\mu(x)$  nos conjuntos com formato linear decrescente (Figura 38), linear crescente (Figura 39) e triangular (Figura 40).

Ao distribuir os jogadores em campo a partir de um sistema tático, o Agent2D tem estratégias implementadas capazes de fazer uma equipe jogar futebol. Para isso, é utilizado o *Formation Editor* para definir o sistema tático de uma equipe, que a partir da distribuição dos jogadores utiliza comportamentos de acordo com suas funções. No entanto, foram implementadas duas novas estratégias defensivas, descritas a seguir.



$$\text{lin}_{\text{decrecente}}(x, a, b) = \begin{cases} 0 & \text{se } x \leq a \\ (b - x)/(b - a) & \text{se } a < x \leq b \end{cases}$$

Figura 38 – Função de pertinência de um conjunto linear decrescente

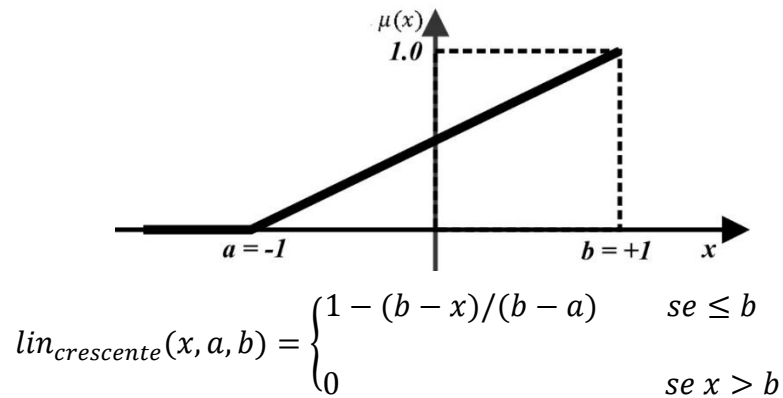


Figura 39 – Função de pertinência de um conjunto linear crescente

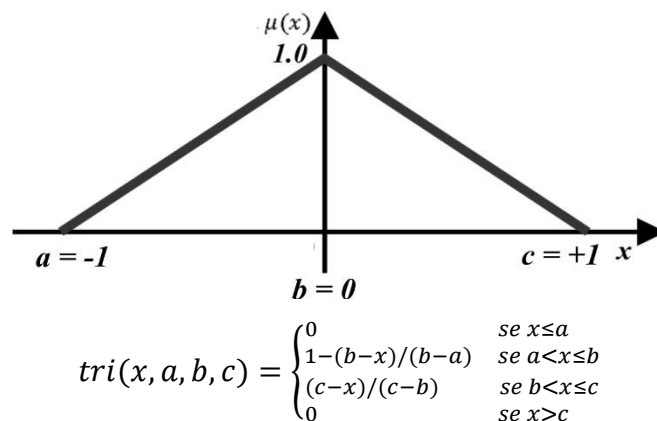


Figura 40 – Função de pertinência de um conjunto triangular

## 4.2 Soccer Scenes

Para facilitar o desenvolvimento de algoritmos a partir da análise estática de cenários do futebol foi desenvolvido um aplicativo, chamado *Soccer Scenes* (Figura 41). Para validar os algoritmos também foi utilizado o próprio *Soccer Scenes* nos testes, vide capítulo cinco. Uma vez validado o algoritmo no *Soccer Scenes* ele é, então, migrado para o Agent2D e executado no *Soccer Server*.

O *Soccer Scenes* é uma aplicação para o sistema operacional Microsoft Windows™ e foi desenvolvido em C++ por facilitar a migração das soluções para o Agent2D, que também é desenvolvido em C++. O *Soccer Scenes* gera cenários aleatoriamente para que os algoritmos implementados possam ser depurados e analisados. A distribuição das equipes em campo no *Soccer Scenes* é determinada pelo algoritmo expresso no Quadro 2.





Figura 41 – Aplicativo *Soccer Scenes*

Quadro 2 – Algoritmo de distribuição aleatória de equipes em campo do *Soccer Scenes*

```

Sortear sistema tático da equipe
Sortear posição no eixo x que indica o início da equipe em campo, usado no sorteio dos jogadores
Sortear posição no eixo x que indica profundidade da equipe (profundidade > início da equipe + 20 e
profundidade < 105, que é o comprimento do campo)
Dividir a região entre início e profundidade da equipe em três regiões (defesa, meio de campo e ataque)
Sortear a posição do goleiro dentro da pequena área
Iniciar contador do número de jogadores com um
Se equipe está com a bola então
    Sortear posição da bola em campo, posição entre o início e o fim da equipe
    Sortear um jogador que estará na posição da bola e subtrai-se dois da sua posição no eixo x
    Incrementar contador do número de jogadores em campo
Fim do se
Faça
    Sortear posição de jogador em campo
    Se posição sorteada é válida, então
        Incrementar contador do número de jogadores em campo
    Fim do se
Enquanto contador do número de jogadores em campo < 11

```

É importante acrescentar que o *Soccer Scenes* trabalha com sete sistemas táticos (4-4-2, 3-4-3, 4-3-3, 3-5-2, 4-5-1, 5-4-1 ou 5-3-2); a bola sempre estará em posse de um jogador, dentro de sua área de chute; e o algoritmo distribui as equipes em campo distribuindo jogadores somente em posições válidas. Um jogador é considerado em posição inválida se:

- a posição estiver fora do campo;
- a posição for menor do que o início da equipe em campo e maior do que a profundidade da equipe;

- a quantidade de jogadores na região da posição sorteada for maior do que a definida no sistema tático da equipe;
- a distância entre jogadores da mesma equipe for menor do que 5m;
- a distância de um jogador da equipe que está com a posse de bola para a bola for menor do que 8m (exceto para o jogador que está com a bola) e maior do que 60m (a fim de tentar garantir um mínimo de compactação na equipe);
- distância de um jogador em relação a um adversário seja menor do que 2.

O *Soccer Scenes*, que é uma aplicação visual, pode ainda ser utilizado por comissões técnicas de equipes de futebol para explicar os fundamentos técnicos e táticos implementados que estão disponíveis visualmente na ferramenta: movimentação dos agentes; algoritmos técnicos de passes e chute; algoritmos táticos de contenção, cobertura defensiva, concentração, equilíbrio, unidade defensiva; classificação quanto à organização defensiva; e as estratégias defensivas implementadas. Além disso, o *Soccer Scenes* pode ser adotado como plataforma de desenvolvimento de novos algoritmos por outras equipes.

#### **4.2.1 Do *Soccer Scenes* para o Agent2D**

Não há qualquer garantia de que um algoritmo projetado em um ambiente estático, caso dos algoritmos desenvolvidos no *Soccer Scenes*, irá se comportar como esperado em um ambiente dinâmico, caso do futebol de robôs. Para exemplificar uma situação, considere que em um determinado ciclo um jogador  $x$  seja indicado para realizar contenção e um jogador  $y$  indicado para realizar cobertura defensiva. Suponha ainda que no ciclo seguinte a situação se inverta e o jogador  $y$  deverá realizar contenção e o jogador  $x$  executar cobertura defensiva. Se a alternância de funções entre os jogadores  $x$  e  $y$  persistir por alguns ciclos, os dois jogadores farão nenhuma das duas coisas e, com isto, o adversário avançará com a bola. Situações como a exemplificada ocorrem com frequência.

Para minimizar esse problema, a solução desenvolvida neste trabalho consiste em verificar se a equipe está em ciclo defensivo, sem posse de bola, e no ciclo anterior ela estava em ciclo ofensivo, com posse de bola. Em caso positivo, é armazenado em uma estrutura unidimensional o papel de cada defensor. Em cada ciclo seguinte sem a posse da bola, é verificado se o responsável por cada papel se encontra entre as três melhores opções para aquele papel, se isto ocorrer o responsável pelo papel no ciclo anterior

continua com o mesmo papel; se não, o jogador com melhor ranqueamento é indicado para o papel em análise. Assim, para exemplificar, se o jogador  $x$ , responsável pela contenção, é uma das três melhores opções de contenção no ciclo seguinte, ele continuará como responsável pela contenção; se não, a responsabilidade de realizar contenção é passada para o que possuir melhor ranqueamento. Essa estratégia vale para os comportamentos defensivos de contenção, marcações individuais e posicionamento visando bloqueios de linha de passe, apresentados na seção 4.3.1.

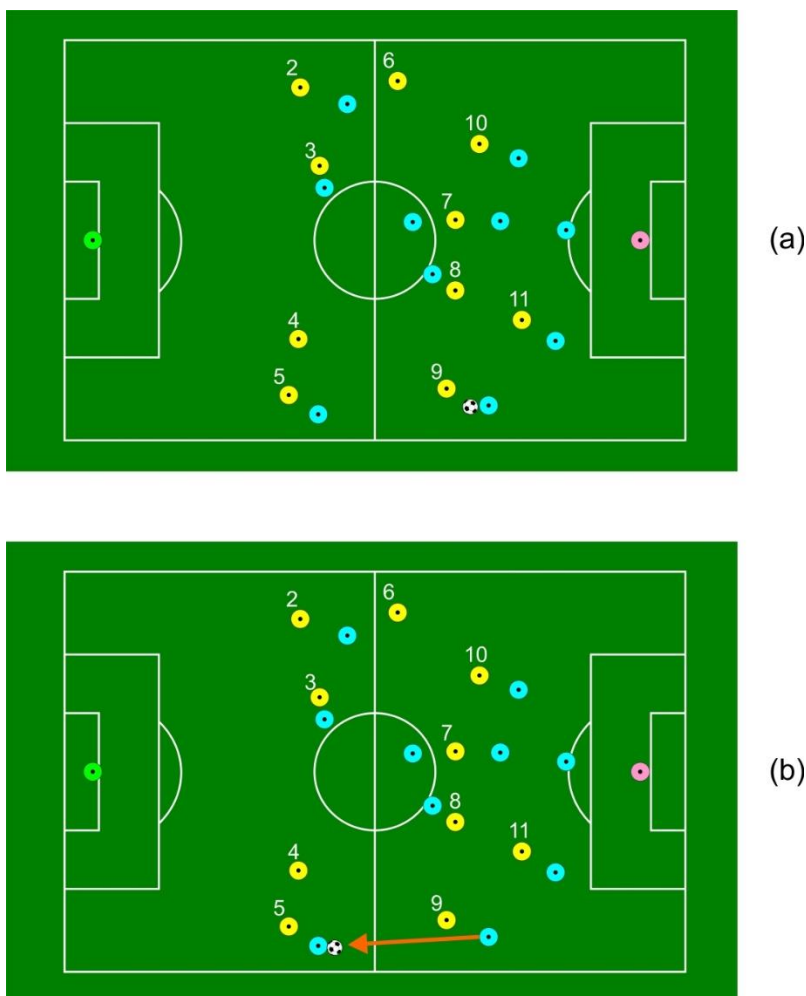


Figura 42 - Exemplo de situação que motivou a adoção de ponto de corte no ranqueamento dos jogadores: (a) ciclo anterior; (b) ciclo atual.

Vale acrescentar que foi adicionado um ponto de corte na definição das três melhores opções. Se o valor da variável de contenção for consideravelmente menor do que a do melhor ranqueado, então ela é descartada para evitar situações como a apresentada no exemplo da Figura 42a, onde o jogador nove é responsável pela contenção em um determinado ciclo. No ciclo seguinte, o portador da bola efetuou passe e resultou no cenário apresentado na Figura 42b. Repare que o jogador de defesa com maior condição de efetuar contenção é o de número cinco. Todavia, o jogador de número nove

continua sendo uma das três melhores opções de contenção, mas com poucas condições de fazer contenção efetiva. Com ponto de corte, situações como essa é evitada.

### 4.3 Equipe desenvolvida: iBots

Para realizar simulações no *Soccer Server* e para atender as necessidades do objeto de estudo proposto neste trabalho, foi necessário desenvolver uma equipe, chamada iBots. A equipe iBots é baseada no time-base Agent2D 3.1.1 (AKIYAMA, 2012a), que depende da biblioteca *librcsc* - a versão utilizada foi 4.1.0 (AKIYAMA, 2012b). Nesta seção são descritos os algoritmos desenvolvidos e começa por explicar a respeito do *Soccer Scenes*, um aplicativo desenvolvido para facilitar o desenvolvimento e depuração dos algoritmos em ambientes estáticos e simplificar a realização dos testes.

A Figura 11 da seção 3.4 apresentou a execução de um agente do Agent2D. A Figura 43 apresenta a execução do agente da equipe iBots. Note, em destaque na Figura 43, que os itens três e quatro foram adicionados ao agente do Agent2D. Como é determinado o estado da partida de acordo com o Modelo de Jogo foi explicado na seção 4.1. Consultar estratégia da equipe para o estado corrente da partida retorna a tática de jogo a ser utilizada. As táticas desenvolvidas para a equipe iBots são exploradas na próxima seção.

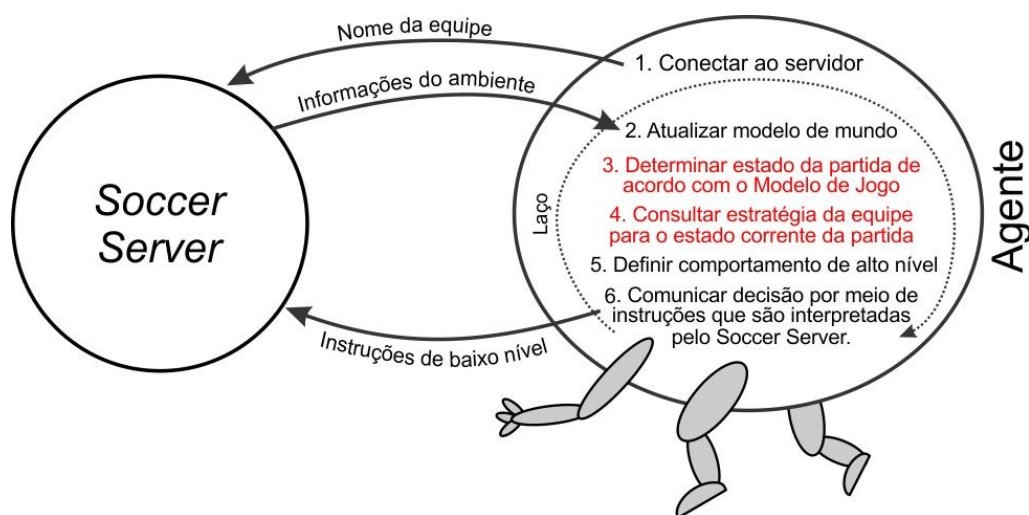


Figura 43 - Execução de um agente da equipe iBots

#### 4.3.1 Táticas defensivas da equipe iBots

Foram desenvolvidas duas estratégias defensivas na equipe iBots. Para isso, foram implementados comportamentos defensivos para os agentes, são eles: contenção, marcação e bloquear linha de passe.

O comportamento de contenção faz com que o agente responsável pela contenção diminua as ações do portador da bola ao fechar o caminho para a baliza e impede que o portador da bola finalize, ao mesmo tempo que se prepara para o desarme, que é um princípio técnico que tem seu algoritmo detalhado na seção 4.3.9.4. Taticamente a contenção visa diminuir o ritmo de jogo do adversário ou dar mais tempo à própria equipe para se organizar.

O comportamento de marcação faz com que este agente se aproxime do robô adversário a ser marcado a fim de reduzir espaço, evitando que ele seja opção de passe e, caso receba a bola, o agente seja capaz de realizar rápida contenção.

O comportamento de bloquear linha de passe visa obstruir um passe adversário. Nesse sentido, um agente ao identificar uma linha de passe a ser bloqueada deve se posicionar entre o robô portador da bola e outro robô adversário, mesmo que eles estejam distantes do agente.

As duas estratégias desenvolvidas são, basicamente, diferentes usos dos comportamentos defensivos implementados e estão apresentadas na sequência.

#### **4.3.1.1 Estratégia defensiva I**

Esta estratégia é inspirada no *pressing* (descrito na seção 2.4), isto não significa que tenha sido implementado *ipsis litteris*. No algoritmo implementado (

Quadro 3), a primeira etapa consiste em definir o agente responsável pela contenção, que fará opressão ao portador da bola e foi detalhado na seção 4.1.3.1. Na sequência são definidos os agentes que deverão marcar adversários. Para isso, no primeiro ciclo defensivo é calculado por força bruta com poda em nível seis a melhor combinação de marcação dos jogadores de defesa em relação aos adversários no centro de jogo, que se dá no eixo  $x$  da posição da bola menos 20m até o gol. As variáveis para quantificar a qualidade de marcação são exatamente as mesmas utilizadas para quantificar a qualidade da contenção. Nos demais ciclos, os jogadores de defesa que continuarem como uma das três melhores opções de marcação permanecem marcando. Os agentes que não marcarem se movimentarão a fim de bloquear linhas de passe. As movimentações dos agentes, provenientes da contenção, marcação e do bloqueio da linha de passe, são computadas pelo algoritmo de planejamento de trajetória apresentado na seção 4.3.5. Caso ainda haja algum jogador de defesa sem função definida, então o algoritmo retorna para o fluxo de execução normal do Agent2D.

### Quadro 3 - Algoritmo da estratégia defensiva I

```
Se é o primeiro ciclo se defendendo, então
  O jogador de contenção será o que tem melhores condições de realizar a tarefa
Fim do se
Senão
  Se o jogador que realizou contenção no ciclo anterior é uma das três melhores opções no ciclo atual, então
    O jogador de contenção continuará a ser o mesmo do ciclo anterior
  Fim do se
  Senão
    O jogador de contenção será o que tem melhores condições de realizar a tarefa
  Fim do se
Fim do senão
Se o jogador da contenção é ele próprio, então:
  Calcular ponto alvo de movimentação do jogador de contenção
  Prestar atenção na bola
  Retorna PlanejamentoDeTrajetoria(ponto)
Fim do se
Senão
  Para cada um dos adversários de linha no centro de jogo, faça
    Se no ciclo anterior um jogador de defesa já marcava um adversário, então
      Se jogador for uma das três melhores opções de marcação e não está muito distante do adversário, então
        Jogador continua marcando o mesmo adversário
      Se o jogador de defesa for ele próprio, então
        Calcular ponto alvo de movimentação do jogador de defesa
        Prestar atenção no adversário
        Retorna PlanejamentoDeTrajetoria(ponto)
      Fim do se
    Fim do se
  Fim do para
  Calcular, por força bruta e poda em nível 6, os jogadores que marcarão os adversários desmarcados do centro de jogo
  Para cada jogador que no ciclo atual ainda não foi atribuído função, faça
    Se o jogador próprio deve marcar alguém, então
      Calcular ponto alvo de movimentação do jogador de defesa
      Prestar atenção no adversário
      Retorna PlanejamentoDeTrajetoria(ponto)
    Fim do se
  Fim do para
Fim do senão
Para cada jogador que no ciclo atual ainda não foi atribuído função, faça
  Se o jogador estiver no centro de jogo e há adversário para se bloquear linha de passe, então
    Atribuir ao jogador a função de bloquear linha de passe de um determinado adversário
  Se o jogador é ele próprio, então
    Calcular ponto para interceptar passe
    Prestar atenção no adversário
    Retorna PlanejamentoDeTrajetoria(ponto)
  Fim do se
Fim do Se
Fim do para
```

#### 4.3.1.2 Estratégia defensiva II

Esta estratégia foi desenvolvida com o objetivo de induzir a equipe adversária a conduzir a bola para zonas menos perigosas de jogo e, assim, ganhar tempo para que a defesa possa se posicionar mais adequadamente. Para isso, a primeira etapa consiste em definir o agente responsável pela contenção, que fará opressão ao portador da bola. Na sequência, os agentes que estiverem fora do centro de jogo devem se movimentar em

direção ao centro da baliza de sua equipe a fim de aumentar a concentração defensiva da equipe e retornar ao centro de jogo. Os jogadores que estão no centro de jogo devem, preferencialmente, se posicionar a fim de bloquear linhas de passe. As movimentações dos agentes, provenientes da contenção e do bloqueio da linha de passe, são computadas pelo algoritmo de planejamento de trajetória apresentado na seção 4.3.5. Caso ainda haja algum jogador de defesa sem função definida, então o algoritmo retorna para o fluxo de execução normal do Agent2D. O Quadro 4 apresenta o algoritmo da Estratégia Defensiva II.

Quadro 4 - Algoritmo da estratégia defensiva II

```

Se é o primeiro ciclo se defendendo, então
  O jogador de contenção será o que tem melhores condições de realizar a tarefa
Fim do se
Senão
  Se o jogador que realizou contenção no ciclo anterior é uma das três melhores opções no ciclo atual, então
    O jogador de contenção continuará a ser o mesmo do ciclo anterior
  Fim do se
  Senão
    O jogador de contenção será o que tem melhores condições de realizar a tarefa
  Fim do senão
Fim do senão
Se o jogador da contenção é ele próprio, então:
  Calcular ponto alvo de movimentação do jogador de contenção
  Prestar atenção na bola
  Retorna PlanejamentoDeTrajetoria(ponto)
Fim do se
Senão
  Para cada jogador de linha da equipe que se defende, exceto o de contenção, faça
    Se o jogador estiver fora do centro de jogo, então
      Movimentar o jogador para o centro de jogo
    Fim do se
  Senão
    Se o jogador estiver no centro de jogo e há adversário para se bloquear linha de passe, então
      Atribuir ao jogador a função de bloquear linha de passe de um adversário
    Se o jogador é ele próprio, então
      Calcular ponto para interceptar passe
      Prestar atenção no adversário
      Retorna PlanejamentoDeTrajetoria(ponto)
    Fim do se
  Fim do Se
Fim do senão
Fim do para
Se o adversário estiver próximo ao gol e um defensor sem função estiver próximo (menos de três metros), então
  Define ponto de marcação do adversário
  Retorna PlanejamentoDeTrajetoria(ponto)
Fim do se
Fim do senão

```

#### 4.3.2 Tática ofensiva da equipe iBots

Em relação à parte de jogo ofensiva, foi adotada somente uma estratégia, o que é considerado suficiente para testar a validade da hipótese verificada neste trabalho. Basicamente foi implementada a tomada de decisão do agente com a posse de bola,

apresentada na seção 4.3.6, e algumas movimentações simples de posicionamento. No mais, foi utilizado o fluxo de execução normal do Agent2D.

### **4.3.3 Resolução de conflitos entre agentes**

Conflitos entre agentes podem acontecer. Isso ocorre quando agentes competem por mesmo recursos, mais especificamente quando os comportamentos defensivos de contenção, marcação ou de bloqueio de linha de passe são disputados por dois ou mais agentes. Na equipe iBots, como não houve implementação de tática ofensiva distinta da do Agent2D, então não haverá conflitos a serem tratados. Por isso, a política de resolução de conflitos descrita nesta seção se refere única e exclusivamente à tática defensiva da equipe iBots.

Os agentes têm visão parcial do mundo e conhecimento e objetivos locais, o que pode fazer com que eles entrem em conflitos ocasionados por divergências nos modelos de mundo, oriundas de informações incompletas ou imprecisas do ambiente. No entanto, os agentes devem estar habilitados a interagirem entre si. Como nenhum agente possui visão global e autoridade sobre a sociedade de agentes, é necessário que os agentes coordenem as suas atividades voluntariamente a fim de evitar confusão, desordem e desorganização na equipe. Em caso de conflitos, o importante é que os agentes possuam uma noção de bem social e de preocupação em atingir objetivos compartilhados com outros agentes.

Na solução proposta, para resolução de conflitos, os agentes realizam negociação automática (JENNINGS *et al.*, 2000) por meio de três constituintes principais:

- Protocolo de negociação - Procura responder ao questionamento: como é feita a negociação para resolver o conflito? É, basicamente, um conjunto de regras que governam a interação entre os agentes participantes na negociação. O protocolo definido na equipe iBots estabelece que quando há conflito, então a preferência pelo recurso é do agente mais defensivo, de acordo com a divisão do campo em três setores (defensivo, meio-campo e ofensivo), e mais centralizado. Essa política foi definida com a finalidade de direcionar o jogo para zonas com menor risco;
- Objetos de negociação - Deve responder à pergunta: o que está em conflito e deve ser negociado? É o papel a ser desempenhado pelo agente, atributos sobre os quais se pretende chegar a acordo. Na equipe iBots o que pode ocasionar conflito entre agentes é quando há concorrência de recursos, quando comportamentos defensivos, apresentados na seção 4.3.1, são coincidentes. Isso ocorre quando dois



ou mais agentes são: eleitos para realizar contenção; responsáveis para marcar um mesmo adversário; ou responsáveis por bloquear uma mesma linha de passe.

- Modelos de Tomada de Decisão do Agente – Aqui o questionamento é: como ocorrerá será resolvido o conflito? Os agentes devem empregar a agir em consonância com o protocolo de negociação. Por exemplo, quando dois ou mais agentes robóticos disputam o comportamento de contenção, então a prioridade é de o que tem o menor número na camisa. Essa tomada de decisão foi possível de ser estabelecida porque a distribuição da numeração dos jogadores em campo, a partir do *Formation Editor*, foi realizada de maneira que todos os agentes do setor defensivo do campo tenham numeração menor do que os dos setores de meio-campo e ofensivo; do mesmo modo todos os agentes do setor de meio-campo têm numeração de camisa menor do que os do setor ofensivo. Além disso, os jogadores mais centralizados de um mesmo setor têm numerações menores. Quando um agente não assume o papel proveniente de conflito, ele volta a ficar disponível na execução linear do algoritmo de estratégia defensiva. A distribuição da numeração das camisas dos agentes em campo no sistema tático 4-4-2, que é o sistema adotado na equipe iBots, é apresentada na Figura 44.

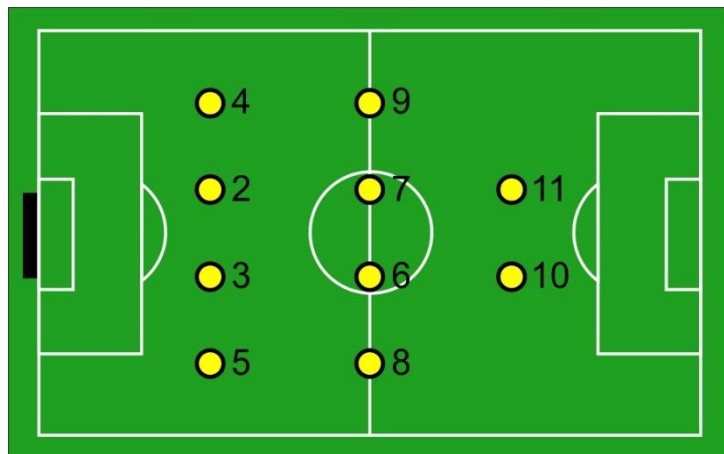


Figura 44 - Numeração da camisa dos agentes de linha da equipe iBots no sistema tático 4-4-2

Em resumo, se o algoritmo de tática defensiva da equipe iBots, apresentada na seção 4.3.1, retornar que o próprio agente deve realizar contenção e ele recebe mensagem sonora de ciclo anterior dizendo que outro agente deve fazer esta mesma tarefa, então é detectado conflito e este conflito deve ser sanado. Para isso, são tomadas as decisões a seguir: 1) se o agente recebeu mensagem de um companheiro com número de camisa menor do que a dele próprio e a diferença de contenção é pequena (valor definido por uma constante), então o outro agente será responsável pela tarefa; 2) senão, ele próprio

será responsável pela tarefa e envia mensagem comunicando a decisão aos demais companheiros de equipe.

#### 4.3.4 Movimentação dos agentes robóticos

Para realizar os comportamentos defensivos, os agentes necessitam se movimentar. A movimentação é o que faz um jogador sair de um ponto e chegar em outro. A movimentação implementada usa o método `rcsc::Body_GoToPoint()` do Agent2D, todavia faz algumas verificações para otimizar e garantir movimentação adequada. O método implementado foi nomeado de `IrPara()` e está descrito no Quadro 5. Os parâmetros `destino` e `bola` indicam, respectivamente, o ponto alvo de movimentação e se o jogador deve virar para a bola (`true`) ou para o ponto armazenado em `destino` (`false`).

Quadro 5 - Algoritmo de movimentação dos agentes

```
void SamplePlayer::IrPara(TPos *destino, bool bola) {
    if(destino!=NULL) {
        rcsc::Vector2D ponto;
        ponto.x=destino->x;
        ponto.y=destino->y;

        TPos self;
        self.x=world().self().inertiaPoint(1).x;
        self.y=world().self().inertiaPoint(1).y;
        if(ibotsMath.DistanciaEuclidiana(self,*destino)>0.1)
            rcsc::Body_GoToPoint(ponto,1.0,ServerParam::MAX_DASH_POWER).execute(this);
        else {
            this->setNeckAction(new Neck_TurnToPoint(ponto));

            if(bola)
                this->doTurn(this->world().ball().angleFromSelf()-this->world().self().body());
            else {
                TPos gol;
                gol.x=-52.5;
                gol.y=0.0;
                double ang=ibotsMath.Angulo(gol,*destino);
                this->doTurn(ang-this->world().self().body());
            }
        }
        delete destino;
    }
}
```

#### 4.3.5 Planejamento de trajetória dos agentes

A movimentação de um robô de um ponto a outro em um ambiente dinâmico não é tão simples uma vez que podem aparecer obstáculos no percurso. Assim, um robô autônomo móvel, que é um agente robótico, deve ser capaz de planejar sua própria locomoção e de decidir quais movimentos são necessários para isto. O conceito de planejamento de trajetória é muitas vezes equivocadamente confundido com o conceito

de detecção de colisão. Sem dúvida, uma das preocupações que um algoritmo de planejamento de trajetória deve ter é não colidir com obstáculos. No entanto, o conceito de planejamento de trajetória é mais abrangente. Deve ser considerada, ainda, a posição na qual se objetiva chegar e a trajetória planejada para execução deve preferencialmente ser ótima, ou seja, com menor custo de acordo com a medida de desempenho de cada problema.

Para JENSEN et al. (2003), o maior desafio na navegação dos robôs está em representar o ambiente de forma compacta. Existem vários métodos para resolver problemas gerais de planejamento de trajetórias. Entretanto, os métodos são baseados em algumas técnicas gerais. As três principais abordagens utilizadas pelas técnicas de navegação de robôs móveis autônomos são: *roadmaps*, decomposição de células e campo potencial artificial.

A técnica adotada neste trabalho foi o campo potencial artificial (KHATIB, 1986), que tem como princípio fundamental a movimentação do robô sob um campo de forças artificiais, geradas pelos obstáculos e pelo alvo. O potencial, seu gradiente, deve ser contínuo. Os obstáculos (outros robôs) e o objetivo (uma posição no campo de jogo) geram campos de repulsão e de atração, respectivamente, obtendo um movimento (seguindo o gradiente) através do qual os obstáculos são evitados e espera-se que o robô atinja seu objetivo (Figura 45). Essas forças são oriundas de uma função chamada de potencial artificial.

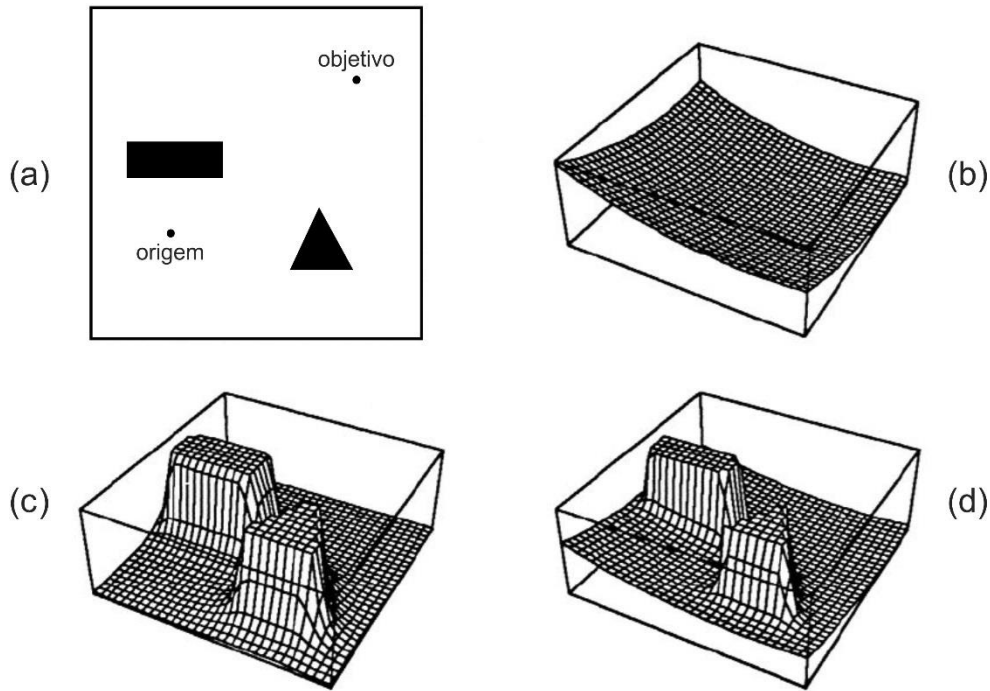


Figura 45 - Exemplo de campo potencial: (a) ambiente, com dois obstáculos, visto por cima; (b) força de atração exercida pelo objetivo; (c) forças de repulsão decorrentes dos obstáculos; (d) resultado final das forças de atração e repulsão (LATOMBE, 1991)

A função potencial,  $U : F \rightarrow R$ , deve atrair o robô para a posição objetivo e repelir o robô para longe dos obstáculos. Um potencial de atração  $U_{atr}$  deve estar associado a uma posição  $x$ , que representa o objetivo, e um potencial de repulsão  $U_{rep}$  induzido pelo obstáculo que deve repelir o robô para longe dele, associado à sua posição  $x$ . O campo repulsivo não deve afetar o movimento do robô quando este estiver a uma distância muito grande. O potencial total é dado pela equação 29.

$$U(x) = U_{atr}(x) + U_{rep}(x) \quad (29)$$

A força resultante  $f$  é dada pela equação 30.

$$\begin{aligned} F &= f_{atr} + f_{rep} \\ f_{atr} &= -\nabla U_{atr}(x) \\ f_{rep} &= -\nabla U_{rep}(x) \end{aligned} \quad (30)$$

onde  $f_{atr}$  é uma força de atração que guia o robô até o objetivo e  $f_{rep}$  é uma força repulsiva produzida pela superfície do obstáculo.

A equação que expressa o campo potencial de atração é definida pela equação 31.

$$U_{atr}(x) = \frac{1}{2} k(x - x_{atr})^T(x - x_{atr}) \quad (31)$$

onde  $k$  é uma constante. A força exercida sobre o robô é apresentada na equação 32.

$$f_{atr}(x) = -\nabla U_{atr}(x) = -k(x - x_{atr}) \quad (32)$$

Dessa forma, proporcional à distância do robô à posição do objetivo. O potencial repulsivo é definido pela equação 33.

$$U_{rep}(x) = \begin{cases} \frac{1}{2}k\left(\frac{1}{d} - \frac{1}{d_0}\right)^2 & se \ d < d_0 \\ 0 & se \ d \geq d_0 \end{cases} \quad (33)$$

onde  $d$  é a distância entre o robô e o obstáculo,  $d_0$  é a distância máxima de influência do obstáculo e  $k$  uma constante de ganho. A força repulsiva induzida por este campo está na equação 34.

$$U_{rep}(x) = \begin{cases} k\left(\frac{1}{d} - \frac{1}{d_0}\right)\frac{1}{d^2}\frac{dd}{dx} & se \ d < d_0 \\ 0 & se \ d \geq d_0 \end{cases} \quad (34)$$

onde  $\frac{dd}{dx}$  é o vetor unitário segundo o qual a força é aplicada.

De forma geral, para  $n$  obstáculos, a força total geral pelos obstáculos  $f_{rep}$  é expressa pela equação 35.

$$f_{rep_t} = \sum_{i=1}^n f_{rep_i} \quad (35)$$

A força resultante dos campos de atração e repulsão é apresentada na equação 36.

$$f = f_{atr} + f_{rep_t} \quad (36)$$

Por fim, a força resultante  $f$  deve ser aplicada no controle do robô.

O campo potencial artificial é muito popular entre os pesquisadores de Robótica e é comumente adotado no futebol de robôs (NAGASAKA *et al.*, 2001) (MEYER *et al.*, 2003) (SILVA, 2006) por ser de baixo custo computacional, algo bastante interessante para aplicações de futebol de robôs, e ser bastante eficiente em ambientes com restrição temporal, quando comparado a outros métodos.

A Figura 46 ilustra um cenário gerado pelo aplicativo *Soccer Scenes* e as trajetórias planejadas, como exemplo, para os jogadores da equipe amarela. No algoritmo de trajetória implementado, todos os jogadores, adversários ou companheiros de equipe, são tratados como obstáculos (campos de repulsão) e o objetivo (campo de atração) varia de acordo com a função de cada jogador de acordo com o cenário. Note, na Figura 46, que os obstáculos são contornados, o que evita colisões (encontros faltosos) entre jogadores.

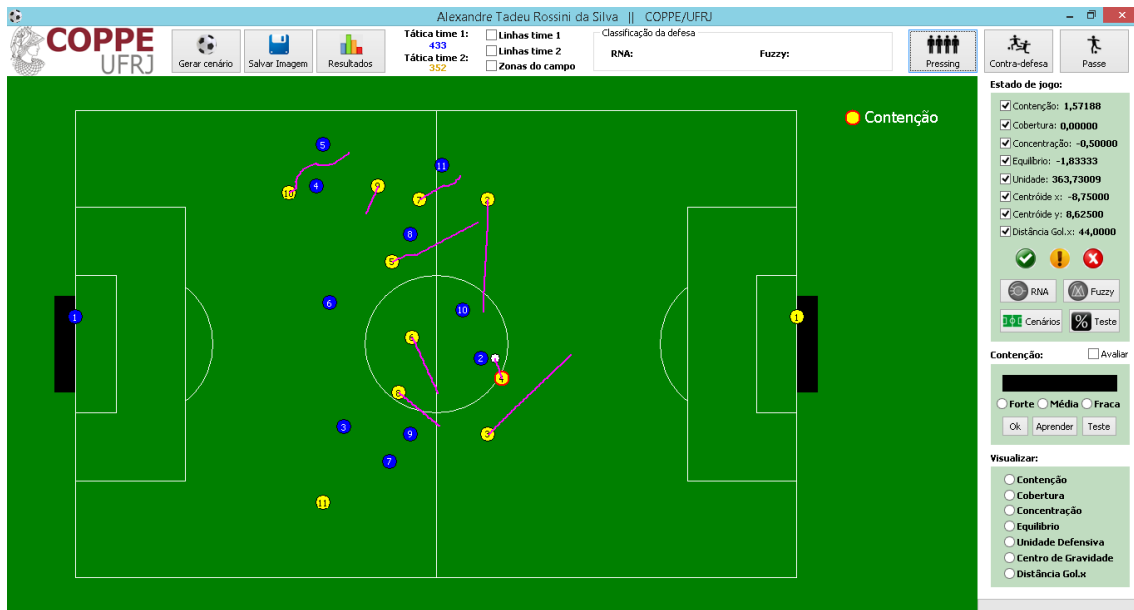


Figura 46 – Exemplo de cenário gerado pelo aplicativo *Soccer Scenes* e as trajetórias planejadas

Vale atenção especial para a trajetória do jogador dez da equipe amarela (Figura 47). Note que para chegar ao ponto de atração, que é marcar o jogador cinco da equipe azul, ele primeiro desvia do jogador quatro e depois desvia do jogador cinco para conseguir chegar ao objetivo.

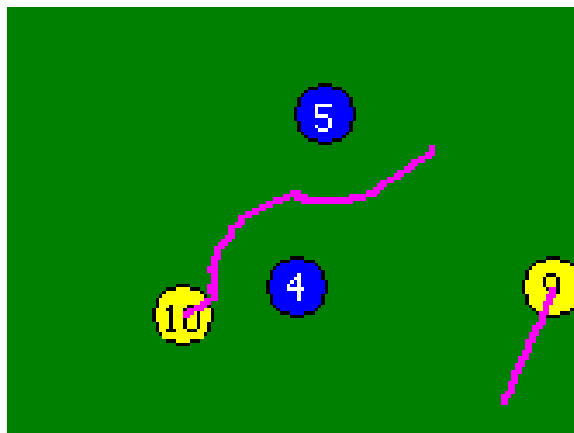


Figura 47 – Destaque ampliado da trajetória do jogador dez da equipe amarela para o cenário da Figura 46

O problema mais conhecido da abordagem por campo potencial é a possibilidade de convergência do movimento para regiões em estado de potencial mínimo local. Um exemplo de mínimo local é apresentado na Figura 48. O jogador sete da equipe amarela tem como objetivo marcar o jogador oito da equipe azul. Para isso, a trajetória determinada pelo campo potencial artificial força a passagem por entre os jogadores oito e sete adversários, o que fica impossibilitada uma vez que o campo de repulsão, em destaque tracejado, impede isso.

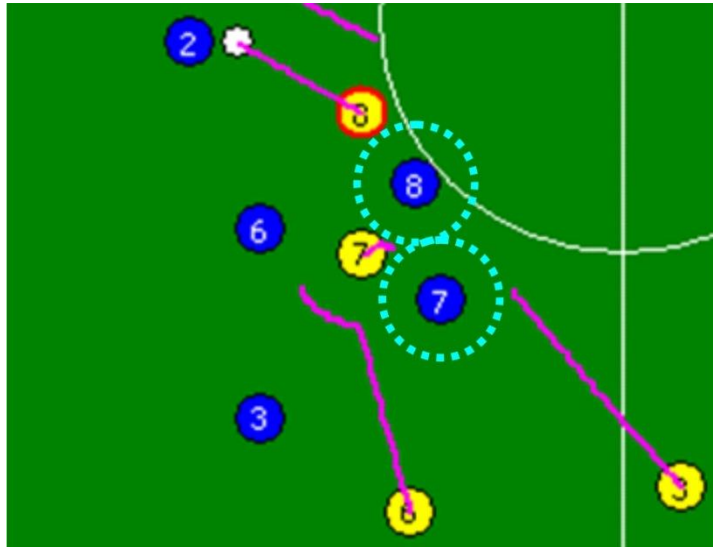


Figura 48 – Exemplo de mínimo local no cálculo do campo potencial artificial

Há diversas heurísticas propostas para solucionar o problema dos mínimos locais, mas pelo fato do futebol ser uma aplicação extremamente dinâmica (em que os obstáculos estão em constante movimentação), o uso do método de campo potencial artificial sem a implementação de heurísticas pode ser uma solução viável e, por isto, foi a estratégia adotada.

#### 4.3.6 Tomada de decisão do agente com a posse de bola

O algoritmo de tomada de decisão implementado no agente para ser executado quando ele estiver com a posse de bola foi baseado na seguinte política: “se o jogador puder chutar a gol, então ele deve chutar; senão, passar a bola a alguém que possa chutar; senão, passar a bola a alguém que possa passar a alguém que possa chutar; senão...” (REIS, 2003, pp.302).

Jogador poder chutar a gol significa que o agente deve estar próximo ao gol adversário e em condições de chutar, ou seja, que não haja jogadores adversários com possibilidade de interceptar a bola por estarem posicionados entre o portador da bola e a posição do gol definida para chute. Passar a bola a alguém denota um agente realizar passe a um companheiro de equipe que esteja em condições de receber o passe. O agente não efetuará um passe, direto ou no vazio, para um companheiro que:

- está recebendo marcação FORTE, determinado por uma Rede Neuronal Artificial Perceptron de Múltiplas Camadas treinada para qualificar contenção em FRACA, MÉDIA ou FORTE. A arquitetura da rede neuronal e como foi realizado seu treinamento está descrito na seção 5.2;

- houver algum adversário na linha de passe, para isso verifica se há algum oponente na área compreendida por 20 graus a mais e a menos do ângulo formado entre o ponto candidato e a bola e algum oponente estiver mais próximo da bola do que o ponto candidato.

A solução adotada é recursiva e, para identificar jogadores melhores posicionados, precisou definir critérios como posicionamento dos jogadores em campo e da qualidade da posição para chute/passe. O posicionamento ofensivo de um agente em campo é quantificado pelo método *DistanciaDoGol()* da equipe iBots. Esse método tem como parâmetro um atributo do tipo *TPos* (similar aos atributos da classe *Vector2D* do *Agent2D* e criado para utilização do *Soccer Scenes*) que recebe como argumento a posição do jogador que está sendo avaliado, utilizada para calcular sua distância em relação ao gol adversário. Quanto menor a distância de um agente em relação ao gol adversário, melhor é o posicionamento ofensivo deste agente.

O método *DistanciaDoGol()* considera como gol adversário a posição 52.5 do eixo  $x$  e em relação ao eixo  $y$  o gol adversário é discretizado em 15 pontos, separados em uma unidade, e tem como centro a posição 0 (zero) do plano cartesiano do campo de jogo. Em suma, isso significa que os pontos verificados pelo método *DistanciaDoGol()* são: (52.5, -7), (52.5, -6), (52.5, -5), (52.5, -4), (52.5, -3), (52.5, -2), (52.5, -1), (52.5, 0), (52.5, 1), (52.5, 2), (52.5, 3), (52.5, 4), (52.5, 5), (52.5, 6) e (52.5, 7). Vide Figura 49. Assim, quanto menor a distância de um companheiro em relação a um dos 15 pontos considerados do gol adversário, melhor é o posicionamento ofensivo do jogador.



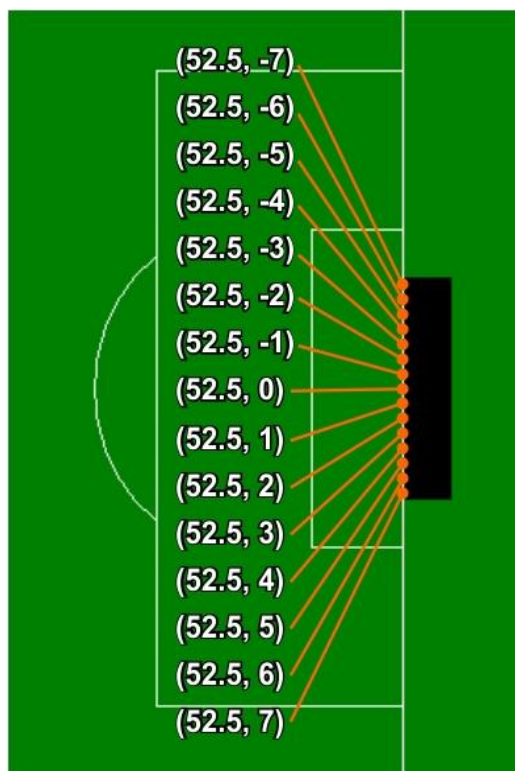


Figura 49 - Pontos considerados pelo método *DistanciaDoGol()* para quantificar o posicionamento de um companheiro de equipe

Em suma, se a melhor posição retornada pelo algoritmo for o gol adversário, então o agente deverá chutar; senão, o agente portador da bola realizará passe para o agente da mesma equipe que esteja com maior qualidade de posição ofensiva, exceto quando o retorno seja ele próprio. Quando da realização do passe, o jogador que deverá receber o passe é avisado via mensagem sonora no simulador com mensagem contendo informação da posição que este deve receber a bola. Caso o algoritmo da tomada de decisão implementado decida não chutar a gol e não passar a bola para outro companheiro, então volta-se à execução linear do Agent2D.

Assim como os jogadores de linha, ao goleiro também é um agente e necessita tomar decisões. Em relação ao goleiro, foram utilizados exclusivamente os algoritmos contidos no Agent2D.

#### 4.3.7 Sistema tático adotado pela equipe

Para que os agentes possam tomar suas decisões e se movimentar pelo ambiente atuando nele, é necessário que eles sejam regidos taticamente por um sistema e que saibam qual sua função dentro deste sistema. Apesar das diversas opções, decidiu-se por implementar no Agent2D apenas um sistema tático, o que é considerado suficiente para testar a validade da hipótese levantada neste trabalho. O sistema tático escolhido foi o 4-

4-2: linha defensiva com dois zagueiros e dois laterais (definidos como *CenterBack* e *SideBack*, respectivamente, no *Agent2D*); dois volantes e dois meias armadores no meio de campo (definidos como *DefensiveHalf* e *OffensiveHalf*, respectivamente, no *Agent2D*); e dois atacantes na linha ofensiva (definidos como *SideForward* no *Agent2D*).



Figura 50 – Exemplo de modelagem do sistema 4-4-2 no *Formation Editor*.

Para distribuir taticamente os jogadores no campo de jogo foi utilizado o aplicativo *Formation Editor*, apresentado na seção 3.4.2. Foram manipulados os arquivos *defensive-formation.conf* e *offensive-formation.conf* do *Agent2D*, que são chamados quando a partida está no modo *play on* e, respectivamente, a equipe está sem e com a posse de bola. Cada um dos arquivos contém 83 pontos, que abstraem um conjunto representativo de posições do campo de jogo. Veja na Figura 50 exemplo do sistema 4-4-2 modelado no *Formation Editor*. As linhas de jogadores foram destacadas por retas tracejadas que foram adicionadas em posterior edição de imagem, ou seja, não fazem parte do *Formation Editor*.

#### 4.3.8 Modelagem da compactação do futebol

O sistema tático, além de definir o posicionamento e a função de cada jogador em campo, também orienta o funcionamento de outros conceitos táticos, entre eles o da compactação. Defensivamente, a compactação objetiva fazer com que a equipe diminua o espaço de jogo do time adversário que ataca por meio de movimentos coletivos coordenados. Esses movimentos costumam utilizar da linha de impedimento para reduzir o espaço ofensivo adversário.

Para implementar o conceito de compactação da Teoria do Futebol, que ocorre em função da posição da bola, no Agent2D foi utilizado o aplicativo *Formation Editor* uma vez que o modelo de posicionamento tático dos jogadores no *Formation Editor* também ocorre em função da posição da bola. Assim como no sistema tático, foram manipulados os arquivos *defensive-formation.conf* e *offensive-formation.conf*. Isso significa que os 83 pontos desses arquivos foram editados a fim de garantir posicionamento tático dos agentes na formação 4-4-2 de maneira que se movimente em bloco com espaços reduzidos, obedecendo ao conceito de compactação da Teoria do Futebol.

### 4.3.9 Princípios técnicos desenvolvidos

Mesmo havendo vários princípios técnicos no Agent2D, apresentados na seção 3.4, foram desenvolvidos métodos próprios da equipe iBots, apresentados a seguir.

#### 4.3.9.1 Domínio de bola

Domínio de bola é um fundamento técnico que se caracteriza pela habilidade de recepcionar a bola. É importante porque a bola precisa estar devidamente controlada para que o jogador possa passá-la com qualidade a algum companheiro. Na implementação deste fundamento foi necessário implementar métodos capazes de identificar a velocidade da bola e o ângulo do jogador em relação à bola para, assim, aplicar uma força contrária (através do comando *kick*) capaz de fazer a bola parar ou deixá-la quase parada. O Quadro 6 apresenta o método *DominarBola()*, responsável por parar a bola.

Quadro 6 - Algoritmo de domínio de bola

```
bool SamplePlayer::DominarBola() {
    if(!world().self().isKickable())
        return false;
    if(!world().ball().velValid()) {
        Vector2D acelereacao=world().self().vel()-world().ball().rpos();
        double potencia_chute=acelereacao.r()/world().self().kickRate();
        potencia_chute*=0.5;
        doKick(std::min(potencia_chute,ServerParam::i().maxPower()),acelereacao.th()-world().self().body());
        return true;
    }
    double raio=0.0;
    AngleDeg angulo;
    iBotsCalculaAceleracao(&raio,&angulo);

    if(raio<0.1)
        return false;

    double potencia_chute=raio/this->world().self().kickRate();
    potencia_chute=std::min(potencia_chute,ServerParam::i().maxPower());
    return this->doKick(potencia_chute,angulo-this->world().self().body());
}
```

O método *iBotsCalculaAceleracao()*, chamado pelo método *DominarBola()*, calcula os atributos *raio* e *angulo* e é apresentado no Quadro 7.

Quadro 7 - Algoritmo *iBotsCalculaAceleracao()* chamado pelo domínio de bola

```

void SamplePlayer::iBotsCalculaAceleracao(double *raio, AngleDeg *angulo) {
    const double dist_segura=world().self().playerType().playerSize()+ServerParam::i().ballSize()+0.1;

    double dist_alvo=world().ball().distFromSelf();
    if(dist_alvo<dist_segura)
        dist_alvo = dist_segura;

    if (dist_alvo>world().self().playerType().kickableArea()-0.1)
        dist_alvo=world().self().playerType().kickableArea()-0.1;

    Vector2D alvo_rpos = world().ball().rpos();
    alvo_rpos.setLength(dist_alvo);

    Vector2D aceleracao=world().self().vel();
    aceleracao+=alvo_rpos;
    aceleracao-=world().ball().rpos();
    aceleracao-=world().ball().vel();

    *raio=aceleracao.r();

    if(*raio<0.01)
        return;

    const double aceleracao_max=ServerParam::i().maxPower()*world().self().kickRate();
    if(aceleracao_max>*raio) {
        //pode dominar a bola com sucesso
        *angulo=aceleracao.th();
        return;
    }

    //tenta manter a bola por perto
    Vector2D bola_proxima=world().self().vel();
    bola_proxima-=world().ball().rpos();
    bola_proxima-=world().ball().vel();

    double manter_dist=world().self().playerType().playerSize()+world().self().playerType().kickableMargin()*0.4;

    *raio=std::min(aceleracao_max,bola_proxima.r()-manter_dist);
    *angulo=bola_proxima.th();

    if(*raio<0.0) {
        *raio*=-1.0;
        *raio=std::min(*raio,aceleracao_max);
        *angulo-=180.0;
    }
}

```

#### 4.3.9.2 Passes

Dentre os fundamentos técnicos mais importantes, o passe merece destaque. O passe tem como objetivo: avançar a equipe mais rapidamente, explorar espaços vazios e

diminuir o desgaste físico dos jogadores. Os passes podem ser classificados em dois grupos: passe direto; e passe no vazio.

#### 4.3.9.2.1 Passe direto

Os passes diretos se caracterizam pelo envio da bola à exata posição em que se encontra algum companheiro de equipe. Por isso, a porcentagem de acerto deste tipo de passe é alta e são os passes mais utilizados durante uma partida de futebol. Para realizar o passe direto, foi utilizado comando `rcsc::Body_KickOneStep()` do Agent2D, descrito no Quadro 8, desde que seja passado por parâmetro a posição do companheiro de equipe no campo, que é do tipo *Vector2D*, e para ser chamado bastar incluir a biblioteca `#include <rcsc/geom/vector_2d.h>` do Agent2D.

Quadro 8 - Algoritmo de passe direto

```
bool SamplePlayer::PasseParaJogador(int recebedor, Vector2D alvo, double vel_inicial) {
    if(!world().self().isKickable() || recebedor<0)
        return false;

    if(vel_inicial==0.0)
        vel_inicial=ServerParam::i().ballSpeedMax()/1.0;

    int chutar_step=(world().gameMode().type()!=GameMode::PlayOn &&
        world().gameMode().type()!=GameMode::GoalKick_?1:3);
    if(Body_SmartKick(alvo,vel_inicial,vel_inicial*0.98,chutar_step).execute(this)) {
        if(DominarBola())
            return true;
        vel_inicial=std::min(world().self().kickRate()*ServerParam::i().maxPower(),vel_inicial);
        Body_KickOneStep(alvo,vel_inicial).execute(this);
        addSayMessage(new PassMessage(recebedor,alvo,effector().queuedNextBallPos(),effector().queuedNextBallVel()));
    }
    else {
        if(PararBola())
            return true;
        if(world().gameMode().type()==GameMode::PlayOn &&
            !world().self().goalie() && world().self().isKickable() && world().existKickableOpponent()) {
            vel_inicial=std::min(world().self().kickRate()*ServerParam::i().maxPower(),vel_inicial);
            Body_KickOneStep(alvo,vel_inicial).execute(this);
            return true;
        }
        return false;
    }
}
if(config().useCommunication() && recebedor!=Unum_Unknown) {
    Vector2D alvo_buf=alvo-world().self().pos();
    alvo_buf.setLength(1.0);
}
return true;
}
```

#### 4.3.9.2.2 Passe no vazio

O passe no vazio, do inglês *passing into space*, é bastante usado quando uma partida é jogada em alta velocidade. O agente sem a bola inicia uma passagem, fazendo

uma corrida para um espaço vazio. O agente com posse de bola deve observar o ritmo e a orientação do receptor. Tempo e precisão são essenciais.

No passe no vazio, a bola é passada a alguma posição futura de algum companheiro de equipe a fim de deixá-lo em boa situação de campo, preferencialmente, de chute a gol. A comunicação entre os agentes envolvidos em passes no vazio é muito importante para otimizar o *timing* da jogada, por isto há troca de mensagens sonora entre os agentes envolvidos. Os passes no vazio podem ser classificados em: *leading pass*; *through pass*.

O *leading pass* é um passe que visa encontrar um companheiro, denominado líder, para receber a bola, ou seja, a bola é passada para um espaço vazio à frente do receptor (veja Figura 51a). É um tipo mais simples de passe no vazio. Geralmente ocorre nas laterais do campo.

*Through Pass* também é chamado de *Tunnel Pass* e *Piercing Pass*. É um passe realizado entre dois adversários em direção a um espaço vazio, preferencialmente entre a linha de zagueiros e o goleiro adversário (Figura 51b). É um passe comumente utilizado para deixar o atacante sozinho com o goleiro. Geralmente provoca algum tipo de desorganização na defesa adversária.

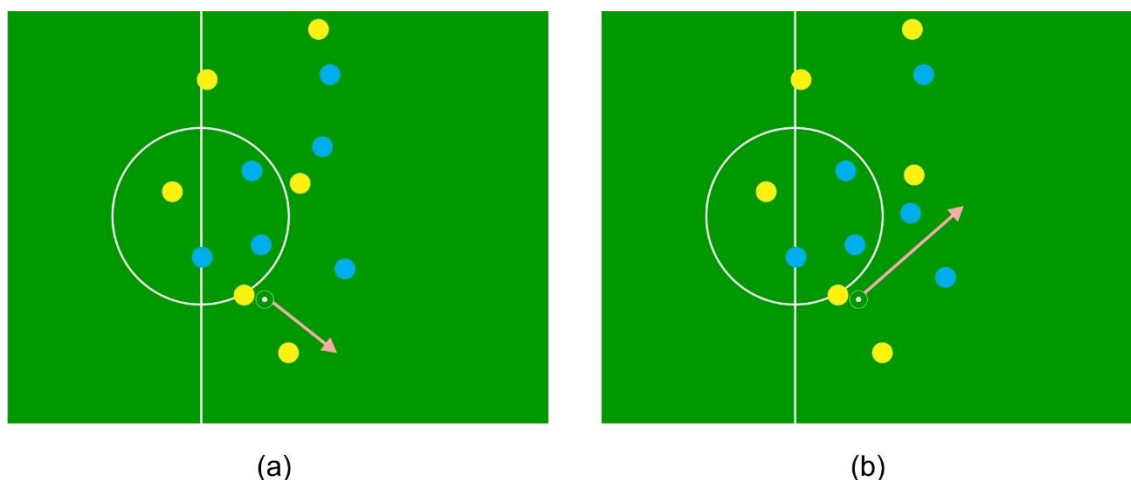


Figura 51 – Exemplos de passe no vazio: (a) *leading pass* e (b) *through pass*

No algoritmo desenvolvido, tanto para *Leading Pass* quanto para *Through Pass*, é verificado o grau de segurança de passar a bola ao espaço vazio. Ambos os casos são tratados por um único algoritmo. Alguns pontos candidatos são levantados e analisados em um processo de discretização. Sete pontos com intervalos de 15 graus e espaçados em três metros compreendem os 35 pontos analisados no passe no vazio proposto neste trabalho (Figura 52). Adicionado o ponto da posição do jogador, que corresponde ao passe direto, aos 35 pontos do passe no vazio, resulta em 36 pontos analisados por companheiro de equipe no processo de decisão do passe.

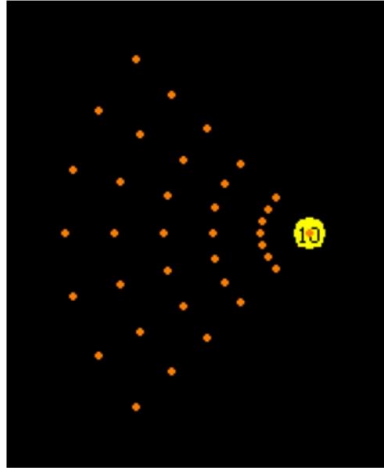


Figura 52 – Pontos candidatos para passe

Ao analisar os pontos, são descartados os que são considerados de menor qualidade. Os pontos descartados são aqueles em condições de serem interceptados por algum adversário de acordo com os critérios a seguir:

- se o ponto candidato estiver fora do campo de jogo;
- se o jogador mais próximo do ponto candidato é um adversário;
- se o ponto candidato está muito longe, ou seja, a fim de minimizar passes longos, que são mais propensos a erros, os pontos com mais de 30m de distância da bola são descartados;
- se o companheiro da equipe estiver em impedimento, então todos os pontos candidatos associados a ele são descartados;
- se houver algum adversário na linha de passe, ou seja, em condições de interceptar o passe (verifica se há algum oponente na área compreendida por 20 graus a mais e a menos do ângulo formado entre o ponto candidato e a bola e algum oponente estiver mais próximo da bola do que o ponto candidato – área delimitada pelo contorno vermelho no exemplo da Figura 53).

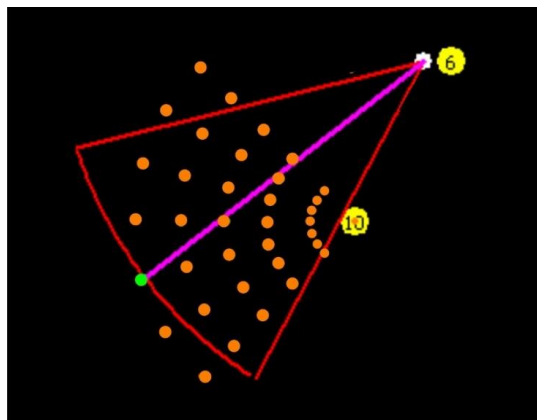


Figura 53 – Exemplo de ponto eleito para passe

Aos pontos não descartados, são calculadas as suas distâncias euclidianas em relação ao gol. Para isso, é utilizado o método *DistanciaDoGol()*, apresentado na seção 4.3.6. Esse método tem como parâmetro um atributo do tipo *TPos* (similar aos atributos da classe *Vector2D* do *Agent2D* e criado para utilização do *Soccer Scenes*) que recebe como argumento a posição candidata a receber o passe no vazio. O ponto mais próximo do gol é considerado o mais promissor. Em seguida o jogador com a posse de bola calcula a força que deverá exercer sobre a bola para executar o passe.

Quadro 9 – Algoritmo de passe no vazio

```

Para cada um dos jogadores i da equipe controlada
  Se jogador i não está em posse da bola, então
    Para j de 5 a 1 com decremento em uma unidade
      Para k de 1 a 7 com incremento em uma unidade
        Variável ângulo recebe 120 graus mais 15 * k
        Posição candidata do jogador i no eixo x recebe posição atual do jogador i no eixo x + cos(ângulo)*(j*3)
        Posição candidata do jogador i no eixo y recebe posição atual do jogador i no eixo y + sen(ângulo)*(j*3)
        Se o passe para a posição candidata não pode ser interceptado, então
          Armazenar a posição em um vetor de candidatos
        Fim do se
      Fim do para
    Fim do para
  Fim do se
  Variável mínimo armazena +∞
  Variável eleito armazena -1
  Para cada posição i do vetor de posições candidatas
    Calcular distância euclidiana da posição i em relação ao centro do gol adversário
    Se posição i < mínimo então
      mínimo armazena distância euclidiana da posição i
      Variável eleito armazena i
    Fim do se
  Fim do para
  Retorno variável eleito
ra cada um dos jogadores i da equipe controlada
  Se jogador i não está em posse da bola, então
    Para j de 5 a 1 com decremento em uma unidade
      Para k de 1 a 7 com incremento em uma unidade
        Variável ângulo recebe 120 graus mais 15 * k
        Posição candidata do jogador i no eixo x recebe posição atual do jogador i no eixo x + cos(ângulo)*(j*3)
        Posição candidata do jogador i no eixo y recebe posição atual do jogador i no eixo y + sen(ângulo)*(j*3)
        Se o passe para a posição candidata não pode ser interceptado, então
          Armazenar a posição em um vetor de candidatos
        Fim do se
      Fim do para
    Fim do para
  Fim do se
  Variável mínimo armazena +∞
  Variável eleito armazena -1
  Para cada posição i do vetor de posições candidatas
    Calcular distância euclidiana da posição i em relação ao centro do gol adversário
    Se posição i < mínimo
      Então mínimo armazena distância euclidiana da posição i
      Variável eleito armazena i
    Fim do se
  Fim do para
  Retorno variável eleito

```



O Quadro 9 apresenta o algoritmo implementado. Note que, ao contrário dos demais algoritmos de princípios técnicos, que foram apresentados em código-fonte, o algoritmo de passe no vazio está em pseudocódigo uma vez que em código-fonte é ele muito extenso. No algoritmo, se o valor retornado pelo algoritmo for igual a -1, então não deverá ser realizado um passe no vazio.

Para ilustrar o resultado do algoritmo de passe, é apresentado um exemplo extraído do aplicativo *Soccer Scenes*, Figura 54. Os pontos em cor alaranjada foram descartados e os verdes são candidatos não descartados. O ponto vencedor está indicado com um segmento de reta na cor magenta.

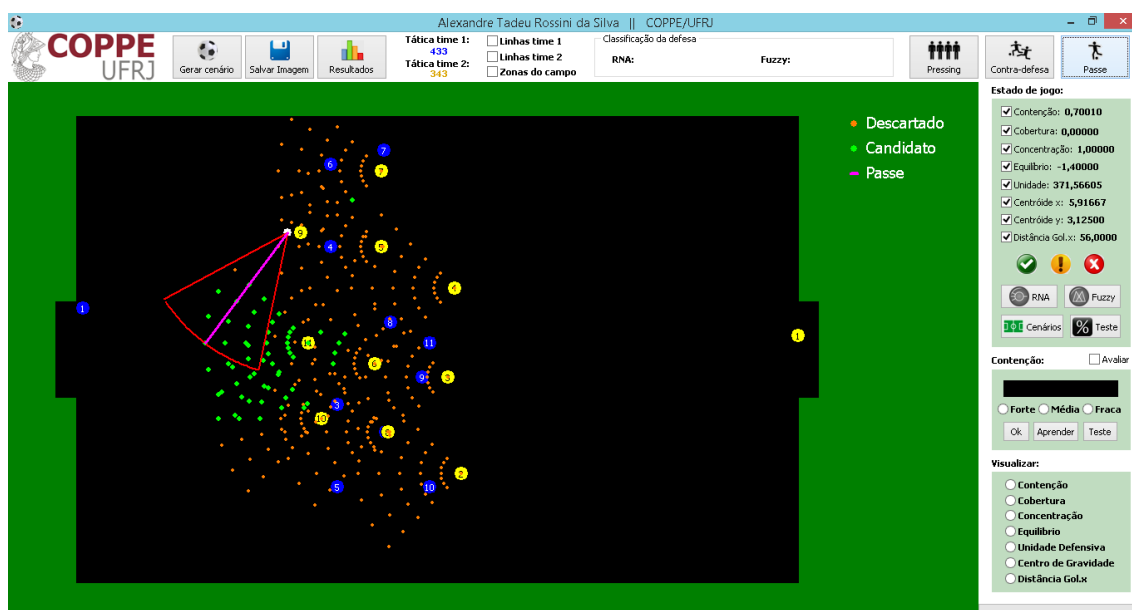


Figura 54 – Exemplo de aplicação do algoritmo de passe

#### 4.3.9.3 Chute

O chute a gol é realizado pelo comando do Agent2D apresentado no Quadro 10. O argumento *posicao* é do tipo *Vector2D* e indica o ponto de referência do gol para chute.

Quadro 10 - Comando do Agent2D utilizado para realizar chute a gol

```
rcsc::Body_KickOneStep(posicao,ServerParam::i().ballSpeedMax()).execute(this);
```

#### 4.3.9.4 Desarme

Verifica se o jogador pode tentar um desarme. Para isso, o jogador não deve estar paralisado, ocasionado pela realização de um desarme (*tackle*) anterior; existir um adversário com a posse de bola; e a probabilidade de realizar desarme seja maior do que o valor mínimo de probabilidade aceitável para realização do desarme, que deve ser passado como argumento ao parâmetro *min\_prob* do método *IsTackle()*. Veja Quadro 11.

### Quadro 11 - Algoritmo que verificar se é possível realizar desarme

```
bool SamplePlayer::IsTackle(double min_prob) {
    if (world().self().isFrozen())
        return false;

    if (world().existKickableOpponent() && world().self().tackleProbability()>min_prob)
        return true;

    return false;
}
```

Se o jogador pode realizar desarme, então o método *RealizarTackle()*, que está expresso no Quadro 12, é chamado. O atributo *falta* do método *RealizarTackle()* é do tipo booleano e determina se o desarme pode ou não efetuar uma falta. Uma falta será evitada sempre que a bola estiver dentro da grande área defensiva da equipe ou quando o jogador a realizar o desarme já ter recebido cartão amarelo.

### Quadro 12 - Algoritmo de desarme

```
bool SamplePlayer::RealizarTackle() {
    double min_prob=0.85;
    if (IsTackle(min_prob)) {
        TPos bola;
        bola.x=this->world().ball().pos().x*(-1);
        bola.y=this->world().ball().pos().y;

        //não cometer falta dentro da grande área
        bool falta=false;
        if((bola.x<36 || bola.y<-20 || bola.y>20) && world().self().card()==NO_CARD)
            falta=true;

        double body_thr=80.0;
        double tackle_power = ServerParam::i().maxPower();
        if (this->world().self().body().abs()<body_thr) {
            this->doTackle(tackle_power,falta);
            this->setNeckAction(new Neck_TurnToBallOrScan());
            return true;
        }
        else if (this->world().self().body().abs()>180.0-body_thr) {
            this->doTackle(tackle_power*(-1),falta);
            this->setNeckAction(new Neck_TurnToBallOrScan());
            return true;
        }
    }
    return false;
}
```

## 5. Testes e resultados

No capítulo quatro foi realizado estudo sobre os princípios fundamentais defensivos (contenção, cobertura defensiva, concentração, equilíbrio e unidade defensiva) e foram projetados algoritmos para quantificar a qualidade de cada um destes princípios. Esses algoritmos visam classificar se uma defesa se encontra organizada ou não, algo necessário para verificar a validade dos Modelos de Jogo, objeto de estudo desta tese. Nos testes, quatro especialistas do futebol (dois treinadores de equipe de base de escolinha de futebol e dois auxiliares) foram utilizados com a finalidade de aferir esses algoritmos. No entanto, antes de detalhar os testes com os especialistas, são apresentados resultados que reforçam a validade do modelo matemático-computacional do simulador *Soccer Server*, que teve estudo exposto na seção 3.5.

### 5.1 Testes do simulador *Soccer Server* com a equipe iBots

Foram realizadas 50 partidas da equipe iBots contra as equipes Agent2D 3.1.1, WrightEagle 2009 e FC Portugal 2010. A Figura 55a apresenta a distância média percorrida por cada um dos jogadores da equipe iBots nas partidas contra o Agent2D. O jogador que percorreu em média a maior distância foi o de número nove, na função de meia-armador. Dos jogadores de linha o que percorreu a menor distância em média foi zagueiro de número três. O mesmo fenômeno aconteceu nas partidas contra WrightEagle, Figura 55b, e FC Portugal, Figura 55c, onde o jogador que também percorreu em média a maior distância foi o de número nove e o de linha que percorreu a menor distância também foi um defensor, em ambos casos o jogador de número dois. Como previsto, o jogador que sempre percorreu menor distância em todos foi o goleiro. A Figura 55d apresenta a distância média percorrida pelos jogadores em todas as partidas.

Na Figura 56 observa-se que os jogadores de meio de campo foram os que percorram as maiores distâncias, em média. Os que percorrem distâncias menores foram os zagueiros. Esses resultados eram esperados uma vez que BARROS *et al.* (2007) revelam que, dentro da amostragem analisada por eles, os jogadores que percorrem maiores distâncias são os de meio de campo, seguido pelos atacantes e, por último, os zagueiros. Além disso, na maioria dos estudos verifica-se que os meio-campistas percorrem maiores distâncias, enquanto os zagueiros são os que percorrem menores (GODINHO *et al.*, 2013). Saber quais jogadores percorrem maiores distâncias é

importante no planejamento tático uma vez estas posições devem ser preenchidas, preferencialmente, por jogadores com melhores condicionamentos físicos. Por exemplo, se um jogador titular do meio de campo se encontra no departamento médico ou suspenso, o treinador poderá optar entre dois suplentes de nível técnico similar por aquele que está melhor condicionado fisicamente. Se o nível técnico for diferente e as características físicas muito distintas, o condicionamento físico é apenas mais uma variável nessa tomada de decisão do treinador.

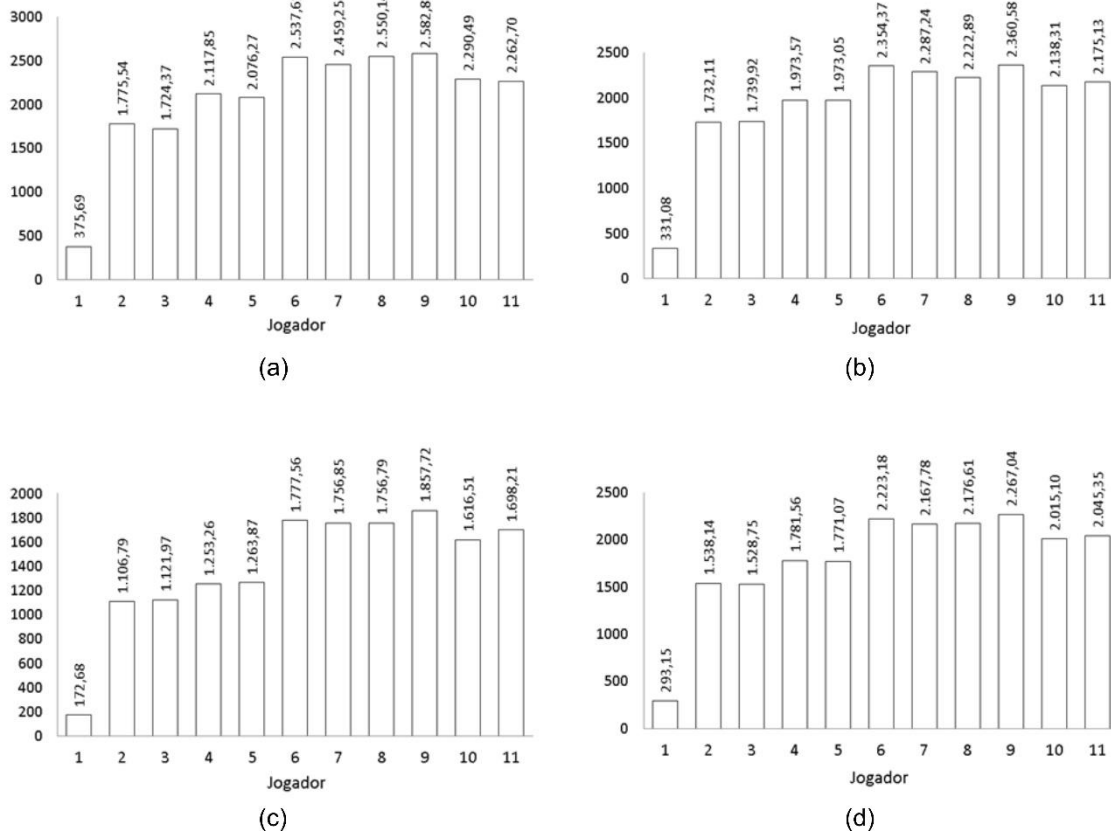


Figura 55 - Distância média percorrida pelos jogadores da equipe iBots: (a) contra a equipe Agent2D; (b) contra a equipe WrightEagle; (c) contra a equipe FC Portugal; (d) todas as partidas.

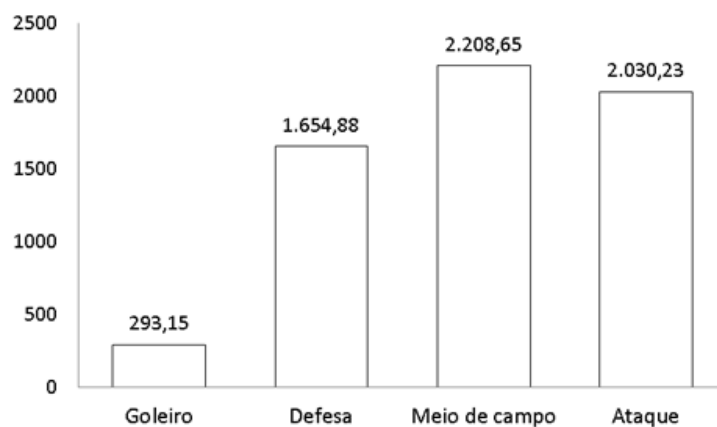


Figura 56 - Distância média percorrida pelos jogadores

A Figura 57 apresenta a velocidade média dos jogadores de linha. Consta-se que nos três setores os jogadores têm perda de velocidade média em campo ao longo da partida nos três setores: (a) defesa, (b) meio de campo e (c) ataque. Isso é evidenciado pela linha de tendência dos gráficos e era esperado, afinal, como já apresentado na seção 2.6.2, o desempenho físico dos atletas diminui ao longo de uma partida de futebol.

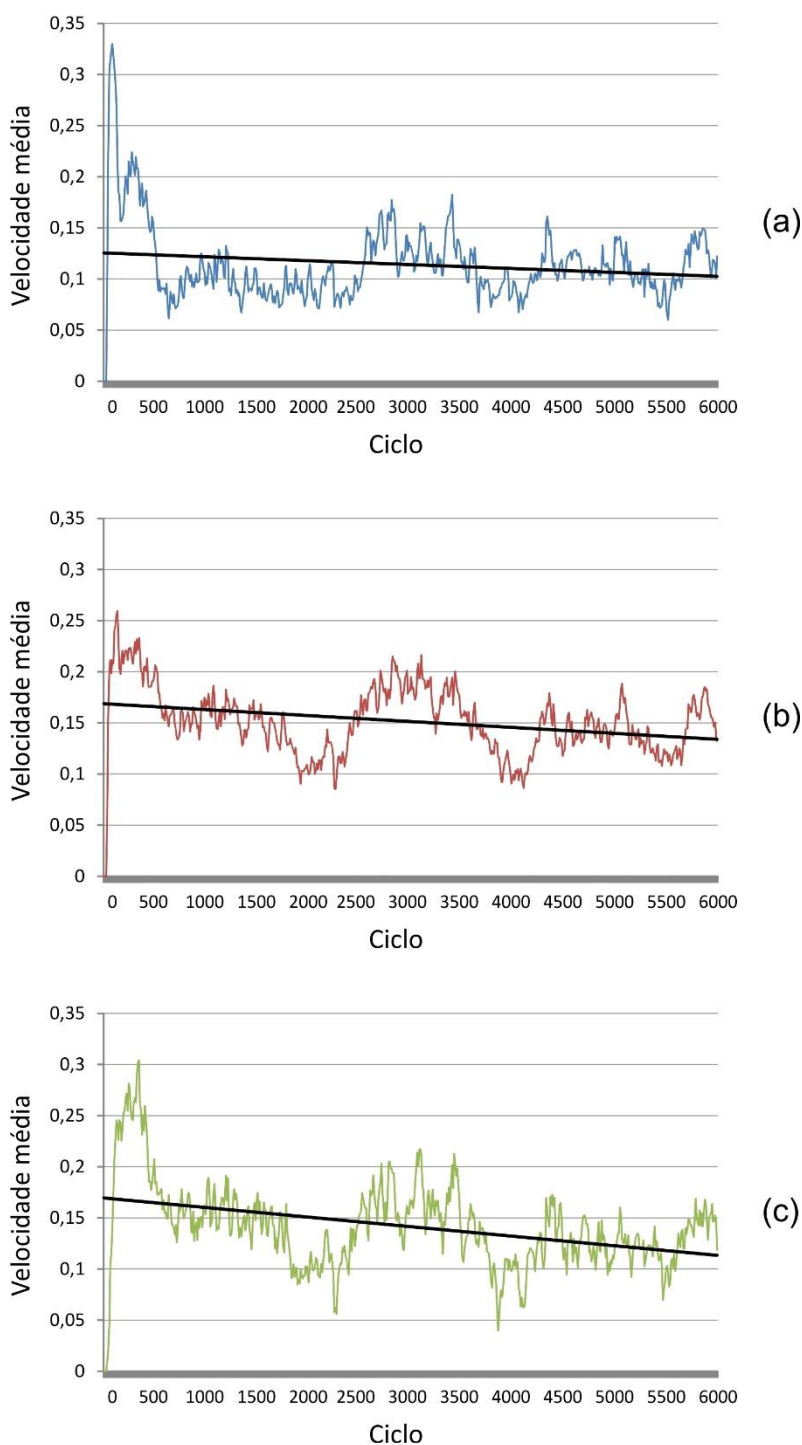


Figura 57 – Gráfico com velocidade média obtidas nos testes dos jogadores de linha: (a) defesa; (b) meio de campo; (c) ataque.

BARROS *et al.* (2007) expressam que os jogadores percorrem cerca de 7,1% de distância menor no segundo tempo do que no primeiro. Já BARBERO-ÁLVAREZ *et al.* (2008) registraram a movimentação de jovens jogadoras de futebol com GPS e verificaram que elas percorreram uma distância 8,1% menor no segundo tempo. Resultados próximos aos obtidos neste trabalho uma vez que a velocidade média dos jogadores virtuais de linha reduziram em 8,813% do primeiro para o segundo tempo nas simulações.

É importante acrescentar os desvios padrões das velocidades médias: 0,038, para a defesa; 0,033, para o meio de campo; e 0,042, para o ataque. Nesse sentido, esses dados permitem concluir que os jogadores de meio de campo têm menor variação de velocidade média, ou seja, tendem a permanecerem em movimento durante maior tempo em uma partida. Por outro lado, os jogadores de ataque têm maior variação de velocidade média.

## 5.2 Contenção

Em um primeiro momento foi solicitado aos especialistas que avaliassem o a resposta do algoritmo que determina o jogador responsável pela contenção. O aplicativo *Soccer Scenes* gerou 50 cenários aleatoriamente para cada especialista, que avaliou o cenário indicando o(s) jogador(es) que, na opinião dele, deveria(m) ser responsável(is) pela contenção. A possibilidade de selecionar mais de um jogador foi oferecida uma vez que poderiam ocorrer situações dúbias entre dois ou mais defensores. Por outro lado, o algoritmo implementado computacionalmente sempre determina somente um defensor como responsável pela contenção. O defensor determinado pelo algoritmo de contenção não foi apresentado aos especialistas para não influenciar em suas avaliações. Se o defensor eleito pelo algoritmo estava no conjunto determinado pelo especialista, então era computado como acerto do algoritmo; se não, erro. O resultado desta avaliação está expresso na Tabela 17.

Tabela 17 - Resultado do teste do jogador de contenção pelo algoritmo e por especialistas

	Acertos		Erros	
<b>Especialista 1</b>	48	96%	2	4%
<b>Especialista 2</b>	47	94%	3	6%
<b>Especialista 3</b>	47	94%	3	6%
<b>Especialista 4</b>	48	96%	2	4%
<b>Total</b>	190	95%	10	5%

Posteriormente, foi solicitado aos especialistas que eles avaliassem a qualidade da contenção dos cenários gerados pelo *Soccer Scenes*. Como no teste anterior, o aplicativo gerou 50 cenários aleatoriamente para cada especialista, que avaliou cada um dos cenários classificando a contenção realizada pelo defensor definido pelo algoritmo como FORTE, MÉDIA ou FRACA. Contenção FORTE é equivalente a uma excelente contenção, MÉDIA como contenção regular e FRACA como contenção ruim. Com isso, foi montada uma base de dados com 200 cenários, sendo que em 53 casos a contenção foi avaliada como FORTE; em 67 como MÉDIA; e em 80 como FRACA. Essa base de dados foi pré-processada para ser utilizada por uma rede neuronal Perceptron de Múltiplas Camadas (RUMELHARTE *et al.*, 1986) e por um Sistema de inferência Fuzzy Mamdani (ZADEH, 1965; MAMDANI, 1974) com extração automática de regras realizada pelo algoritmo de Wang-Mendel (WANG e MENDEL, 1992). O pré-processamento realizado foi idêntico para os dois métodos.

Da base de dados utilizada, 60% dela foi destinada para treinamento e 40% para validação. A base de treinamento foi composta pelos primeiros 40 cenários armazenados de cada uma das classes (FORTE, MÉDIA e FRACA), o que totalizou 120 cenários. Nesse sentido, a seleção de dados para treinamento, ou seja, a redução de dados horizontal para formar a base de treinamento, foi feita pela eliminação direta de casos.

Como parte do pré-processamento, em cada uma das variáveis de entrada da base de treinamento foi identificado o valor mínimo e máximo a fim determinar o domínio da variável e realizado decréscimo e acréscimo de 10% do universo sobre o valor mínimo e máximo, respectivamente. Vide equação 37.

$$\begin{aligned} \text{mín}'(var) &= \text{mín}(var) - [\text{máx}(var) - \text{mín}(var)] * 0.1 \\ \text{máx}'(var) &= \text{máx}(var) + [\text{máx}(var) - \text{mín}(var)] * 0.1 \end{aligned} \quad (37)$$

A ampliação do domínio em 10% para menos e para mais visa comportar situações em que os valores mínimos e máximos possam ser extrapolados pela base de validação e por casos futuros. Assim, para as variáveis da base de dados serem utilizadas como entradas na rede neuronal e do sistema de inferência *fuzzy*, utilizou-se da transformação matemática da equação 38 a fim de os valores ficarem normalizados no intervalo [-1,+1].

$$x' = \begin{cases} -1 & \text{se } x < \text{mín}'(var) \\ \frac{(x - \text{mín}'(var))}{(\text{máx}'(var) - \text{mín}'(var))} * 2 - 1.0 & \text{se } \text{mín}'(var) \leq x \leq \text{máx}'(var) \\ +1 & \text{se } \text{máx}'(var) < x \end{cases} \quad (38)$$

Após treinada a rede neuronal com a base de treinamento, foi fornecida a base de validação com seus dados pré-processados. O resultado desse teste está expresso na Tabela 18. Observa-se que o melhor resultado foi obtido com rede neuronal com dez neurônios na camada oculta e com taxa de aprendizado em 0,1.

Tabela 18 - Resultado dos testes de classificação da qualidade de contenção com rede neuronal

		Camada oculta											
		5 neurônios				10 neurônios				15 neurônios			
		Acertos		Erros		Acertos		Erros		Acertos		Erros	
Taxa de aprendizado	0,25	73	91,25%	7	8,75%	75	93,75%	5	6,25%	75	93,75%	5	6,25%
	0,2	76	95%	4	5%	77	96,25%	3	3,75%	77	96,25%	3	3,75%
	0,1	78	97,5%	2	2,5%	79	98,75%	1	1,25%	78	97,5%	2	2,5%
	0,5	77	96,25%	3	3,75%	77	96,25%	3	3,75%	73	96,25%	3	3,75%
	0,01	77	96,25%	3	3,75%	78	97,5%	2	2,5%	76	95%	4	5%

Após o algoritmo de Wang-Mendel extrair as regras da base de treinamento, foi fornecida a base de validação com os dados pré-processados. O resultado é apresentado na Tabela 19. É observado que o melhor resultado foi obtido com cinco e seis conjuntos.

Tabela 19 - Resultado dos testes de classificação da qualidade de contenção com sistema de inferência *fuzzy*

		Acertos		Erros	
		<b>3</b>	49	61,25%	31
<b>4</b>	58	72,5%	22	27,5%	
<b>5</b>	59	73,75%	21	26,25%	
<b>6</b>	59	73,75%	21	26,25%	
<b>7</b>	52	65%	28	35%	

Como resultado, a rede neuronal apresentou melhor desempenho com 98,5% de acertos da base de validação, em seu melhor resultado, contra 73,75% de acertos do sistema de inferência *fuzzy*, também em seu melhor resultado. Diante disso, adotou-se como parte da solução proposta neste trabalho a rede neuronal com 10 neurônios na camada oculta e taxa de aprendizado de 0,1.

### 5.3 Cobertura defensiva

O teste realizado com a cobertura defensiva foi o mesmo utilizado na contenção, afinal cobertura defensiva é uma espécie de segunda contenção. Assim, foi solicitado aos especialistas que avaliassem o algoritmo que determina o jogador responsável pela cobertura defensiva. Para isso, eles usaram o aplicativo *Soccer Scenes*. O aplicativo gerou



50 cenários aleatoriamente para cada especialista, que avaliou o cenário indicando o(s) jogador(es) que, na opinião dele, deveria(m) fazer cobertura defensiva. A possibilidade de selecionar mais de um jogador foi oferecida uma vez que poderiam ocorrer situações dúbias entre dois ou mais defensores. Por outro lado, o algoritmo implementado computacionalmente sempre determina somente um defensor como responsável pela cobertura defensiva. O defensor determinado pelo algoritmo não foi apresentado aos especialistas para não influenciar em suas avaliações. Se o defensor eleito pelo algoritmo estava no conjunto determinado pelo especialista, então era computado como acerto do algoritmo; se não, erro. O teste com os especialistas resultou em 92% de acertos do algoritmo ao escolher o jogador responsável pela cobertura defensiva, resultado expresso na Tabela 20.

Tabela 20 - Resultado do teste do jogador de cobertura defensiva pelo algoritmo e por especialistas

	Acertos		Erros	
	Quantidade	Porcentagem	Quantidade	Porcentagem
<b>Especialista 1</b>	45	90%	5	10%
<b>Especialista 2</b>	47	94%	3	6%
<b>Especialista 3</b>	47	94%	3	6%
<b>Especialista 4</b>	45	90%	5	10%
<b>Total</b>	184	92%	16	8%

#### 5.4 Concentração

O teste sobre o algoritmo de concentração também fez uso do aplicativo *Soccer Scenes*, que gerou 50 cenários aleatoriamente para cada especialista. Foi solicitado que cada especialista classificasse a concentração de uma equipe como FORTE, MÉDIA ou FRACA. Concentração FORTE é equivalente a uma excelente concentração, MÉDIA como concentração regular e FRACA como concentração ruim. Com isso, foi montada uma base de dados com 200 cenários, sendo que em 45 casos a contenção foi avaliada como FORTE; em 78 casos como MÉDIA; e em 77 casos como FRACA. Essa base de dados foi pré-processada para ser utilizada por uma rede neuronal Perceptron de Múltiplas Camadas e por um sistema de inferência fuzzy Mamdani com extração automática de regras realizada pelo algoritmo de Wang-Mendel. O pré-processamento realizado foi idêntico para os dois casos.

Da base de dados utilizada, 60% dela foi destinada para treinamento e 40% para validação. A base de treinamento foi composta pelos primeiros 40 cenários armazenados de cada uma das classes (FORTE, MÉDIA e FRACA), o que totalizou 120 cenários. Como parte do pré-processamento, do mesmo modo que utilizado no teste de contenção,

em cada uma das seis variáveis de entrada do algoritmo de concentração e armazenadas na base de treinamento foi identificado o valor mínimo e máximo a fim de determinar seu domínio e realizados, respectivamente, decréscimo e acréscimo de 10% do domínio sobre o valor mínimo e máximo, equação 37.

A ampliação do domínio em 10% para mais e para menos visa comportar situações em que os valores máximos e mínimos possam ser extrapolados pela base de validação ou em casos futuros. Assim, para as variáveis da base de dados serem utilizadas como entradas na rede neuronal e do sistema de inferência *fuzzy*, utilizou-se da transformação matemática da equação 38 a fim de os valores ficarem normalizados no intervalo [-1,+1].

Após treinada a rede neuronal e após serem extraídas as regras *fuzzy* da base de treinamento, foi fornecida a base de validação com os dados pré-processados. O resultado dos testes com rede neuronal e sistema de inferência *fuzzy* estão expressos na Tabela 21 e na Tabela 22, respectivamente. O melhor resultado obtido pela rede neuronal foi de 95% de acertos em três configurações (cinco neurônios na camada oculta e 0,1 de taxa de aprendizado; dez neurônios na camada oculta e 0,2 de taxa de aprendizado; 15 neurônios na camada oculta e 0,1 de taxa de aprendizado) e no sistema de inferência *fuzzy* foi de 80% (quatro conjuntos nas variáveis linguísticas de entrada).

Tabela 21 - Resultado dos testes de classificação da qualidade de concentração com rede neuronal

		Camada oculta					
		5 neurônios		10 neurônios		15 neurônios	
		Acertos	Erros	Acertos	Erros	Acertos	Erros
Taxa de aprendizado	0,25	72 90%	8 10%	75 93,75%	5 6,25%	73 91,25%	7 8,75%
	0,2	74 92,5%	6 7,5%	76 95%	4 5%	73 91,25%	7 8,75%
	0,1	76 95%	4 5%	73 91,25%	7 8,75%	76 95%	4 5%
	0,05	75 93,75%	5 6,25%	73 91,25%	7 8,75%	75 93,75%	5 6,25%
	0,01	74 92,5%	6 7,5%	76 75%	4 5%	75 93,75%	5 6,25%

Tabela 22 - Resultado dos testes de classificação da qualidade de concentração com sistema de inferência *fuzzy*

		Acertos	Erros
Nº de conjuntos	3	43 53,75%	37 46,25%
	4	64 80%	16 20%
	5	57 71,25%	23 28,75%
	6	48 60%	32 40%
	7	47 58,75%	33 41,25%

Apesar de o sistema de inferência *fuzzy* não ter apresentado bons resultados, foi possível aferir que o algoritmo proposto para avaliar a concentração defensiva da equipe é aceitável uma vez que a rede neuronal apresentou resultados satisfatórios. A rede neuronal teve como melhor resultado 95% de acerto. Vale ressaltar que a rede neuronal e a inferência *fuzzy* foram utilizadas somente nos testes de concentração e não fazem parte do algoritmo de concentração, que na verdade retorna seis variáveis.

## 5.5 Equilíbrio

A fim de avaliar o algoritmo de equilíbrio, cada especialista analisou 50 cenários distintos gerados pelo *Soccer Scenes*, o que resultou em 200 cenários no total. As avaliações foram unificadas em uma mesma base de dados. Dos 200 cenários, em 45 casos o equilíbrio defensivo da equipe foi classificado como FORTE; em 80 casos classificado como MÈDIO; e em 75 casos classificado como FRACO. Para cada classe foi calculada a média aritmética e o desvio padrão.

Para melhor visualização, os valores das médias aritméticas e desvios padrões dos exemplos classificados pelos especialistas das classes FORTE, MÉDIO e FRACO foram calculados e estão reproduzidos na Tabela 23. Note, pela média aritmética, que ficou evidente que quanto menor o valor retornado pelo algoritmo, melhor é o equilíbrio. O desvio padrão determina o quanto de variação ou dispersão existe em relação à média na população analisada. Analisando juntos, o desvio padrão e a média aritmética, observa-se que essas classes possuem distinção entre si e o algoritmo foi capaz reproduzir isso de acordo com as avaliações realizadas pelos especialistas.

Tabela 23 - Médias aritméticas e desvios padrões dos exemplos classificados pelos especialistas das classes Forte, Média e Fraca do princípio de equilíbrio.

	<b>Forte</b>	<b>Médio</b>	<b>Fraco</b>
<b>Média aritmética</b>	0,373	-0,510	-0,838
<b>Desvio padrão</b>	0,601	0,178	0,143

Na Figura 58 **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, é observado que essas classes possuem distinção entre si e o algoritmo foi capaz de reproduzir isto de acordo com as avaliações realizadas pelos especialistas.

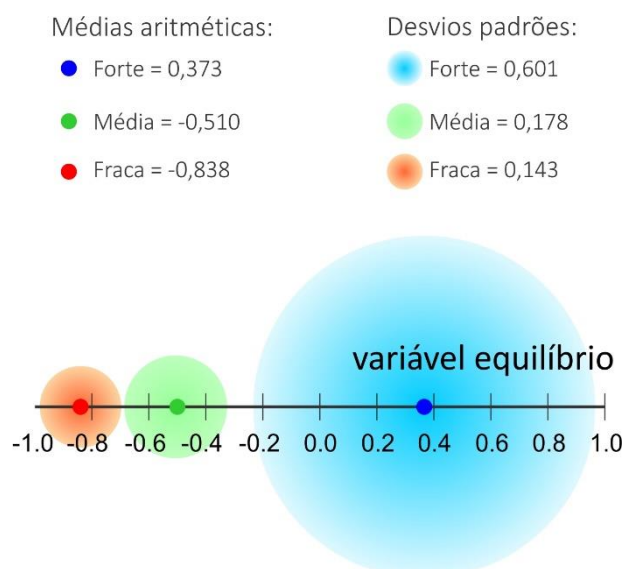


Figura 58 - Gráfico com resultado do teste de equilíbrio defensivo

## 5.6 Unidade defensiva

Cada um dos quatro especialistas analisou ainda outros 50 cenários gerados pelo *Soccer Scenes* classificando as defesas quanto ao princípio de unidade defensiva. Para isso, os especialistas tiveram três classes: FORTE, que corresponde a uma ótima unidade defensiva; MÉDIA, que corresponde a uma boa unidade defensiva; e FRACA, que corresponde a uma unidade defensiva ruim.

As avaliações foram então unificadas em uma mesma base de dados. Dos 200 cenários analisados, em 50 casos a defesa foi classificada como FORTE; em 87 casos classificada como MÉDIA; e em 63 casos classificada como FRACA. Para cada classe foi calculada a média aritmética e o desvio padrão, reproduzidos na

Tabela 24. Pela média, note que ficou evidente que quanto menor o valor retornado pelo algoritmo, melhor é a unidade defensiva. O desvio padrão determina o quanto de variação ou dispersão existe em relação à média na população analisada. Analisando juntos, o desvio padrão e a média, observa-se que essas classes possuem distinção entre si e o algoritmo foi capaz reproduzir isso de acordo com as avaliações realizadas pelos especialistas.

Tabela 24 - Médias aritméticas e desvios padrões dos exemplos classificados pelos especialistas das classes Forte, Média e Fraca do princípio de unidade defensiva.

	Ótimo	Regular	Ruim
Média aritmética	272,25	471,80	724,22
Desvio padrão	51,15	67,73	102,14

A Figura 59 apresenta graficamente as médias aritméticas e os desvios padrões das classificações feitas pelos especialistas.

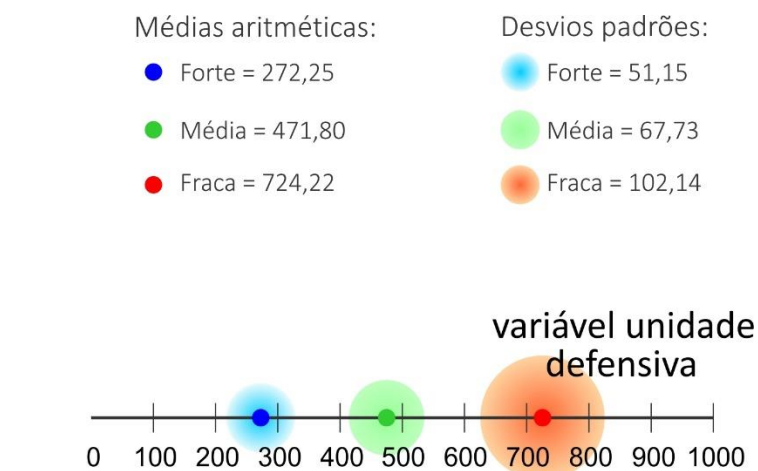


Figura 59 - Gráfico com resultado do teste de unidade defensiva

## 5.7 Organização defensiva

Com o objetivo de mensurar a qualidade do algoritmo de organização defensiva resultante da Rede Neuronal e do Sistema de Inferência Fuzzy (seção 4.1.3.6), foi solicitado que os especialistas avaliassem diferentes cenários. Foi utilizado o aplicativo *Soccer Scenes*, que gerou 50 cenários aleatoriamente para cada especialista, que classificou a defesa como ORGANIZADA ou DESORGANIZADA.

A partir da análise dos especialistas, foi montada uma base de dados com 200 cenários, sendo que em 101 casos a defesa foi avaliada como ORGANIZADA; e em 99 casos como DESORGANIZADA. Da base de dados utilizada, 60% dela foi destinada para treinamento e 40% para validação. A base de treinamento foi composta pelos primeiros 60 cenários armazenados de cada uma das classes (ORGANIZADA e DESORGANIZADA), o que totalizou 120 cenários.

Após treinada a rede neuronal e após serem extraídas as regras fuzzy com a base de treinamento, foi fornecida a base de validação com dados pré-processados. Como parte do pré-processamento, do mesmo modo que utilizado no teste de contenção e concentração, em cada uma das variáveis de entrada do algoritmo de organização defensiva foi identificado o valor mínimo e máximo a fim de determinar seu domínio e realizados, respectivamente, decréscimo e acréscimo de 10% do domínio sobre o valor mínimo e máximo, vide equação 37. A ampliação do domínio em 10% para menos e para mais visou comportar situações em que os valores mínimos e máximos pudessem ser

extrapolados pela base de validação ou em casos futuros. No pré-processamento as entradas foram normalizadas para ficarem no intervalo  $[-1,+1]$ , equação 38.

A fim de verificar a influência das variáveis e tentar reduzir o número de entradas, foram feitos testes com a combinação das entradas (contenção, cobertura defensiva, concentração, equilíbrio e unidade defensiva), sendo que sempre foram fornecidas pelo menos duas entradas. O resultado desse teste com o sistema de inferência *fuzzy* com três, cinco e sete conjuntos por variável linguística está expresso na Tabela 25. Observe que o melhor resultado foi 65 acertos de 80, ou seja, 81,25% de acertos com as entradas concentração e unidade defensiva.

Tabela 25 - Resultado dos testes de classificação de organização defensiva com sistema de inferência *fuzzy*

Variáveis	3 conjuntos		5 conjuntos		7 conjuntos	
	Acertos	%	Acertos	%	Acertos	%
EQ UD	36	45,00	53	66,25	46	57,50
CC, UD	65	81,25	53	66,25	24	30,00
CC, EQ	63	78,75	56	70,00	16	20,00
CC, EQ, UD	62	77,50	46	57,50	13	16,25
CB, UD	34	42,50	38	47,50	40	50,00
CB, EQ	38	47,50	43	53,75	40	50,00
CB, EQ, UD	36	45,00	51	63,75	43	53,75
CB, CC	62	77,50	53	66,25	20	25,00
CB, CC, UD	61	76,25	45	56,25	15	18,75
CB, CC, EQ	61	76,25	47	58,75	13	16,25
CB, CC, EQ, UD	59	73,75	40	50,00	10	12,50
CN, UD	44	55,00	45	56,25	44	55,00
CN, EQ	48	60,00	48	60,00	52	65,00
CN, EQ, UD	50	62,50	46	57,50	48	60,00
CN, CC	64	80,00	53	66,25	18	22,50
CN, CC, UD	61	76,25	47	58,75	16	20,00
CN, CC, EQ	61	76,25	47	58,75	7	8,75
CN, CC, EQ, UD	60	75,00	42	52,50	6	7,50
CN, CB	43	53,75	44	55,00	47	58,75
CN, CB, UD	42	52,50	50	62,50	46	57,50
CN, CB, EQ	51	63,75	46	57,50	51	63,75
CN, CB, EQ, UD	51	63,75	46	57,50	42	52,50
CN, CB, CC	60	75,00	49	61,25	13	16,25
CN, CB, CC, UD	60	75,00	41	51,25	10	12,50
CN, CB, CC, EQ	60	75,00	42	52,50	5	6,25
CN, CB, CC, EQ, UD	61	76,25	36	45,00	4	5,00

Legenda: CN - Contenção; CB - Cobertura; CC - Concentração;  
EQ - Equilíbrio; UD - Unidade Defensiva.

Com a rede neuronal, foram realizadas quatro baterias de testes para diferentes taxas de aprendizados. Os resultados dos testes com a rede neuronal com taxa de aprendizado em 0.01, 0.05, 0.1 e 0.2 estão apresentados na

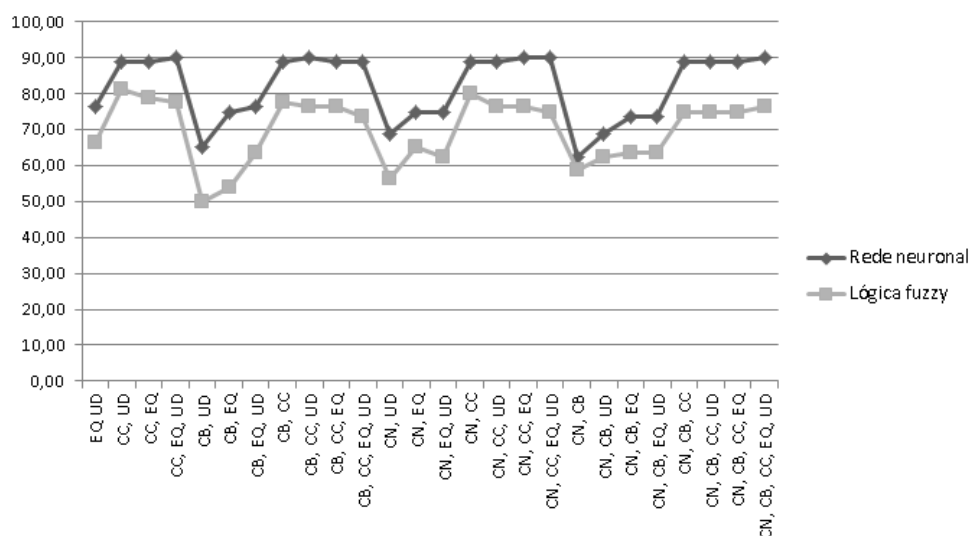
Tabela 26, na Tabela 27, na Tabela 28 e na

Tabela 29, respectivamente. Como melhor resultado, a rede neuronal obteve 72 acertos, ou seja, 90% de acertos. Esse resultado foi obtido com diferentes entradas, expressas a seguir:

- cobertura defensiva, concentração e penetração;
- contenção, concentração, penetração e unidade defensiva;
- contenção, concentração e penetração;
- contenção, cobertura defensiva, concentração, penetração e unidade defensiva.

Em comum às quatro combinações de entradas que obtiveram o melhor resultado estão a concentração e a penetração, mas elas sozinhas não conseguiram o melhor resultado. Isso indica que os princípios táticos defensivos de concentração e penetração são muito importantes na classificação de organização defensiva de uma equipe, pelo menos da forma como foram modeladas neste trabalho. No entanto, as outras três variáveis de entrada (contenção, cobertura defensiva e unidade defensiva) também se mostraram capazes de melhorar os resultados. Por isso, decidiu-se por adotar, neste trabalho, os cinco princípios táticos defensivos como entradas da rede neuronal para classificar a organização defensiva e arquitetura composta por cinco neurônios na camada oculta, por requerer menor custo computacional, e a fase de treinamento com taxa de aprendizado em 0,01.

A Figura 60 apresenta de maneira sumarizada os melhores resultados obtidos pelos sistemas inteligentes do algoritmo de organização defensiva.



Legenda: CN - Contenção; CB - Cobertura; CC - Concentração; EQ - Equilíbrio; UD - Unidade Defensiva.

Figura 60 - Melhores resultados obtidos pelos sistemas inteligentes utilizados no algoritmo de organização defensiva

Tabela 26 - Resultado dos testes de classificação de organização defensiva com rede neuronal com taxa de aprendizado 0.01

Variáveis	5 neurônios na camada oculta		7 neurônios na camada oculta		9 neurônios na camada oculta		11 neurônios na camada oculta		13 neurônios na camada oculta		15 neurônios na camada oculta	
	Acertos	%	Acertos	%	Acertos	%	Acertos	%	Acertos	%	Acertos	%
EQ UD	57	71,25	61	76,25	60	75,00	59	73,75	57	71,25	56	70,00
CC, UD	69	86,25	69	86,25	68	85,00	68	85,00	68	85,00	70	87,50
CC, EQ	68	85,00	69	86,25	68	85,00	68	85,00	67	83,75	69	86,25
CC, EQ, UD	72	90,00	70	87,50	71	88,75	69	86,25	70	87,50	69	86,25
CB, UD	51	63,75	45	56,25	46	57,50	45	56,25	47	58,75	46	57,50
CB, EQ	58	72,50	59	73,75	58	72,50	59	73,75	58	72,50	58	72,50
CB, EQ, UD	57	71,25	56	70,00	58	72,50	59	73,75	56	70,00	54	67,50
CB, CC	68	85,00	69	86,25	66	82,50	68	85,00	70	87,50	67	83,75
CB, CC, UD	72	90,00	71	88,75	69	86,25	70	87,50	70	87,50	71	88,75
CB, CC, EQ	66	82,50	67	83,75	68	85,00	70	87,50	69	86,25	67	83,75
CB, CC, EQ, UD	68	85,00	70	87,50	69	86,25	69	86,25	69	86,25	68	85,00
CN, UD	53	66,25	55	68,75	53	66,25	50	62,50	54	67,50	51	63,75
CN, EQ	60	75,00	60	75,00	58	72,50	60	75,00	58	72,50	59	73,75
CN, EQ, UD	59	73,75	55	68,75	59	73,75	58	72,50	58	72,50	57	71,25
CN, CC	68	85,00	70	87,50	71	88,75	69	86,25	69	86,25	69	86,25
CN, CC, UD	70	87,50	68	85,00	70	87,50	70	87,50	70	87,50	68	85,00
CN, CC, EQ	70	87,50	70	87,50	69	86,25	71	88,75	68	85,00	70	87,50
CN, CC, EQ, UD	68	85,00	68	85,00	71	88,75	70	87,50	68	85,00	71	88,75
CN, CB	49	61,25	49	61,25	48	60,00	48	60,00	50	62,50	47	58,75
CN, CB, UD	54	67,50	55	68,75	51	63,75	52	65,00	52	65,00	51	63,75
CN, CB, EQ	59	73,75	59	73,75	56	70,00	58	72,50	59	73,75	55	68,75
CN, CB, EQ, UD	55	68,75	54	67,50	59	73,75	55	68,75	57	71,25	56	70,00
CN, CB, CC	71	88,75	71	88,75	70	87,50	70	87,50	69	86,25	69	86,25
CN, CB, CC, UD	69	86,25	68	85,00	68	85,00	71	88,75	70	87,50	70	87,50
CN, CB, CC, EQ	68	85,00	67	83,75	68	85,00	69	86,25	70	87,50	68	85,00
CN, CB, CC, EQ, UD	72	90,00	71	88,75	72	90,00	71	88,75	70	87,50	70	87,50

Legenda: CN - Contenção; CB - Cobertura; CC - Concentração; EQ - Equilíbrio; UD - Unidade Defensiva.



Tabela 27 - Resultado dos testes de classificação de organização defensiva com rede neuronal com taxa de aprendizado 0.05

Variáveis	5 neurônios na camada oculta		7 neurônios na camada oculta		9 neurônios na camada oculta		11 neurônios na camada oculta		13 neurônios na camada oculta		15 neurônios na camada oculta	
	Acertos	%	Acertos	%	Acertos	%	Acertos	%	Acertos	%	Acertos	%
EQ UD	51	63,75	54	67,50	56	70,00	53	66,25	57	71,25	53	66,25
CC, UD	69	86,25	68	85,00	68	85,00	67	83,75	69	86,25	69	86,25
CC, EQ	69	86,25	70	87,50	71	88,75	70	87,50	69	86,25	67	83,75
CC, EQ, UD	70	87,50	71	88,75	69	86,25	68	85,00	69	86,25	69	86,25
CB, UD	47	58,75	51	63,75	45	56,25	46	57,50	49	61,25	46	57,50
CB, EQ	57	71,25	58	72,50	58	72,50	58	72,50	59	73,75	60	75,00
CB, EQ, UD	54	67,50	56	70,00	54	67,50	54	67,50	61	76,25	55	68,75
CB, CC	69	86,25	70	87,50	69	86,25	68	85,00	68	85,00	67	83,75
CB, CC, UD	70	87,50	70	87,50	68	85,00	69	86,25	66	82,50	71	88,75
CB, CC, EQ	70	87,50	65	81,25	70	87,50	68	85,00	69	86,25	66	82,50
CB, CC, EQ, UD	70	87,50	70	87,50	71	88,75	71	88,75	70	87,50	70	87,50
CN, UD	49	61,25	52	65,00	45	56,25	48	60,00	53	66,25	46	57,50
CN, EQ	60	75,00	58	72,50	54	67,50	59	73,75	59	73,75	58	72,50
CN, EQ, UD	56	70,00	56	70,00	56	70,00	56	70,00	57	71,25	58	72,50
CN, CC	69	86,25	69	86,25	69	86,25	68	85,00	68	85,00	69	86,25
CN, CC, UD	68	85,00	69	86,25	69	86,25	71	88,75	70	87,50	70	87,50
CN, CC, EQ	69	86,25	68	85,00	69	86,25	68	85,00	68	85,00	66	82,50
CN, CC, EQ, UD	71	88,75	71	88,75	71	88,75	69	86,25	69	86,25	66	82,50
CN, CB	50	62,50	46	57,50	46	57,50	46	57,50	46	57,50	48	60,00
CN, CB, UD	49	61,25	50	62,50	50	62,50	50	62,50	52	65,00	49	61,25
CN, CB, EQ	57	71,25	57	71,25	56	70,00	58	72,50	54	67,50	53	66,25
CN, CB, EQ, UD	57	71,25	59	73,75	54	67,50	52	65,00	53	66,25	55	68,75
CN, CB, CC	70	87,50	70	87,50	69	86,25	69	86,25	68	85,00	69	86,25
CN, CB, CC, UD	69	86,25	69	86,25	69	86,25	69	86,25	70	87,50	67	83,75
CN, CB, CC, EQ	68	85,00	70	87,50	70	87,50	70	87,50	69	86,25	70	87,50
CN, CB, CC, EQ, UD	70	87,50	68	85,00	72	90,00	69	86,25	68	85,00	68	85,00

Legenda: CN - Contenção; CB - Cobertura; CC - Concentração; EQ - Equilíbrio; UD - Unidade Defensiva.

Tabela 28 - Resultado dos testes de classificação de organização defensiva com rede neuronal com taxa de aprendizado 0.1

Variáveis	5 neurônios na camada oculta		7 neurônios na camada oculta		9 neurônios na camada oculta		11 neurônios na camada oculta		13 neurônios na camada oculta		15 neurônios na camada oculta	
	Acertos	%	Acertos	%	Acertos	%	Acertos	%	Acertos	%	Acertos	%
EQ UD	55	68,75	53	66,25	55	68,75	56	70,00	57	71,25	52	65,00
CC, UD	67	83,75	69	86,25	68	85,00	71	88,75	68	85,00	68	85,00
CC, EQ	69	86,25	69	86,25	69	86,25	69	86,25	69	86,25	69	86,25
CC, EQ, UD	71	88,75	68	85,00	67	83,75	68	85,00	67	83,75	71	88,75
CB, UD	50	62,50	50	62,50	51	63,75	50	62,50	51	63,75	52	65,00
CB, EQ	57	71,25	58	72,50	59	73,75	60	75,00	60	75,00	60	75,00
CB, EQ, UD	53	66,25	53	66,25	54	67,50	54	67,50	57	71,25	57	71,25
CB, CC	71	88,75	70	87,50	70	87,50	67	83,75	67	83,75	70	87,50
CB, CC, UD	69	86,25	72	90,00	67	83,75	69	86,25	69	86,25	68	85,00
CB, CC, EQ	71	88,75	69	86,25	68	85,00	69	86,25	70	87,50	69	86,25
CB, CC, EQ, UD	66	82,50	67	83,75	68	85,00	71	88,75	69	86,25	70	87,50
CN, UD	48	60,00	51	63,75	49	61,25	48	60,00	51	63,75	52	65,00
CN, EQ	57	71,25	55	68,75	56	70,00	57	71,25	60	75,00	55	68,75
CN, EQ, UD	58	72,50	55	68,75	60	75,00	54	67,50	56	70,00	58	72,50
CN, CC	70	87,50	68	85,00	68	85,00	69	86,25	67	83,75	66	82,50
CN, CC, UD	69	86,25	68	85,00	68	85,00	68	85,00	69	86,25	70	87,50
CN, CC, EQ	68	85,00	67	83,75	68	85,00	67	83,75	69	86,25	67	83,75
CN, CC, EQ, UD	70	87,50	72	90,00	71	88,75	70	87,50	69	86,25	69	86,25
CN, CB	50	62,50	48	60,00	46	57,50	46	57,50	46	57,50	47	58,75
CN, CB, UD	53	66,25	50	62,50	52	65,00	51	63,75	53	66,25	52	65,00
CN, CB, EQ	58	72,50	58	72,50	58	72,50	59	73,75	59	73,75	54	67,50
CN, CB, EQ, UD	54	67,50	54	67,50	55	68,75	57	71,25	57	71,25	54	67,50
CN, CB, CC	69	86,25	68	85,00	71	88,75	70	87,50	69	86,25	68	85,00
CN, CB, CC, UD	68	85,00	68	85,00	70	87,50	69	86,25	70	87,50	69	86,25
CN, CB, CC, EQ	69	86,25	70	87,50	68	85,00	71	88,75	68	85,00	67	83,75
CN, CB, CC, EQ, UD	69	86,25	71	88,75	71	88,75	70	87,50	70	87,50	70	87,50

Legenda: CN - Contenção; CB - Cobertura; CC - Concentração; EQ - Equilíbrio; UD - Unidade Defensiva.

Tabela 29 - Resultado dos testes de classificação de organização defensiva com rede neuronal com taxa de aprendizado 0.2

Variáveis	5 neurônios na camada oculta		7 neurônios na camada oculta		9 neurônios na camada oculta		11 neurônios na camada oculta		13 neurônios na camada oculta		15 neurônios na camada oculta	
	Acertos	%	Acertos	%	Acertos	%	Acertos	%	Acertos	%	Acertos	%
EQ UD	53	66,25	52	65,00	53	66,25	50	62,50	51	63,75	53	66,25
CC, UD	69	86,25	71	88,75	67	83,75	69	86,25	69	86,25	68	85,00
CC, EQ	69	86,25	69	86,25	69	86,25	70	87,50	66	82,50	67	83,75
CC, EQ, UD	67	83,75	69	86,25	65	81,25	67	83,75	68	85,00	69	86,25
CB, UD	51	63,75	52	65,00	52	65,00	51	63,75	52	65,00	49	61,25
CB, EQ	59	73,75	59	73,75	59	73,75	58	72,50	58	72,50	58	72,50
CB, EQ, UD	56	70,00	57	71,25	55	68,75	54	67,50	54	67,50	56	70,00
CB, CC	70	87,50	71	88,75	70	87,50	69	86,25	70	87,50	70	87,50
CB, CC, UD	69	86,25	69	86,25	68	85,00	70	87,50	69	86,25	68	85,00
CB, CC, EQ	68	85,00	67	83,75	67	83,75	71	88,75	71	88,75	69	86,25
CB, CC, EQ, UD	68	85,00	69	86,25	68	85,00	70	87,50	69	86,25	67	83,75
CN, UD	49	61,25	49	61,25	46	57,50	48	60,00	49	61,25	51	63,75
CN, EQ	51	63,75	51	63,75	50	62,50	50	62,50	49	61,25	50	62,50
CN, EQ, UD	50	62,50	54	67,50	53	66,25	53	66,25	52	65,00	53	66,25
CN, CC	68	85,00	68	85,00	68	85,00	69	86,25	68	85,00	70	87,50
CN, CC, UD	67	83,75	68	85,00	68	85,00	68	85,00	67	83,75	69	86,25
CN, CC, EQ	70	87,50	69	86,25	67	83,75	72	90,00	70	87,50	69	86,25
CN, CC, EQ, UD	67	83,75	70	87,50	67	83,75	69	86,25	68	85,00	67	83,75
CN, CB	47	58,75	43	53,75	48	60,00	48	60,00	46	57,50	45	56,25
CN, CB, UD	50	62,50	52	65,00	52	65,00	53	66,25	54	67,50	53	66,25
CN, CB, EQ	50	62,50	54	67,50	50	62,50	48	60,00	49	61,25	48	60,00
CN, CB, EQ, UD	55	68,75	56	70,00	56	70,00	55	68,75	52	65,00	54	67,50
CN, CB, CC	69	86,25	69	86,25	70	87,50	70	87,50	70	87,50	68	85,00
CN, CB, CC, UD	69	86,25	69	86,25	67	83,75	69	86,25	68	85,00	68	85,00
CN, CB, CC, EQ	68	85,00	67	83,75	68	85,00	68	85,00	69	86,25	71	88,75
CN, CB, CC, EQ, UD	67	83,75	69	86,25	68	85,00	67	83,75	69	86,25	68	85,00

Legenda: CN - Contenção; CB - Cobertura; CC - Concentração; EQ - Equilíbrio; UD - Unidade Defensiva.

## 5.8 Modelo de jogo

Findados os testes de classificação de organização posicional defensiva, os testes passaram a ser realizados diretamente no simulador *Soccer Server*. Foi pensado em um teste capaz de refutar o Modelo Dualista, que ainda é aceito por parte dos profissionais do futebol, e ao mesmo tempo capaz de transformar a tese<sup>9</sup> por trás do Modelo de Quatro Estados em uma conjectura<sup>10</sup>.

Uma prova direta do Modelo de Quatro Estados é algo complicado porque exige a demonstração, através de lógica de axiomas, definições e teoremas já existentes, de validade para todos os casos possíveis, que tende ao infinito. Isso porque para provar que determinada propriedade ou regra vale para um conjunto, é necessário mostrar que ela vale para todos os seus elementos. Por outro lado, para mostrar que ela não vale, basta encontrar um elemento daquele conjunto para o qual a propriedade não se aplica. A esse elemento dá-se o nome de contraexemplo.

A ideia foi realizar testes a fim de encontrar contraexemplo(s) capaz(es) de refutar o Modelo Dualista e, ao mesmo tempo, reforçar o pressuposto do Modelo de Quatro Estados. Para isso, foram implementadas duas estratégias defensivas (seção 4.3.1) para serem utilizadas na equipe iBots quando estiver nos estados Defesa Posicional e Contra-Defesa. Para os estados ofensivos, Ataque Posicional e Contra-Ataque, foi implementada uma única estratégia (seção 4.3.2).

Assim, o objetivo do teste foi de encontrar um contraexemplo capaz de refutar o Modelo Dualista, ou seja, capaz de demonstrar que usar duas estratégias para se defender, uma para cada estado defensivo, torna a equipe mais forte defensivamente do que utilizar uma única estratégia (ideia do Modelo Dualista), desde que as estratégias tenham sido projetadas de forma a explorar as características de cada um dos estados defensivos. Como Contra-Defesa é o estado complementar do estado Contra-Ataque e Defesa Posicional é o estado complementar do estado Contra-Ataque, então, não é necessário demonstrar em testes que o mesmo comportamento também ocorre nos estados ofensivos.

A equipe iBots foi colocada em confrontos contra equipes com diferentes características técnicas e táticas. As equipes utilizadas nos testes foram: Agent2D 3.1.1<sup>11</sup>

---

<sup>9</sup> Tese – é uma hipótese levantada para debate ou discussão.

<sup>10</sup> Conjectura – é uma hipótese com indícios de ser verdadeira, porém, não foi provada.

<sup>11</sup> Agent2D 3.1.1 - Esta versão foi disponibilizada em oito de março de 2012 e continua sendo a versão mais atual. É o time-base desenvolvido e utilizado pela equipe Helios, campeã da RoboCup 2012.

(AKIYAMA, 2012a), WrightEagle 2009<sup>12</sup> (SHI *et al.* 2009) e FC Portugal 2010<sup>13</sup> (REIS *et al.*, 2010). Todas essas equipes têm seus arquivos executáveis disponíveis gratuitamente na internet. A equipe iBots jogou 200 partidas contra cada um dos três times. As 200 partidas foram divididas em quatro grupos de 50 partidas de acordo com as estratégias defensivas da equipe iBots descritas a seguir.

- Grupo 1 - estados Contra-Defesa e Defesa Posicional com estratégia defensiva 1;
- Grupo 2 - estado Contra-Defesa com estratégia defensiva 1 e Defesa Posicional com estratégia defensiva 2;
- Grupo 3 - estado Contra-Defesa com estratégia defensiva 2 e Defesa Posicional com estratégia defensiva 1;
- Grupo 4 - estados Contra-Defesa e Defesa Posicional com estratégia defensiva 2.

Os resultados das partidas contra a equipe Agent2D 3.1.1 estão apresentados na Tabela 30. Com 24 vitórias, é observado que a estratégia defensiva que obteve o melhor resultado foi a do grupo 3, ou seja, o sistema defensivo que usou as estratégias defensiva 2 e defensiva 1 nos estados Contra Defesa e Defesa Posicional, respectivamente. Com essa estratégia defensiva, a equipe iBots conquistou 88 pontos de 150 possíveis<sup>14</sup>, o que corresponde a 58,67% dos pontos disputados, e é um número bem acima dos pontos adquiridos pelas outras estratégias: 77 pontos do grupo 1; 77 pontos do grupo 2; 70 pontos do grupo 4. Observe que, além do maior número de vitórias, a estratégia defensiva do grupo 3 perdeu apenas dez vezes, isto é, a equipe iBots não perdeu (obteve vitórias e empates) em 80% das partidas. Enquanto a segunda estratégia que menos perdeu foi a do grupo 1, não perdendo em 70% das partidas.

Tabela 30 - Resultados das partidas realizadas contra a equipe Agent2D 3.1.1

	Vitórias		Empates		Derrotas		Pts. conquistados	
	Qt.	%	Qt.	%	Qt.	%	Qt.	%
<b>Grupo 1</b>	21	42,00	14	28,00	15	30,00	77	51,33
<b>Grupo 2</b>	22	44,00	11	22,00	17	34,00	77	51,33
<b>Grupo 3</b>	24	48,00	16	32,00	10	20,00	88	58,67
<b>Grupo 4</b>	18	36,00	16	32,00	16	32,00	70	46,67

<sup>12</sup> WrightEagle 2009 – equipe campeã da RoboCup 2009, maior competição mundial na categoria Simulation 2D.

<sup>13</sup> FC Portugal – equipe sétima colocada na RoboCup 2010, foi campeã na RoboCup 2000.

<sup>14</sup> Pontuação no futebol - as equipes recebem três pontos por vitória e um ponto por empate. Não são atribuídos pontos para derrotas.

Os resultados das partidas contra a equipe WrightEagle 2009 estão na Tabela 31. Assim como ocorreu contra o Agent2D, a estratégia que obteve melhor resultado fez com que a equipe iBots vencesse 24 partidas e também foi a do grupo 3. Com essa estratégia, a equipe iBots conquistou 83 pontos, o que corresponde a 55,33% dos pontos disputados. Em segundo ficou a estratégia do grupo 2 (sistema defensivo com as estratégias defensiva 1 e defensiva 2 nos estados Contra Defesa e Defesa Posicional, respectivamente) com 23 vitórias e 51,33% de pontos conquistados. Assim, contra a equipe WrightEagle 2009, os piores resultados foram observados quando a estratégia defensiva adotada foi a mesma para os estados Defesa Posicional e Contra-Defesa. As estratégias defensivas do grupo 3 e 2 fizeram que a equipe iBots não perdesse 35 (70%) e 31 (62%) das partidas, respectivamente. Já a estratégias dos grupos 4 e 1, que utilizaram as mesmas estratégias defensivas, fez com que a equipe iBots não perdesse 27 (54%) e 24 (48%) das disputas.

Tabela 31 - Resultados das partidas realizadas contra a equipe *WrightEagle 2009*

	Vitórias		Empates		Derrotas		Pts. conquistados	
	Qt.	%	Qt.	%	Qt.	%	Qt.	%
<b>Grupo 1</b>	19	38,78	5	10,20	26	52,00	62	41,33
<b>Grupo 2</b>	23	46,00	8	16,00	19	38,00	77	51,33
<b>Grupo 3</b>	24	48,00	11	22,00	15	30,00	83	55,33
<b>Grupo 4</b>	19	38,00	8	16,00	23	46,00	65	43,33

Os resultados das partidas contra a equipe FC Portugal 2010 estão na Tabela 32 e não apresentaram vantagens para a equipe iBots quando ela utilizou estratégias táticas defensivas diferentes para os estados Defesa Posicional e Contra-Defesa.

Tabela 32 - Resultados das partidas realizadas contra a equipe *FC Portugal 2010*

	Vitórias		Empates		Derrotas		Pts. conquistados	
	Qt.	%	Qt.	%	Qt.	%	Qt.	%
<b>Grupo 1</b>	35	70,00	15	30,00	0	0,00	120	80,00
<b>Grupo 2</b>	32	64,00	16	32,00	2	4,00	112	74,67
<b>Grupo 3</b>	29	58,00	20	40,00	1	2,00	107	71,33
<b>Grupo 4</b>	33	66,00	17	34,00	0	0,00	116	77,33

As médias de gols marcados pelas equipes e os desvios padrões dos testes anteriores estão apresentados na Tabela 33, na Tabela 34 e na Tabela 35. A Tabela 33 exibe o cenário de gols dos confrontos entre as equipes iBots e Agent2D. As estratégias defensivas dos grupos 2 e 3, que utilizam estratégias diferentes para os estados Defesa Posicional e Contra-Defesa, obtiveram os melhores resultados, ou seja, possibilitaram ao time iBots marcar uma maior média de gols e também reduziram a média de gols marcados pelo Agent2D. Em suma, a diferença de gols marcados em relação aos gols

sofridos pela equipe iBots é superior nos grupos 2 e 3 com 0,72 e 0,64 gols, respectivamente; e inferior nos grupos 4 e 1 com 0,38 e 0,13 gols, respectivamente.

Tabela 33 – Média de gols marcados pelas equipes iBots e Agent2D

	Gols iBots		Agent2D		Diferença da média de gols
	Média aritmética	Desvio padrão	Média aritmética	Desvio padrão	
<b>Grupo 1</b>	1,30	0,95	1,16	1,17	0,13
<b>Grupo 2</b>	1,66	1,24	1,34	0,94	0,72
<b>Grupo 3</b>	1,52	1,09	1,08	0,88	0,64
<b>Grupo 4</b>	1,40	1,28	1,22	1,02	0,38

Na **Erro! Autoreferência de indicador não válida.** está o cenário de gols dos confrontos entre as equipes iBots e WrightEagle. A estratégia defensiva do grupo 2, que utiliza estratégia diferente para os estados Defesa Posicional e Contra-Defesa, obteve o melhor desempenho. Foi a estratégia que resultou em maior número de gols marcados, 143 gols. A diferença de gols marcados em relação aos gols sofridos pela equipe iBots foi de 0,54 no grupo 2; 0,26 no grupo 3; 0,04 no grupo 4; e -0,28 no grupo 1.

Tabela 34 – Média de gols marcados pelas equipes iBots e WrightEagle

	Gols iBots		WrightEagle		Diferença da média de gols
	Média aritmética	Desvio padrão	Média aritmética	Desvio padrão	
<b>Grupo 1</b>	1,80	1,70	2,08	1,23	-0,28
<b>Grupo 2</b>	2,86	2,43	2,32	1,41	0,54
<b>Grupo 3</b>	2,30	1,47	2,04	1,40	0,26
<b>Grupo 4</b>	2,52	1,81	2,48	1,40	0,04

A Tabela 35 apresenta o cenário de gols dos confrontos entre as equipes iBots e FC Portugal. Como a equipe FC Portugal marcou poucos gols, essa tabela tem pouca relevância. Mas, para constar, a estratégia defensiva do grupo 2, que utiliza estratégia diferente para os estados Defesa Posicional e Contra-Defesa, obteve o melhor desempenho. A estratégia do grupo 2 tanto marcou mais gols quanto levou menos gols.

Tabela 35 – Média de gols marcados pelas equipes iBots e FC Portugal

	Gols iBots		FC Portugal		Diferença da média de gols
	Média aritmética	Desvio padrão	Média aritmética	Desvio padrão	
<b>Grupo 1</b>	1,08	0,85	0,06	0,24	1,02
<b>Grupo 2</b>	1,22	0,27	0,08	0,27	1,14
<b>Grupo 3</b>	0,92	0,88	0,08	0,27	0,84
<b>Grupo 4</b>	1,08	0,99	0,00	0,00	1,08

A seguir são apresentadas as médias de posses de bola nas partidas realizadas nos testes apresentados anteriormente. Na Tabela 36 observa-se que em todos os grupos as médias de posse de bola da equipe Agent2D foi um pouco superior à da equipe iBots e

que somente este dado aparentemente não influenciou nas partidas. A informação mais relevante exposta nessa tabela é a de que maior posse de bola no estado Contra-Defesa não significa, necessariamente, pior resultado. Afinal, o grupo 1 foi o com menor posse de bola no estado Contra-Defesa, mas o que obteve melhores resultados foi o grupo 2. O mesmo ocorreu no confronto contra a equipe WrightEagle, Tabela 37, mas não foi observado nos confrontos contra a equipe FC Portugal, Tabela 38. Como exposto em capítulos anteriores, deve ser sempre evitada a situação de, sem a posse de bola, estar com a defesa sem organização posicional, ou seja, evitar o estado Contra-Defesa. No entanto, estratégias adequadas para o estado Contra-Defesa, como conduzir a bola para regiões menos perigosas e de tentar ganhar tempo para a reorganização defensiva da equipe, podem minimizar os efeitos danosos deste estado.

Tabela 36 - Posse de bola média referente às partidas entre iBots e Agent2D

	Agent2D	iBots			
	Posse de bola	Posse de bola iBots	Posse de bola no estado Defesa	Posse de bola no estado Contra-Defesa	Diferença da média de gols a favor iBots
<b>Grupo 1</b>	51,34%	48,66%	30,14	18,52	0,13
<b>Grupo 2</b>	51,42%	48,58%	25,56	23,02	0,72
<b>Grupo 3</b>	51,13%	48,87%	24,54	24,33	0,64
<b>Grupo 4</b>	50,48%	49,52%	22,42	27,10	0,38

Tabela 37 - Posse de bola média referente às partidas entre iBots e WrightEagle

	WrightEagle	iBots			
	Posse de bola	Posse de bola iBots	Posse de bola no estado Defesa	Posse de bola no estado Contra-Defesa	Diferença da média de gols a favor iBots
<b>Grupo 1</b>	43,90%	56,10%	40,35%	15,75%	-0,28
<b>Grupo 2</b>	43,90%	56,10%	35,65%	20,45%	0,54
<b>Grupo 3</b>	44,48%	55,52%	34,75%	20,77%	0,26
<b>Grupo 4</b>	46,03%	53,97%	30,27%	23,70%	0,04

Tabela 38 - Posse de bola média referente às partidas entre iBots e FC Portugal

	FC Portugal	iBots			
	Posse de bola	Posse de bola iBots	Posse de bola no estado Defesa	Posse de bola no estado Contra-Defesa	Diferença da média de gols a favor iBots
<b>Grupo 1</b>	47,04%	56,10%	40,35%	15,75%	1,02
<b>Grupo 2</b>	46,80%	56,10%	35,65%	20,45%	1,14
<b>Grupo 3</b>	46,88%	55,52%	34,75%	20,77%	0,84
<b>Grupo 4</b>	47,72%	53,97%	30,27%	23,70%	1,08



## 5.9 Mapa de calor

Por fim, outro dado extraído dos testes de Modelo de Jogo foi o de movimentação da bola. A partir desse dado foram gerados os mapas de calor da movimentação média da bola nas partidas da equipe iBots contra as equipes Agent2D 3.1.1 (Figura 61a), WrightEagle 2009 (Figura 61b) e FC Portugal 2010 (Figura 61c). Para isso, o campo foi discretizado em 416 células.

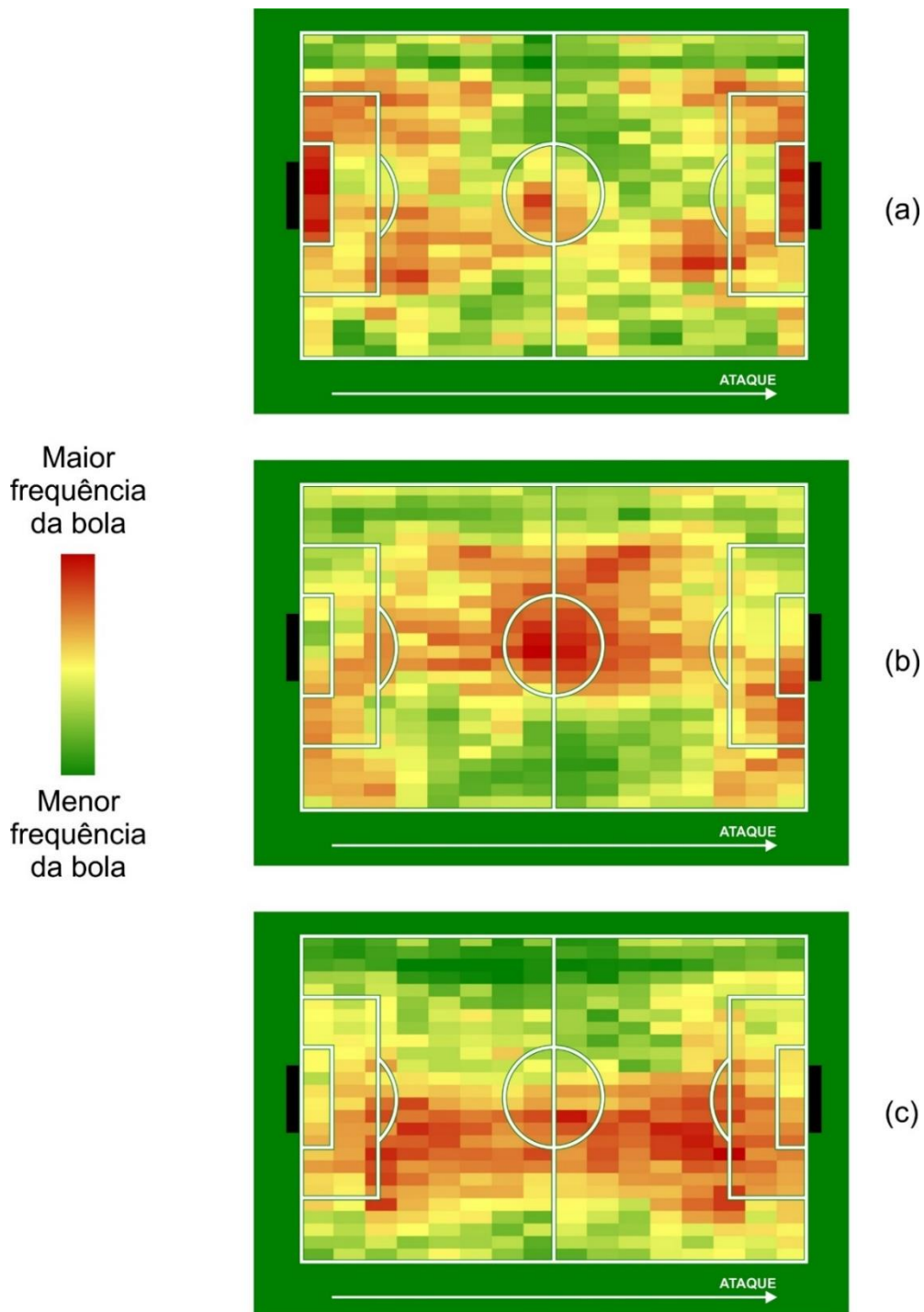


Figura 61 - Mapa de calor da movimentação da bola da equipe iBots contra as equipes: (a) Agent2D; (b) WrightEagle; e (c) FC Portugal.

Pelos mapas de calor, verifica-se que as equipes Agent2D 3.1.1, WrightEagle 2009 e FC Portugal 2010 têm características bastante distintas, o que leva à conclusão de que, apesar de a equipe iBots ter sua identidade e de uma mesma estratégia ter sido adotada contra os adversários, a movimentação de uma equipe em campo é resultante do comportamento do adversário. Taticamente essa informação é importante porque demonstra a necessidade de treinamentos táticos específicos para cada equipe adversária e que diferentes adversários podem exigir mais de determinadas características técnicas dos jogadores do que de outras. Esse tipo de observação é importante porque se constatou que a simulação computacional permite que fenômenos e inferências sejam mais facilmente observados e com menor custo financeiro. Atualmente, em seres humanos, para coletar em partidas de futebol esse tipo de dado é necessário o uso de tecnologias, como sensores e *tags* sem fio como câmeras, RFID, GPS, LPM e UWB.

## 6. Conclusões

Nos capítulos anteriores foram expostos estudos e testes necessários para que fosse possível realizar análises sobre conceitos táticos do futebol por meio de simulação computacional. Especificamente realizar análise sobre o Modelo Dualista e o Modelo de Quatro Momentos, que é o objetivo deste trabalho. Fez parte intrínseca do objetivo propor um conjunto de métodos capazes de validar o modelo matemático-computacional de um simulador de futebol. Para isso, foram levantadas características inerentes ao futebol na literatura e por meio de análise de dados estatísticos de algumas das principais competições do mundo (Copa do Mundo FIFA 2010, UEFA Euro 2012, Conmebol Copa América 2011 e UEFA Champions League 2012/2013). Esses dados forneceram um parâmetro para a validação do simulador de futebol de robôs 2D da RoboCup, adotado neste trabalho.

Para verificar se o modelo do simulador é válido, foram coletados dados estatísticos de partidas realizadas em dois campeonatos oficiais de futebol de robôs na categoria RoboCup Simulation 2D (RoboCup 2012 e LARC 2012) e de partidas realizadas com a equipe iBots, desenvolvida neste trabalho. Esses dados foram comparados com estatísticas do futebol e verificado que o simulador *Soccer Server* tende a obter resultados similares ou próximos de partidas de futebol, ou seja, o modelo matemático-computacional do simulador mostrou-se promissor para simular futebol. Assim, este trabalho identificou um simulador, utilizado em futebol de robôs, com potencial para simular futebol, o que justificou estudo mais aprofundado de seu uso para analisar conceitos táticos do futebol.

Uma característica importante do *Soccer Server* é que ele permite implementar equipes, com suas nuances envolvidas no processo de tomada de decisão individual (jogador) e coletiva (equipe). Isso porque a implementação de equipes no *Soccer Server* resulta em sistemas multiagentes, ou seja, permite a implementação individual de jogadores/agentes virtuais, o que implica em emergir comportamento tático coletivo a partir de individualidades. Simuladores esportivos com essa característica não havia sido descrito na literatura, pelo menos não foi encontrado, e é muito importante para a análise de conceitos táticos uma vez que pode ser útil, no futuro, como ferramenta para as comissões técnicas de preparação de equipes.

A implementação computacional a partir de conceitos descritos na Teoria do Futebol, detalhada no capítulo quatro, ocorreu sobre os princípios fundamentais defensivos e Modelos de Jogo, o que demonstra viabilidade de implementação de outros conceitos. A partir da implementação computacional dos princípios fundamentais defensivos, foi determinado um método computacional, via aprendizado supervisionado (Rede Neuronal e Sistema de Inferência Fuzzy), capaz de classificar as defesas das equipes de futebol como organizada ou desorganizada, algo parcialmente definido na Teoria do Futebol. Porém, foram propostas alterações no Modelo de Quatro Momentos, o resultado foi o surgimento do Modelo de Quatro Estados, um conceito original e principal contribuição desta pesquisa.

Para desenvolvimento das soluções computacionais no simulador *Soccer Server*, foi implementada a ferramenta *Soccer Scenes*, descrita na seção 4.2. Essa ferramenta facilitou a implementação computacional dos conceitos da Teoria do Futebol utilizados nesta pesquisa e pode ser utilizada por comissões técnicas de equipes de futebol para explicar fundamentos técnicos e táticos aos seus jogadores, afinal estes fundamentos estão alicerçados em algoritmos que retornam resultados visuais na ferramenta. Isso motiva a continuidade de desenvolvimento da ferramenta para contemplar mais conceitos e facilitar a interação com comissões técnicas de equipes de futebol.

Os algoritmos propostos neste trabalho foram testados e validados, os resultados estão expressos no capítulo cinco. Os resultados dos testes em simulação permitiram concluir que defender sempre com uma única estratégia tática (ideia concebida pelo Modelo Dualista) não obtém, necessariamente, melhores resultados do que o Modelo de Quatro Estados. Isso significa que foi encontrado um contraexemplo capaz de falsear o Modelo Dualista, afinal nos confrontos entre iBots e WrightEagle 2009 a equipe iBots obteve 26,3% de vitórias a mais quando usou estratégias diferentes nos estados Defesa Posicional e Contra-defesa do que quando usou uma única estratégia e conquistou 27,7% mais pontos.

Logo, tratar o Modelo de Jogo do futebol como apenas dois estados, proposto pelo Modelo Dualista, é algo que em simulação foi refutado. Do mesmo modo, por ter sido encontrado contraexemplo usando como Modelo de Jogo a tese proposta pelo Modelo de Quatro Estados, este modelo passa a ser uma alternativa palpável ao Modelo Dualista, ou seja, um conceito a ser considerado pela Teoria do Futebol.

KUHN (1962), em seu livro *A Estrutura das Revoluções Científicas*, defende que uma ideia substitui outra, não porque funcione, com sucesso, como premissa maior em

um maior número de deduções, mas porque responde a algumas questões que a outra teoria não responde. As mudanças de teoria ocorrem porque uma teoria satisfaz mais do que outra, porque as questões a que dá resposta são consideradas mais importantes. A investigação feita sob um paradigma não é feita para falsificar uma teoria, mas para preencher e desenvolver conhecimento para o qual o paradigma fornece um quadro de trabalho. Assim, não significa que o Modelo de Quatro Estados seja o modelo correto do futebol, mas que respondeu, em simulação, mais adequadamente que o Modelo Dualista.

É importante ressaltar que, pela pequena quantidade de especialistas participantes da pesquisa, apenas quatro, e pelo tipo qualificação deles, pode ser que os resultados estejam enviesados. Assim, a replicação deste trabalho é algo importante para que se possa verificar a recorrência das observações a fim de reforçar/enfraquecer as conclusões desta tese. O uso de algoritmos de aprendizado por reforço ou aplicar informações e conhecimentos emergidos da simulação em futebol de humanos são outras possibilidades a fim de ratificar os resultados obtidos.

Assim, conclui-se que este trabalho possibilitou analisar conceitos táticos do futebol por meio de simulação computacional. Os conceitos verificados foram Modelo Dualista e Modelo de Quatro Momentos. A simulação e a implementação computacional de conceitos do futebol se mostraram viáveis e podem contribuir com este esporte. As conclusões deste trabalho poderão implantadas pela Ciência do Esporte em humanos, o que demonstraria de maneira mais contundente a validade do modelo do simulador *Soccer Server*.

### **6.1 Sugestões para trabalhos futuros**

Para trabalhos futuros, são sugeridos os seguintes pontos:

- desenvolver interpretador léxico, sintático e semântico para a ferramenta *Soccer Scenes* a fim de possibilitar a entrada comandos pelas comissões técnicas;
- aplicar informações e conhecimentos emergidos da simulação em futebol de humanos a fim de reforçar a validade do modelo do simulador *Soccer Server* e, se divergir, propor mudanças no modelo do simulador;
- incorporar em ferramentas de coleta de informações de uma partida em tempo real os algoritmos propostos e validados neste trabalho;
- desenvolver ferramentas de análise tática de uma partida em tempo real;

- realizar novos estudos com a finalidade de aprimorar ainda mais o *Soccer Server* como simulador de futebol;
- usar algoritmos de aprendizado por reforço (*reinforcement learning*) para verificar se o resultado dos testes com o Modelo de Quatro Estados são ratificados;
- verificar a tolerância a falhas de diferentes conceitos táticos, ou seja, quantos jogadores podem falhar em suas funções táticas, ou ter limitações técnicas, e manter a qualidade ofensiva/defensiva dentro de um determinado conceito;
- verificar em diferentes conceitos táticos o quanto é afetada a estratégia de jogo de uma equipe por ter jogadores pouco comprometidos taticamente, informação relevante para a contratação de jogadores;
- descobrir contra que tipos de adversários funcionam melhor certas táticas de jogo;
- identificar características técnicas (qualidade do passe, chute, domínio de bola, etc.) e físicas (velocidade, condicionamento físico, etc.) mínimas dos jogadores, por posicionamento, que devem ser consideradas para a execução eficiente de uma estratégia de jogo.

# Referências

- ABOUTOHI, S. Football: guide de l'éducateur sportif. Paris: Editions ACTIO. 2006.
- AKIYAMA, H., SHIMORA, H., and NODA, I. Helios 2009 team description. RoboCup 2009, 2009.
- AKIYAMA, H. (2012a), Agent2D, Fukuoka university.  
<http://en.sourceforge.jp/projects/rctools/downloads/55186/agent2d-3.1.1.tar.gz>,  
acessado em 20 de fevereiro de 2013.
- AKIYAMA, H. (2012b), Librcsc, Fukuoka university.  
<http://en.sourceforge.jp/projects/rctools/downloads/48788/librcsc-4.0.0.tar.gz>,  
acessado em 20 de fevereiro de 2013.
- ALMEIDA, R. M. F. de. Análise e previsão das formações das equipas no domínio do futebol robótico. p. 24–60, 2008.
- AMIEIRO, N. Defesa à Zona no Futebol: um pretexto para reflectir sobre o "jogar"... bem, ganhando! Edição de Autor, 2005.
- AMIEIRO, N., BARRETO, R., OLIVEIRA, B., RESENDE, N. Mourinho - Porquê tantas vitórias? Lisboa, Gradiva, 2006.
- ANDERSON, C., SALLY, D. Os números do jogo: por que tudo o que você sabe sobre futebol está errado. Tradução André Fontenelle, 1a ed. São Paulo: Paralela, 2013.
- AZEVEDO, J. P. P. A construção de uma forma de jogar específica: um estudo de caso com Carlos Brito na Equipa Sénior do Rio Ave Futebol Clube. Lisboa: Faculdade de Desporto da Universidade do Porto, 2009.
- AZEVEDO, J. P., Por dentro da tática – A construção de uma forma de jogar específica, Portugal, 2011
- BANGSBO, J. The physiology of the soccer, with special reference to intense intermittent exercise. Acta Physiologica Scandinavica. Supplementum, Stockholm, v. 619, p. 1-155, 1994.
- BANGSBO, J., MOHR, M., KRUSTRUP, P. Physical and metabolic demands of training and match-play in the elite football player. J Sport Sci: 24(7): 665-674, 2006.
- BARBERO-ÁLVAREZ, José C.; LÓPEZ, Maite G.; ÁLVAREZ, Verónica B.; GRANDA, Juan; CASTAGNA, Carlo. Heart rate and activity profile for young female soccer players. Journal of Human Sport and Exercise, Alicante, v. 3, n. 2, p. 1-11, jan. 2008.
- BARBOSA, P. F. A. F. Eficácia do Processo Ofensivo em Futebol: Estudo comparativo das equipas classificadas nos primeiros e segundo lugares das ligas

- nacionais de Espanha, Inglaterra, Itália e Portugal, na época de 2008/09. Faculdade de Desporto da Universidade do Porto, 2009.
- BARREIRA, D. (2006). Transição defesa-ataque em Futebol - Análise Sequencial de padrões de jogo relativos ao Campeonato Português 2004/05. Dissertação de Licenciatura. Porto: FADEUP.
- BARROS, R. M. L. et al. Analysis of the distances covered by first division Brazilian soccer players obtained with an automatic tracking method. *Journal of Sports Science and Medicine*, v. 6, n. 2, p. 233-242, june. 2007.
- BAYER, C. O ensino dos desportos colectivos. Lisboa: Dinalivro, 1994.
- BEETZ, M., KIRCHLECHNER, B., LAMES, M. Computerized real-time analysis of football games. *IEEE Pervasive Computing*, 4 (3), 33-39, 2005.
- BERENDS, P.; ROMME, G.. Simulation as a Research Tool in Management Studies. *European Management Journal*, v.17, n.6, p.576-583, 1999.
- BOER, R. de; KOK, J. The Incremental Development of a Synthetic Multi-Agent System: The UvA Trilearn 2001 Robotic Soccer Simulation Team. Master's Thesis - Faculty of Science University of Amsterdam, 2002.
- BOGDANIS, G. C., PAPASPYROU, A., SOUGLIS, A. G., THEOS, A., SOTIROPOULOS, A., MARIDAKI, M. Effects of two different short-term training programs on the physical and technical abilities of adolescent basketball players, *Journal of Science and Medicine in Sport*, 10 (2), 79-88, 2007.
- BONIZZONI, L. Pressing' Story. Società Stampa Sportiva. Roma. 1988.
- CAPINUSSÚ, J. M. Comunicação e Transgressão no Esporte. São Paulo: IBRASA, 1997.
- CARVALHAL, C. Entrevista. In Almeida, F. A importância dos momentos de transição (ataque-defesa e defesa-ataque) num determinado entendimento de jogo. Dissertação de Licenciatura. Porto: FCDEF-UP, 2006.
- CASTELO, J. Modelo Técnico-Táctico do jogo. Lisboa: Edições FMH, 1994.
- CASTELO, J. Futebol, a organização do jogo. Lisboa. Edição do autor, 1996.
- CASTELO, J. O exercício de treino. O acto médico versus o acto do treinador. *Ludens*, 1 (17), 35-54, 2002.
- CONAIRE, C. O., KELLY, P., CONNAGHAN, D., O'CONNOR, N. E. Tennissense: A Platform for Extracting Semantic Information from Multi-Camera Tennis Data. 16th International Conference on Digital Signal Processing (1, 2; Santorini, Greece), 1062-67, 2009.



- COSTA, I. T., GARGANTA, J., GRECO, P. J., MESQUITA, I. Princípios Táticos do Jogo de Futebol: conceitos e aplicação. Motriz: revista de educação física, v.15 n.3 p.657-668, jul./set., 2009.
- COSTA, I. T. Comportamento Tático no Futebol: Contributo para a Avaliação do Desempenho de Jogadores em situações de Jogo Reduzido. Porto: Tese de Doutoramento apresentada à Faculdade de Desporto da Universidade do Porto, 2010.
- COSTA, I. T., GARGANTA, J., GRECO, P. J., MESQUITA, I., MÜLLER, E. S. Relação entre a dimensão do campo de jogo e os comportamentos táticos do jogador de futebol. Revista Brasileira de Educação Física e Esporte (Impresso), v.5, p.79 – 96, 2011a.
- COSTA, I. T., GARGANTA, J., GRECO, P.J., MESQUITA, I., MAIA, J. Sistema de avaliação tática no Futebol (FUT-SAT): Desenvolvimento e validação preliminar Motricidade, vol. 7, núm. 1, pp. 69-84, 2011b.
- COSTA, I. T., GARGANTA, J., GRECO, P. J., MESQUITA, I. Proposta de avaliação do comportamento tático de jogadores de Futebol baseada em princípios fundamentais do jogo. Motriz: revista de educação física, v.17, n.3, jul./set., 2011c.
- COVACI, A., POSTELNICU, C. C., PANFIR, A. N., TALABA, D. A Virtual Reality Simulator for Basketball Free-Throw Skills Development. DoCEIS 2012: 105-112, 2012.
- CUNHA; F. A. Correlação entre vitórias e passes errados no futebol profissional. Lecturas Educación Física y Deportes, Revista Digital, Año 9, n° 62, 2003.
- DIAS, C. M. M. C. Análise tática no futebol: estudo exploratório dos comportamentos táticos desempenhados por jogadores no campo relvado e no campo pelado. Dissertação de licenciatura apresentada à Faculdade de Desporto da Universidade do Porto. Porto, 2009.
- DOI, M., TAKAI, T., CHIHARA, K. VR American Football Simulator with Cylindrical Screen. In Proc. Virtual Worlds, pp.286-293, 2000.
- DOS SANTOS, M. P. Introdução à Simulação Discreta. Rio de Janeiro: UERJ, 1999.
- DURFEE, E. H., LESSER, V., Using Partial Global Plans to Coordinate Distributed Problem Solvers, Proceedings of the 10th International Joint Conference on Artificial Intelligence, IJCAI'87, Milão, Itália, pp. 875-883, 1987.
- FERREIRINHA, F. (2008) Transições - Momentos de desorganização organizada... ou não! In Revista Futebolista. Nº 38 (pp.45-46). Lisboa.
- FESTA, F. Importância, Comportamentos e Operacionalização da Transição Ataque-Defesa no Futebol inserida num contexto de jogo colectivo. Universidade do Porto, Porto, 2009.

- FIANI, R. Teoria dos Jogos para Cursos de Administração e Economia. Rio de Janeiro: Elsevier 2002.
- FIFA (2015). Laws of the game 2015/2016. Disponível em:  
[http://www.fifa.com/mm/Document/FootballDevelopment/Refereeing/02/36/01/11/LawsofthegamewebEN\\_Neutral.pdf](http://www.fifa.com/mm/Document/FootballDevelopment/Refereeing/02/36/01/11/LawsofthegamewebEN_Neutral.pdf). Acessado em 6 de outubro de 2015.
- FIGUEROA, P. J., LEITE, N. J., BARROS, R. M. L. Tracking soccer players aiming their kinematical motion analysis. *Computer Vision and Image Understanding*, 101 (2), 122-35, 2006.
- FORD, I., EKLUND, R., GORDON, S. An examination of psychosocial variables moderating the relationship between life stress and injury time-loss among athletes of a high standard. *Journal of Sport Sciences*, 18, 301-312, 2000.
- FRADE, V. Alta Competição - Que exigências do tipo metodológico? Comunicação apresentada ao Curso de Actualização - Futebol. ISEF - Universidade do Porto, 1985.
- GABBETT, T. When to think and when to blink. VII World Congress on Science and Football. Nagoya, 2011.
- GAITERO, B. (2006). A Ciência Oculta do Sucesso! Mourinho aos olhos da ciência. Dissertação de Licenciatura. Porto: FADEUP.
- GARGANTA, J.; PINTO, J. O ensino do futebol. In: A. Graça e J. Oliveira (Ed.). O ensino dos jogos desportivos Faculdade de Ciências do Desporto e de Educação Física da Universidade do Porto: Rainho & Neves Lda, v.1, p.95-136, 1994.
- GARGANTA, J. Modelação Tática do Jogo de Futebol - Estudo da organização da fase ofensiva em equipas de alto rendimento. Tese de Doutoramento. Porto. FCDEF-UP, 1997.
- GARGANTA, J., PINTO, J. (1998). O ensino do futebol. In GRAÇA, A., OLIVEIRA, J. (Eds.), O Ensino dos Jogos Desportivos (pp.95-135). CEJD, FCDEF-UP
- GARGANTA, J., MARQUES, A., MAIA, J. Modelação tática do jogo de futebol. Estudo da organização da fase ofensiva em equipas de alto rendimento. In J. Garganta, A. A. Suarez e C. L. Peñas (Eds.), A investigação em futebol: Estudos ibéricos (pp. 51-66). Porto: FCDEFUP, 2002.
- GARGANTA, J. Dos constrangimentos da acção à liberdade de (inter)acção, para um futebol com pés... e cabeça. In D. Araújo (Ed.), O contexto da decisão – A acção tática no desporto (pp. 179-190). Lisboa: Visão e Contextos, Lda, 2005.
- GODINHO, Laidiston S.; FIGUEIREDO, Antonio J. B.; VAZ, Luís M. T. Caracterização métrica em futebolistas sub-15. In: Revista Brasileira de Ciência do Esporte, v.35, p.409-423, Florianópolis, 2013.

- GRECO, P. J., BENDA, R. N. (Org.) Iniciação Esportiva Universal: da aprendizagem motora ao treinamento técnico. Volume I. Belo Horizonte: UFMG, 1998.
- HAINAUT, K., BENOIT, J. Enseignement des pratiques physiques spécifiques: le football moderne - tactique-technique-lois du jeu. Bruxelles: Presses Universitaires de Bruxelles. 1979.
- HANSER, F., GRÜNERBL, A., RODEGAST, C., LUKOWICZ, P. Design and Real Life Deployment of a Pervasive Monitoring System for Dementia Patients. 2nd International Conference on Pervasive Computing Technologies for Healthcare (Tampere), 265-66, 2008.
- HARDY, C. J., RICHMAN, J. M., ROSENFELD, L. B. The role of social support in the life stress/injury relationship. *Sport Psychologist*, 5, 128-139, 1991.
- HEARST, E. Psychology and Nothing. *American Scientist*, v.79, n.5, pp. 432-443, 1991.
- HUGHES, C. The Football Association Book of Soccer-Tactics and Skills (4a ed.). British Broadcasting Corporation and Macdonald Queen Anne Press, 1994.
- IWASE, S., SAITO, H. (2003). Tracking soccer players based on homography among multiple views. *Procedures SPIE*, 5150, 283-292.
- JENNINGS, N. R., FARATIN, P., LOMUSCIO, A. R., PARSONS, S., WOOLDRIDGE, M. J., SIERRA, C. Automated negotiation: Prospects, methods and challenges. 10:199–215, 2000.
- JENSEN, R. M., VELOSO, M. M. and BRYANT, R. E. Guided symbolic universal planning. In *Proceedings of the 13th International Conference on Automated Planning and Scheduling ICAPS-03*, pages 123-132, 2003.
- JOHNSON, U. A three-year follow-up of long-term injured competitive athletes: influence of psychological risk factors on rehabilitation. *Journal of Sport Rehabilitation*, 6, 256-271, 1997.
- KHATIB, O. Real-Time Obstacle Avoidance for Manipulators and Mobile Robots. In *International Journal of Robotic Research*, v. 5, n. 1, p. 90-98, 1986.
- KLAUS, D. C. M. RoboCup Soccer Server, 2003.
- KRUSTRUP, P., MOHR, M., STEENSBERG, A., BENCKE, J., KJÆR, M., BANGSBO, J. Muscle and blood metabolites during a soccer game: Implications for sprint performance. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 38(6), 1 – 10, 2006.
- KUHN, Thomas. (1962). *The Structure of Scientific Revolutions*. University of Chicago Press. 2ª edição.
- LACERDA JÚNIOR, L. F. B. Módulo de Visualização de Dados de Depuração de Agentes Inteligentes da RoboCup. UFPE, Trabalho de graduação. Recife: 2004.

- LATOMBE, J. C. Robot Motion Planning. Kluwer Academic Publishers, Boston, 1991.
- LAVIERS, K., SUKTHANKAR, G. A Monte Carlo Approach for Football Play Generation. In G. Michael Youngblood, Vadim Bulitko, editors, Proceedings of the Sixth AAAI Conference on Artificial Intelligence and Interactive Digital Entertainment, AIIDE 2010, October 11-13, 2010, Stanford, California, USA. The AAAI Press, 2010.
- LAW, A. M.; KELTON, W. D. Simulation Modeling and Analysis. New York: McGraw- Hill, 1991.
- LEITÃO, R. A. (2009) Tipos de marcação no futebol: quantas são as possibilidades? Disponível em: <https://unicamptaticafutebol.files.wordpress.com/2009/03/tipos-de-marcacao.pdf>. Acessado em 5 de maio de 2015.
- LINK, D., LAMES, M. (2009). "Sport Informatics – Historical Roots, Interdisciplinarity and Future Developments". IJCSS Volume 8 Edition 2, 68-87.
- LIU, J., TONG, X., LI, W., WANG, T., ZHANG, Y., WANG, H., YANG, B., SUN, L., YANG, S. Automatic player detection, labeling and tracking in broadcast soccer video. Pattern Recognition Letters, 30 (2), 103-113, 2009.
- MADDISON, R. MHURCHU, C. N. Global positioning system: a new opportunity in physical activity measurement. International Journal of Behavioral Nutrition and Physical Activity, 6, 2009.
- MAMDANI, E. H. Application of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant. IEEE (Control and Science), v. 121(12), p. 1585–1588, 1974.
- MEYER, J., ADOLPH, R., SEPHAN, D., DANIEL, A., SEEKAMP, M., WEINERT, V. and VISSER, U. Decision-making and Tactical Behavior with Potential Fields. In RoboCup 2002: Robot Soccer World Cup VI. Volume 2752 of Lecture Notes in Artificial Intelligence, Springer, 2003.
- MOHR, M., KRUSTRUP, P., BANGSBO, J. Match performance of high-standard soccer players with special reference to development of fatigue. Journal of Sports Sciences, 21, 439 – 449, 2003.
- MOHR, M., KRUSTRUP, P., NYBO, L., NIELSEN, J. J., BANGSBO, J. Muscle temperature and sprint performance during soccer matches – beneficial effects of re-warm-up at half time. Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports, 14, 156 – 162, 2004.
- MOHR, M., KRUSTRUP, P., BANGSBO, J. Fatigue in soccer: A brief review. Journal of Sports Sciences, 23, 593 – 599, 2005.
- NAGASAKA, Y., MURAKAMI, K., NARUSE, T., TAKAHASHI, T. and MORI, Y. Potential Field Approach to Short Term Action Planning in RoboCup F180 League. In RoboCup 2000: Robot Soccer World Cup IV table of contents, 345-350, 2001.

- NUNES, J. C. (2013) Compactação e balanço defensivo. Universidade do Futebol. Disponível em: <http://www.universidadedofutebol.com.br/Artigo/15606/Compactacao-e-balanco-defensivo>. Acessado em 19 de maio de 2014.
- OLIVEIRA, J. (2001). Entre o sonho e a realidade, um mundo de expectativas e compromissos. In GARGANTA, J., OLIVEIRA, J., MURAD, M. (Eds.), Futebol de muitas cores e sabores: reflexões em torno do desporto mais popular do Mundo (235-238). FCDEF-UP: Campo das Letras.
- OLIVEIRA, J. G. Entrevista In TAVARES J. “Uma noção fundamental: a especificidade. O como investigar a ordem das “coisas” do jogar, uma espécie de invariâncias de tipo fractal.” Dissertação de Licenciatura. FADEUP, Porto, 2003a.
- OLIVEIRA, J. G. "Organização do jogo de uma equipa de Futebol. Aspectos metodológicos na abordagem da sua organização estrutural e funcional." Documento de apoio das II Jornadas técnicas de futebol da U.T.A.D, 2003b.
- OLIVEIRA, J. G. Entrevista. In ALMEIDA, F. A importância dos momentos de transição (ataque-defesa e defesa-ataque) num determinado entendimento de jogo. Dissertação de Licenciatura. Porto: FCDEF-UP, 2006.
- OLSEN, E. An analysis of goal scoring strategies in the world championship in Mexico 1986. In T. Reilly, A. Lees, K. Davids; W. Murphy (eds.), Science and Football (pp. 373-376). London: E & FN Spon, 1988.
- OTTO, S. Ereigniserkennung mit Ortungssystemen am Beispiel von Witrack. CEPConf, 2010.
- PALOMINO, F.; RIGOTTIZ, L.; RUSTICHINIX, A. Skill, Strategy, and Passion: an Empirical Analysis of Soccer. Journal of Economic Literature, 2000.
- PARREIRA, C. A. Evolução Tática e Estratégias de Jogo. Confederação Brasileira de Futebol, 2005.
- PETRIE, T. A. Coping skills, competitive trait anxiety, and playing status moderating effects on the life stress-injury relationship. Journal of Sports and Exercise Psychology, 5, 261-274, 1993.
- PINTO, C. Periodização do treino desportivo. O Treinador, 21, 39-56, 1988.
- PORTUGAL, L. S. Simulação de tráfego: conceitos e técnicas de modelagem. Rio de Janeiro: Interciência, 2005.
- QUEIROZ, C. Para uma teoria de ensino/treino do futebol. Ludens, v.8, n.1, p.25-44. 1983.
- QUEIROZ, C. Estrutura e Organização dos Exercícios de Treino em Futebol. Lisboa: Federação Portuguesa de Futebol, 1986.

- QUEIROZ, C. (2003). Entrevista. In Tavares, J. (2003). Uma noção fundamental: a especificidade. O como investigar a ordem das "coisas" do jogar, uma espécie de invariâncias de tipo fractal. Dissertação de Licenciatura. Porto: FCDEF-UP.
- RAMOS, A. Uma “(des)baromatriz (acção)” conceptocomportamental da(s) zona(s) pressing. Um “olhar” sobre o(s) sucesso(s) persistente(s) de dois treinadores de «top»: José Mourinho (FC Porto - Chelsea FC) e Carlo Ancelotti (AC Milan). Licenciatura. FADEUP. 2005.
- RAMOS, M. J. A. (2009). Fase ofensiva em futebol - análise sequencial de padrões de jogo ofensivos relativos à selecção nacional de Espanha no Euro 2008. Dissertação de Licenciatura. Porto: FADEUP.
- REBELO, A. N. C. Studies of fatigue in soccer. PhD thesis, University of Porto, Porto, Portugal, 1999.
- REILLY, T., THOMAS, V. Estimated energy expenditures of professional association footballers. *Ergonomics*, 22, 541 – 548, 1979.
- REINA, E., ABAD, P., LOSA, J. La velocidad en el juego de ataque: análisis táctico de los goles de la eurocopa 96 de fútbol. *Cuadernos Técnicos*, 8, 36-43, 1997.
- REIS, L. P. Coordenação em Sistemas Multi-Agentes: Aplicações na Gestão Universitária e Futebol Robótico. Tese de PhD, FEUP, julho de 2003.
- REIS, L. P., LAU N., MOTA L. (2010) FC Portugal 2D Simulation: Team Description Paper. RoboCup 2010, 2D Soccer Simulation League.
- ROCHA, P. G. M., LOPES, J. L., MORAES, S. M. F. Effect of environment alteration in psychological components and physiological parameters during the treadmill running in athletes. *Psicologia: Teoria e Pesquisa*, vol.26, n.2, pp. 381-386, 2010.
- ROMERO, D. Entrevista a Jesús Cuadrado Pino in nuestra entrevista del mês: entrevista de táctica. El pressing de ataque para el sistema de juego 1-4-2-3-1. *Revista Técnica Profesional - Training Fútbol Núm 99*. p.18-10. Valladolid. 2004.
- RUMELHART, D. E., HINTON, G. E., and WILLIAMS, R. J. “Learning Internal Representations by Error Propagation”. David E. Rumelhart, James L. McClelland, and the PDP research group. (editors), *Parallel distributed processing: Explorations in the microstructure of cognition, Volume 1: Foundations*. MIT Press, 1986.
- RUSSELL, Stuart, NORVIG, Peter. *Artificial Intelligence - A Modern Approach*. Prentice Hall, 1995.
- SÁNCHEZ, A. F.; FRISA, A. F. *Acciones tácticas del fútbol y su entrenamiento*. Zaragoza. Kronos. 2006.

- SANTIAGO, C. M. B. Vision and knowledge representation methodologies for game analysis. PhD thesis, Doctoral program in informatics engineering, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto: 2015.
- SHI, K., BAI, A., TAI, Y., CHEN, X. (2009) WrightEagle2009 2D Soccer Simulation Team Description Paper. RoboCup 2010, 2D Soccer Simulation League.
- SILVA, A. (2004). Padrões de jogo no processo ofensivo em Futebol de Alto rendimento: análise dos jogos da segunda fase do Campeonato do Mundo Coreia - Japão 2002. Dissertação de Mestrado. Madrid: Universidad Autónoma de Madrid.
- SILVA, A. T. R. Comportamento social cooperativo na realização de tarefas em ambientes dinâmicos e competitivos. Dissertação de Mestrado, Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro: 2006.
- SILVA, C. D., PAOLI, P. B., CAMPOS JÚNIOR, R. M. A vantagem de 'jogar em casa': uma avaliação no futebol internacional de elite nas temporadas de 2002 a 2005. *Lecturas Educación Física y Deportes* (Buenos Aires), Argentina, v. 88, p. 1-9, 2005.
- SILVA, C. D. Gols: Uma Avaliação no Tempo de Ocorrências no Futebol Internacional de Elite. *Revista Digital*. Buenos Aires. Núm. 112, 2007.
- SMITH, R. G., DAVIS, R. Frameworks for Cooperation in Distributed Problem Solving, *IEEE Transactions on System, Man and Cybernetics*, Vol.11(1), 1980.
- SPENCER, M., RECHICHI, C., LAWRENCE, S., DAWSON, B., BISHOP, D., GOODMAN, C. Time-motion analysis of elite field hockey during several games in succession: a tournament scenario, *Journal of Science and Medicine in Sport*, 8 (4), 382-91, 2005.
- STELZER, A., POURVOYEUR, K., FISCHER, A. Concept and Application of LPM—A Novel 3-D Local Position Measurement System. *IEEE Transactions on Microwave Theory Techniques*, 52, 2664-69, 2004.
- TEODURESCU, L. Problemas da teoria e metodologia nos desportos colectivos. Lisboa: Livros Horizonte, 1984.
- USTC, University of Science and Technology of China. (2014) WEBBase's official webpage. Multi-Agent Systems Lab. Disponível em: <http://wrighteagle.org/2D/>, acessado em 27 de março de 2015.
- VIOLA, P., JONES, M. Rapid object detection using a boosted cascade of simple features. *Proceedings 2001 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* (1), 511-18, 2001.
- WANG, L. X, MENDEL, M. M. Generating fuzzy rules by learning from examples. *IEEE Transactions on Systems, Man, And Cybernetics*, vol. 22, nº 6, november/december 1992.

- WEINBERG, R. S., GOULD, D. Foundations of sport and exercise psychology. Champaign, IL: Human Kinetics, 2003.
- WILLIAMS, J. M., ROEPKE, N. (1993). Psychology of injury and injury rehabilitation. In R. N. Singer, M. Murphey, & L. K. Tennant (Eds.), Handbook of research on sport psychology (pp. 815-839). New York: Macmillan.
- WISBEY, B., MONTGOMERY, P. G., PYNE, D. B., RATTRAY, B. Quantifying movement demands of AFL football using GPS tracking. Journal of Science and Medicine in Sport, 13 (5), 531-36, 2010.
- WORTHINGTON, E. Learning & teaching soccer skills. California: Hal Leighton Printing Company, pp.182, 1974.
- XAVIER, R. O., BARBOSA, R., MATSUURA, J. P. O time de futebol simulado itandroids-2d. Anais do XXVI Congresso da SBC, 2006.
- ZADEH, L. A. Fuzzy sets. Journal Information and Control, p. 338–353, 1965.
- ZERHOUNI, M. Principes de base du football contemporain. Fleury: Orges. 1980.