



Implementation of Fuzzy Multimodel Control in Speed Tracking of Mobile Robots Applied to Robot Soccer

Mateus Gomes Miquelanti, Luiz Felipe Pugliese,
Waner Wodson Aparecido Gonçalves Silva,
Tiago Gaiba Oliveira, Juliano de Almeida Monte-Mor and
Rodrigo Aparecido da Silva Braga

EasyChair preprints are intended for rapid
dissemination of research results and are
integrated with the rest of EasyChair.

October 8, 2024

Implementação do Controle Multimodelo Fuzzy no Rastreamento de Velocidade de Robôs Móveis Aplicados ao Futebol de Robôs

Mateus G. Miquelanti* Luiz F. Pugliese* Waner W. A. G. Silva*
Tiago G. de Oliveira* Juliano A. Monte-Mor* Rodrigo A. S. Braga*

* *Instituto de Ciências Tecnológicas, Universidade Federal de Itajubá
campus Itabira, MG, (e-mail: pugliese@unifei.edu.br).*

Abstract: This work addresses control problems for mobile robots with non-holonomic constraints and differential traction, specifically football robots in the VSS (Very Small Size) category. The motors are modeled as a first-order system, with data obtained by step response. The discrete-time root locus technique is used to adjust the proportional and integral gains of the local controllers. Finally, a global controller is developed using the fuzzy multimodel intelligent control strategy, and implementations are made to verify the speed-tracking dynamics of the robot motors.

Resumo: Este trabalho aborda problemas de controle de robôs móveis com restrições não-holonômicas e tração diferencial, especificamente robôs de futebol na categoria VSS (*Very Small Size*). Os motores são modelados como um sistema de primeira ordem, com dados obtidos por resposta ao degrau. Utiliza-se a técnica do lugar geométrico das raízes em tempo discreto para ajustar os ganhos proporcionais e integrais dos controladores locais. Finalmente, um controlador global é desenvolvido utilizando a estratégia de controle inteligente multimodelo fuzzy, e implementações são feitas para verificar a dinâmica de rastreamento da velocidade dos motores dos robôs.

Keywords: mobile robots; non-holonomic constraints; differential wheel drive; multi-models fuzzy.

Palavras-chaves: Robôs móveis; restrições não holonômicas; acionamento diferencial; Controle multimodelo fuzzy.

1. INTRODUÇÃO

O ser humano busca constantemente desenvolver tecnologias que facilitem tarefas, e a robótica é crucial para isso. O avanço da sociedade está ligado ao progresso tecnológico nesse setor. A robótica envolve a concepção, aplicação e uso de robôs para melhorar a vida humana, substituindo-os em trabalhos perigosos e atuando em áreas como saúde, espaço, agricultura e transportes (Niku, 2020).

Com o avanço das inovações tecnológicas, soluções robóticas estão sendo cada vez mais implementadas em aplicações industriais e residenciais. Os robôs atuais podem ser classificados em seis categorias: robôs móveis autônomos (RMAs), veículos guiados automaticamente (AGVs), robôs articulados, humanóides, colaborativos e híbridos (Bruzzone et al., 2022). Esses robôs podem ser divididos entre os que se movem no ambiente e os que permanecem estacionários. A robótica móvel estuda os robôs que se movem, geralmente sistemas não lineares com alta interdependência entre variáveis, o que aumenta a complexidade no ajuste e projeto de controladores (Rubio et al., 2019).

Robôs com rodas, especialmente com acionamento diferencial, possuem restrições não holonômicas, o que significa que seus graus de liberdade no ambiente são maiores que os controláveis, impedindo movimentos normais na super-

fície das rodas (Bie et al., 2023). Para garantir que esses robôs possam seguir uma trajetória específica, as rodas são acopladas a caixas de engrenagens e motores CC, cuja velocidade de rotação precisa ser controlada (Sani et al., 2023).

A dinâmica de um motor CC para controle de velocidade pode ser aproximada por um modelo de primeira ordem, simplificando o projeto e a síntese de controladores. Por isso, a estratégia de controle PID (Proporcional, Integral e Derivativo) é adequada para controlar a velocidade desses motores (Bhatta et al., 2023). O PID é a técnica de controle mais utilizada devido à sua praticidade, facilidade de entendimento e menor custo computacional e financeiro. Ele elimina o erro em estado estacionário com a componente integral e melhora a resposta transitória com a componente derivada (Khan et al., 2023).

Os controladores PID enfrentam obstáculos, especialmente com não linearidades em certos sistemas. A técnica de multimodelos aborda isso representando o sistema não linear global como uma combinação de vários sistemas lineares locais mais simples. Isso permite estudar sistemas locais e desenvolver estratégias que combinam soluções locais para obter resultados significativos no sistema global. Modelos locais baseados em regimes operacionais facilitam a aplicação de técnicas clássicas de controle, combinando vários

modelos simples para representar um sistema complexo (Bensafia et al., 2023).

Este trabalho visa desenvolver e implementar uma estratégia de controle multimodelo fuzzy para rastrear a velocidade das rodas de robôs não holonômicos. Primeiramente, são obtidos modelos dinâmicos locais com a técnica de resposta ao degrau e sintonizados controladores PI para cada modelo. Uma inferência fuzzy é então usada para obter um sinal de controle global, permitindo o rastreamento da velocidade das rodas direita e esquerda dos robôs.

A organização do trabalho é a seguinte: A seção 2 aborda a estrutura da competição e os elementos de acionamento do robô. A seção 3 apresenta a modelagem matemática de um motor CC e a estratégia para obter os modelos locais. A seção 4 discute a sintonia do controlador PI discreto e a estratégia de controle multimodelo fuzzy, foco principal do trabalho. A seção 5 apresenta os resultados obtidos, e a última seção traz as conclusões do trabalho.

2. ESTRUTURA DA COMPETIÇÃO, COMUNICAÇÃO E ACIONAMENTO

A Figura 1 mostra a estrutura oficial usada nas partidas de futebol de robôs, que inclui uma câmera para captar dados dos robôs, um sistema de comunicação remota para enviar informações aos robôs, computadores para processamento de imagens e execução do algoritmo de controle, e uma área base para a locomoção dos robôs (Solc and Honzik, 2002).

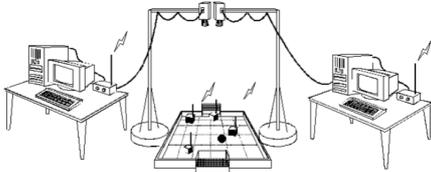


Figura 1. Estrutura utilizada em partidas oficiais de futebol de robôs.

Cada robô possui um microcontrolador ESP32 com um transceptor Bluetooth para receber sinais de controle do computador que executa o algoritmo de controle. No microcontrolador, esses sinais são convertidos em sinais PWM para acionar um conversor ponte H, que permite a inversão de polaridade e magnitude da corrente, movendo os motores CC acoplados às rodas. Os motores CC, da marca Pololu, são de 6 V com um redutor de 30:1, alcançando uma velocidade máxima de 1100 rpm sem carga e um torque de 0,45 kg.cm.

A escolha deste motor baseou-se na sua capacidade de fornecer torque adequado e velocidade satisfatória, permitindo ao robô ser rápido sem comprometer a eficiência do movimento. Além disso, seu pequeno tamanho otimiza o espaço interno do robô, garantindo uma boa integração com outros componentes, equilibrando desempenho e eficiência em um motor compacto e eficaz.

O código de implementação de baixo nível configura os periféricos do ESP32 e controla a velocidade dos motores das rodas do robô. Sem essa implementação, as velocidades enviadas pelo computador via Bluetooth não seriam garantidas. A estratégia de controle é feita em malha fechada,

usando encoders magnéticos de efeito Hall para fornecer realimentação da velocidade em rpm. Esses encoders têm um disco magnético de 6 polos e uma resolução de 12 contagens por rotação do eixo.

3. MODELAGEM MATEMÁTICA DO MOTOR CC

Muitas aplicações com motores CC em miniatura exigem operação em vários pontos de carga ou ciclos específicos, necessitando de uma fonte de alimentação ajustável. Isso pode ser alcançado por fontes de tensão CC ajustáveis ou por modulação por largura de pulso (PWM). A regulação de tensão PWM é eficaz, especialmente em aplicações com bateria ou fonte de corrente contínua, aumentando a eficiência, a vida útil da bateria e reduzindo o aquecimento dos componentes. Motores CC possuem pouca inércia e baixa indutância, permitindo respostas rápidas e comportamento dinâmico. O PWM controla a corrente nos enrolamentos, permitindo o controle preciso da velocidade angular de saída, que é proporcional à corrente média do enrolamento (Hilal et al., 2023).

Motores CC são amplamente utilizados em sistemas de controle devido ao seu comportamento linear. A Figura 2 apresenta o diagrama esquemático de um motor CC.

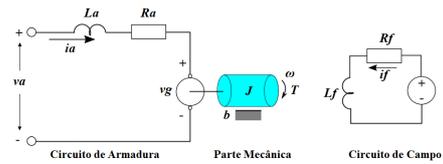


Figura 2. Diagrama esquemático de um motor CC.

A Figura 2 apresenta o diagrama esquemático de um motor CC controlado pela armadura, onde o sinal de entrada é a tensão aplicada à armadura (va). Neste esquema, a carga é modelada por um momento de inércia J e um atrito viscoso com coeficiente b . Considera-se que

$$vg = Km \cdot \omega \quad (1)$$

e

$$T = Km \cdot ia \quad (2)$$

A constante Km é conhecida como constante do motor. Devido às relações entre os elementos do motor, é possível modelar o circuito equivalente do motor CC, conforme mostrado na Figura 3.

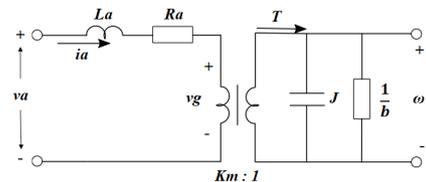


Figura 3. Equivalente elétrico de um motor CC.

Da Figura 3 tem-se que

$$\frac{\Omega(s)}{Va(s)} = \frac{Km}{JLas^2 + (JRa + bLa)s + bRa + Km^2} \quad (3)$$

Se a impedância da armadura for desprezada ($La \rightarrow 0$), o que geralmente é possível, pois a constante de tempo

mecânica do motor é muito maior que a elétrica, a função de transferência que relaciona a velocidade angular de saída com a tensão de entrada é representada por

$$\frac{\Omega(s)}{Va(s)} = \frac{Km}{JRas + bRa + Km^2} = \frac{K}{\tau s + 1} . \quad (4)$$

Se a impedância da armadura for desprezada, a função de transferência do motor que relaciona a velocidade angular com a tensão de entrada se comporta como um sistema de primeira ordem. A maior dificuldade no controle de motores CC é a alta amplitude da corrente de armadura, exigindo uma fonte de alta potência para fornecer o sinal de entrada va (Menaka and Patilkulkarni, 2023). A resposta dinâmica a uma entrada do tipo degrau para um sistema de primeira ordem é ilustrada na Figura 4.

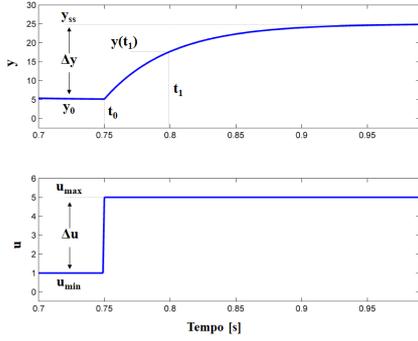


Figura 4. Resposta ao degrau de um sistema de primeira ordem.

A Figura 4 mostra que a entrada em degrau começa no tempo t_0 , com valores mínimo (u_{min}) e máximo (u_{max}). A saída inicial está em y_0 , e após o degrau, a saída y se estabiliza em um valor de estado estacionário y_{ss} . Com base nos valores de entrada e saída, o ganho em estado estacionário pode ser determinado por

$$K = \frac{\Delta y}{\Delta u} = \frac{y_{ss} - y_0}{u_{max} - u_{min}} . \quad (5)$$

Para encontrar a constante de tempo do modelo, τ , deve-se primeiro determinar

$$y(t_1) = 0,632 \cdot y_{ss} + y_0 . \quad (6)$$

Com base na resposta de um sistema de primeira ordem a uma entrada em degrau, conforme mostrado na Figura 4, é possível determinar o tempo t_1 , que corresponde ao valor de saída $y(t_1)$ da equação (6), e assim obter a constante de tempo do sistema, dada por

$$\tau = t_1 - t_0 . \quad (7)$$

Os motores CC dos robôs são acionados por tensões proporcionais ao percentual PWM, e equipados com encoders para medir a velocidade. A resposta de saída de cada estágio do ciclo de trabalho foi obtida via encoder. Com os dados de entrada e saída, foram desenvolvidos modelos matemáticos para projetar controladores locais.

4. ESTRATÉGIAS DE CONTROLE

4.1 Controladores PI Discretos Locais

Após obter modelos para diferentes pontos de operação, foram projetados controladores PI discreto locais usando

a técnica do lugar das raízes, que assume a presença de um par de polos dominantes em malha fechada com base no *overshoot* e no tempo de acomodação. A adição de zeros e polos não influencia significativamente a resposta, sendo a técnica usada para modificar a localização das raízes do modelo por meio de um compensador, permitindo posicionar um par de polos dominantes em malha fechada na posição desejada (Phillips et al., 1990).

Para projetar os ganhos de um controlador PI discreto usando o método do lugar das raízes, foi necessário discretizar os modelos locais dos motores com um tempo de amostragem T , adequado ao tempo de processamento do microcontrolador ESP32. A discretização foi feita pelo método ZOH (*Zero Order Hold*), que memoriza a última amostra do sinal até a inserção de uma nova entrada no sistema.

Para projetar o controlador no domínio z , é necessário definir um *overshoot* e um tempo de acomodação. A partir dessas definições, calcula-se o coeficiente de amortecimento (ζ), que pode ser obtido por

$$\zeta = \sqrt{\frac{\ln^2(\text{overshoot})}{\ln^2(\text{overshoot}) + \pi^2}} . \quad (8)$$

Além disso, para obter o par de polos desejado (z_d) no plano z , é necessário determinar a frequência de oscilação natural não amortecida (w_n), a frequência de oscilação amortecida (w_d) e a frequência de amostragem (w_s), representados por

$$w_n = \frac{4}{t_s \cdot \zeta} , \quad (9)$$

$$w_d = w_n \cdot \sqrt{1 - \zeta^2} \quad (10)$$

e

$$w_s = \frac{2\pi}{T} . \quad (11)$$

Assim, é possível obter o polo desejado, dado por

$$z_d = |z_d| \cdot e^{\angle z_d} \quad (12)$$

em que

$$|z_d| = e^{-\zeta \cdot w_n \cdot T} \quad (13)$$

e

$$\angle z_d = \frac{2 \cdot \pi \cdot w_d}{w_s} . \quad (14)$$

Considerando

$$X + jY = \frac{-1}{G(z_d)} \quad (15)$$

e

$$\alpha + j\beta = \frac{z_d \cdot T}{z_d - 1} \quad (16)$$

com X e α sendo a parte real, Y e β sendo a parte imaginária das equações (15) e (16) respectivamente, tem-se que

$$Kp = X - \frac{\alpha \cdot Y}{\beta} \quad (17)$$

e

$$Ki = \frac{Y}{\beta} . \quad (18)$$

Assim, a partir dos ganhos calculados pelo método do lugar das raízes discreto, é possível determinar a função de transferência de cada controlador local $C(z)$, dada por

$$C(z) = \frac{U(z)}{E(z)} = \frac{(Kp + Ki \cdot T)z - Kp}{z - 1}, \quad (19)$$

possibilitando a determinação da equação a diferenças para cada controlador local, que será implementada no código de baixo nível para controlar efetivamente a velocidade dos motores das rodas do robô (Phillips et al., 1990).

4.2 Controle Multimodelo Fuzzy

Um conjunto fuzzy é composto por objetos cujo grau de pertinência varia entre 0 e 1. Funções de pertinência fuzzy, como trapezoidais, triangulares e gaussianas, são usadas para atribuir valores de pertinência à variável de controle. Inferências em sistemas fuzzy avaliam conjuntos de regras que descrevem a relação entre variáveis de entrada e saída. Os conceitos de fuzzificação e defuzzificação são essenciais: a fuzzificação converte quantidades reais em números fuzzy, e a defuzzificação combina diferentes regras para inferir um sinal de controle. O objetivo do trabalho é desenvolver um sistema de controle não linear usando uma estratégia multimodelo com controladores PI locais de tempo discreto, combinados por lógica fuzzy. A lógica fuzzy é utilizada por seus modelos serem aproximadores universais de funções em um espaço compacto, permitindo a composição do modelo global a partir de múltiplos modelos locais, o que favorece a interpretabilidade e o projeto do controlador (Fan et al., 2020).

Com os controladores locais desenvolvidos para os pontos de operação desejados, estes podem ser combinados via lógica fuzzy para permitir o controle global do sistema. Essa abordagem favorece a aplicação de controle híbrido multimodelo em uma ampla faixa de operação, fazendo com que controladores PI locais em tempo discreto atuem na planta de processo global com base no grau de pertinência dos controladores locais em cada região de operação. O grau de pertinência é calculado por funções que representam as faixas de operação e, através de regras IF-THEN, determina-se o sinal de saída que atuará na planta de processo global. Para implementar a estratégia de controle multimodelo, primeiro obtêm-se os controladores PI em tempo discreto para cada ponto de operação linearizado e discretizado. Depois, escolhem-se as regras fuzzy que unirão todos os controladores locais usando as funções de pertinência desenvolvidas, conforme mostrado nas Figuras 5 e 6.

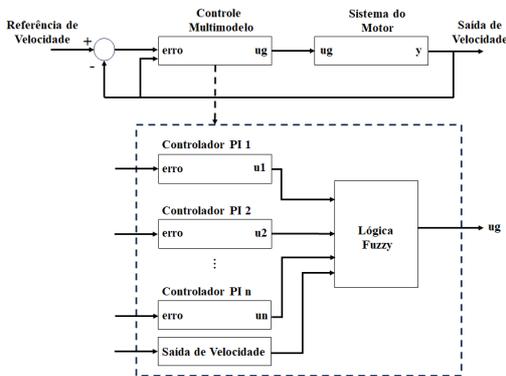


Figura 5. União dos controladores locais.

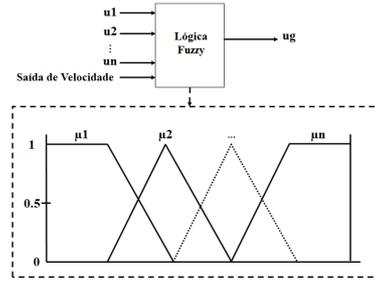


Figura 6. Funções de pertinência fuzzy

Na Figura 5, cada controlador local gera seu próprio sinal de controle, que atua melhor próximo ao seu ponto de operação. Na Figura 6, observa-se que cada sinal de controle local possui uma função de pertinência com um grau de pertinência correspondente μ , de modo que

$$\begin{cases} u1 \text{ terá grau de pertinência } \mu1 \\ u2 \text{ terá grau de pertinência } \mu2 \\ \vdots \\ un \text{ terá grau de pertinência } \mu n \end{cases}$$

Dessa forma, dependendo da posição de referência a ser rastreada, cada controlador local fornece um valor do sinal de controle representado por $u(k)$. O desempenho de cada controlador local é representado pelo seu grau de pertinência μ , que ativa as regras fuzzy. A ativação dessas regras permite o cálculo do sinal de saída baseado nas funções de pertinência. Os controladores lineares corrigem a resposta de cada modelo local com base na resposta do sistema e na saída dos modelos locais. A ação de controle global é obtida por inferência fuzzy, combinando ponderadamente as ações de cada controlador PI discreto local. O sinal de controle global ajusta o motor para atuar na posição de referência. Desta forma, a ação de controle global é obtida por

$$ug = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_i \cdot u_i}{\sum_{i=1}^n \mu_i} \quad (20)$$

em que μ_i é o valor de ativação da i -ésima regra (modelo local), u_i a ação de controle determinada pelo i -ésimo controlador e i o número de modelos/controladores locais. Assim, a união dos controladores locais baseados em modelos lineares e a lógica fuzzy implementada com regras IF-THEN gera um sinal de saída que atua no sistema, mantendo o rastreamento da referência de entrada com as características dinâmicas desejadas.

5. RESULTADOS

5.1 Modelos Locais e Controladores PI

Inicialmente, foi implementado um código no microcontrolador ESP32 para realizar testes em malha aberta, adquirindo dados para as faixas de 30%, 50%, 60%, 70% e 90% de PWM aplicadas ao motor. A Figura 7 mostra os dados adquiridos (em vermelho) e a validação dos modelos (em preto tracejado) para as faixas de operação PWM dos motores das rodas direita e esquerda.

Os controladores locais discretos foram projetados para cumprir os critérios de operação: overshoot máximo de 1%, tempo de amostragem de 5 ms e tempo de acomodação de

Tabela 1. Modelos da Roda Direita (RD), Roda Esquerda (RE) e seus respectivos ganhos (Kp e Ki).

Degrau PWM (%)	Modelo RD	Kp	Ki	Modelo RE	Kp	Ki
30	$13,70/(0,74s+1)$	0,754	4,85	$15,84/(0,73s+1)$	0,643	4,14
50	$15,94/(0,42s+1)$	0,340	2,36	$15,84/(0,39s+1)$	0,313	2,20
60	$14,94/(0,34s+1)$	0,280	2,04	$14,96/(0,33s+1)$	0,269	1,97
70	$13,79/(0,29s+1)$	0,248	1,88	$13,60/(0,28s+1)$	0,240	1,84
90	$11,70/(0,21s+1)$	0,194	1,64	$11,29/(0,21s+1)$	0,194	1,66

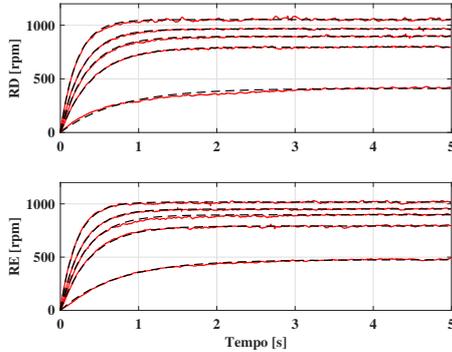


Figura 7. Validação dos modelos da roda direita (RD) e da roda esquerda (RD) para faixas de 30%, 50%, 60%, 70% e 90% de PWM.

4 vezes o τ de cada modelo. A Tabela 1 mostra os modelos obtidos e os ganhos dos respectivos controladores locais.

A Tabela 1 mostra que a constante de tempo (τ) dos modelos varia conforme a faixa de operação. Portanto, o ajuste dos controladores locais é feito de acordo com a velocidade de cada faixa de operação dos motores. A Tabela 2 apresenta as velocidades de cada ponto de operação, obtidas com tacômetros, que serão usadas nas regras fuzzy.

Tabela 2. Velocidades em rpm para seleção de controladores locais.

PWM (%)	Roda Direita	Roda Esquerda
30	645	665
50	896	897
60	965	952
70	1016	992
90	1112	1070

O trabalho foi realizado em duas etapas: a primeira no ambiente Simulink para modelagem, simulação e análise de sistemas dinâmicos. Após desenvolver e validar os modelos e controladores na simulação, a segunda etapa envolveu a aplicação prática nos robôs.

As próximas subseções descrevem os resultados da aplicação prática da estratégia de controle multimodelo fuzzy com 3 e 4 modelos. Os resultados mostram a resposta dinâmica do robô a diferentes referências de velocidade e os sinais de controle aplicados aos motores. Os resultados apresentarão referências positivas, que correspondem ao movimento do robô para frente, em direção à bola.

5.2 Controle Multimodelo Fuzzy com 3 Modelos

Esta abordagem envolve a criação de um controlador que fornece um sinal de controle global a partir dos modelos

locais de 30%, 60% e 90% de PWM. Quando a referência de velocidade está abaixo de 30% de PWM, utiliza-se o controlador do modelo de 30%. Para referências acima de 90%, usa-se o controlador do modelo de 90%. Para referências intermediárias entre 30%, 60% e 90%, a lógica fuzzy calcula a saída com base nas ponderações das funções de pertinência e das regras fuzzy. A Figura 8 mostra a dinâmica das rodas direita e esquerda do robô e o sinal de controle para variações na referência de velocidade.

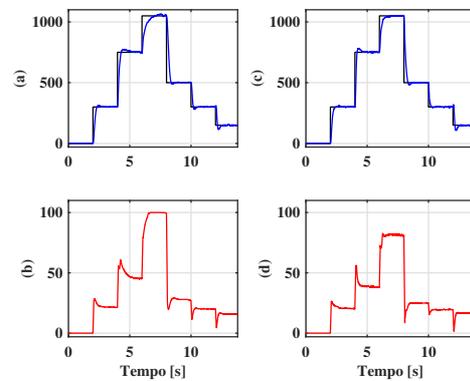


Figura 8. Controle multimodelo fuzzy com 3 modelos. Sinal de referência em preto e resposta do sistema em azul para (a) RD e (c) RE. Sinal de controle aplicado aos motores para (b) RD e (d) RE.

A Figura 8 mostra que o rastreamento da referência de entrada foi mantido para os motores das rodas direita e esquerda. Além disso, o sinal de controle aplicado aos motores está dentro da faixa de PWM aceitável, conforme a eletrônica de acionamento desenvolvida para os motores do robô.

5.3 Controle Multimodelo Fuzzy com 4 Modelos

Esta abordagem cria um controlador que fornece um sinal de controle global a partir dos modelos locais de 30%, 50%, 70% e 90% de PWM. Quando a referência de velocidade está abaixo de 30% de PWM, utiliza-se o controlador do modelo de 30%. Para referências acima de 90%, usa-se o controlador do modelo de 90%. Para referências intermediárias entre 30%, 50%, 70% e 90%, a lógica fuzzy calcula a saída com base nas ponderações das funções de pertinência e das regras fuzzy. A Figura 9 mostra a dinâmica das rodas direita e esquerda do robô e o sinal de controle para variações na referência de velocidade.

De forma análoga, a Figura 9 mostra que o rastreamento da referência de entrada foi mantido para os motores das rodas direita e esquerda. Além disso, o sinal de controle aplicado aos motores está dentro da faixa de

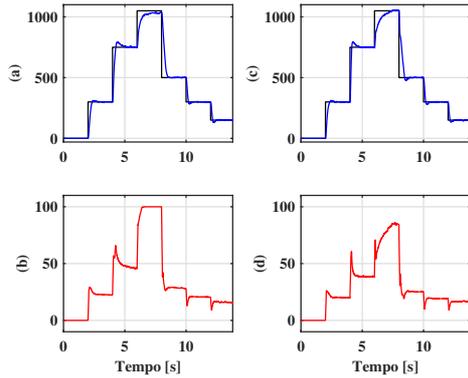


Figura 9. Controle multimodelo fuzzy com 4 modelos. Sinal de referência em preto e resposta do sistema em azul para (a) RD e (c) RE. Sinal de controle aplicado aos motores para (b) RD e (d) RE.

PWM aceitável, conforme a eletrônica de acionamento desenvolvida para os motores do robô.

5.4 Critérios de desempenho

Cada controlador apresentou desempenho satisfatório no rastreamento da referência e forneceu sinais de controle dentro dos parâmetros aceitáveis para a eletrônica dos motores. Para avaliar o desempenho de cada sistema de controle, foram usados dois critérios: ISE (*Integral Square Error*) e ITAE (*Integral of Time multiplied Absolute Error*). O ISE penaliza erros maiores no início da resposta, enquanto o ITAE penaliza erros que persistem por mais tempo, proporcionando uma avaliação complementar. A tabela 3 apresenta os erros obtidos para cada critério para as rodas direita e esquerda, respectivamente.

Tabela 3. Critérios de desempenho para as rodas direita e esquerda.

	Roda Direita		Roda Esquerda	
	ISE	ITAE	ISE	ITAE
3 Modelos	$3,583 \cdot 10^4$	$2,049 \cdot 10^3$	$5,725 \cdot 10^4$	$2,425 \cdot 10^3$
4 Modelos	$5,096 \cdot 10^4$	$2,599 \cdot 10^3$	$6,261 \cdot 10^4$	$2,581 \cdot 10^3$

Calculando a média dos resultados das rodas direita e esquerda, observa-se que o controlador multimodelo fuzzy com 3 modelos apresenta o menor erro para ambos os critérios. Isso demonstra que ter mais modelos no controlador não garante melhor desempenho. A técnica multimodelo fuzzy é útil para sistemas com várias dinâmicas operacionais, e a escolha do número de modelos depende do projetista. Embora não haja uma relação direta entre desempenho e número de modelos, a técnica permite o rastreamento eficaz da referência, auxiliando no controle dos motores e na dinâmica do robô durante uma partida de futebol.

6. CONCLUSÕES

O objetivo deste trabalho foi implementar uma estratégia de controle multimodelo para fornecer um sinal de controle global ao sistema de velocidade das rodas de um robô não holonômico. O sinal global foi gerado a partir da inferência fuzzy de controladores PI locais, projetados para 3 e 4 modelos específicos.

Os resultados demonstram que a abordagem multimodelo foi eficaz, permitindo um rastreamento preciso das velocidades de referência. A técnica proporcionou bons tempos de resposta e rápida estabilização. O controlador multimodelo fuzzy de três modelos foi o mais eficiente, apresentando os menores erros em todas as alterações na referência de velocidade.

Para trabalhos futuros, planeja-se comparar a técnica multimodelo fuzzy com a técnica de escalonamento de ganhos e estudar a relação entre desempenho e o número de modelos utilizados na sintonia dos controladores locais.

REFERÊNCIAS

- Bensafia, Y., Boukra, T., and Khettab, K. (2023). Fractionalized pid control in multi-model approach: A new tool for detection and diagnosis faults of dc motor. *Przeglad Elektrotechniczny*, 99(6).
- Bhatta, B., Salim, G., Borra, V., and Li, F.X. (2023). Low-cost dc motor control system experiments for engineering students. In *2023 ASEE Annual Conference & Exposition*.
- Bie, H., Li, P., Chen, F., and Ghaderpour, E. (2023). An observer-based type-3 fuzzy control for non-holonomic wheeled robots. *Symmetry*, 15(7), 1354.
- Bruzzone, L., Nodehi, S.E., and Fanghella, P. (2022). Tracked locomotion systems for ground mobile robots: A review. *Machines*, 10(8), 648.
- Fan, Y., An, Y., Wang, W., and Yang, C. (2020). Ts fuzzy adaptive control based on small gain approach for an uncertain robot manipulators. *International Journal of Fuzzy Systems*, 22(3), 930–942.
- Hilal, M., ALRikabi, H., and Aljazaery, I.A. (2023). A control system of dc motor speed: Systematic review: A control system of dc motor speed: Systematic review. *Wasit Journal of Computer and Mathematics Science*, 2(1), 93–111.
- Khan, H., Khatoon, S., Gaur, P., Abbas, M., Saleel, C.A., and Khan, S.A. (2023). Speed control of wheeled mobile robot by nature-inspired social spider algorithm-based pid controller. *Processes*, 11(4), 1202.
- Menaka, S. and Patilkulkarni, S. (2023). Dc motor system identification and speed control using dspace tools. In *Smart Sensors Measurement and Instrumentation: Select Proceedings of CISCON 2021*, 115–128. Springer.
- Niku, S.B. (2020). *Introduction to robotics: analysis, control, applications*. John Wiley & Sons.
- Phillips, C.L., Nagle, H.T., and Chakraborty, A. (1990). *Digital control system analysis and design*, volume 2. Prentice Hall Englewood Cliffs, NJ.
- Rubio, F., Valero, F., and Llopis-Albert, C. (2019). A review of mobile robots: Concepts, methods, theoretical framework, and applications. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 16(2), 1729881419839596.
- Sani, M., Hably, A., Robu, B., Dumon, J., and Meslem, N. (2023). Real-time dynamic obstacle avoidance for a non-holonomic mobile robot. In *2023 IEEE 32nd International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, 1–6. IEEE.
- Solc, F. and Honzik, B. (2002). Modelling and control of a soccer robot. In *7th International Workshop on Advanced Motion Control. Proceedings*, 506–509. IEEE.