ESTRATÉGIAS COLABORATIVAS PARA EQUIPES DE ROBÔS SSL

Daniel Giraldi Michels, Lucas Alexandre Zick, Dieisson Martinelli, Vivian Cremer Kalempa

INTRODUÇÃO

A RoboCup Small Size League (SSL) é um ambiente de alta complexidade para o estudo de inteligência artificial distribuída e o controle de múltiplos agentes (Kitano et al., 1997; Ferrein; Steinbauer, 2016). Durante uma partida, equipes compostas por 11 robôs autônomos operam em um ambiente dinâmico (Robocup Small Size League, 2026), precisando tomar decisões e agir em uma frequência de atualização de 60Hz (Weitzenfeld et al., 2014). O controle eficiente dessa equipe de robôs exige um sistema capaz de conciliar o planejamento tático global com a evasão de obstáculos em tempo de execução (Umbarkar et al., 2026). Arquiteturas clássicas de controle baseadas em Máquina de Estados Finitos (FSM) monolíticas tendem a apresentar gargalos de escalabilidade, o que dificulta a execução de estratégias colaborativas complexas (Oliveira et al., 2023).

Para superar essas limitações e adotar modelos mais modulares e reativos (Gurung et al., 2026), este trabalho propõe o desenvolvimento e a validação de uma arquitetura de controle híbrida otimizada. A solução integra uma camada tática de alto nível orquestrada por Árvore de Comportamento (Behavior Tree), responsável pela alocação dinâmica de papéis táticos (como Atacantes, Alas e Defensores) e pela tomada de decisão em jogadas colaborativas. Paralelamente, a camada reativa de baixo nível utiliza um algoritmo de Campos Potenciais Artificiais (APF) refinado por um filtro direcional, projetado para anular interferências vetoriais na retaguarda do agente. O objetivo da arquitetura é promover a coordenação de multirrobôs, possibilitando a execução de jogadas colaborativas e a navegação reativa em cenários dinâmicos.

DESENVOLVIMENTO

A arquitetura de controle proposta opera em duas camadas hierárquicas, executadas a cada ciclo de processamento para garantir a reatividade do sistema multirrobôs.

Para estruturar a inteligência coletiva, a tomada de decisão de alto nível foi abstraída através de uma Árvore de Comportamento (Colledanchise; Ögren, 2018). Ela avalia as condições do ambiente e distribui as ações do time de forma hierárquica, designando comportamentos para as linhas de defesa, meio-campo e ataque de acordo com o estado global da partida. A principal contribuição tática da arquitetura reside na sua capacidade de orquestrar colaboração autônoma entre múltiplos agentes, impedindo que os robôs ajam de forma isolada.

Como prova de conceito dessa orquestração colaborativa, destaca-se o fluxo de decisão do nó ofensivo. O robô atacante utiliza projeções de linhas de visão para verificar se o caminho até o gol adversário está livre. Ao detectar um bloqueio, o orquestrador cancela a finalização precipitada e aciona o protagonismo da jogada. Em seguida, o sistema identifica a posição dos robôs alas e inicia a transição de passe. Assim, a árvore garante a reatividade da equipe, priorizando a manutenção da posse de bola e a criação de assistência contra defesas consolidadas.

Para a navegação reativa, a locomoção de cada agente é governada por um algoritmo de APF, método amplamente adotado por sua agilidade e capacidade de adaptação em tempo de execução na evasão de obstáculos (Benmachiche et al., 2025). A força de atração guia o robô até o seu alvo, enquanto as forças de repulsão evitam colisões. Contudo, o modelo clássico do APF apresenta instabilidade ao sofrer repulsões parasitas (Koren; Borenstein, 1991) de obstáculos localizados nas costas do robô, gerando frenagens e desvios desnecessários.

Para mitigar esse comportamento, implementou-se um Filtro Direcional geométrico (Ge; Cui, 2002). Durante o cálculo das forças, o controlador realiza o produto escalar entre o vetor de direção

do movimento (V_{mov}) e o vetor do robô até o obstáculo (V_{obs}). A força de repulsão só é aplicada se a condição $V_{mov} \cdot V_{obs} > 0$ for satisfeita. Se o resultado for negativo, o sistema conclui que a ameaça está no hemisfério traseiro e a ignora. Essa restrição purifica o vetor resultante, garantindo arrancadas retilíneas e velozes mesmo em cenários povoados.

RESULTADOS

Para validar a arquitetura proposta, desenvolveu-se um cenário de infiltração ofensiva no simulador grSim desenhado para forçar a tomada de decisão colaborativa. O teste posicionou o robô Atacante com a posse de bola diante de uma formação defensiva adversária distribuída por todo o setor, congestionando o campo e bloqueando o avanço frontal e o chute direto. Para superar essa marcação, dois robôs aliados operando como Alas precisam se movimentar estrategicamente pelas laterais em busca de espaços vazios. Visando comprovar a adaptabilidade dinâmica do time, a formação defensiva adversária recebeu uma variação estocástica controlada a cada iteração, sofrendo alterações espaciais aleatórias nos eixos X e Y.

A validação qualitativa do sistema é ilustrada na Figura 1, que apresenta um estudo de caso vetorial da jogada. O robô Atacante identificou o bloqueio no vetor frontal. Em seguida, a Árvore de Comportamento acionou a transição tática enquanto os robôs Alas se movimentavam para buscar posições favoráveis e criar linhas de passes por entre a zaga adversária, permitindo que o Atacante executasse uma assistência diagonal precisa. Ao mesmo tempo, a camada reativa (APF) garantiu que o Ala interceptasse a bola em movimento e contornasse o último marcador antes de efetuar o disparo ao gol.

Quantitativamente, o sistema foi submetido a uma bateria de 20 rodadas, todas exigindo tomadas de decisão sob configurações espaciais diferentes devido à variação estocástica da defesa. As métricas estão consolidadas na Tabela 1. O orquestrador obteve 100% de eficácia na decisão de passe (rejeitando todas as finalizações ou dribles precipitados na barreira) e 100% de sucesso na interceptação e domínio de bola pelos Alas em deslocamento. A taxa de conversão em gols foi de 80%, com um tempo médio de construção ofensiva de 12,50 segundos. A ausência de conversão em 20% dos cenários ocorreu devido ao tempo limite de 20 segundos estabelecido para cada teste, em defesas mais complexas geradas pela aleatoriedade, os robôs necessitaram de maior tempo para executar manobras evasivas, resultando no esgotamento do cronômetro antes do disparo ao gol, sem que houvesse qualquer falha na lógica de tomada de decisão.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho demonstrou que a integração hierárquica entre Árvore de Comportamento e APF modificado oferece uma solução escalável para sistemas multirrobôs na RoboCup SSL. A abstração tática garantiu a colaboração autônoma entre os agentes enquanto a filtragem geométrica na camada reativa assegurou acelerações retilíneas e evasão eficientes em tempo de execução. A arquitetura desenvolvida mitiga a explosão combinatória típica das FSM, viabilizando jogadas complexas e multiagentes sob restrições estritas de tempo. Como trabalhos futuros, sugere-se a integração de um algoritmo de planejamento de trajetória global, como o RRT*, para contornar mínimos locais absolutos em cenários de alta densidade. Esse método se encaixaria às restrições dinâmicas da liga justamente por oferecer um excelente compromisso entre tempo de computação e otimalidade na geração de rotas.

Palavras-chave: sistema multirrobôs; Árvore de Comportamento; Campos Potenciais Artificiais; RoboCup SSL.

ANEXOS

Tabela 1. *Consolidação das métricas de eficácia após bateria de 20 rodadas em cenário com defesa estocástica.*

Métricas Avaliadas	Eficácia Obtida
Decisão de passe autônomo perante bloqueio	100,0%
Recepção e domínio de bolas pelos Alas	100,0%
Eficiência de conversão em gols	80,0%
Tempo médio de construção ofensiva	12,50s

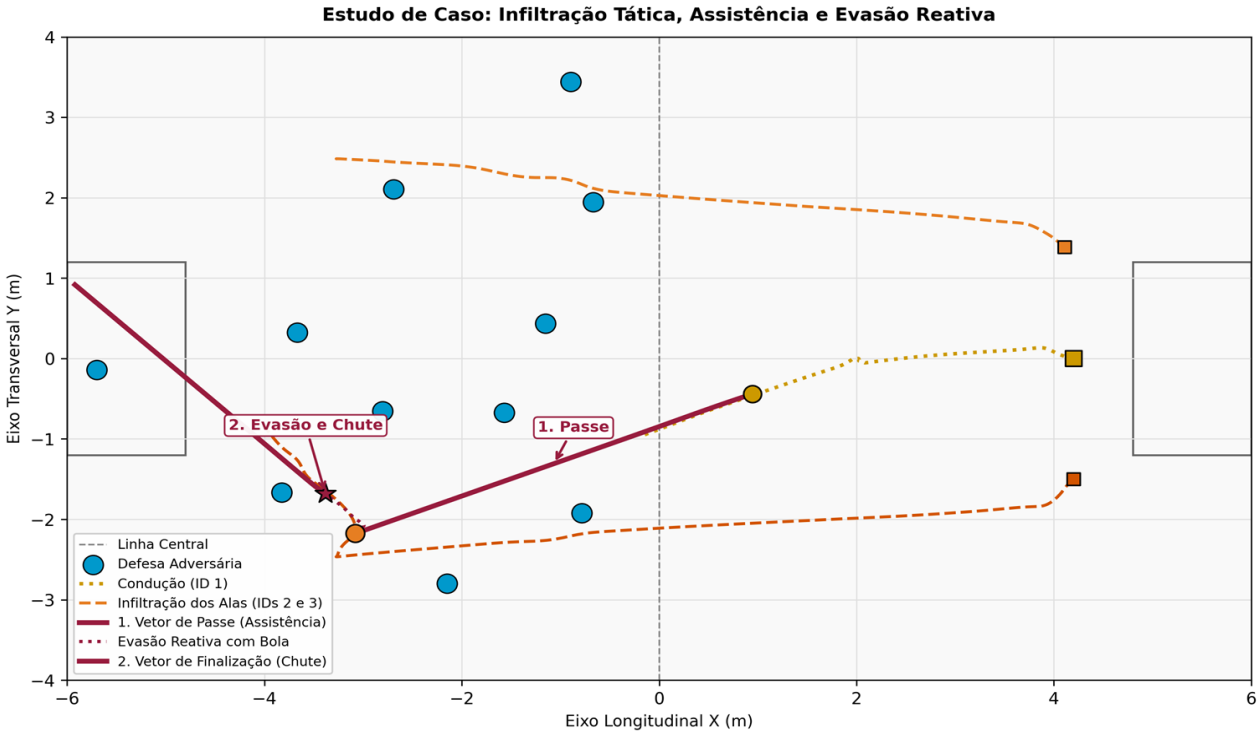


Figura 1. *Estudo de caso vetorial de infiltração ofensiva.*

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BENMACHICHE, Abdelmadjid. *et al*. Adaptive hybrid PSO-APF algorithm for advanced path planning in next-generation autonomous robots. **Sensors**, v. 25, n. 18, p. 5742, 2025.

FERREIN, Alexander; STEINBAUER, Gerald. 20 years of RoboCup: a subjective retrospection. **KI-Künstliche Intelligenz**, v. 30, n. 3, p. 225-232, 2016.

GE, Shuzhi Sam; CUI, Yun J. Dynamic motion planning for mobile robots using potential field method. **Autonomous Robots**, v. 13, n. 3, p. 207-222, 2002.

GURUNG, Darpan. *et al*. **TurtleRabbit 2026 SSL Team Description Paper**. [S. l.: s. n.], 2026. Disponível em: https://ssl.robocup.org/wp-content/uploads/2026/04/2026_TDP_TurtleRabbit.pdf. Acesso em: 19 ago. 2026.

KITANO, Hiroaki. *et al*. The RoboCup synthetic agent challenge 97. *In*: **Robot Soccer World Cup**. [S. l.]: Springer, 1997. p. 62-73.

KOREN, Yoram.; BORENSTEIN, J. *et al*. Potential field methods and their inherent limitations for mobile robot navigation. *In*: ICRA. **Proceedings** [...]. [S. l.: s. n.], 1991. v. 2, p. 1398-1404.

ÖGREN, Petter; COLLEDANCHISE, Michele. **Behavior trees in robotics and AI**: an introduction. [S. l.]: CRC Press, 2018.

OLIVEIRA, Aline Lima de *et al*. **RobôCIn Small Size League Extended Team Description Paper for RoboCup 2023**. [S. l.: s. n.], 2023. Disponível em: https://arxiv.org/abs/2307.10018. Acesso em: 15 ago. 2026.

ROBOCUP SMALL SIZE LEAGUE. **RoboCup Small Size League Rules**. [S. l.: s. n.], 2026. Disponível em: https://robocup-ssl.github.io/ssl-rules/sslrules.html. Acesso em: 13 ago. 2026.

UMBARKAR, Ashish. *et al*. Path Planning for Multiple Mobile Robots: A Systematic Review Using Parameter-Mapped Benchmarking. **Machines**, v. 14, n. 8, p. 870, 2026.

WEITZENFELD, Alfredo. *et al*. Robocup small-size league: past, present and future. *In*: **Robot Soccer World Cup**. [S. l.]: Springer, 2014. p. 611-623.