

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE COMPUTAÇÃO
BACHARELADO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO

**PLANEJAMENTO DE CAMINHOS PARA ROBÔS AUTÔNOMOS UTILIZANDO
CAMPOS POTENCIAIS: AVALIAÇÃO DE MÉTODOS ATRAVÉS DE SIMULAÇÃO
PARA UTILIZAÇÃO PELO TIME DE FUTEBOL DE ROBÔS CARROSSEL
CAPIRA**

BAURU – SP
2015

MATEUS BATISTA SANTOS

**PLANEJAMENTO DE CAMINHOS PARA ROBÔS AUTÔNOMOS UTILIZANDO
CAMPOS POTENCIAIS: AVALIAÇÃO DE MÉTODOS ATRAVÉS DE SIMULAÇÃO
PARA UTILIZAÇÃO PELO TIME DE FUTEBOL DE ROBÔS CARROSSEL
CAIPIRA**

Monografia para Trabalho de Conclusão de
Curso do Curso de Bacharelado em Ciência da
Computação da Universidade Estadual Paulista
“Júlio de Mesquita Filho”, Faculdade de
Ciências, campus Bauru.

Orientador: Rene Pegoraro

BAURU

2015

MATEUS BATISTA SANTOS

**PLANEJAMENTO DE CAMINHOS PARA ROBÔS AUTÔNOMOS UTILIZANDO
CAMPOS POTENCIAIS: AVALIAÇÃO DE MÉTODOS ATRAVÉS DE SIMULAÇÃO
PARA UTILIZAÇÃO PELO TIME DE FUTEBOL DE ROBÔS CARROSSEL
CAIPIRA**

Monografia para Trabalho de Conclusão de
Curso do Curso de Bacharelado em Ciência da
Computação da Universidade Estadual Paulista
“Júlio de Mesquita Filho”, Faculdade de
Ciências, campus Bauru.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Renê Pegoraro
DCo - FC - UNESP - Bauru
Orientador

Prof. Dr. Wilson Massashiro Yonezawa
DCo - FC - UNESP - Bauru

Prof. Dr. Humberto Ferasoli Filho
DCo - FC - UNESP - Bauru

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aqueles que estiveram ao meu lado nos momentos mais difíceis, que não mediram esforços para me ajudar.

À minha família por proporcionar vinte e um anos de completude, na alegria e na tristeza.

À companhia da minha futura esposa, que nunca me abandonou mesmo quando eu não tinha mais esperança

À todos os meus amigos, que estiveram comigo no laboratório, na periferia e na sala de aula. Eles me proporcionaram excelentes momentos durante esse período de graduação.

Em especial por este trabalho, agradeço ao meu orientador Rene Pegoraro, que foi um excelente tutor durante a maior parte da minha graduação, se tornando um amigo que levarei para a vida.

"Try not. Do or do not. There is no try"

(Yoda)

RESUMO

Uma das maiores dificuldades de um robô autônomo é o obstáculo físico. Para a robótica autônoma a necessidade de desviar de obstáculos é essencial, para isso é necessário o mapeamento do ambiente em busca destes obstáculos. Depois de mapeado o ambiente, é necessário interpretar os obstáculos e calcular rotas para evitá-los, este é o papel do Campo Potencial. Baseado em análises matemáticas centradas em equações diferenciais que considerem o robô e o ambiente em um sistema unificado. Os campos potenciais partem da ideia de forças imaginárias atuando sobre o robô, onde a “força causada” pelo obstáculo é de caráter repulsivo e pelo objetivo de caráter atrativo. O objetivo deste trabalho é implementar e comparar quatro métodos existentes de campos potenciais que foram apresentados por Faria (2006) e verificar, através de simulação, qual deles se enquadra melhor para o time de futebol de robôs do Departamento de Computação da UNESP de Bauru. Dentre os testes que foram feitos para realizar este trabalho, verificou-se que o método de Campos Potenciais Harmônicos foi mais eficiente em termos de simulação, apesar de não superar o método sem campos potenciais.

Palavras-chave: Futebol de Robôs, Campos Potenciais, Robôs Móveis Autônomos.

ABSTRACT

Path Planning For Autonomous Robots Using Potential Fields

One of the major difficulties faced in autonomous robot is the physical obstacle. For autonomous robotics, the need to dodge such obstacles is essential, and for that it's necessary to develop their environment's mapping while searching for them. After the environment has been mapped, it's necessary to interpret the obstacles and calculating routes for avoiding them, and this is where the Potential Field comes in. Based on mathematical analysis centered around differential equations that consider the robot and the environment in an unified field, the potential fields are based on the idea of imaginary forces acting over the robot, where the "force which's caused" by the obstacle is of repulsive fashion, and by the goal, an attractive one. The goal of this work is develop and compare four methods of potential fields presented by Faria (2006) and verify, throug simulation, which one of those methods can be used by the robot soccer team of UNESP - Campus of Bauru. Among the tests, which were made to accomplish this work, was found that the Harmonic Potential Field had more efficiency in terms of simulation, although it did not overcome the method without potential fields.

Key Words: Robot Soccer, Potential Fields, Mobile Autonomous Robots.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Ligação entre módulos (Fonte: o autor)

Figura 2.1 - Energia específica versus velocidade atingível de vários mecanismos de locomoção (Retirada de Todd, 1985).

Figura 3.1 – Imagem do campo obtida pela placa de aquisição de imagens (Fonte: o autor)

Figura 3.2 – Exemplo de etiqueta de identificação do robô. (Fonte: o autor)

Figura 3.3. Posicionamento do robô reconhecido pelo sistema de visão global (Fonte: Alves et al (2011))

Figura 3.4 – Sistema de coordenadas globais obtidas do sistema de coordenadas da câmera. (Fonte: o autor)

Figura 3.5 - Comportamento do goleiro. (Fonte: Costa et al (1998))

Figura 3.6 - Esquema dos ângulos presentes no cálculo da velocidade dos motores (Fonte: o autor)

Figura 3.7 – Primeira parte do Gráfico de Fluxo de Programa do Algoritmo de escolha da velocidade dos motores (Fonte: o autor)

Figura 3.8 - Primeira parte do Gráfico de Fluxo de Programa do Algoritmo de escolha da velocidade dos motores (Fonte: o autor)

Figura 3.9 – Simulador usado pelo time Carrossel Caipira (Fonte: o autor)

Figura 4.1 – (a) Força de repulsão na vizinhança de um obstáculo; (b) Força de repulsão do objeto O sobre um robô localizado em R. (Fonte: Faria (2006))

Figura 4.2 – (a) Campo de atração constante; (b) Atração entre o robô R e a meta M. (Fonte: Faria (2006))

Figura 5.1 – Representação gráfica do Campo Potencial de Khatib (Fonte: o autor)

Figura 5.2 – Representação gráfica do Campo Potencial Harmônico (Fonte: o autor)

Figura 5.3 – Representação gráfica do Campo Potencial Orientado com indicação do vetor de orientação. (Fonte: o autor)

Figura 5.4 – Representação gráfica do Campo Potencial Localmente Orientado com indicação do vetor de orientação. (Fonte: o autor)

Figura 5.5 – Representação do CPK, perspectiva do defensor (esquerda) e do atacante (direita). (Fonte: o autor)

Figura 5.6 – Visão do simulador na situação inicial. (Fonte: o autor)

Figura 5.7 – Representação do CPK com os rastros de cada robô. (Fonte: o autor)

Figura 5.8 – Visão do simulador na situação final. (Fonte: o autor)

Figura 5.9 – Representação do CPH, perspectiva do defensor (esquerda) e do atacante (direita). (Fonte: o autor)

Figura 5.10 – Representação do CPH com os rastros de cada robô. (Fonte: o autor)

Figura 5.11 – Visão do simulador na situação final. (Fonte: o autor)

Figura 5.12 – Representação do CPO, perspectiva do defensor (esquerda) e do atacante (direita). (Fonte: o autor)

Figura 5.13 – Representação do CPO com os rastros de cada robô. (Fonte: o autor)

Figura 5.14 – Visão do simulador na situação final. (Fonte: o autor)

Figura 5.15 – Representação do CPO fora da área sem orientação, perspectiva do defensor (esquerda) e do atacante (direita). (Fonte: o autor)

Figura 5.16 – Representação do CPO com os rastros de cada robô fora da área sem orientação. (Fonte: o autor)

Figura 5.17 – Representação do CPH, perspectiva do defensor (esquerda) e do atacante (direita). (Fonte: o autor)

Figura 5.18 – Representação do CPH com os rastros de cada robô. (Fonte: o autor)

Figura 5.19 – Simulador antes das alterações. (Fonte: o autor)

Figura 5.20 – Simulador após alterações, representação de uma conexão. (Fonte: o autor)

Figura 5.21 – Eficiência de cada método em relação aos seus “concorrentes” (Fonte: o autor)

Figura 5.22 – Comparação do número de gols marcados pelos métodos somando todos os jogos realizados. (Fonte: o autor)

Figura 5.23 – Número total de pênaltis cometidos. (Fonte: o autor)

Figura 5.24 – Número de pênaltis convertidos. (Fonte: o autor)

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Transição dos acionamentos dos motores. (Fonte: o autor)

Tabela 5.1 – Dados obtidos do jogo CPH x CPK (Fonte: o autor)

Tabela 5.2 – Análise Estatística do jogo CPH x CPK (Fonte: o autor)

Tabela 5.3 – Dados obtidos do jogo CPH x CPO (Fonte: o autor)

Tabela 5.4 – Análise Estatística do jogo CPH x CPO (Fonte: o autor)

Tabela 5.5 – Dados obtidos do jogo CPH x CPLO (Fonte: o autor)

Tabela 5.6 – Análise Estatística do jogo CPH x CPLO (Fonte: o autor)

Tabela 5.7 – Dados obtidos do jogo CPK x CPO (Fonte: o autor)

Tabela 5.8 – Análise Estatística do jogo CPK x CPO (Fonte: o autor)

Tabela 5.9 – Dados obtidos do jogo CPLO x CPK (Fonte: o autor)

Tabela 5.10 – Análise Estatística do jogo CPLO x CPK (Fonte: o autor)

Tabela 5.11 – Dados obtidos do jogo CPO x CPLO (Fonte: o autor)

Tabela 5.12 – Análise Estatística CPO x CPLO (Fonte: o autor)

GLOSSÁRIO

ATUADOR – é um elemento que produz movimento, atendendo a comandos que podem ser manuais, elétricos ou mecânicos.

BIOINSPIRADO – que tem sua inspiração vinda de sistemas biológicos estudados pelo homem.

MANOBRABILIDADE – capacidade de um veículo de executar movimentos através de manobras.

POSE DO ROBÔ – conjunto de dados que compõe o estado do robô, sendo eles ângulo do robô e a posição x e y no espaço.

CHASSI – é uma estrutura de suporte para outros componentes que pode ser feita de aço, alumínio, ou qualquer outro material rígido.

GRADIENTE DESCENDENTE – é um vetor que indica o sentido e a direção na qual, por deslocamento a partir do ponto especificado até mais próximo de menor valor.

MÉTODO SOR – O Método de Sobre-Relaxação Sucessiva (Successive Over-Relaxation-SOR) é um método iterativo para a solução de sistemas de equações lineares

INTERVALO DE CONFIANÇA – Em estatística, um intervalo de confiança (IC) é um intervalo estimado de um parâmetro estatístico. Quanto maior a probabilidade do intervalo conter o parâmetro, maior será o intervalo.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO.....	14
1.1 OBJETIVO.....	16
1.2 JUSTIFICATIVA.....	16
CAPÍTULO 2 - O ROBÔ MÓVEL.....	17
2.1 CINEMÁTICA DO ROBÔ.....	18
2.1.1 REPRESENTAÇÃO DA POSIÇÃO DO ROBÔ.....	19
CAPÍTULO 3 O SISTEMA DE FUTEBOL DE ROBÔS.....	22
3.1 MÓDULO DA VISÃO.....	22
3.2 MÓDULO DA ESTRATÉGIA.....	25
3.3 MÓDULO DO CONTROLE.....	27
3.4 O SIMULADOR.....	30
CAPÍTULO 4 CAMPOS POTENCIAIS.....	33
4.1 CAMPO POTENCIAL DE KHATIB.....	33
4.1.1 FORÇA DE REPULSÃO.....	34
4.1.2 FORÇA DE ATRAÇÃO.....	35
4.1.3 FORÇA RESULTANTE.....	36
4.2 CAMPO POTENCIAL HARMÔNICO.....	36
4.3 CAMPO POTENCIAL ORIENTADO.....	38
4.4 CAMPO POTENCIAL LOCALMENTE ORIENTADO.....	38
CAPÍTULO 5 DESENVOLVIMENTO.....	39
5.1 IMPLEMENTAÇÃO.....	39
5.1.1 IMPLEMENTAÇÃO DO CAMPO POTENCIAL DE KHATIB.....	40
5.1.2 IMPLEMENTAÇÃO DO CAMPO POTENCIAL HARMÔNICO.....	42
5.1.3 IMPLEMENTAÇÃO DO CAMPO POTENCIAL ORIENTADO.....	44
5.1.4 IMPLEMENTAÇÃO DO CAMPO POTENCIAL LOCALMENTE ORIENTADO.....	45
5.2 INTEGRAÇÃO DOS CAMPOS POTENCIAIS COM O SIMULADOR.....	47
5.2.1 INTEGRAÇÃO DO CAMPO POTENCIAL DE KHATIB COM O SIMULADOR.....	48
5.2.2 INTEGRAÇÃO DO CAMPO POTENCIAL HARMÔNICO COM O SIMULADOR.....	50
5.2.3 INTEGRAÇÃO DO CAMPO POTENCIAL ORIENTADO COM O SIMULADOR.....	52
5.2.4 INTEGRAÇÃO DO CAMPO POTENCIAL LOCALMENTE ORIENTADO COM O SIMULADOR.....	55
5.3 AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO.....	56
5.3.1 MODIFICAÇÃO DO SIMULADOR.....	56
5.3.2 RESULTADOS.....	58
CAPÍTULO 6 CONCLUSÃO.....	70
6.1 TRABALHOS FUTUROS.....	70
REFERÊNCIAS.....	72

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO

A história da UNESP-Bauru no campo de futebol de robôs começa em 1998, dois anos depois de ter sido proposto pelo professor Jong-Hwan Kim, do Departamento de engenharia Elétrica do KAIST (Korean Advanced Institute of Science and Technology), da República da Coreia (Coreia do Sul), juntamente com o primeiro campeonato brasileiro de futebol de robôs. Nesta edição do campeonato o time da UNESP-Bauru, então conhecido como Carrossel Caipira, sagrou-se vice-campeão, ganhando o direito de disputar o campeonato mundial na França em 1998. No campeonato mundial houve uma parceria entre POLI-USP e UNESP-Bauru que deu origem ao time Guaraná, vice-campeão do torneio mundial que veio a ser disputado. Depois deste campeonato o time da UNESP-Bauru voltou a ganhar títulos, sendo estes o campeonato brasileiro no VI SBAI (Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente) de 2003, em Bauru, São Paulo, e posteriormente bicampeão brasileiro no VII SBAI em 2005, em São Luis, Maranhão. A categoria que este time compete atualmente chama-se: IEEE Very Small Size. Nela são utilizados três robôs: o atacante, o defensor e o goleiro. O objetivo no futebol de robôs, assim como no esporte praticado por humanos, é marcar gols.

Para dar continuidade nessa história, este Trabalho de Conclusão de Curso tem por objetivo implementar e testar métodos existentes na literatura que contribuem para um módulo de significativa importância na robótica, o planejamento de caminhos. Segundo Siegwart e Nourbakhsh (2004) dado um mapa e a posição do objetivo, o planejamento de caminhos envolve identificar uma trajetória que irá fazer com que o robô alcance o objetivo ao qual está destinado. Siegwart e Nourbakhsh (2004) afirmam também que o primeiro passo de um sistema de planejamento de caminhos é transformar o ambiente contínuo do mundo real em um mapa adequado e discreto para o algoritmo que planejará o caminho. Os algoritmos de planejamento de caminhos diferem na forma que ocorre a decomposição do ambiente real em um mapa discretizado. Siegwart e Nourbakhsh (2004) identificam três estratégias de decomposição comumente usadas:

1. Mapa de caminho: identifica um conjunto de caminhos dentro do espaço livre;
2. Decomposição de Células: discrimina células ocupadas das células livres;
3. Campos potenciais: impõe uma função matemática ao longo do espaço.

Segundo Faria (2006) os Campos Potenciais são uma forma de se planejar caminhos de forma otimizada e de baixo custo computacional, sendo esta abordagem a escolhida para implementação e desenvolvimento do controle do time de futebol de robôs “Carrossel Caipira”. Como existem muitas variações de campos potenciais, alguns métodos envolvendo esses campos serão implementados com o intuito de comparar e verificar desempenho deles, utilizando-se da simulação.

Para atingir estes objetivos é preciso entender como o sistema de futebol funciona, que será denominado como Carrossel Caipira Sem Campos Potenciais, e será usada a sigla SCP (Sem Campos Potenciais). O sistema do time da UNESP-Bauru de futebol de robôs é composto por módulos. Cada módulo do sistema é abordado no capítulo 3. O Sistema pode ser simplificado através do seguinte esquema, representado na figura 1.1.



Figura 1.1 – Ligação entre módulos (Fonte: o autor)

É necessário abordar com detalhes os módulos deste sistema, visando empregar os métodos de campos potenciais dentro do contexto de futebol de robôs. Assim a exploração de cada módulo do sistema será analisada a fim de encontrar uma forma de realizar o controle do robô através de caminhos planejados por campos potenciais.

1.1 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é implementar e comparar quatro métodos existentes de campos potenciais que foram apresentados por Faria (2006) e verificar, através de simulação, qual deles se enquadra melhor para o time de futebol de robôs do Departamento de Computação da UNESP de Bauru.

1.2 JUSTIFICATIVA

O time Carrossel Caipira vem recebendo atualizações de hardwares nos últimos anos, sendo que o atual time foi construído em 2013. Mesmo com essas atualizações de hardware o time não consegue evoluir sem que o software esteja em consonância. Apesar de existente desde 1998, o time continua com poucas alterações funcionais em seu software, por isso este trabalho se insere no aprimoramento do controle, especificamente, no planejamento de caminhos para o deslocamento do robô, para isso usou-se campos potenciais. Um dos métodos de campos potenciais, que será apresentado nesse trabalho, foi implementado para o time visando a Competição Brasileira de Robótica (CBR) de 2013, nesse ano o time sagrou-se vice-campeão brasileiro. Desta forma uma análise dos métodos de campos potenciais foi realizada, para verificar se o time pode evoluir utilizando estes métodos.

CAPÍTULO 2 - O ROBÔ MÓVEL

Um robô móvel precisa de mecanismos de locomoção que o permite deslocar através do ambiente. Como descrito por Matarić (2007), existe uma grande variedade de meios possíveis de se deslocar, e a seleção da abordagem de locomoção do robô é um importante aspecto do design do robô móvel. Existem pesquisas sobre robôs que podem andar, pular, correr, deslizar, patinar, nadar, voar e rolar. Segundo Siegwart e Nourbakhsh (2004), a maioria destes mecanismos de locomoção tem sido inspirada em seus homólogos biológicos.

Existe, no entanto, uma exceção: a roda é uma invenção humana e que se adapta bem a terrenos planos. As limitações dos sistemas de locomoção bioinspirados são uma barreira para se atingir a mesma eficiência que robôs sobre rodas, no que se refere a terrenos planos, muito devido a complexidade mecânica destes sistemas, desta forma robôs móveis usam muitas vezes mecanismos com rodas.

A figura 2 ilustra essa eficiência inerente ao robô sobre rodas. Em terrenos planos a locomoção sobre rodas é em ordem de 1 para 2 de magnitude de eficiência que a locomoção por pernas, em termos de gasto de energia e velocidade (Todd, 1985).

Na Categoria IEEE Very Small Size os robôs utilizados para jogar futebol se deslocam com rodas sobre uma superfície plana, justamente pela menor complexidade mecânica e maior eficiência nesta superfícies, visto que, segundo as regras, o robô não pode ultrapassar o tamanho de 7.5cm x 7.5cm x 7.5cm.

Desta forma, este é o contexto que este trabalho se insere, ele foca no problema de navegação de robôs móveis, particularmente salientando o planejamento de caminhos em um ambiente de competição para futebol de robôs. Assim serão apresentados elementos que concernem ao universo deste ambiente.

A dinâmica do robô, que considera as forças atuantes nele, é propositalmente ignorada neste trabalho, pois ela não é determinística para os robôs do carrossel caipira em suas velocidades mais altas. Assim, optou-se pela utilização apenas da velocidade mais baixa disponível, o que resulta em um comportamento mais estável aos robôs.

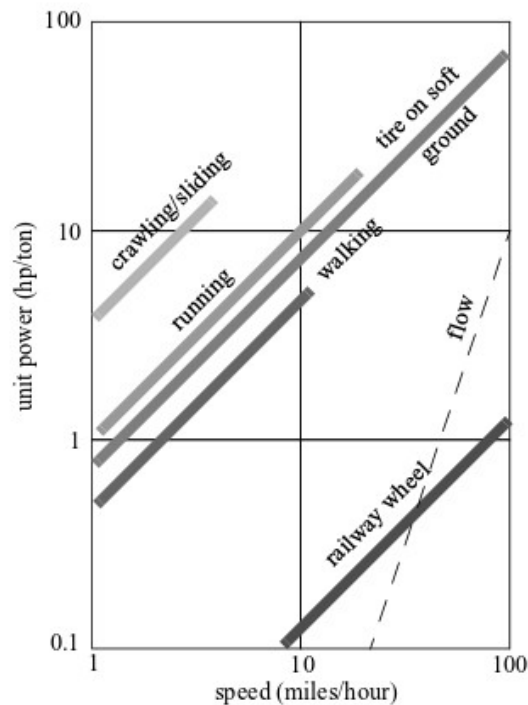


Figura 2.1 - Energia específica versus velocidade atingível de vários mecanismos de locomoção (Retirada de Todd, 1985).

2.1 CINEMÁTICA DO ROBÔ

A correspondência entre o movimento do atuador e do movimento efetivo resultante é chamado de cinemática. A Cinemática é constituída pelas regras sobre a estrutura do manipulador, descrevendo o movimento (Matarić, 2007). Na robótica, considera-se as restrições do comportamento mecânico do robô tanto na ordem do desenvolvimento do *design* apropriado para determinadas tarefas quanto no entendimento de como criar um software de controle para uma instância de hardware de um robô.

O movimento do robô é descrito pela contribuição fornecida pelo movimento de cada roda, considerando a disposição das rodas na estrutura mecânica do robô e as dimensões usadas. Por outro lado, cada roda também impõe restrições no movimento do robô; por exemplo, evitando deslizamentos laterais. Na seção seguinte é apresentado a notação que permite a expressão do movimento do robô em uma representação de posição global tão bem quanto a representação de posição local. Então, usando esta notação, é apresentado a construção de um modelo simples da cinemática direta (*forward kinematics*), descrevendo

como o robô se move como uma função de sua geometria. Com essas ferramentas, podem-se avaliar os caminhos e trajetórias que definem a manobrabilidade do robô. Isto é particularmente importante em robótica móvel por conta da natureza móvel e da autonomia; o mapeamento claro entre as representações de posição do robô global e localmente é requerido. De início apresenta-se a representação da posição do robô formalmente, então usa-se o formalismo resultante para anotar a cinemática do robô. Através deste processo desenha-se extensivamente na notação e terminologia presente em Campion, Bastin e D'Andréa-Novell (1996).

2.1.1 REPRESENTAÇÃO DA POSIÇÃO DO ROBÔ

Através desta análise é possível modelar o robô como um corpo rígido sobre rodas, operando horizontalmente em terreno plano. A dimensionalidade total do chassi do robô no plano são três, duas para posição no plano e uma para orientação ao longo do eixo vertical, que é ortogonal ao plano. No entanto pelo chassi do robô refere-se apenas ao corpo rígido do robô, ignorando as juntas e graus de liberdade internos ao robô e as rodas.

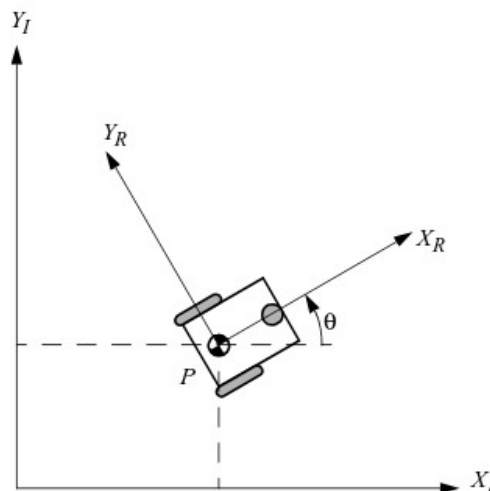


Figura 2.3 – Representação de posição global e local do robô (Retirada de Siegwart e Nourbakhsh, 2004)

Em ordem de especificar a pose do robô no plano se estabelece a relação entre o *frame* de referência global do plano e de referência local do robô, como na figura 3, onde o termo *frame* remete a representação da pose do robô em um determinado instante t . Os eixos X_I e Y_I definem uma base inercial arbitrária no plano no *frame* global de referência de alguma origem $O: [X_I, Y_I]$. Para especificar a posição do robô é escolhido um ponto P no chassi do robô e assim obtém-se o *frame* de referência local do robô. A posição de P no *frame* de referência global é especificadas pelas coordenadas x e y , e pela diferença angular entre a referência global e a referência local dada por θ . Descreve-se o posicionamento do robô por um vetor com estes três elementos. Note que o uso do subscrito I é para deixar claro que a base desse posicionamento é em relação ao *frame* referência global, equação 1:

$$\xi_I = \begin{bmatrix} x \\ y \\ \theta \end{bmatrix} \quad (1)$$

Para descrever o movimento do robô em termos dos componentes de movimento, será necessário mapear o movimento ao longo dos eixos do *frame* de referência global para movimentar ao longo dos eixos do *frame* de referência local do robô. Naturalmente, o mapeamento é uma função do posicionamento atual do robô. Este mapeamento é alcançado usando a *matriz de rotação ortogonal*:

$$R(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Essa matriz pode ser usada para mapear o movimento no *frame* de referência global $[X_I, Y_I]$ para movimentar em termos do *frame* de referência local $[X_R, Y_R]$. Essa operação é denotada pelo $R(\theta)\xi_I$ porque a computação desta operação depende do valor de θ :

$$\xi_R = R(\theta)\xi_I \quad (3)$$

O robô diferencial possui duas rodas, cada uma com diâmetro r . Dado um ponto P centralizado no meio de duas rodas, cada roda com distância l de P . Dado r, l, θ e a velocidade de giro de cada roda, $\dot{\phi}_1$ e $\dot{\phi}_2$, um modelo de cinemática direta pode prever a velocidade do robô no *frame* global de referência:

$$\dot{\xi}_I = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = f(l, r, \theta, \dot{\phi}_1, \dot{\phi}_2) \quad (4)$$

É com base nesta notação que Siegwart e Nourbakhsh (2004) apresentam um modelo cinemático para o robô, como demonstra a equação 5.

$$\dot{\gamma}_I = R(\theta)^{-1} \begin{bmatrix} \frac{r\dot{\phi}_1}{2} + \frac{r\dot{\phi}_2}{2} \\ 0 \\ \frac{r\dot{\phi}_1}{2l} + \frac{-r\dot{\phi}_2}{2l} \end{bmatrix} \quad (5)$$

CAPÍTULO 3 O SISTEMA DE FUTEBOL DE ROBÔS

Como discutido no capítulo 1, o sistema de futebol de robôs é composto por módulos que visam compreender o ambiente que o robô está inserido, descobrindo sua posição no ambiente, sugerindo qual o objetivo que deve ser atingido e calculando a melhor forma de atingi-lo. O Sistema é então dividido em três módulos essenciais, sendo eles a visão, a estratégia e o controle. Estes módulos serão apresentados no decorrer deste capítulo de acordo com o que faz parte do SCP. Além disto discorre-se sobre o simulador utilizado neste trabalho que tem papel fundamental na verificação dos dados colhidos nos testes realizados.

3.1 MÓDULO DA VISÃO

O módulo de visão no sistema de futebol de robôs funciona com o processamento de imagens capturadas por uma câmera que está posicionada acima do campo. Cada imagem é capturada e transmitida para uma placa de aquisição de imagem, veja um exemplo na figura 3.1.



Figura 3.1 – Imagem do campo obtida pela placa de aquisição de imagens (Fonte: o autor)

Uma vez que o sistema de visão utilizado no time Guaraná é equivalente ao utilizado no time Carrossel Caipira, desta forma, segundo Costa e Pegoraro (2000) o ciclo total de controle do sistema foi definido pela taxa de aquisição de imagens, que, no time GUARANÁ, é de 30 quadros por segundo, ou seja, um quadro a cada 33 ms. Assim, em períodos de 33 ms uma nova imagem refletindo o estado atual do campo torna-se disponível ao computador para processamento.

Após a captura da imagem, ou seja, de cada quadro, que representa um instante da partida, é feito o processamento da imagem que consiste em procurar por determinadas cores que foram previamente escolhidas. Essas cores são as cores das etiquetas que estão fixadas na parte superior do robô e que os identificam. Veja um exemplo da etiqueta na figura 3.2.



Figura 3.2 – Exemplo de etiqueta de identificação do robô. (Fonte: o autor)

Segundo Alves et al. (2011^a), que bem descreveu, para facilitar o reconhecimento do robô, foram adotados marcadores coloridos que consistem em dois círculos de cores diferentes pré-determinada, C_0 e C_1 . Uma vez que o centro de processamento adquire a imagem da câmera, ele é capaz de reconhecer estas cores como regiões e determinar o ponto central de cada uma destas regiões. Com as coordenadas Cartesianas de C_0 e C_1 , o servidor calcula as coordenadas de C , dado pelo ponto médio entre C_0 e C_1 , e o ângulo θ do robô,

dado por $\alpha - 45^\circ$, sabendo que é o ângulo formado entre a reta que passa por C_0 e C_1 e o eixo das abscissas, figura 3.3.

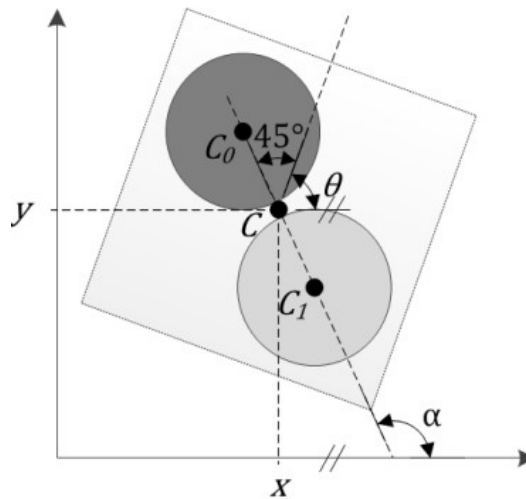


Figura 3.3. Posicionamento do robô reconhecido pelo sistema de visão global (Fonte: Alves et al (2011))

Para enviar um comando a um determinado robô, o computador central deve ser capaz de identificar este robô, além de determinar sua posição, orientação e velocidade atual. Após identificar cada objeto na imagem, o sistema de coordenadas da imagem (em pixels) é transformado em sistema cartesiano do campo, como mostrado na Figura 3.4. Todas as fórmulas serão apresentadas considerando o campo de defesa no lado esquerdo do campo (origem de x).

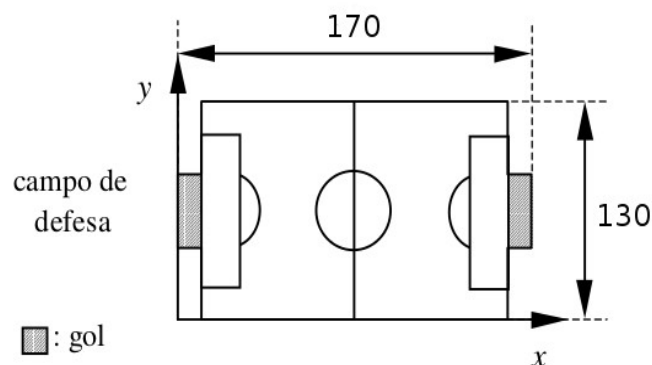


Figura 3.4 – Sistema de coordenadas globais obtidas do sistema de coordenadas da câmera. (Fonte: o autor)

Os dados colhidos através do processamento da imagem capturada pela câmera são utilizados nos outros módulos e esses dados são armazenados tendo em vista a estrutura de dados a seguir, escrito em linguagem C:

```
struct Estado {  
    float angulo;  
    float dAngulo; // diferença de ângulo entre robô e objetivo  
    float x, y;  
    float dx, dy; // velocidade atual do robô  
};
```

O módulo de visão implementado tem se mostrado confiável, permitindo algumas variações nas condições de iluminação e nas cores do campo, etiquetas e bola. O que traz confiança para a implementação do planejamento de caminhos ótimos, pois, os erros que se propagam através deste módulo são pequenos e não interferem no planejamento.

3.2 MÓDULO DA ESTRATÉGIA

A estratégia é o módulo responsável por definir a meta do robô. Utilizando as posições do robô, dos obstáculos e da bola, é sugerido uma meta para o robô, de tal forma que corresponda ao comportamento que este robô deve desempenhar na partida. No caso da categoria IEEE Very Small Size existem três tipos de comportamento, que são assumidos de acordo com a posição do robô: goleiro, defensor e atacante. Segundo Costa et al. (1998) existem as seguintes ações para os comportamentos citados:

1. Goleiro: O robô é posicionado na projeção da posição da bola com a linha defensiva do gol, se a bola vir diretamente na direção da região do gol. Caso contrário o robô se alinha com a bola na coordenada y do sistema, sempre permanecendo em frente ao gol.

Para posicionamento rápido o robô mantém sua orientação em 90 ou 270 graus, como é mostrado na figura 3.5.

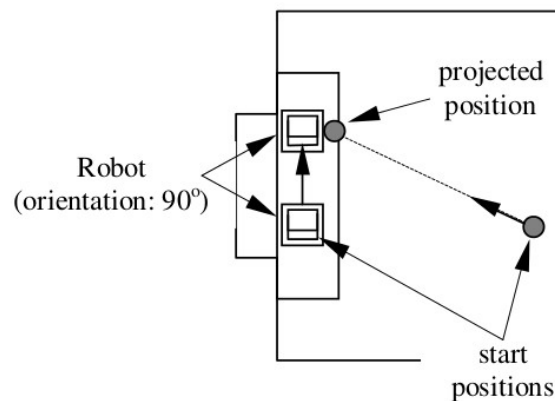


Figura 3.5 - Comportamento do goleiro. (Fonte: Costa et al (1998))

2. Defensor: O robô é posicionado na direção da coordenada y da bola, bloqueando a bola para prevenir seu avanço até o gol. Mas deve permitir a bola de passar se ela estiver sendo conduzida pelo atacante. Quando o defensor e a bola estão em situação favorável no que diz respeito a um possível ataque ao gol adversário, ele troca de comportamento com o atacante e tenta atacar. A situação favorável acontece quando o defensor estiver mais próximo da bola em posição de ataque.

3. Atacante: nesta posição existem dois tipos de comportamento: (I) modo de posicionamento, quando o objetivo é posicionar o robô atrás da bola para conduzi-la até o gol ou bloquear algum adversário; (ii) modo de condução, quando o robô empurra a bola até o gol.

Através destes comportamentos são calculados a pose que o robô deve atingir, ou seja, as coordenadas x , y e o ângulo que o robô deve alcançar para realizar a estratégia específica. Esta pose é importante para o planejamento do caminho ótimo, pois, define o fim do trajeto escolhido por ele (o objetivo) e a forma como ele deve chegar lá, com determinado ângulo desejado pela estratégia, que será denominado nesse trabalho como ângulo objetivo.

3.3 MÓDULO DO CONTROLE

O aprimoramento do módulo de controle é o motivo deste trabalho, pois é através dele que o sistema sabe o que deve ser feito com cada robô para se atingir o objetivo. O controle do time Carrossel Caipira tem como função realizar dois cálculos necessários para a movimentação do robô, o planejamento do caminho e o cálculo das velocidades de cada roda. O SCP possui um planejamento de caminho simples, que consiste em traçar um caminho retilíneo até o objetivo, desta forma o cálculo das velocidades dos motores tentarão alinhar o robô a este caminho. O cálculo das velocidades utilizado neste trabalho é um método simples que foi desenvolvido para suprir emergencialmente um problema ocorrido na Competição Brasileira de Robótica (CBR) de 2013 e difere do método referente ao time anterior ao de 2013. Este problema ocorreu por conta da mudança de hardware, pois o atual time foi construído em 2013, como exposto no capítulo 1, seção 1.2. Ao mudar o hardware, alguns parâmetros referentes a modelagem do robô mudaram, fazendo com que o controle antigo, que foi construído de forma empírica, tivesse o seu funcionamento comprometido, levando o cálculo da velocidade dos motores a uma reformulação. Além disso, a escolha do uso deste controle simplificado neste trabalho se deu por conta da possibilidade de diminuir a interferência da dinâmica do robô em sua movimentação, uma vez que com velocidades menores as acelerações tem um comportamento mais estável nos robôs, diminuindo assim a interferência dessas variações na análise posterior dos métodos de campos potenciais, focando apenas no planejamento de caminhos.

Para realizar o controle o sistema precisa saber apenas o estado do robô e da bola, mas para desenvolver um método melhor que pode inclusive desviar de obstáculos é necessário ter ciência de todos os elementos presentes no campo.

Após receber da visão a posição da bola e a pose dos robôs, e da estratégia a posição na qual cada robô deve estar, o controle vai verificar o alinhamento do robô com o objetivo e então vai enviar um comando para cada roda, esquerda e direita, de acordo com a diferença do ângulo objetivo para o ângulo do robô, como apresentado na figura 3.6.

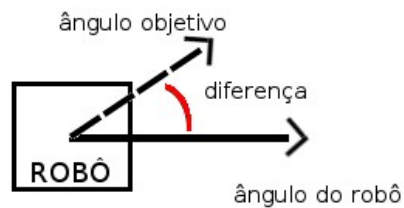


Figura 3.6 - Esquema dos ângulos presentes no cálculo da velocidade dos motores
(Fonte: o autor)

A velocidade é escolhida então através das condições explicitadas no algoritmo ilustrado pelo gráfico de fluxo de programa das figuras 3.7 e 3.8, considerando a diferença entre os ângulos do robô e da trajetória (difAng), um limite de faixa de ângulos onde o acionamento dos motores pode ser mantido (lim), a velocidade na roda esquerda (ve), a velocidade na roda direita (vd) e a medida dos ângulos em graus. Optou-se por representar as velocidades com números, onde as velocidades 1, 0 e -1 representam, respectivamente, motor ligado para frente, motor desligado e motor ligado para trás.

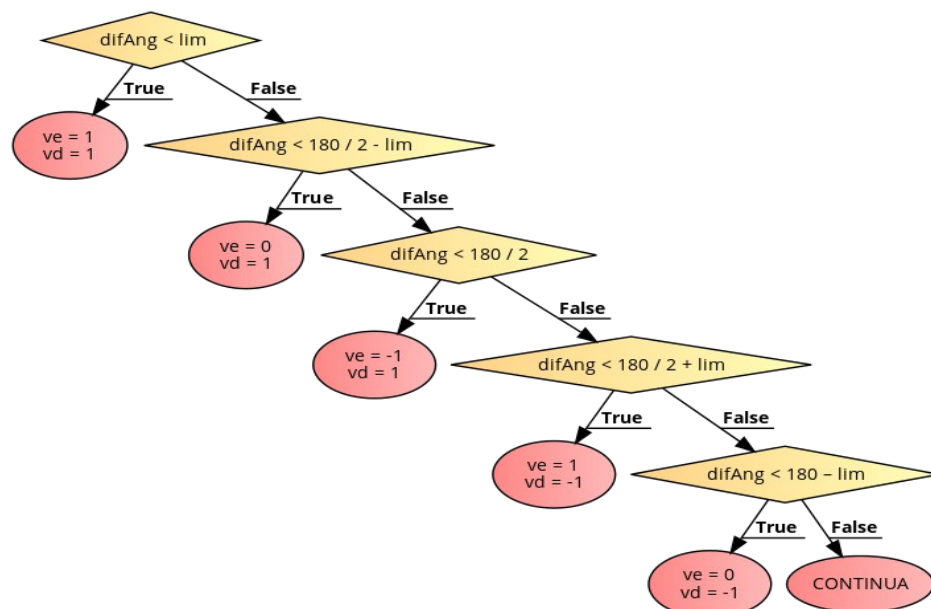


Figura 3.7 – Primeira parte do Gráfico de Fluxo de Programa do Algoritmo de escolha da velocidade dos motores (Fonte: o autor)

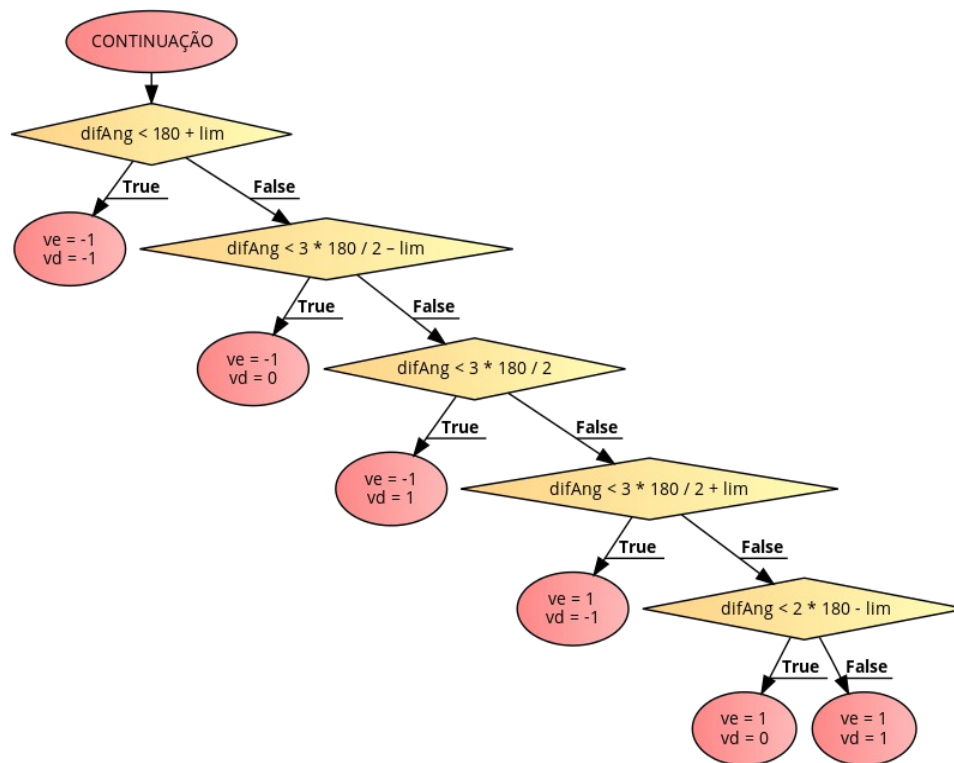


Figura 3.8 - Primeira parte do Gráfico de Fluxo de Programa do Algoritmo de escolha da velocidade dos motores (Fonte: o autor)

O funcionamento do algoritmo pode ser explicado através da tabela I, onde assume-se que o limite da faixa de acionamento será de $22,5^\circ$ ($180/8^\circ$):

Quando a diferença entre o ângulo do robô e o ângulo da trajetória for próximo da faixa de acionamento, o robô aciona as duas rodas na mesma velocidade indo para frente ou para trás, dependendo da direção que ele irá tomar para atingir o objetivo; conforme a diferença entre os ângulos aumenta, o robô faz um movimento leve para um dos lados, direito ou esquerdo, dependendo do ângulo, este movimento pode ser para trás ou para frente; e se a diferença angular for muito grande, o robô faz um movimento brusco para um dos lados, direito ou esquerdo, dependendo do ângulo, este movimento pode ser para trás ou para frente. Na tabela I, e como foi citado anteriormente, nota-se que o robô pode fazer seu movimento para trás ou para frente, isso significa que dependendo da posição do objetivo considera-se que a frente do robô será trocada, para que seja feito o menor deslocamento possível para se atingir a meta.

DIFERENÇA DE ÂNGULO EM GRAUS	MOTOR DIREITO	MOTOR ESQUERDO	REGIÃO
$0^\circ > \alpha \leq 22,5^\circ$	FRENTE	FRENTE	A
$22,5^\circ > \alpha \leq 45^\circ$	FRENTE	PARADO	B
$45^\circ > \alpha \leq 67,5^\circ$	FRENTE	PARADO	B
$67,5^\circ > \alpha \leq 90^\circ$	FRENTE	TRÁS	C
$90^\circ > \alpha \leq 112,5^\circ$	TRÁS	FRENTE	C
$112,5^\circ > \alpha \leq 135^\circ$	TRÁS	PARADO	B
$135^\circ > \alpha \leq 157,5^\circ$	TRÁS	PARADO	B
$157,5^\circ > \alpha \leq 180^\circ$	TRÁS	TRÁS	A
$180^\circ > \alpha \leq 202,5^\circ$	TRÁS	TRÁS	A
$202,5^\circ > \alpha \leq 225^\circ$	PARADO	TRÁS	B
$225^\circ > \alpha \leq 247,5^\circ$	PARADO	TRÁS	B
$247,5^\circ > \alpha \leq 270^\circ$	FRENTE	TRÁS	C
$270^\circ > \alpha \leq 292,5^\circ$	TRÁS	FRENTE	C
$292,5^\circ > \alpha \leq 315^\circ$	PARADO	FRENTE	B
$315^\circ > \alpha \leq 337,5^\circ$	PARADO	FRENTE	B
$337,5^\circ > \alpha < 360^\circ$	FRENTE	FRENTE	A

Tabela 3.1 - Transição dos acionamentos dos motores. (Fonte: o autor)

Depois de calculado o movimento de cada roda do robô é enviado via rádio a velocidade que cada roda deve atingir para que o movimento seja feito.

3.4 O SIMULADOR

Segundo Freitas (2008), em computação, simulação consiste em empregar formalizações em computadores, tais como expressões matemáticas ou especificações mais ou menos formalizadas, com o propósito de imitar um processo ou operação do mundo real. Desta forma, para ser realizada uma simulação, é necessário construir um modelo computacional que corresponda à situação real que se deseja simular. Robert Shannon (1975) definiu assim este tipo de modelo: “Um modelo computacional é um programa de computador cujas variáveis apresentam o mesmo comportamento dinâmico e estocástico do sistema real que representa”. Considerando esta definição, Pegden, Shannon e Sadowski (1990), apresenta uma definição mais completa, abrangendo todo o processo de simulação. Ele cita “simulação é o processo de projetar um modelo computacional de um sistema real e conduzir experimentos com este modelo com o propósito de entender seu comportamento e/ou avaliar estratégias para sua operação”. Como observado por Freitas (2008), o autor entende a simulação como um processo mais amplo, compreendendo, não somente a construção do

modelo, mas, também, todo o método experimental que se segue, buscando descrever o comportamento do sistema, construir teorias e hipóteses considerando as observações efetuadas e usar o modelo para prever o comportamento futuro, isto é, os efeitos produzidos por alterações no sistema ou nos métodos empregados em sua operação.

Freitas (2008) também cita como a simulação tem sido, cada vez mais, aceita e empregada como uma técnica que permite a analistas, verificar ou encaminhar soluções, com a profundidade desejada, aos problemas com os quais lidam diariamente.

É com base nessa premissa que o simulador do time de futebol de robôs do Departamento de Computação da UNESP-Bauru foi utilizado para verificar o funcionamento dos métodos de planejamento de caminhos implementados, também conhecido como campos potenciais. O simulador já está disponível para testes há muito tempo e, por falta de documentação formalizada, buscou-se entender seu funcionamento. Segundo Yamamoto et al. (2003) três pontos importantes devem ser observados em simuladores: modelagem do robô, modelagem das colisões e tempo de simulação. A modelagem do robô deve seguir os modelos apresentados no capítulo 2 na seção 2.1. A modelagem das colisões é feita conforme apresentado por Kitano et al. (1997), se ocorre sobreposição de objetos, onde os objetos nesses casos são a bola e o robô, isso significa que houve colisão entre dois objetos após o movimento, quando isso ocorre o objeto é movido para trás até que não sobreponha outros objetos, e então sua velocidade é multiplicada por -0.1. O tempo de simulação deve seguir próximo ao real, de tal forma que cada comando calculado em tempo de simulação deve corresponder ao tempo disponível no ambiente real, ou seja, o mesmo tempo que se tem para captura da imagem, 33ms. A figura 3.9 representa visualmente o simulador, onde os quadrados representam os robôs e os círculos seus respectivos objetivos. Nessas figuras existe uma indicação do número do robô, ao qual está sendo representado, seguido de uma letra que indica sua posição, “G” para goleiro, “A” para a atacante e “V” para volante (defensor), essa notação vale para todas as representações do simulador.



CAPÍTULO 4 CAMPOS POTENCIAIS

Segundo Silva e Romero (2011) um dos problemas do controle está na escolha de um caminho ótimo do robô até a meta. Para solucionar este problema é possível utilizar de métodos chamados de Campos Potenciais.

Os Campos Potenciais partem da ideia de forças imaginárias atuando sobre o robô, ideia sugerida por Khatib (1980). Assim, existem métodos capazes de construir uma função potencial, na qual obstáculos têm potenciais repulsivos e metas têm potenciais atrativos. É possível entender através de uma simples analogia, pensando no ambiente do robô como um terreno acidentado composto de vales e montanhas, onde os obstáculos são montanhas e o objetivo é um vale, desta forma o robô se desloca do ponto mais alto (montanha) ao ponto mais baixo (vale).

Através do gradiente descendente, obtidos pelos métodos de campos potenciais é possível encontrar o caminho entre o robô e a posição desejada para ele, que é o ponto de mais baixo potencial da função, ou seja, o mínimo valor potencial global. Porém, em campos potenciais, algumas situações podem gerar mínimos locais (pontos de sela), o que prejudica o desempenho do robô no jogo. Isto pode fazer com que o robô não encontre um caminho até o objetivo, mesmo que exista algum. Além dos Campos Potenciais de Khatib, serão explorados três outros métodos: Campos Potenciais Harmônicos (CPH), Campos Potenciais Orientados (CPO) e Campos Potenciais Localmente Orientados (CPLO).

Os Campos Potenciais só são possíveis de serem usados em um ambiente onde as posições de cada robô, dos obstáculos e do objetivo são conhecidos. Por isso o ambiente de futebol de robôs é propício para empregar estes métodos, pois, através da recepção da imagem do campo de atuação do robô os obstáculos são reconhecidos, mapeados e interpretados para que a estratégia defina a meta, cabendo ao Campo Potencial a tarefa de encontrar o caminho ótimo entre o robô e a meta.

4.1 CAMPO POTENCIAL DE KHATIB

Segundo Silva e Romero (2011), “neste método, obstáculos exercem forças repulsivas e o objetivo aplica uma força atrativa sobre o robô e com estas calcula-se a força resultante

sobre o robô”. Portanto, este método calcula a resultante dos vetores que influenciam o robô baseado nas forças imaginárias que atuam sobre ele. É um método de baixo custo computacional, por isso é bastante usado.

Este método foi utilizado amplamente em ambientes estáticos, onde os obstáculos são definidos *off-line* e o campo é calculado apenas uma vez. No entanto, Brooks (1986) e Arkin (1989) citado por Silva e Romero (2011) foram pioneiros na utilização de campos potenciais de forma reativa, onde o campo é calculado novamente a cada passo que o robô executa. Isto permite que o ambiente dinâmico também seja explorado com campos potenciais, no que se refere a planejamento de caminho.

Faria (2006) propõe uma forma simples de se modelar o campo potencial de Khatib, que será descrita a seguir:

4.1.1 FORÇA DE REPULSÃO

Na Figura 4.1 (a) mostra-se que a força de repulsão decai ao se afastar de um obstáculo, pois a força de repulsão (\vec{F}_R) é um vetor cujo módulo é inversamente proporcional ao quadrado da distância d entre o robô (R) e objeto observado (O) Figura 4.1 (b).

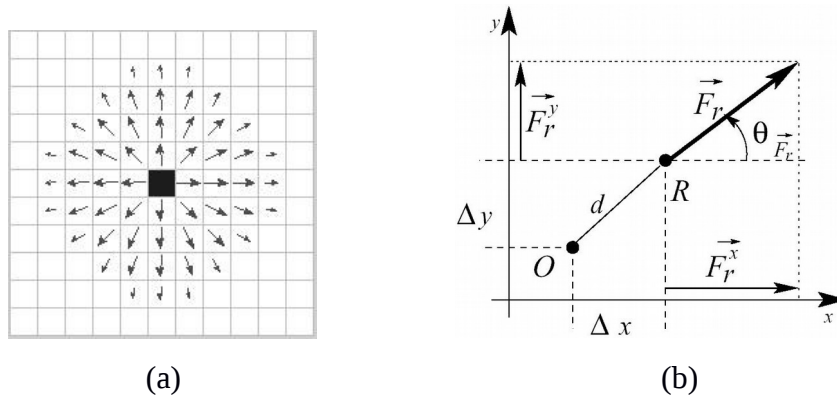


Figura 4.1 – (a) Força de repulsão na vizinhança de um obstáculo; (b) Força de repulsão do objeto O sobre um robô localizado em R . (Fonte: Faria (2006))

O vetor (\vec{F}_R) também pode ser representado por suas componentes: módulo e direção, apresentados na equação (3).

$$|\vec{F}_R| = Q/d^2 \quad \text{e} \quad \theta_{\vec{F}_R} = \arctan(-\Delta y, -\Delta x) \quad (3)$$

sendo que: Q representa um escalar de valor constante de repulsão; \arctan é uma função na qual se considera os sinais de Δy e Δx para fornecer o ângulo correto cuja tangente seja $(-\Delta y/-\Delta x)$; e os sinais negativos de Δy e Δx fornecem uma direção oposta do objeto detectado (O).

Para calcular a força de repulsão para vários obstáculos, deve-se fazer o somatório dos vetores das forças de repulsão geradas.

4.1.2 FORÇA DE ATRAÇÃO

Na Figura 4.2(a) e Figura 4.2(b) mostra-se o campo potencial de atração, no qual deve-se considerar $|\vec{F}_a|$ constante para que o agente seja atraído pela meta mesmo estando distante da mesma equação 4 no qual C representa um escalar constante de atração. Note que Δy e Δx diferem da equação 3 por não estarem acompanhados do sinal negativo. Como resultado, a direção do vetor força de atração será na direção da meta.

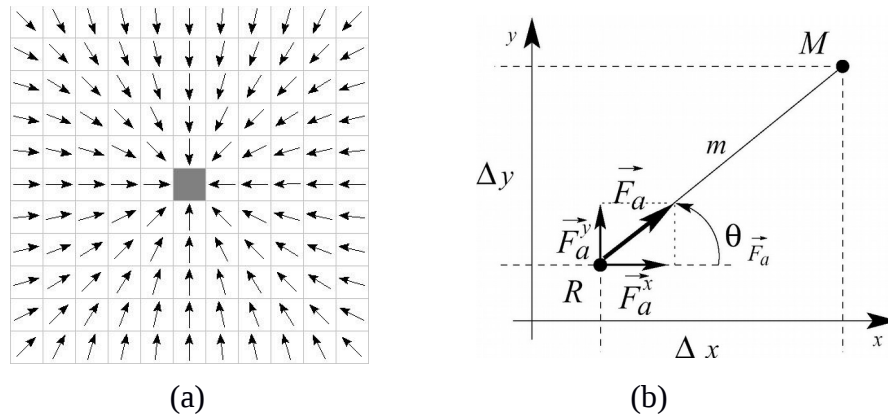


Figura 4.2 – (a) Campo de atração constante; (b) Atração entre o robô R e a meta M . (Fonte: Faria (2006))

$$|\vec{F}_a| = C \quad \text{e} \quad \theta_{\vec{F}_a} = \arctan(\Delta y, \Delta x) \quad (4)$$

4.1.3 FORÇA RESULTANTE

Ao realizar a soma dos vetores força de atração e força de repulsão obtém-se a força resultante dada pela equação (5).

$$\vec{F} = \vec{F}_R + \vec{F}_a \quad (5)$$

Apesar deste método ser simples e rápido de ser calculado, visto que o cálculo da força imaginária que atua no robô é apenas a soma de dois vetores, existe uma grande possibilidade de serem encontrados mínimos locais. Para evitar esta situação Connolly (1990) propôs um método, que extingue a possibilidade de mínimos locais, conhecido por Campo Potencial Harmônico (CPH).

4.2 CAMPO POTENCIAL HARMÔNICO

Connolly, Burns e Weiss (1990) solucionaram o problema de ótimos locais utilizando funções harmônicas para o cálculo do campo potencial de ambientes nos quais as posições de paredes, objetos e metas sejam conhecidas, que é o caso existente na plataforma de futebol de robôs. As funções harmônicas utilizadas são soluções para a equação de Laplace (Equação 6).

$$\nabla^2 P = 0 \text{ para } P: \mathcal{R}^2 \rightarrow \mathcal{R} \quad (6)$$

Onde P é o campo potencial no espaço contínuo, que é discretizado em uma matriz.

As equações em questão possuem propriedades que contribuem para o bom funcionamento do sistema de controle, sendo, segundo Silva e Romero (2011), um método com as seguintes características:

- Integridade – sempre será encontrado um caminho entre o robô e a meta, se ele existir, pois o método fornece um sistema de planejamento completo.
- Robustez – é capaz de lidar com obstáculos dinâmicos.

Assim é definido um PVC (Problema de Valor de Contorno) na região de atuação, atribuindo potencial alto para obstáculos e potencial baixo para a meta. Um vez calculado o campo utiliza-se para se orientar o gradiente descendente o potencial, que direcionam o robô para sua meta, desviando de obstáculos (Connolly et al., 1990; Connolly and Grupen, 1993). Considerando um espaço discretizado em células, dada a posição de um robô em uma determinada célula (i, j), a direção a ser seguida Φ pode ser calculada pela equação 7.

$$\Phi = \arctan(p_{i-1,j} - p_{i+1,j}, p_{i,j-1} - p_{i,j+1}) \quad (7)$$

Onde $p_{i,j}$ é o potencial da célula (i, j) localizada em uma matriz que representa um espaço discretizado.

Utilizando o método das diferenças finitas, a equação de Laplace pode ser discretizada como na Equação 8.

$$p_{i,j} = \frac{p_{i-1,j} + p_{i+1,j} + p_{i,j-1} + p_{i,j+1}}{4} \quad (8)$$

Através da Equação 8 obtém-se as células do campo potencial atualizadas de acordo com as informações dos objetos recebidas pela visão. A convergência destas células pode ser rápida ou não dependendo do método de relaxação que atualiza e calcula os potenciais do campo potencial a cada iteração. Para este trabalho será escolhido o método SOR (Successive Over Relaxation). A diferença entre p^t e p^{t+1} tende a diminuir entre as sucessivas aproximações. O método SOR consiste em aumentar esta pequena diferença de maneira que ele obtenha uma convergência mais rápida, resultando na equação (9).

$$p_{SOR}^{t+1} = \frac{w}{4} (p_{i+1,j}^t + p_{i-1,j}^{t+1} + p_{i,j+1}^t + p_{i,j-1}^{t+1} - 4p_{i,j}^t) + p_{i,j}^t \quad (9)$$

Onde $0 < w < 2$ é um fator de relaxação, sendo que será adotado $w = 1.8$, assim como proposto por Connolly & Grupen (1993). Este método corrige o problema de ótimos locais, porém o robô chegará com qualquer ângulo na meta que, se for atingir a bola, poderá implicar em uma ineficiência no ataque. Os “chutes” se tornam aleatórios e nem sempre serão na direção do gol. Para resolver este problema foi proposto o método de Campo Potencial Orientado (CPO) por Faria (2006).

4.3 CAMPO POTENCIAL ORIENTADO

Segundo Silva e Romero (2011) as soluções da equação de Laplace (Equação 6) garantem que a geração dos campos potenciais não irão apresentar mínimos locais, no entanto, este é apenas um caso particular de um conjunto maior de funções que também apresentam esta característica.

Em (Prestes, 2003), é apresentada uma família de soluções de uma Equação Diferencial Parcial elíptica (Equação 10), que também não apresenta mínimos locais.

$$\nabla^2 P + \varepsilon \langle \nabla^2 P, v \rangle = 0 \quad (10)$$

com $\varepsilon \in \mathbb{R}$, $v \in \mathbb{R}^2$ e $\|v\| = 1$.

Faria (2006) ressalta que a equação de Laplace (Equação 6) é um caso especial da Equação 10, quando $v = 0$. Devido a influência do vetor v na orientação do campo gradiente, esta abordagem utilizando a equação (10) foi denominada no trabalho de Faria (2006) como Campos Potenciais Orientados (CPO).

4.4 CAMPO POTENCIAL LOCALMENTE ORIENTADO

A técnica de Campos Potenciais Localmente Orientados (CPLO), foi proposta em (Faria, 2006) e, consiste, basicamente, de uma modificação do CPO. O objetivo do CPLO é conduzir múltiplos agentes para a meta, através de diferentes direções (vetores), em uma mesmo espaço discretizado. Desta forma, vários robôs podem seguir diferentes trajetórias, usando diferentes vetores, que os conduzem até a meta. Isto é obtido aplicando o CPO somente em uma região (denominada área de influência) em torno de cada robô. Normalmente, esta região é definida como um círculo de raio fixo com centro na posição do robô. E, para as outras regiões, é aplicado método de CPH.

CAPÍTULO 5 DESENVOLVIMENTO

Neste capítulo descreve-se o desenvolvimento realizado para a inserção de campos potenciais ao sistema do futebol de robôs, abordando a sequência empregada para a implementação de cada método, com análises sobre o comportamento deles em diferentes situações.

Os métodos de campos potenciais tiveram sua implementação separada do ambiente de futebol de robôs, onde passaram por alguns testes específicos como: desempenho computacional e visualização através de uma representação virtual. Após este primeiro teste, o método foi integrado ao arquivo do controle do time de futebol de robôs, que foi utilizado tanto no simulador quanto no ambiente real. Uma vez implementado em conjunto com o controle, o campo foi colocado a prova no simulador com algumas situações específicas, com metas e obstáculos colocados propositalmente em determinadas regiões a fim de verificar o comportamento do robô. Feito isso os testes seguiram para situações simuladas de jogo, para isso foi implementado uma nova versão do simulador com comunicação em rede para que os métodos pudessem ser testados em jogos de dois times, nessa etapa foram levantados alguns números referentes aos eventos do jogo para verificar de forma estatística a eficiência de cada método implementado. Dentro do que foi apresentado é possível discriminar esta etapa de desenvolvimento em três etapas importantes: implementação, integração e avaliação de desempenho.

5.1 IMPLEMENTAÇÃO

Para a implementação dos métodos desenvolveu-se um programa capaz de visualização da orientação que o campo proporciona para o robô no ambiente de futebol de robôs, permitindo a avaliação do comportamento do campo apenas de forma visual. As seções a seguir tratam da implementação de cada campo potencial, discutindo sua estrutura de dados, desempenho computacional e expectativas geradas avaliando a representação visual dos campos.

5.1.1 IMPLEMENTAÇÃO DO CAMPO POTENCIAL DE KHATIB

O Campo Potencial de Khatib (CPK) é o campo com o cálculo mais simples e sua convergência depende apenas de uma iteração. Assim como na implementação dos outros métodos que serão descritos, este campo possui uma estrutura de dados com uma matriz que divide o campo de futebol em células, e cada célula aplica uma força em determinada direção ao robô. Essa estrutura precisa ser iniciada a cada cálculo do campo potencial, para que seja possível identificar que células da matriz irão representar obstáculos e a meta.

A estrutura de dados referente ao CPK que é apresentada a seguir, foi escolhida para armazenar a localização dos obstáculos e meta, força a ser aplicada quando o robô estiver localizado na célula representada e o ângulo da força. Sendo assim, é utilizado a seguinte estrutura de dados, escrita em linguagem C:

```
struct campoPotencialKhatib {  
    double matrizDeAngulos [MAX_X][MAX_Y];  
    float matrizDePotenciais[MAX_X][MAX_Y];  
    bool matrizBooleanaPotencial[MAX_X][MAX_Y];  
};
```

Onde MAX_X e MAX_Y são constantes definindo o tamanho da matriz, que irá dividir o campo de futebol em células de tamanhos iguais. Existem três matrizes para armazenar os dados necessários para o cálculo dos campos. A variável “matrizDeAngulos” armazena o ângulo que direciona a “força imaginária” que é aplicada no robô quando este estiver localizado em determinada célula, a variável “matrizDePotenciais” armazena a força a ser aplicada no robô e a “matrizBooleanaPotencial” a posição dos obstáculos e da meta.

Dentro deste contexto a iniciação do campo potencial segue algumas regras, a força a ser aplicada está no intervalo [0,1], sendo 1 o potencial mais alto e 0 o potencial mais baixo, o que representa respectivamente obstáculo e meta. Desta forma, as células que representam as paredes do campo de futebol, assim como as células que representam obstáculos, são iniciadas com potencial 1 e marcadas como obstáculos, assim como a célula que representa a meta é iniciada com potencial 0. Na iniciação deve-se levar em consideração as células que representam espaços livres, ou seja, não possuem obstáculo nem meta. Essas células já são iniciadas com a força atrativa até a meta e o ângulo na qual a força será aplicada, assim no

cálculo do campo potencial caberá apenas verificar os obstáculos e calcular as resultantes levando em consideração as forças repulsivas. O que foi descrito sobre a iniciação do campo potencial pode ser discriminada em sequências de passos que são descritos a seguir:

PASSO 1: Inicia as células correspondentes a parede com valor máximo, ou seja, valor igual a 1, assim se uma determinada célula em uma posição (x, y) representar a parede, então $matrizDePontenciais(x, y) = 1$. Como as paredes são obstáculos, é preciso identificar isso na matriz booleana, desta forma $matrizBooleanaPotencial(x, y) = true$, assim a célula na posição (x, y) recebe potencial máximo, por ser obstáculo, e é identificada sua posição na matriz booleana.

PASSO 2: Levando em consideração que a meta, também conhecida como objetivo, possui coordenadas (x_{obj}, y_{obj}) . Isso implica que a célula que corresponde a coordenada do objetivo deve receber potencial mínimo, ou seja, de valor igual a 0. Desta forma $matrizDePontenciais(x_{obj}, y_{obj}) = 0$. Como a célula que possui a meta nunca tem seu valor alterado, então identifica-se sua posição na matriz booleana, desta forma $matrizBooleanaPotencial(x_{obj}, y_{obj}) = true$, assim a célula na posição (x_{obj}, y_{obj}) recebe potencial mínimo, por ser meta, e é identificada sua posição na matriz booleana.

PASSO 3: Para cada célula livre, ou seja, as células que representam espaços livres e não possuem obstáculo nem meta, na posição (x_i, y_i) $matrizDePontenciais(x_i, y_i) = K$, onde K é uma constante que representa a força atrativa, e $matrizDeAngulos(x_i, y_i) = \theta_{\vec{F}_a} = \arctan(\Delta y, \Delta x)$, como descrito na equação (4), onde $\Delta x = x_{obj} - x_i$ e $\Delta y = y_{obj} - y_i$.

O próximo passo consiste em calcular a resultante das forças repulsivas de cada obstáculo identificado no campo de futebol. Após feito isso obtém-se uma representação gráfica do CPK como mostra a figura 5.1, onde a cor azul representa obstáculo e a cor preta dentro do campo representa a meta. As setas, que indicam a orientação e o sentido daquela célula, são representadas por uma aresta retilínea com um ponto em uma de suas extremidades, este ponto fica na extremidade que indica o sentido da seta. Nota-se que nem

todas as setas indicam diretamente a meta, isso ocorre devido a influência que os obstáculos têm na orientação do campo quando estes estão próximos ao robô.

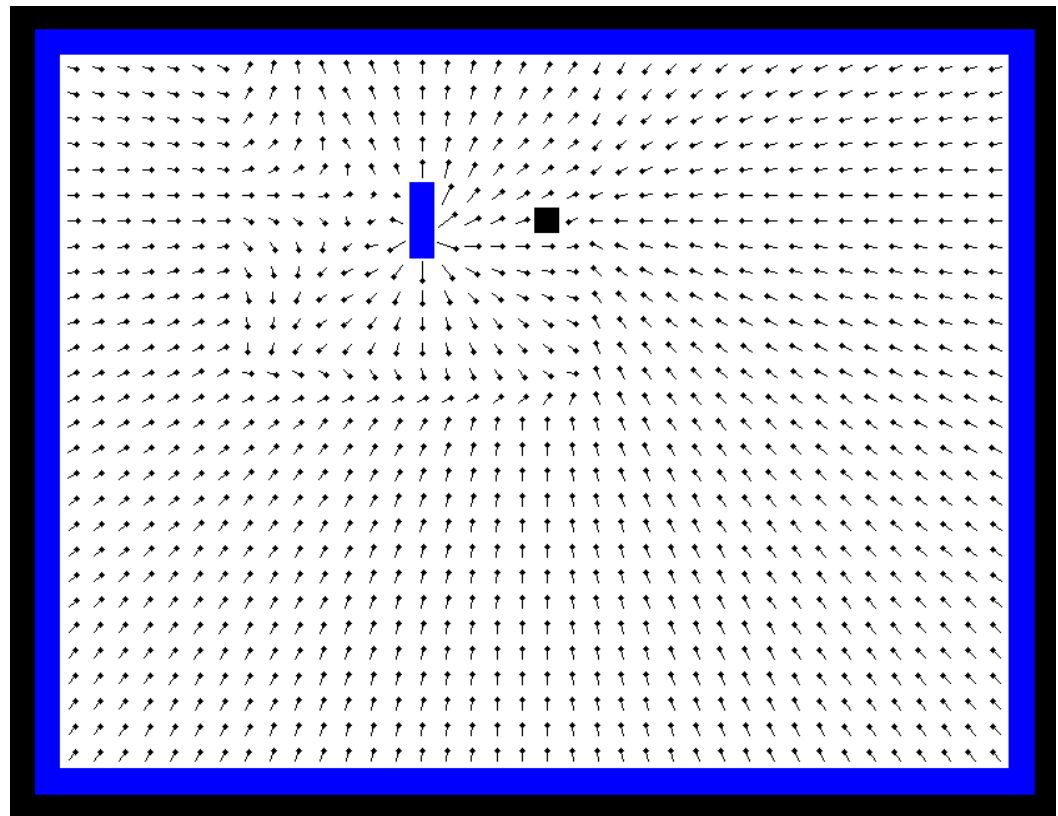


Figura 5.1 – Representação gráfica do Campo Potencial de Khatib (Fonte: o autor)

5.1.2 IMPLEMENTAÇÃO DO CAMPO POTENCIAL HARMÔNICO

O Campo Potencial Harmônico (CPH) também possui cálculo simples porém sua convergência depende de mais iterações, utilizando a mesma situação de teste que foi utilizada para calcular o CPK, que precisa de apenas uma iteração após iniciado, o CPH precisou de 303 iterações. Este método e os demais que serão apresentados na sequência possuem uma estrutura de dados diferente do CPK, com uma matriz que divide o campo de futebol em células, e cada célula possui a força e a direção da trajetória do robô. Essa estrutura também precisa ser iniciada a cada cálculo do campo potencial, para que seja possível identificar que células da matriz irão representar obstáculos e a meta.

A estrutura de dados referente ao CPH que é apresentada a seguir, foi escolhida para armazenar a localização dos obstáculos e meta, e o potencial de influência que aquela célula tem sobre o robô quando este estiver localizado na célula representada. Sendo assim, é utilizado a seguinte estrutura de dados, escrita em linguagem C:

```
struct campoPotencial {  
    float matrizDePotenciais[MAX_X][MAX_Y];  
    bool matrizBooleanaPotencial[MAX_X][MAX_Y];  
};
```

Onde MAX_X e MAX_Y são constantes definindo o tamanho da matriz, que irá dividir o campo de futebol em células de tamanhos iguais. Na implementação deste campo potencial e nas seguintes, são usadas duas matrizes para armazenar os dados necessários para o cálculo dos campos. A variável “matrizDePotenciais” armazena o potencial de influência sobre o robô e a “matrizBooleanaPotencial” a posição dos obstáculos e da meta.

Assim, a iniciação do campo potencial segue as mesmas regras que a iniciação da matriz para o CPK, exceto na iniciação de células livres, ou seja, não possuem obstáculo nem meta.. Nesta etapa da iniciação as células são iniciadas com potencial igual a 0. A iniciação do CPH pode ser discriminada em sequências de passos que são descritos a seguir:

PASSO 1: Inicia células correspondentes a parede com valor máximo, ou seja, valor igual a 1, assim se uma determinada célula em uma posição (x, y) representar a parede, então $matrizDePontenciais(x, y) = 1$. Como as paredes são obstáculos, é preciso identificar isso na matriz booleana, desta forma $matrizBooleanaPotencial(x, y) = true$, assim a célula na posição (x, y) recebe potencial máximo, por ser obstáculo, e é identificada sua posição na matriz booleana.

PASSO 2: Levando em consideração que a meta, também conhecida como objetivo, possui coordenadas (x_{obj}, y_{obj}) . Isso implica que a célula que corresponde a coordenada do objetivo deve receber potencial mínimo, ou seja, de valor igual a 0. Desta forma $matrizDePontenciais(x_{obj}, y_{obj}) = 0$. Como a célula que possui a meta nunca tem seu valor alterado, então identifica-se sua posição na matriz booleana, desta forma $matrizBooleanaPotencial(x_{obj}, y_{obj}) = true$, assim a célula na posição (

x_{obj}, y_{obj}) recebe potencial mínimo, por ser meta, e é identificada sua posição na matriz booleana.

PASSO 3: Para cada célula livre na posição (x_i, y_j) $matrizDePotenciais(x_i, y_j) = 0$.

O próximo passo consiste em calcular o potencial de cada célula do CPH, como descrito no capítulo 4. Pode-se representar graficamente do CPH como mostra a figura 5.2, onde a cor azul representa obstáculo e a cor preta dentro do campo representa a meta. Nesta figura nota-se uma melhora importante na orientação dos campos quando comparada com o CPK, uma vez que as orientações, quando seguidas, têm seus sentidos levando a meta.

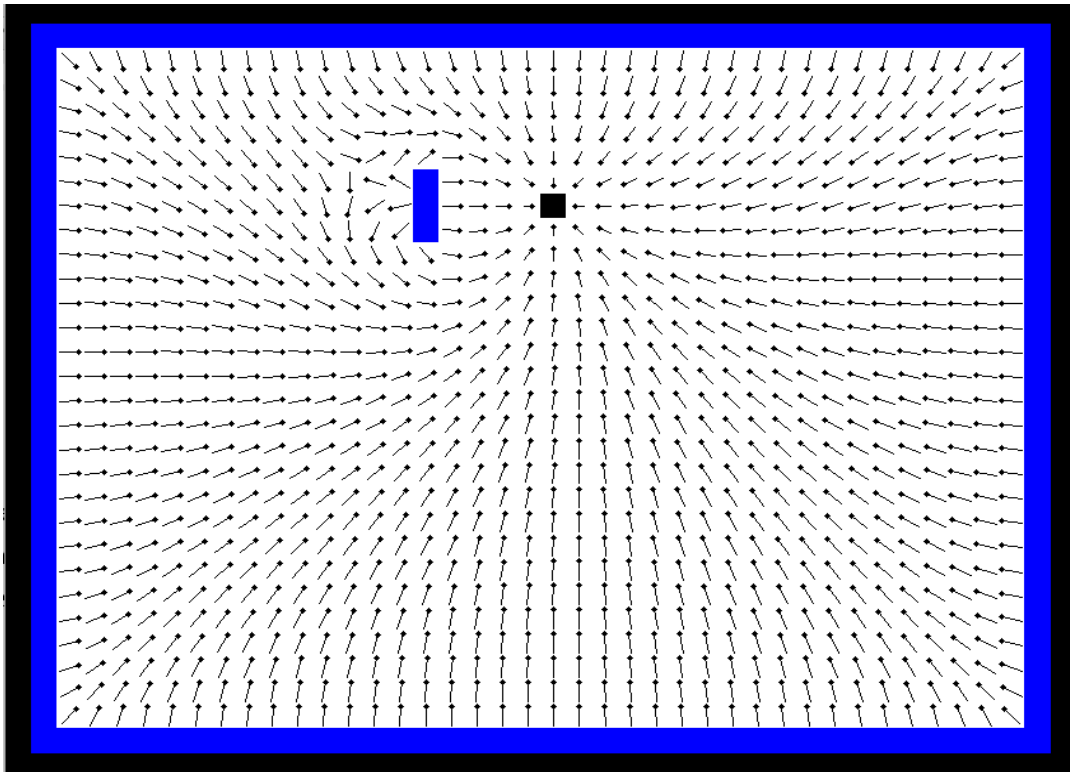


Figura 5.2 – Representação gráfica do Campo Potencial Harmônico (Fonte: o autor)

5.1.3 IMPLEMENTAÇÃO DO CAMPO POTENCIAL ORIENTADO

O Campo Potencial Orientado (CPO) demonstrou um comportamento atípico, o algoritmo converge com 132 iterações, para a mesma situação do exemplo dado com o CPH, porém possui uma área onde o campo não possui orientação, que será considerada como uma

área sem orientação que pode ser identificada pelos vetores orientados verticalmente para cima na figura 5.3. Nessa área, levando em consideração a analogia de que o campo potencial pode ser representado por montanhas e vales, seria como se o robô estivesse em um terreno plano, e não houvesse “descida” do topo da montanha até o vale. Este método como dito anteriormente tem a mesma estrutura de dados do CPH e o algoritmo para iniciação do campo é o mesmo.

O cálculo do potencial de cada célula do CPO, segue como descrito no capítulo 4. Após feito isso obtém-se uma representação gráfica do CPO. A figura 5.3 representa o CPO. Neste exemplo o vetor que orienta o campo potencial tem ângulo de -45° ou 315° , a seta vermelha indica o ângulo de orientação.

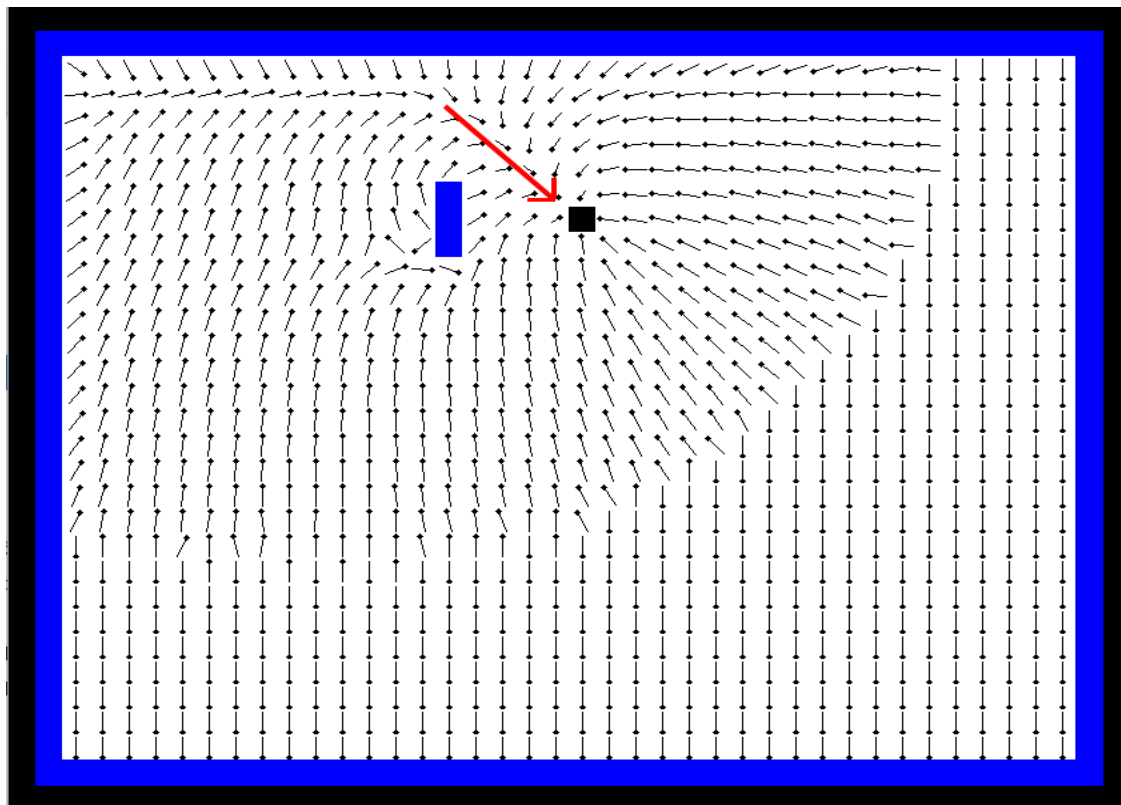


Figura 5.3 – Representação gráfica do Campo Potencial Orientado com indicação do vetor de orientação. (Fonte: o autor)

5.1.4 IMPLEMENTAÇÃO DO CAMPO POTENCIAL LOCALMENTE ORIENTADO

O Campo Potencial Localmente Orientado (CPLO) é um híbrido do CPO e do CPH, assim como demonstrado no capítulo 3. O método consegue convergir dentro do tempo limite,

inclusive com menos iterações que o método CPH, totalizando 287 iterações, para a mesma situação do exemplo dado com o CPH. Assim como o CPO e o CPH este método a mesma estrutura de dados e o algoritmo para iniciação do campo é o mesmo.

O cálculo do potencial de cada célula do CPLO, segue como descrito no capítulo 4. Após feito isso obtém-se uma representação gráfica do CPLO como mostra a figura 5.4. Neste exemplo o vetor que orienta o campo potencial tem ângulo de -45° ou 315° , a seta vermelha indica o ângulo de orientação.

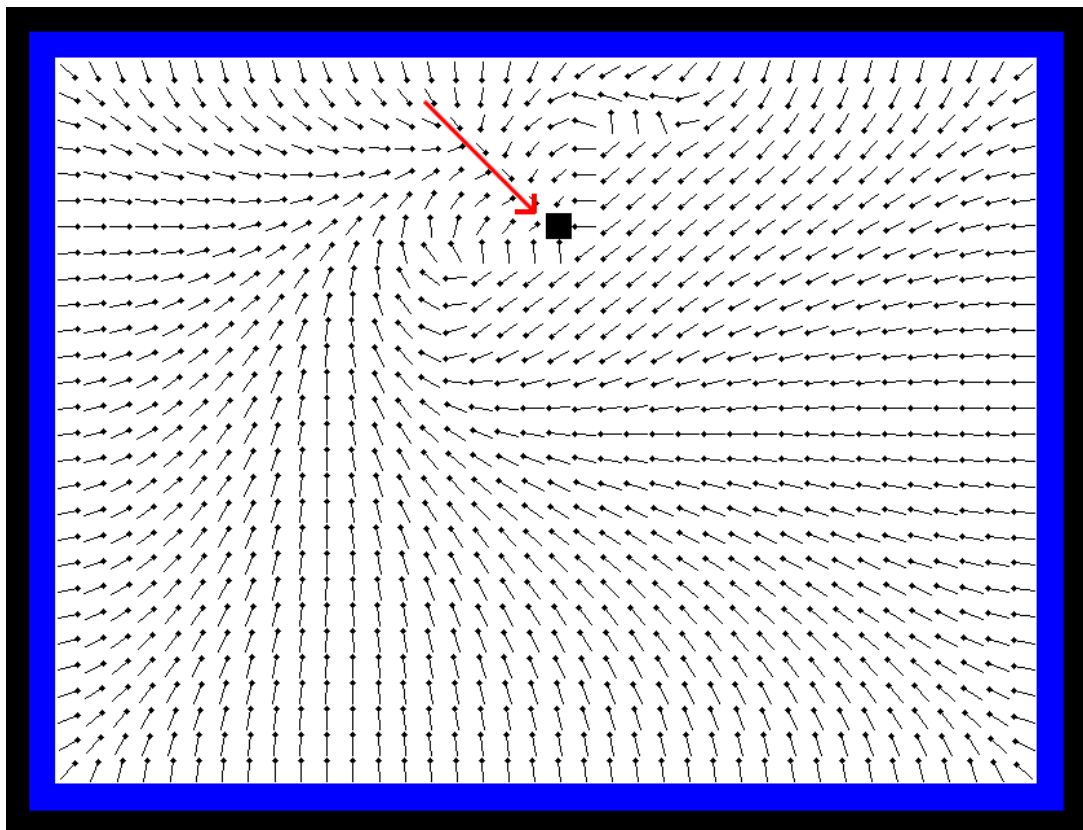


Figura 5.4 – Representação gráfica do Campo Potencial Localmente Orientado com indicação do vetor de orientação. (Fonte: o autor)

5.2 INTEGRAÇÃO DOS CAMPOS POTENCIAIS COM O SIMULADOR

Após este primeiro teste, o método foi integrado ao arquivo do controle do time de futebol de robôs, que é utilizado tanto no simulador quanto no ambiente real. No processo de integração foi necessário fazer algumas adaptações no código, de tal forma que pudesse se encaixar a realidade do sistema. A princípio utilizou-se as células discretizadas com 1cm x 1cm, fazendo com que MAX_X e MAX_Y fossem igual a 170 e 150 respectivamente, porém com esse tamanho de matriz os campos potenciais não convergiam dentro do tempo limite, definido no time Carrossel Caipira em 33ms¹, desta forma definiu-se um tamanho de 4cm x 4cm, que é o tamanho máximo da matriz onde a convergência dos métodos se tornou possível. Coincidentemente esse valor é próximo ao diâmetro da bola utilizada no jogo, que tem 4,27cm. Chegou-se neste número empiricamente, testando valor por valor até encontrar um “ótimo aparente”, que satisfizesse com os resultados observados no simulador. Uma vez implementado em conjunto com o controle, os campos foram colocados a prova no simulador com algumas situações específicas, com metas e obstáculos posicionados propositalmente em determinadas regiões a fim de verificar o comportamento do controle de trajetória.

Dentro do sistema de futebol de robôs existe um arquivo chamado “controle.cpp” onde ocorrem os cálculos que envolvem o planejamento de caminhos e o controle de velocidades. Nele foram acrescentados os códigos descritos na etapa anterior (item 5.1) sem grandes mudanças, a única alteração, como foi descrita, foi a dimensão da matriz que representa o campo potencial discretizado. No arquivo de controle existe uma função chamada “calculaCmd” que faz o cálculo do planejamento de caminho e das velocidades dos motores, após feito isso ele envia os dados de volta para a estratégia que vai efetivar o comando no simulador ou enviar via rádio no ambiente real. Desta forma, dentro da função “calculaCmd” foram integrados os métodos de campos potenciais. Esta função utiliza os dados de índice do robô jogador, ângulo e velocidade com que o robô deve chegar no objetivo e posição (x, y) do objetivo.

¹ O tempo limite varia de acordo com o computador que está sendo utilizado, no caso este foi considerado de acordo com o computador que está disponível para uso para do Carrossel Caipira.

5.2.1 INTEGRAÇÃO DO CAMPO POTENCIAL DE KHATIB COM O SIMULADOR

A integração deste método foi submetida a análise do deslocamento do robô até o objetivo, verificando o caminho que o robô fez para atingi-lo. Utilizando o software que desenha os campos potenciais, adaptou-se o mesmo para guardar o rastro que o robô percorreu e desenhá-lo, de modo que pudesse ser visualizado o caminho tomado pelo robô. O campo potencial é calculado a cada iteração do programa, ou seja, a cada quadro de execução. Optou-se por não representar o campo potencial do goleiro pois, o mesmo fica a todo o momento na área fazendo movimentos retilíneos.

Na figura 5.5 temos duas perspectivas diferentes, uma do defensor e a outra do atacante, que estão na esquerda e direita respectivamente, onde as células em azul representam os obstáculos, a célula preta o objetivo e a célula verde o robô para qual o campo potencial foi calculado.

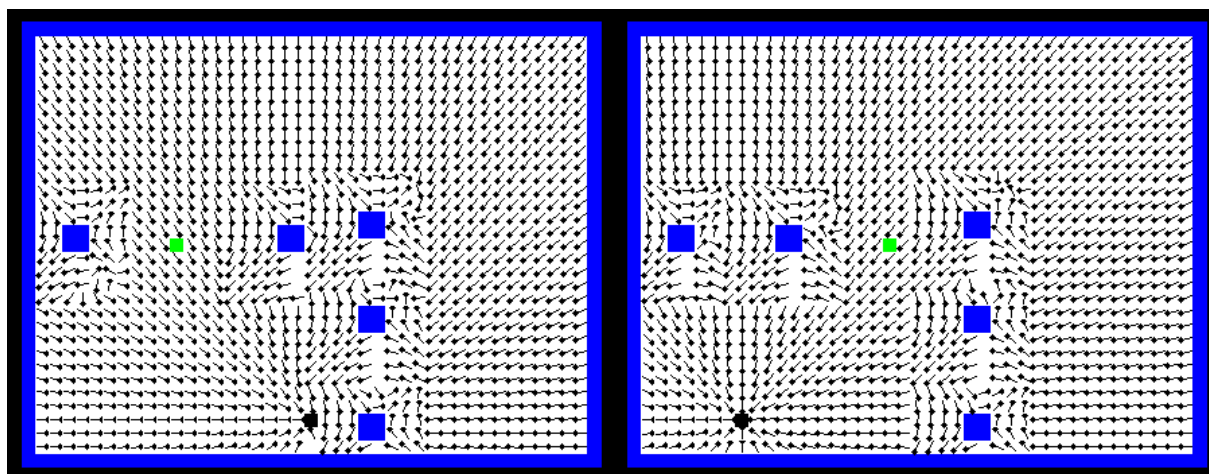


Figura 5.5 – Representação do CPK, perspectiva do defensor (esquerda) e do atacante (direita). (Fonte: o autor)

Além disso, a figura 5.6 possui a situação inicial do teste, que vale para os testes com os demais métodos.

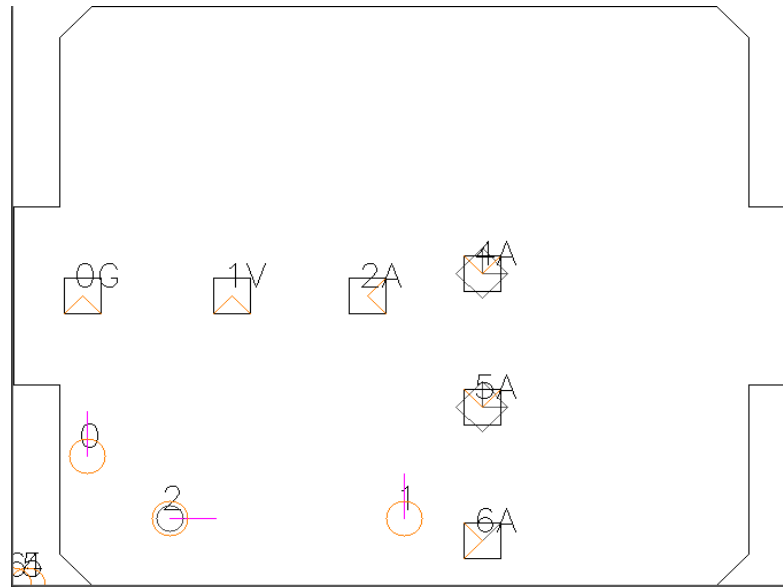


Figura 5.6 – Visão do simulador na situação inicial. (Fonte: o autor)

Já na figura 5.7, dentro das perspectivas apresentadas, temos dois rastros, o rastro de cor vermelha representa robô defensor e o rastro de cor lilás o robô atacante. É possível também ver uma representação de como o robô se comportou no teste. A cada iteração do programa, o campo muda o comportamento, sendo que o que está representado é a sua situação final. Na situação em que foram colocados, os robôs cruzam o caminho para atingir o objetivo, e em meio a isso entram em rota de colisão. Como o cálculo do campo potencial inclui a repulsão de obstáculos, os robôs não chegam a se tocar fazendo com que um dos robôs abra caminho para o outro seguir.

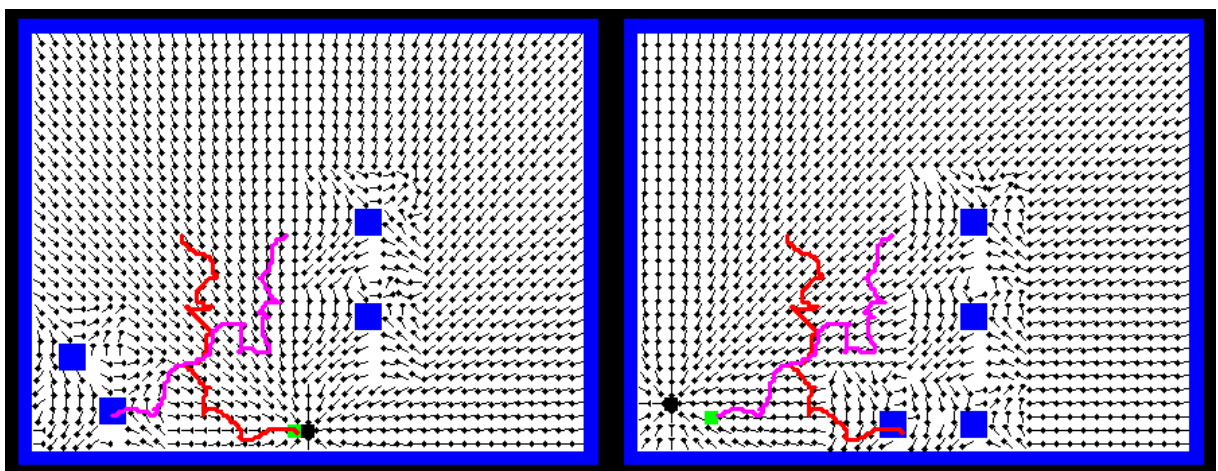


Figura 5.7 – Representação do CPK com os rastros de cada robô. (Fonte: o autor)

Na figura 5.8 é possível ver a visão do simulador quando o robô chega ao fim da trajetória.

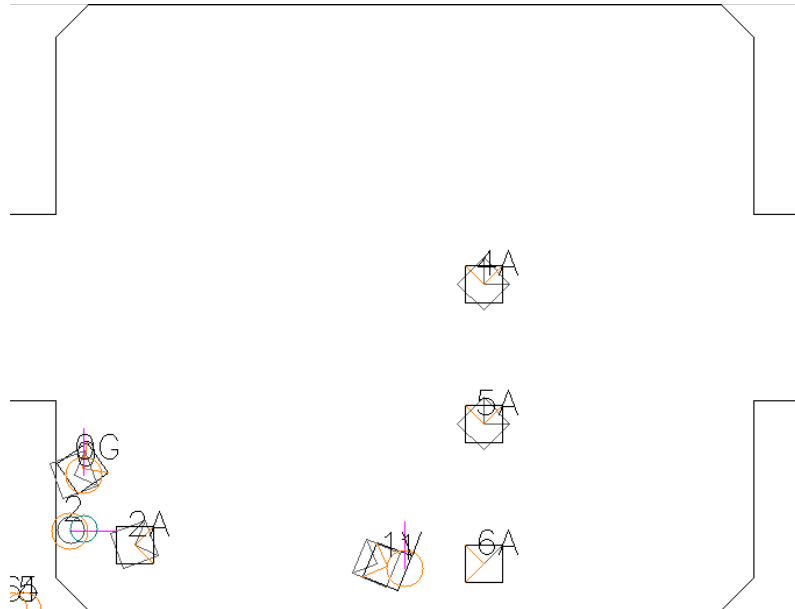


Figura 5.8 – Visão do simulador na situação final. (Fonte: o autor)

Uma vez que o robô consegue atingir seu objetivo através do planejamento de caminhos por CPK, é possível realizar um jogo utilizando este método.

5.2.2 INTEGRAÇÃO DO CAMPO POTENCIAL HARMÔNICO COM O SIMULADOR

A integração deste método foi submetida ao mesmo teste que o CPK. Nas figuras 5.9 e 5.10 temos a mesma notação utilizada na seção anterior (5.2.1) e assim será com a representação dos demais métodos.

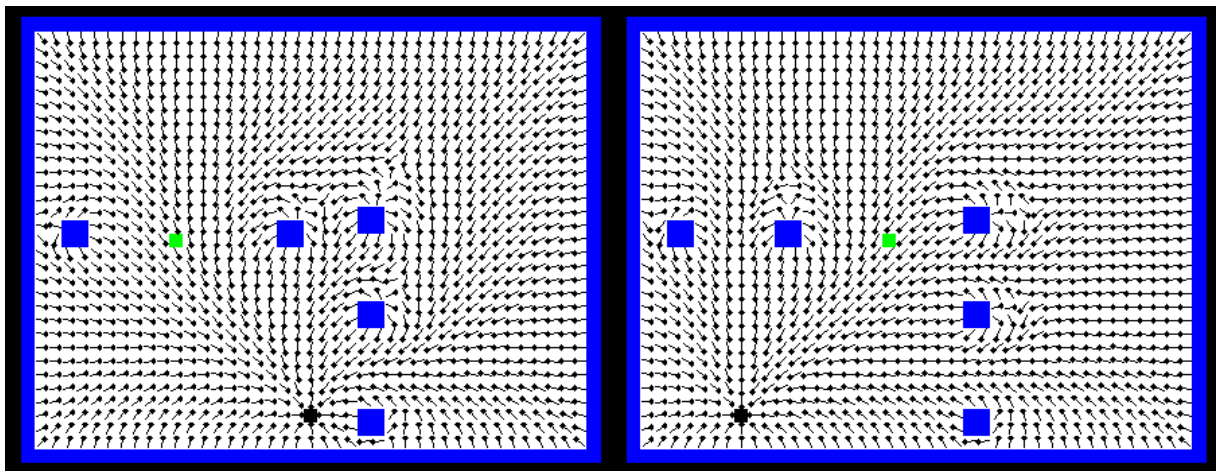


Figura 5.9 – Representação do CPH, perspectiva do defensor (esquerda) e do atacante (direita). (Fonte: o autor)

Na figura 5.10 é possível também ter uma representação de como o robô se comportou no teste. O comportamento é parecido com o apresentado no CPK, pois o desafio é o mesmo, porém o caminho planejado é diferente.

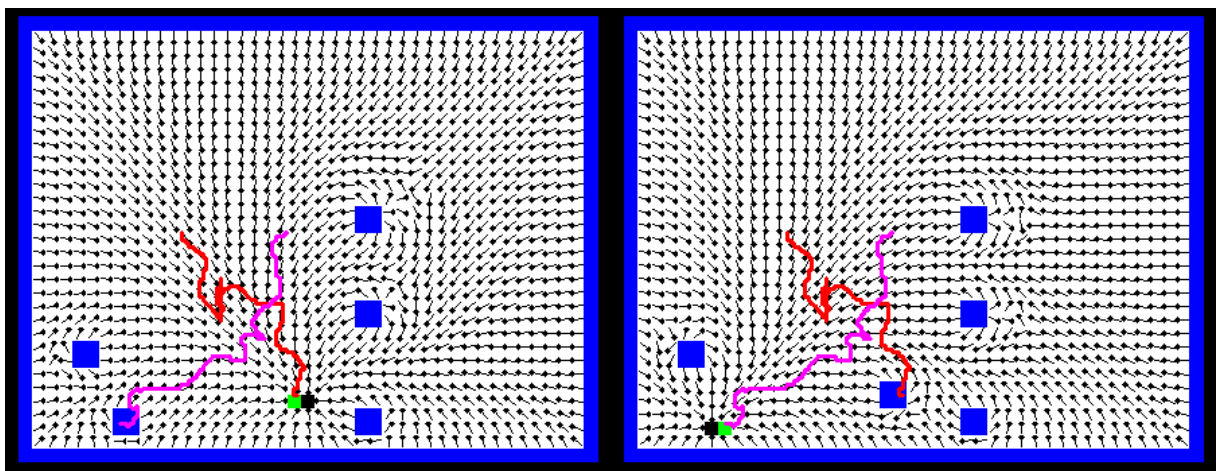


Figura 5.10 – Representação do CPH com os rastros de cada robô. (Fonte: o autor)

Além disso, na figura 5.11 temos a visão do simulador na situação final onde é possível ver que os robôs chegam em estados diferentes até a meta, o que significa, com angulação e posições diferentes.

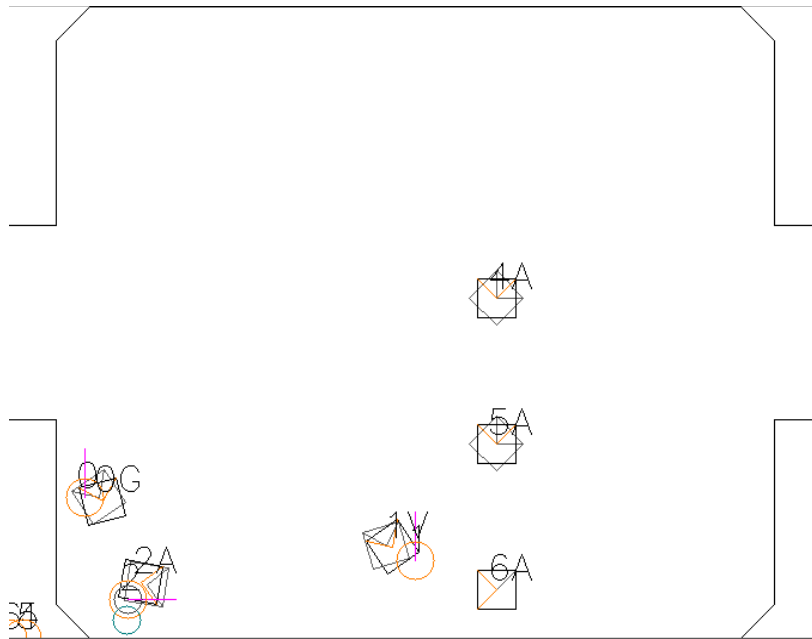


Figura 5.11 – Visão do simulador na situação final. (Fonte: o autor)

5.2.3 INTEGRAÇÃO DO CAMPO POTENCIAL ORIENTADO COM O SIMULADOR

Uma vez que o método CPH é integrado, os métodos CPO e CPLO também são integrados da mesma forma, pois, a estrutura de dados e o algoritmo de iniciação são os mesmos, mudando apenas o cálculo do campo, desta forma submete-se ao mesmo teste. Na figura 5.12 tem-se o campo potencial representado no estado inicial onde verifica-se que o CPO não mudou de comportamento, em relação ao constatado na implementação do método, e continua com problemas em sua convergência.

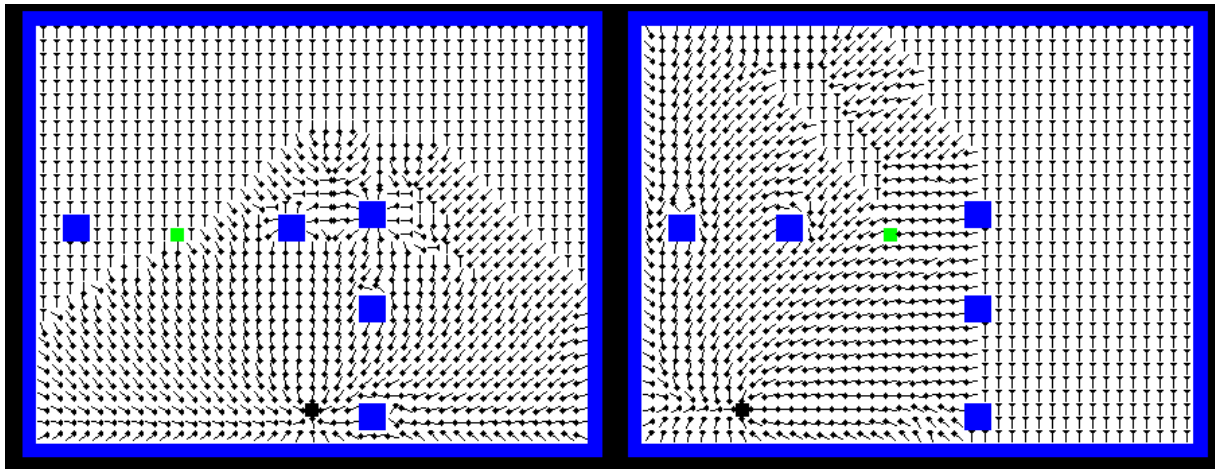


Figura 5.12 – Representação do CPO, perspectiva do defensor (esquerda) e do atacante (direita). (Fonte: o autor)

Na figura 5.13 tem-se o campo potencial representado em seu estado final onde é possível também ter uma representação de como o robô se comportou no teste. O comportamento, dentro da área sem orientação, é parecido com o apresentado nos métodos anteriores.

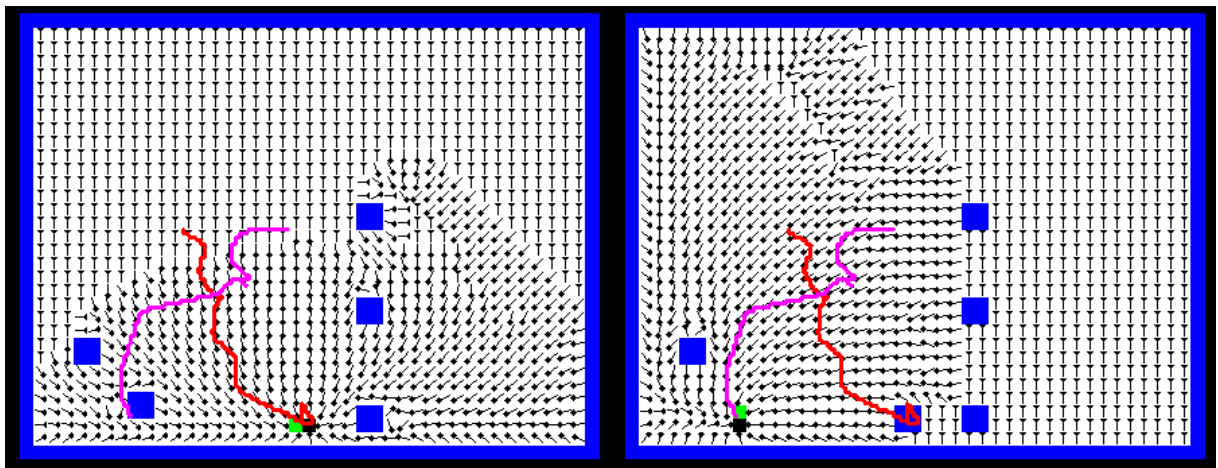


Figura 5.13 – Representação do CPO com os rastros de cada robô. (Fonte: o autor)

Na figura 5.14 é possível ver que os robôs chegam em estados diferentes até a meta, o que significa, com angulação e posições diferentes.

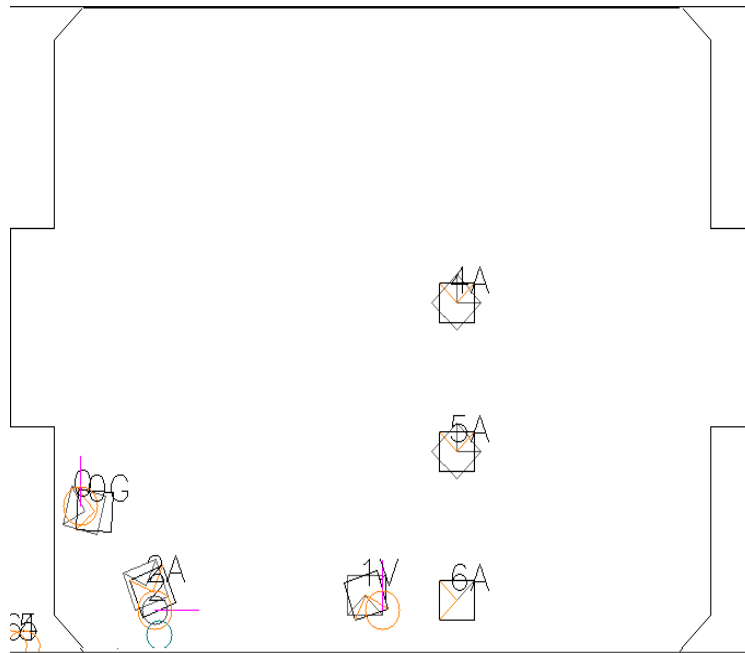


Figura 5.14 – Visão do simulador na situação final. (Fonte: o autor)

No teste com os robôs fora da área sem orientação temos um comportamento inadequado para a estratégia do jogo, o motivo disso acontecer é porque não há caminho planejado, por conta disto é mostrado um segundo teste, onde os robôs são posicionados fora da área sem orientação para verificar seu comportamento, estes são representados pelas figuras 5.15 e 5.16.

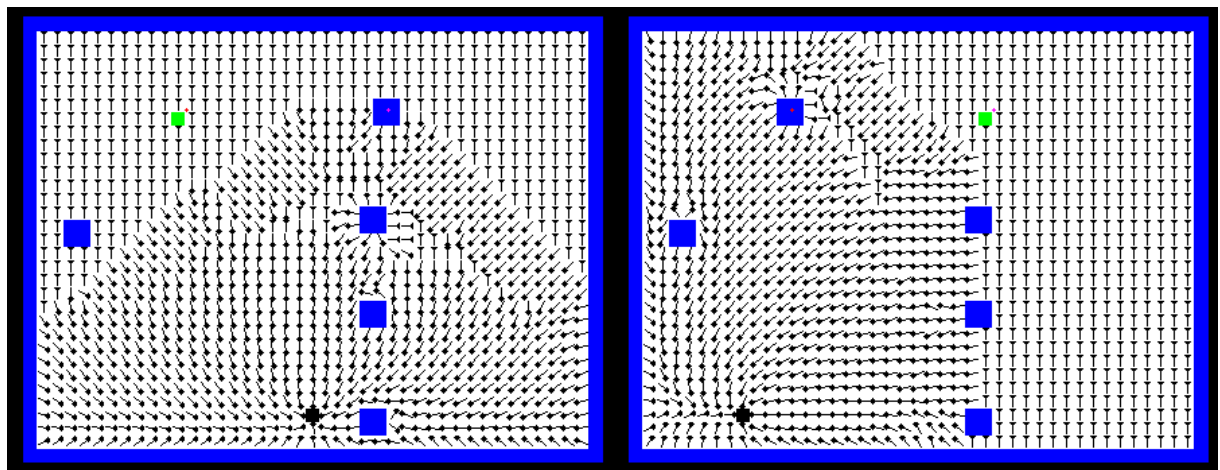


Figura 5.15 – Representação do CPO fora da área sem orientação, perspectiva do defensor (esquerda) e do atacante (direita). (Fonte: o autor)

Na figura 5.16 verifica-se que fora da área sem orientação o robô vai em um único sentido até acertar a parede. No caso do defensor, com rastro de cor vermelha, há um movimento parecido com uma senoide, isso acontece pois o controle do robô tenta corrigir o ângulo constantemente e nunca atinge o suficiente para ir retilíneo, tendo que corrigir cada vez que ultrapassa o valor necessário.

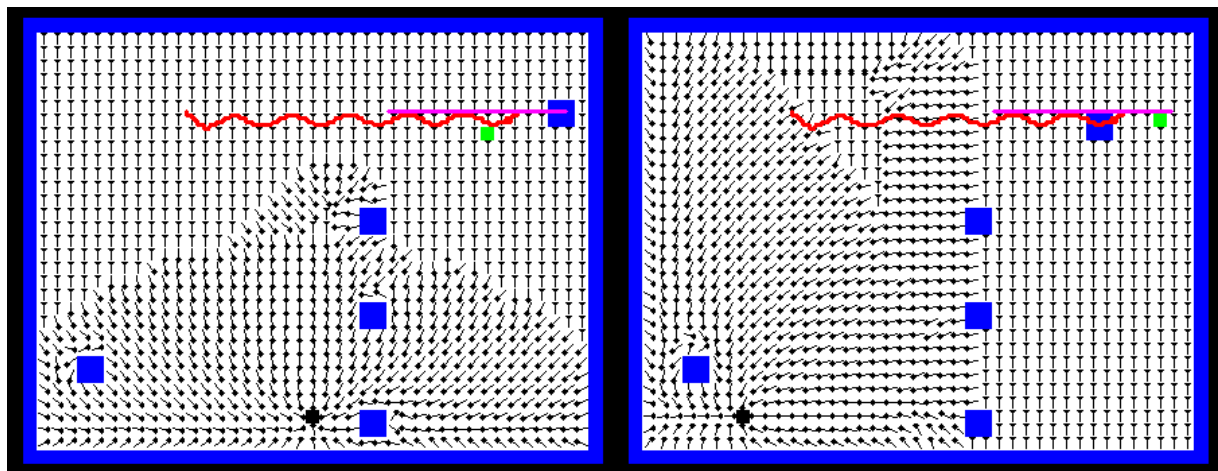


Figura 5.16 – Representação do CPO com os rastros de cada robô fora da área sem orientação. (Fonte: o autor)

Esse problema de convergência faz com que o robô tenha comportamentos indesejados em determinadas áreas do campo, de tal forma que não consiga atingir o objetivo proposto pela estratégia.

5.2.4 INTEGRAÇÃO DO CAMPO POTENCIAL LOCALMENTE ORIENTADO COM O SIMULADOR

Uma vez que com a integração realizada, submeteu-se ao mesmo teste que o CPH, CPK e o primeiro teste do CPO. Nas figuras 5.17 e 5.18 temos o campo potencial representado no estado inicial e no estado final, respectivamente.

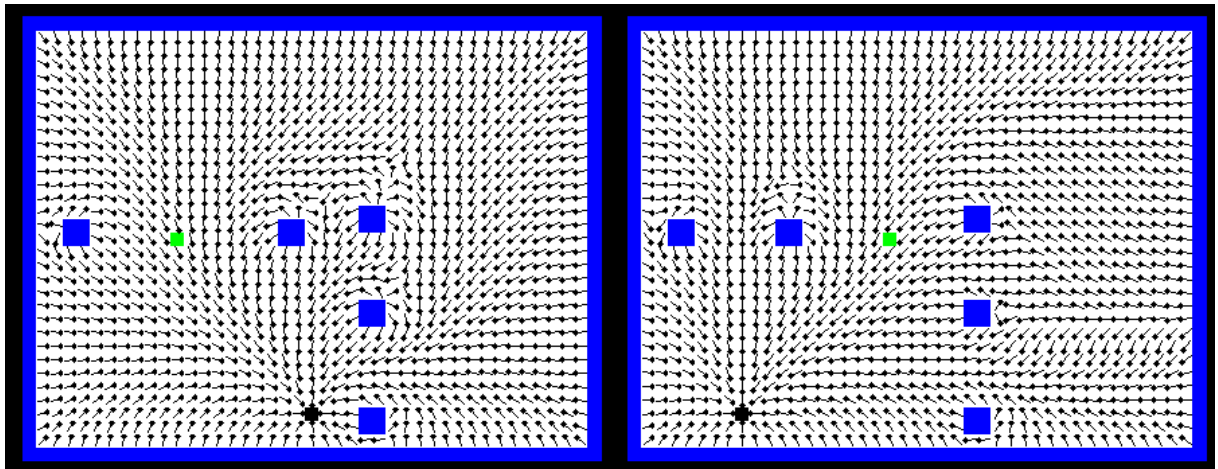


Figura 5.17 – Representação do CPH, perspectiva do defensor (esquerda) e do atacante (direita). (Fonte: o autor)

Na figura 5.18 é possível também ter uma representação de como o robô se comportou no teste. O comportamento é muito parecido com o CPH, inclusive no caminho tomado pelo robô.

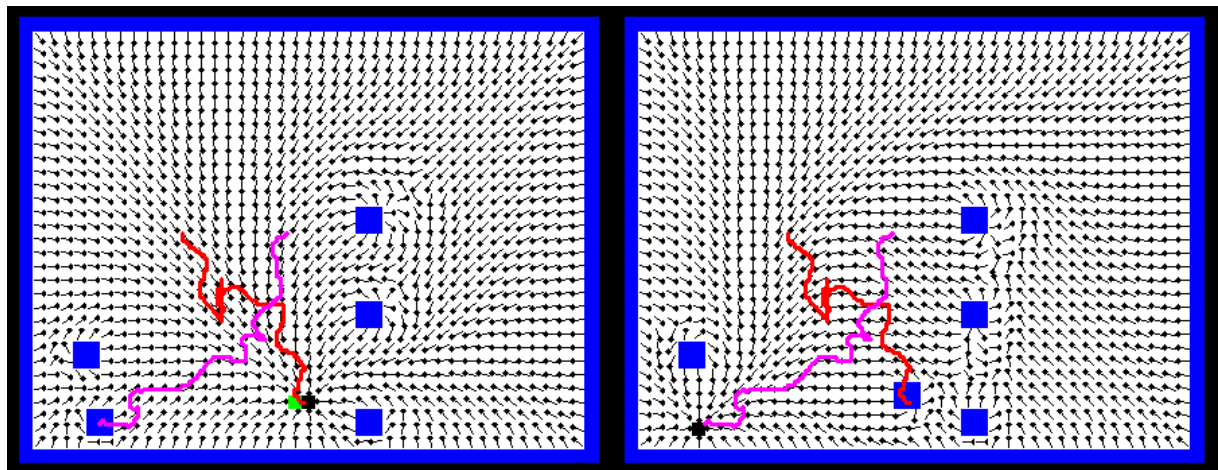


Figura 5.18 – Representação do CPH com os rastros de cada robô. (Fonte: o autor)

5.3 AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO

Para se alcançar o objetivo deste trabalho é preciso quantificar de alguma forma a atuação dos campos potenciais. Optou-se pela simulação de um jogo real, a fim de levantar dados referentes aos eventos presentes neste tipo de ambiente. Então, a partir dos dados coletados faz-se uma análise, buscando verificar se o comportamento dos métodos de campos potenciais implementados se atendem as necessidades do Carrossel Caipira.

5.3.1 MODIFICAÇÃO DO SIMULADOR

O simulador do time é uma peça fundamental neste trabalho, pois, através dele realizaram-se jogos simulados, onde cada método de planejamento de caminhos foi testado sem que houvesse mudança do controle da velocidade dos motores e a estratégia. Através destes jogos levantou-se estatísticas para entender o comportamento dos métodos de campos potenciais quando colocados em prática numa situação de jogo. O simulador foi apresentado no capítulo 3 na seção 3.4, porém foi necessário intervir no código atual para acrescentar uma nova funcionalidade que permitisse que dois times jogassem entre si. Para isso foi acrescentado ao simulador a possibilidade de se comunicar em rede, de tal forma que houvessem dois times clientes, cada um com sua estratégia e controle, se comunicando com o servidor do simulador, que efetiva os comandos enviados por cada cliente, realizando a movimentação dos robôs e da bola virtualmente, e fazendo o papel da visão fornecendo o estado de cada robô para os times clientes. Para a comunicação entre os clientes e o servidor optou-se por um protocolo de comunicação simples, o *User Datagram Protocol* (UDP).

Desta forma mudou-se a forma como o simulador funciona, os esquemas nas figuras 5.19 e 5.20 mostram o funcionamento do simulador antigo, de forma simplificada, antes da alteração e como funciona atualmente.

Na figura 5.19 é apresentado o esquema do simulador antigo, onde a estratégia recebe o estado do robô, calcula o objetivo e envia para o controle. O controle vai calcular a trajetória e o comando que será enviado para cada roda, que será enviado para o simulador que efetua a movimentação.

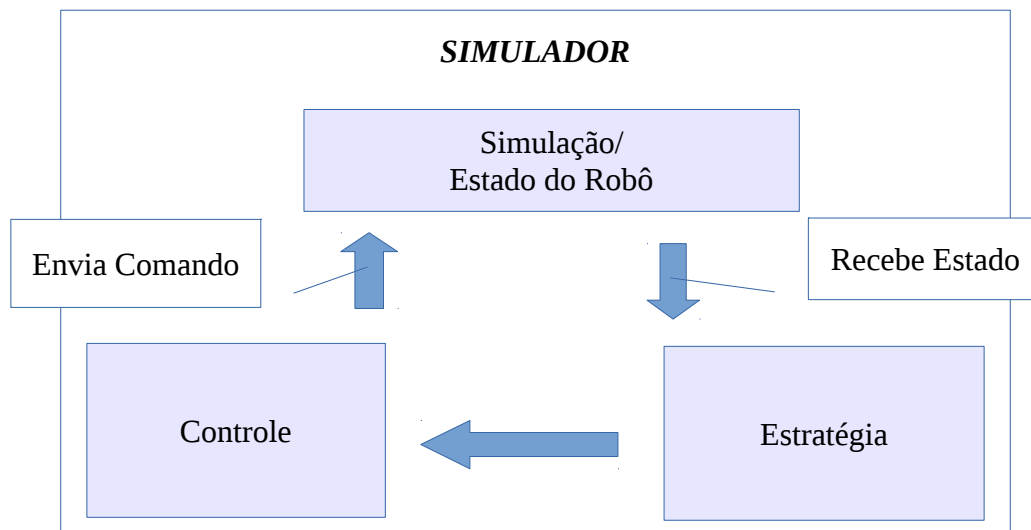


Figura 5.19 – Simulador antes das alterações. (Fonte: o autor)

Na figura 5.20 é apresentado o esquema do simulador atual, onde o simulador torna-se um servidor, que recebe os comandos de cada roda, efetua-os e em seguida envia o estado do robô para os clientes. Os clientes recebem o estado, calculam o objetivo através da estratégia e os comandos a serem enviados para o simulador através do controle, na sequência esse comando é enviado para o servidor que efetuará a movimentação dos robôs. Além disso, tem-se a representação para a conexão de um cliente, no caso a mesma representação serve para o número de clientes que forem necessários, no caso dois.

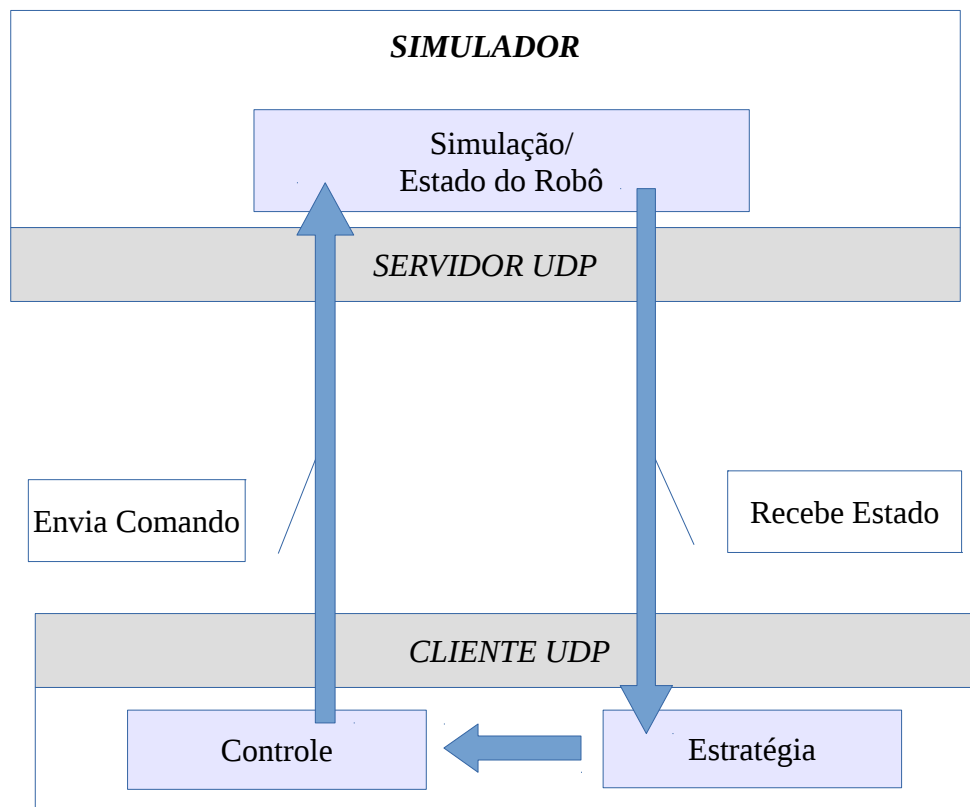


Figura 5.20 – Simulador após alterações, representação de uma conexão. (Fonte: o autor)

A seção a seguir apresenta os resultados obtidos nos jogos simulados.

5.3.2 RESULTADOS

Foram realizados seis jogos para indicar o método mais eficiente, de tal forma que todos os métodos foram colocados a prova contra seus “concorrentes”, assim tem-se três jogos para cada time com seu respectivo método: Campo Potencial de Khatib (CPK), Campo Potencial Harmônico (CPH), Campo Potencial Orientado (CPO) e Campo Potencial Localmente Orientado (CPLO). Os dados colhidos para análise envolvem os eventos de jogo, sendo estes: número de gols de cada time, pênaltis cometidos, gols de pênalti, número de

faltas cometidas (*freeballs*) e o tempo de jogo representado pelo número de iterações do programa. Os dados são apresentados de acordo com tabelas e análises estatísticas.

Cada jogo teve um total de 1380000 iterações. Cada iteração representa o cálculo de um comando enviado ao robô a partir de uma imagem capturada, ou seja, 33ms de jogo. Desta forma cada jogo simulado durou o equivalente a aproximadamente doze horas e quarenta seis minutos, um jogo normal no ambiente real possui dois tempo de cinco minutos, o que implica que cada jogo possui aproximadamente 18000 iterações, desta forma a simulação equivaleu a 76 jogos no tempo normal. As faltas, aqui chamadas de *freeball*, ocorrem quando a bola fica parada por 10 segundos sem que os robôs a movimente, e os pênaltis ocorrem quando dois robôs tentam defender a bola dentro da área ou quando a bola fica parada na área sem que o goleiro a tire de lá. Os critérios adotados tanto para a falta quanto para o pênalti são embasados nas regras pertinentes a categoria IEEE Very Small Size.

As tabelas a seguir representam os dados colhidos de cada um dos seis jogos efetuados entre os métodos, considera-se melhor, ou mais eficiente, o método que ganha o jogo, ou seja, que termina o jogo com o placar agregado a seu favor, onde o placar agregado é a somatória do placar de todos os jogos realizados. A tabela 5.1 apresenta os dados obtidos no jogo entre CPH e CPK. Nela podemos observar que o CPH foi mais eficiente dentro do tempo em que os testes foram realizados e pode-se observar que, além do número de gols totais, este método mostrou bom comportamento cometendo poucos pênaltis. Porém a margem de sucesso é pequena, desta forma, é necessário analisar quantitativamente a confiança dos dados levantados. Para isso optou-se por calcular o intervalo de confiança, usando o nível de confiança igual a 95%.

AGREGADO	CPH	CPK
PLACAR	81	66
PENALTIS COMETIDOS	36	77
GOLS DE PENALTIS	19	17
TEMPO DE JOGO E FREEBALLS	TOTAL	
TEMPO DE JOGO	1380000	INTERAÇÕES
NUMERO DE FREEBALLS	3112	

Tabela 5.1 – Dados obtidos do jogo CPH x CPK (Fonte: o autor)

Na tabela 5.2 temos alguns dados estatísticos relevantes para o mesmo jogo, como a média de gols e o intervalo de confiança. Os valores destes dados foram aproximados para

duas casas decimais, com o propósito de facilitar a visualização da tabela. Percebe-se que há intersecção entre os intervalos de confiança, o que significa que entre o CPH e o CPK houve empate técnico.

Análise Estatística	CPH	CPK
Média de gols por partida	1,07	0,87
Intervalo de Confiança	[0,83; 1,31]	[0,65; 1,09]

Tabela 5.2 – Análise Estatística jogo CPH x CPK (Fonte: o autor)

Na tabela 5.3 temos os dados colhidos no jogo entre CPH e CPO. O CPH teve uma eficiência visível e ganhou com grande vantagem. Além disso, percebe-se que não foi eficiente só no total de gols, mas também na conversão dos pênaltis, o que mostra um ponto fraco do CPO, que proporcionou um número muito grande de pênaltis ao adversário.

AGREGADO	CPH	CPO
PLACAR	250	41
PENALTIS COMETIDOS	33	227
GOLS DE PENALTIS	94	13
TEMPO DE JOGO E FREEBALLS	TOTAL	
TEMPO DE JOGO	1380000	INTERAÇÕES
NUMERO DE FREEBALLS	2968	

Tabela 5.3 – Dados obtidos do jogo CPH x CPO (Fonte: o autor)

Na tabela 5.4 temos alguns dados estatísticos relevantes, como a média de gols e o intervalo de confiança do jogo entre CPH x CPO. Neste caso não há intersecção dos intervalos, confirmando a superioridade do CPH.

Análise Estatística	CPH	CPO
Média de gols por partida	3,29	0,54
Intervalo de Confiança	[2,89; 3,69]	[0,38; 0,70]

Tabela 5.4 – Análise Estatística do jogo CPH x CPO (Fonte: o autor)

A tabela 5.5 apresenta os dados colhidos no jogo entre CPH e CPLO. Esse foi mais um jogo favorável para o CPH, que manteve um aproveitamento de 100% nessa fase de testes. Apesar do jogo ser equilibrado, a análise do intervalo de confiança confirmou a superioridade do CPH.

AGREGADO	CPH	CPLO
PLACAR	68	43
PENALTIS COMETIDOS	39	43
GOLS DE PENALTIS	17	8
TEMPO DE JOGO E FREEBALLS	TOTAL	
TEMPO DE JOGO	1380000	INTERAÇÕES
NUMERO DE FREEBALLS	3378	

Tabela 5.5 – Dados obtidos do jogo CPH x CPLO (Fonte: o autor)

Na tabela 5.6 temos alguns dados estatísticos relevantes, como a média de gols e o intervalo de confiança do jogo entre CPH x CPLO. Neste caso, não há intersecção dos intervalos.

Análise Estatística	CPH	CPLO
Média de gols por partida	0,89	0,56
Intervalo de Confiança	[0,74; 1,04]	[0,41; 0,71]

Tabela 5.6 – Análise Estatística do jogo CPH x CPLO (Fonte: o autor)

A tabela 5.7 apresenta os dados obtidos através da análise do jogo entre CPK e CPO. Neste jogo o método CPK teve maior eficiência e ganhou com boa vantagem, que se confirma na análise do intervalo de confiança.

AGREGADO	CPK	CPO
PLACAR	331	65
PENALTIS COMETIDOS	57	282
GOLS DE PENALTIS	136	25
TEMPO DE JOGO E FREEBALLS	TOTAL	
TEMPO DE JOGO	1380000	INTERAÇÕES
NUMERO DE FREEBALLS	2887	

Tabela 5.7 – Dados obtidos do jogo CPK x CPO (Fonte: o autor)

Na tabela 5.8 temos alguns dados estatísticos relevantes, como a média de gols e o intervalo de confiança do jogo entre CPK x CPO. Neste caso não há intersecção dos intervalos, confirmando a superioridade do CPK.

Análise Estatística	CPK	CPO
Média de gols por partida	4,35	0,85
Intervalo de Confiança	[3,88; 4,83]	[0,61; 1,09]

Tabela 5.8 – Análise Estatística do jogo CPK x CPO (Fonte: o autor)

A tabela 5.9 apresenta os dados obtidos através da análise do jogo entre CPLO e CPK. Verificou-se que o CPK obteve uma boa vantagem, porém a eficiência nesse caso é menor do que a verificada na tabela 5.7. Apesar disto, o intervalo de confiança confirma a superioridade do CPK, que obteve seu segundo saldo positivo.

AGREGADO	CPLO	CPK
PLACAR	66	109
PENALTIS COMETIDOS	99	69
GOLS DE PENALTIS	21	37
TEMPO DE JOGO E FREEBALLS	TOTAL	
TEMPO DE JOGO	1380000	INTERAÇÕES
NUMERO DE FREEBALLS	3177	

Tabela 5.9 – Dados obtidos do jogo CPLO x CPK (Fonte: o autor)

Na tabela 5.10 temos alguns dados estatísticos relevantes, como a média de gols e o intervalo de confiança do jogo entre CPLO x CPK. Apesar da eficiência do CPK em relação ao CPLO ser menor que do CPK em relação ao CPO, neste caso não há intersecção dos intervalos.

Análise Estatística	CPLO	CPK
Média de gols por partida	0,87	1,43
Intervalo de Confiança	[0,69; 1,05]	[1,14; 1,72]

Tabela 5.10 – Análise Estatística do jogo CPLO x CPK (Fonte: o autor)

A tabela 5.11 apresenta os dados obtidos através da análise do jogo entre CPO e CPLO. Observou-se que o CPO obteve uma eficiência baixa contra mais um método, tornando este método o menos eficiente. Temos nesse jogo o único resultado positivo para o método CPLO. Confirmou-se então que, após uma análise estatística, o cálculo do intervalo de confiança obtido para cada jogo confirmou a ineficiência do CPO que não obteve nenhum resultado positivo que possibilitasse que este superasse os demais métodos.

AGREGADO	CPO	CPLO
PLACAR	66	275
PENALTIS COMETIDOS	251	51
GOLS DE PENALTIS	20	92
TEMPO DE JOGO E FREEBALLS	TOTAL	
TEMPO DE JOGO	1380000	INTERAÇÕES
NUMERO DE FREEBALLS	3047	

Tabela 5.11 – Dados obtidos do jogo CPO x CPLO (Fonte: o autor)

Na tabela 5.12 temos alguns dados estatísticos relevantes, como a média de gols e o intervalo de confiança do jogo entre CPO x CPLO. Neste caso, não há intersecção dos intervalos.

Análise Estatística	CPO	CPLO
Média de gols por partida	3,62	0,87
Intervalo de Confiança	[3,18; 4,06]	[0,65; 1,09]

Tabela 5.12 – Análise Estatística CPO x CPLO (Fonte: o autor)

Através destes dados percebeu-se que dois métodos se destacaram como melhores, pois o CPH e o CPK empatam tecnicamente, apesar da maior eficiência do CPH. Os resultados finais apontam para as seguintes situações para cada método: o CPO com três derrotas e indicado como o método menos eficiente; o CPLO com duas derrotas e uma vitória também não alcançou o posto de método mais eficiente; o CPH e o CPK empataram com duas vitórias e um empate.

Na figura 5.21 é possível vislumbrar os resultados dos jogos em um gráfico, que mostra a eficiência que cada método teve contra seu concorrente. A figura confirma a conclusão explicitada em relação aos resultados demonstrados pelas tabelas apresentadas anteriormente.

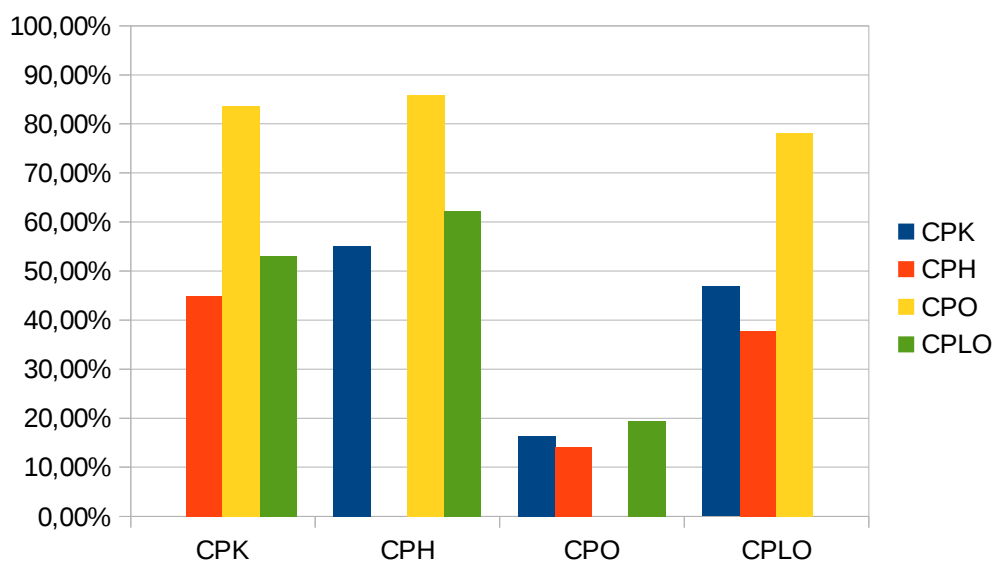


Figura 5.21 – Eficiência de cada método em relação aos seus “concorrentes” (Fonte: o autor)

Além da análise feita com base no placar agregado dos jogos é possível avaliar os números obtidos por cada método nos demais eventos avaliados, que são: número total de gols, número de pênaltis cometidos e número total de gols de pênalti. Esses são comparados nos gráficos disponíveis nas figuras que seguem. Na figura 5.22 apresenta-se a comparação do número de gols marcados pelos métodos somando todos os jogos realizados.

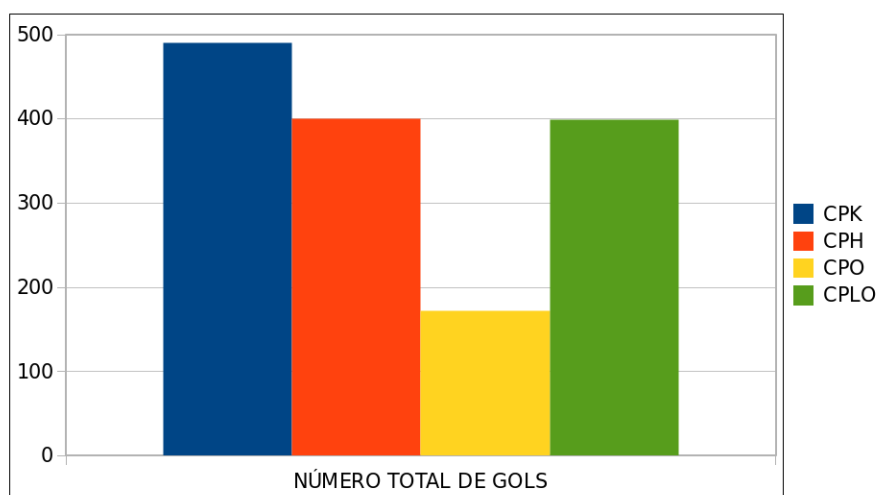


Figura 5.22 – Comparação do número de gols marcados pelos métodos somando todos os jogos realizados. (Fonte: o autor)

Na figura 5.23 apresenta-se o número total de pênaltis cometidos pelos times, abrangendo todos os jogos. Nele pode-se verificar como o CPO ficou vulnerável perante um número grande de pênaltis.

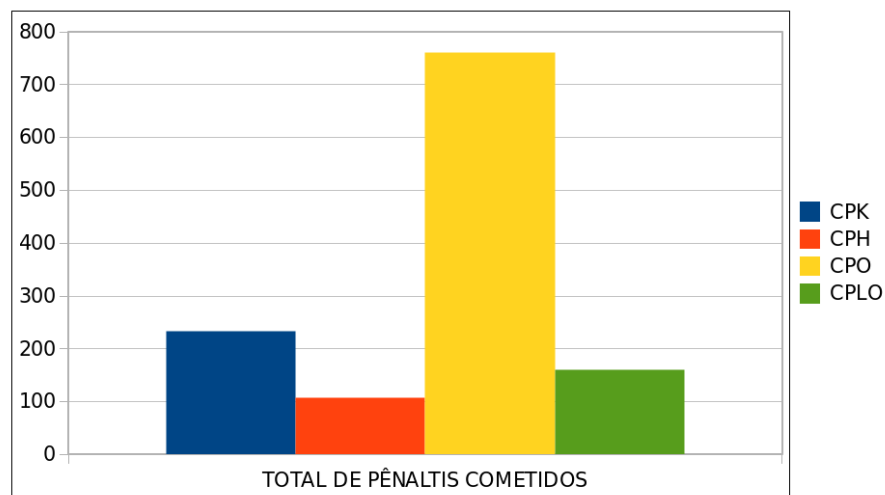


Figura 5.23 – Número total de pênaltis cometidos. (Fonte: o autor)

Na figura 5.24 apresenta-se o número de pênaltis convertidos em todos os jogos pelos times. Mais uma vez o contraste dos dados referentes ao CPLO dão uma possível explicação sobre a ineficiência do método.

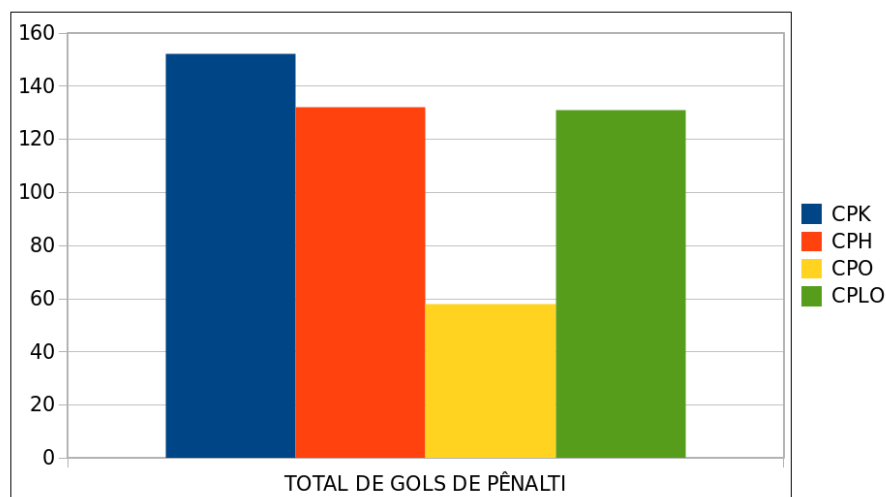


Figura 5.24 – Número de pênaltis convertidos. (Fonte: o autor)

De acordo com os dados apresentados, constatou-se que o CPH tem melhor aproveitamento sobre os demais métodos, sendo assim é o método que se mostra mais eficaz nos testes aos quais foi submetido. Porém, depois de verificar o intervalo de confiança dos dados levantados, constatou-se que os métodos CPK e CPH estão inseridos no critério de empate técnico, pois, existe intersecção entre seus intervalos de confiança. Com isso conclui-se que o CPK e o CPH possuem a maior eficiência sobre os demais métodos de campos potenciais. Desta forma submeteu-se os dois métodos para o último teste, verificar a eficiência em um jogo contra o método antigo, sem campos potenciais, que aqui será chamado apenas de SCP.

Na tabela 5.13 temos os dados colhidos no jogo entre CPH e SCP. Este jogo teve um resultado muito próximo de um empate, com uma diferença mínima a favor do CPH. Utilizando-se do intervalo de confiança calculado, com nível de confiança de 95%, concluiu-se que houve empate técnico entre os métodos.

AGREGADO	CPH	SCP
PLACAR	68	63
PENALTIS COMETIDOS	50	85
GOLS DE PENALTIS	25	15
TEMPO DE JOGO E FREEBALLS	TOTAL	
TEMPO DE JOGO	1380000	INTERAÇÕES
NUMERO DE FREEBALLS	3163	

Tabela 5.13 – Dados obtidos do jogo CPH x SCP (Fonte: o autor)

Na tabela 5.14 temos alguns dados estatísticos relevantes, como a média de gols e o intervalo de confiança do jogo entre CPH e SCP. Neste caso há intersecção dos intervalos, portanto, há empate técnico.

Análise Estatística	CPH	SCP
Média de gols por partida	0,89	0,83
Intervalo de Confiança	[0,70; 1,09]	[0,62; 1,04]

Tabela 5.14 – Análise Estatística do jogo CPH x SCP (Fonte: o autor)

Na tabela 5.15 temos os dados colhidos no jogo entre CPK e SCP. Este jogo foi favorável para o SCP, com uma vantagem considerável. Utilizando-se do intervalo de confiança calculado, também com nível de confiança de 95%, concluiu-se que não houve empate técnico entre os métodos.

AGREGADO	CPK	SCP
PLACAR	98	174
PENALTIS COMETIDOS	130	70
GOLS DE PENALTIS	27	59
TEMPO DE JOGO E FREEBALLS	TOTAL	
TEMPO DE JOGO	1380000	INTERAÇÕES
NUMERO DE FREEBALLS	2836	

Tabela 5.15 – Dados obtidos do jogo CPK x SCP (Fonte: o autor)

Na tabela 5.16 temos alguns dados estatísticos relevantes, como a média de gols e o intervalo de confiança no jogo entre CPK e SCP. Neste caso não há intersecção dos intervalos, portanto, não há empate técnico.

Análise Estatística	CPK	SCP
Média de gols por partida	1,29	2,29
Intervalo de Confiança	[0,98; 1,60]	[1,90; 2,68]

Tabela 5.16 – Análise Estatística do jogo CPK x SCP (Fonte: o autor)

Conclui-se que o método CPK, por não superar o SCP, pode ser descartado após essa última bateria de testes. Como o CPH não atingiu um resultado negativo, apesar de empatar com SCP, este pode ser considerado o método mais eficiente dentre os métodos avaliados neste trabalho

CAPÍTULO 6 CONCLUSÃO

Como exposto no capítulo 1, seção 1.1, o objetivo deste trabalho é implementar e comparar quatro métodos existentes de campos potenciais que foram apresentados por Faria (2006) e verificar, através de simulação, qual deles se enquadra melhor para o time de futebol de robôs do Departamento de Computação da UNESP de Bauru.

Com base nos dados apresentados verificou-se que, dos quatro métodos levantados por Faria (2006) que foram implementados neste trabalho, um deles demonstrou melhores resultados que os demais, que é o Campo Potencial Harmônico (CPH). Porém constatou-se também, que a confiança dos dados não permitiam afirmar que este era o melhor método, devido a um empate técnico com o Campo Potencial de Khatib (CPK), sendo assim, os métodos CPK e CPH foram submetidos a mais uma bateria de testes, porém agora comparando estes métodos com o método Sem Campo Potencial (SCP). Na verificação de desempenho entre os métodos CPK e SCP, constatou-se que, no simulador, o desempenho do SCP é superior ao do CPK, e desta forma contribui-se pouco para o time do Carrossel Caipira.

Na verificação de desempenho entre os métodos CPH e SCP, constatou-se que, no simulador, não houve mudança de desempenho entre os métodos, onde ambos obtiveram resultados muito parecidos. Desta forma, a contribuição deste trabalho é a proposta de utilização de um método de campos potenciais que, mesmo que não tenha maior eficiência verificada pelo simulador, tem embasamento teórico e pode ser formalizado.

Além disto, este trabalho contribui com uma nova versão do simulador, que agora pode simular um jogo de futebol de robôs, elevando o nível dos testes que podem ser feitos utilizando-se desta ferramenta útil que pode suprir o fato de que o time de futebol de robôs Carrossel Caipira não possui seis robôs com o mesmo hardware, e assim não conseguir fazer testes mais profundos no ambiente real.

6.1 TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros propõe-se que outros métodos de planejamento de caminhos sejam desenvolvidos, para que a evolução do Carrossel Caipira em termos de software não diminua. Além disso, outras situações foram constatadas no decorrer do desenvolvimento que

podem melhorar o ambiente de testes, tanto no simulador quanto no ambiente real. São essas situações:

1. Melhoria na modelagem matemática do robô e das colisões no simulador;
2. Melhoria no método de cálculo da velocidade dos motores, buscando uma maior eficiência de movimentação e o uso de velocidades variadas.

REFERÊNCIAS

- ALVES, Silas F. R.; FERASOLI Filho, Humberto; PEGORARO, Renê; CALDEIRA, Marco A. C.; YONEZAWA, Wilson M.; ROSÁRIO, João M.; **Ambiente Educacional de Robótica Direcionado a Aplicações em Engenharia**, X SBAI – Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, 2011a.
- ALVES, Silas F. R.; FERASOLI Filho, Humberto; PEGORARO, Renê; CALDEIRA, Marco A. C.; YONEZAWA, Wilson M.; ROSÁRIO, João. Educational Environment for Robotic Applications in Engineering. In: Eurobot Conference 2011 - 4th International Conference on Research and Education in Robotics, 2011, Praga - República Tcheca. Anais: Research and Education in Robotics - EUROBOT 2011. Berlin - Alemanha: Springer, 2011. v. 161. p.17-28, 2011b.
- ARKIN, R. C. (1989). Motor schema-based mobile robot navigator. In The International Journal of Robotics Research, pages 92–112.
- BROOKS, R. (1986). A robust layered control system for a mobile robot. IEEE Journal of Robotics and Automation, RA-2:14–23.
- CAMPION, G., BASTIN, G., D'ANDRÉA-NOVEL, B., “**Structural Properties and Classification of Kinematic and Dynamic Models of Wheeled Mobile Robots.**” IEEE Transactions on Robotics and Automation, 12, No. 1, 47–62, 1996.
- CONNOLLY, C. I., BURNS, J. B., and WEISS, R. (1990). Path planning using laplaces equation. In IEEE International Conference on Robotics and Automation.
- CONNOLLY, C. I. and GRUPEN, R. A. (1993). On the application of harmonic functions to robotics. Journal of Robotic Systems, 10:931–946.
- COSTA, A.H. Reali.; PEGORARO, Renê; SICHMAN, J. S.; FERASOLI Filho, Humberto; STOLFI, G.; PAIT, F. M.; **GUARANÁ Robot-Soccer Team: Some Architectural Issues**, 1998.
- COSTA, A. H, Reali; PEGORARO, Rene; Construindo Robôs Autônomos para partidas de futebol: o Time Guaraná, SBA Controle & Automação Vol. 11 no. 03, 2000.
- FARIAS, Gedson. **Uma arquitetura de controle inteligente para múltiplos robôs**. São Carlos, 2006.
- FREITAS Filho, Paulo José; **Introdução à Modelagem e Simulação de Sistemas com Aplicações Em Arena** 2ª Ed, Visual Books, 2008.
- KHATIB, O. (1980). **Command Dynamic dans l'Espace Opérationnel des Robots Manipulateurs en Présence d'Obstacles**. PhD thesis, Ecole Nationale Supérieure de l'Aéronautique et de l'Espace, Toulouse. em Francês.
- KITANO, Hiroaki; ASADA, Minoru; KUNIYOSHI, Yasuo; NODA, Itsuki; OSAWA, Eiichi. Robocup: The robot world cup initiative. In: **Proceedings of the first international conference on Autonomous agents**. ACM, 1997. p. 340-347, 1997.
- MATARIC, Maja J.; **The Robotics Primer**, The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 2007.

PEGDEN, C. D.; SHANNON, R. E.; SADOWSKI, R. P.; Introduction to simulation using SIMAN. McGraw-Hill, NY. 2 ed., 1990.

PRESTES, E. (2003). Navegação Exploratória Baseada em Problemas de Valores de Contorno. PhD thesis, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, RS.

SIEGWART, R., NOURBAKHSH, I.R., **Introduction to Autonomous Mobile Robots**, The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 2004.

SILVA, Marcelo O. da; ROMERO, Roseli A. F.; **Campos potenciais modificados aplicados ao controle de múltiplos robôs**, São Carlos, 2011.

SHANNON, Robert E.; **System simulation: the art and science**, Prentice-Hall, Michigan, 1975.

TODD, D.J, **Walking Machines, an Introduction to Legged Robots**. Kogan Page Ltd., Universidade de Michigan, 1985.

YAMAMOMOTO, Marcelo M.; MEDEIROS, Adelardo A. D. de; PEDROSA, Diogo P. F.; ALSINA, Pablo J.; Um Simulador Dinâmico para mini-robôs móveis com modelagem de colisões, **VI SBAI – Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente**, 2003.