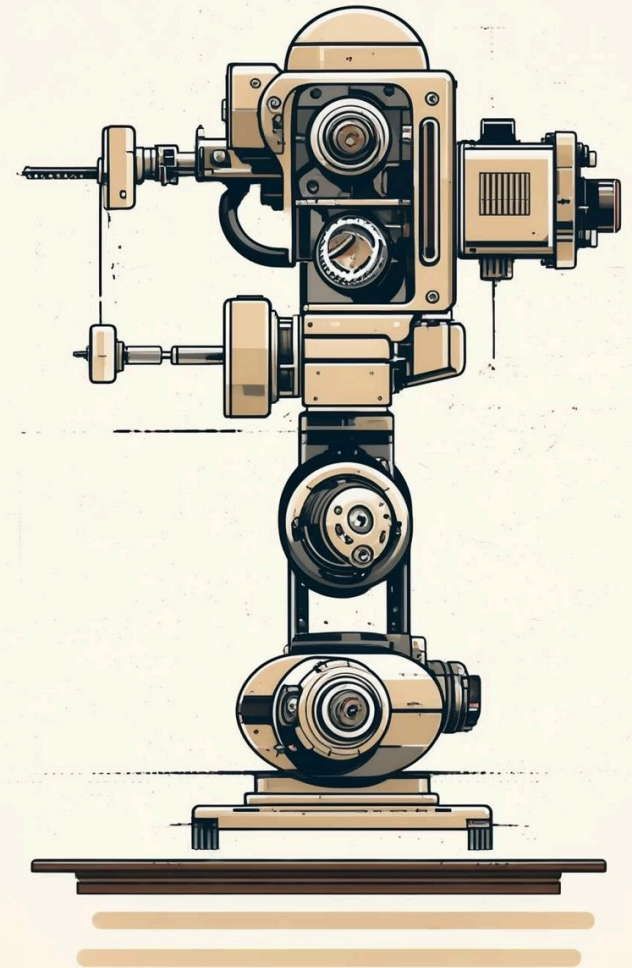


# Controle de Pose em Robôs Diferenciais usando Controlador PID

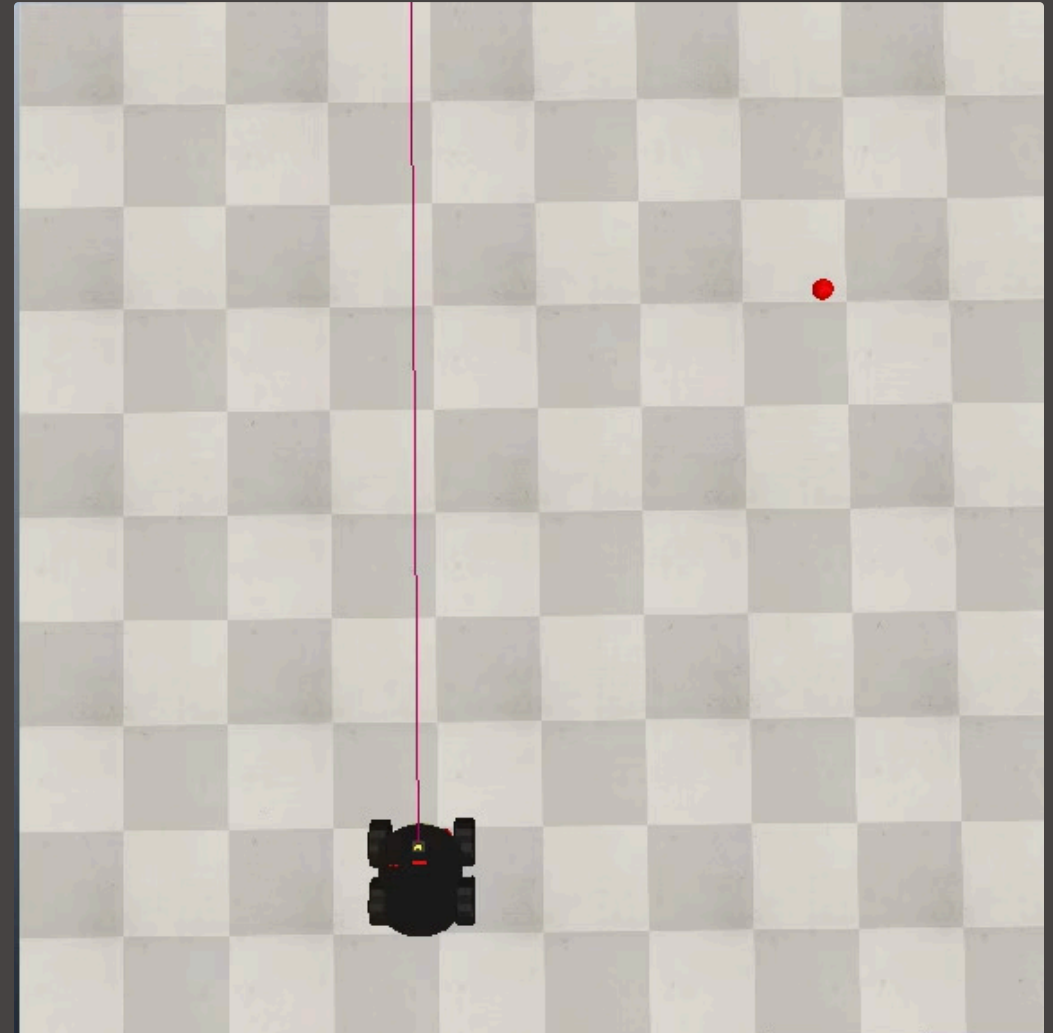
Implementação prática baseada em robôs VSSS e Pioneer



# Introdução ao Controle de Pose

O controle de pose refere-se à capacidade de um robô móvel de alcançar e manter uma posição e orientação específicas no espaço. Essa pose é definida por meio de três variáveis críticas:

- **$x, y$ :** coordenadas cartesianas que definem a posição do robô no plano
- **$\theta$  (theta):** ângulo de orientação em relação a um sistema de referência fixo



Na robótica móvel, o controle preciso de pose é fundamental para tarefas como navegação autônoma, seguimento de trajetórias, posicionamento em estações de trabalho e coordenação multi-robô. Sem um controle eficaz, o robô não consegue executar movimentos planejados nem interagir de forma confiável com seu ambiente.

# Modelo Cinemático do Robô Diferencial

## Configuração básica

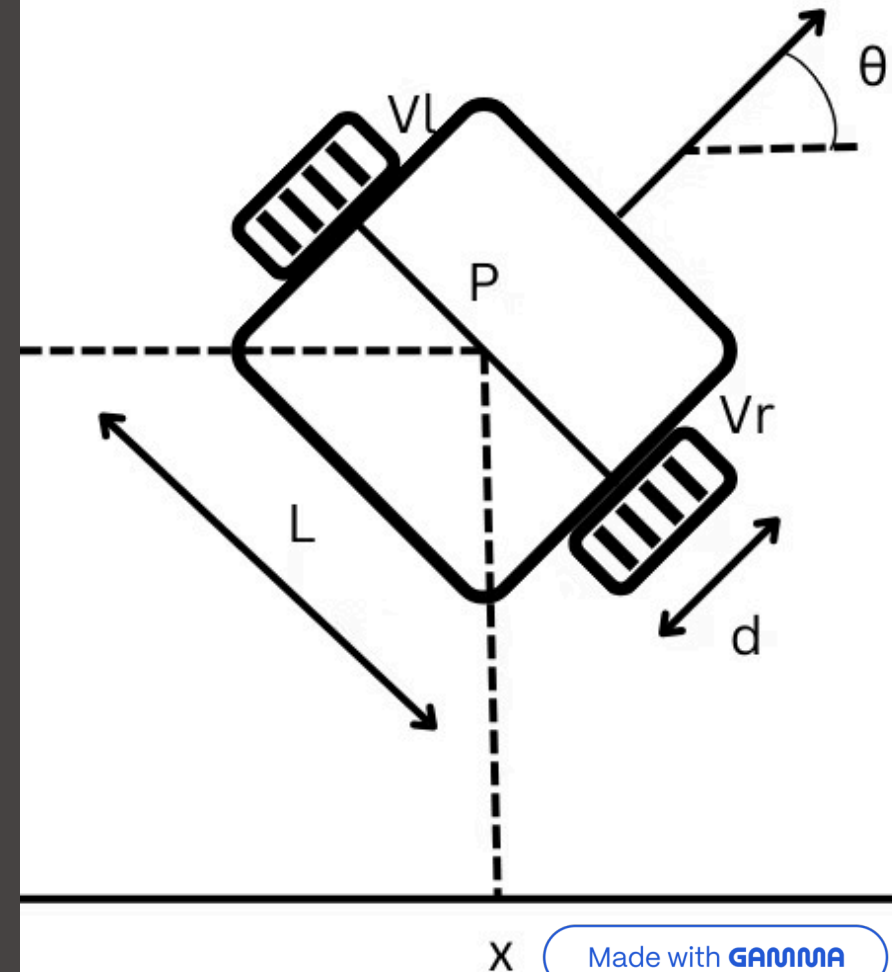
Um robô diferencial possui duas rodas independentes montadas sobre um eixo comum, cada uma controlada por seu próprio motor. Essa configuração permite o movimento através da variação das velocidades entre as rodas.

## Parâmetros geométricos

**L**: distância entre os centros das rodas (largura do eixo). **R**: raio de cada roda. Esses parâmetros são críticos para converter velocidades de translação e rotação em comandos de motor.

## Princípio de operação

Quando ambas as rodas giram à mesma velocidade, o robô avança em linha reta. Uma diferença de velocidades gera rotação em torno do centro geométrico do robô.

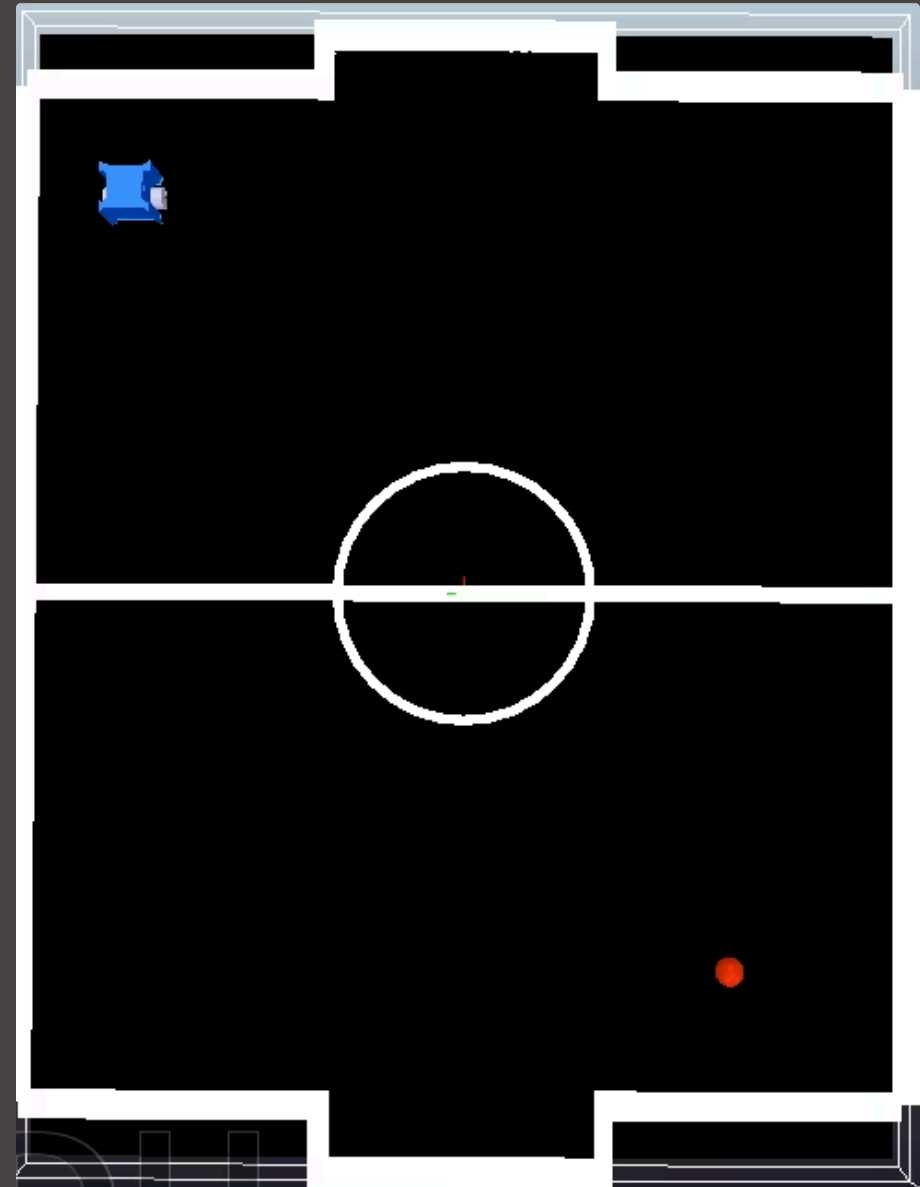


# Controle PID para Erro de Pose

## Erros a corrigir

O sistema de controle deve minimizar continuamente três tipos de erro:

- **Erro linear:** distância euclidiana entre a pose atual e a pose alvo
- **Erro angular:** diferença entre a orientação atual do robô e a direção para o alvo
- **Erro de orientação final:** diferença entre  $\theta$  atual e  $\theta$  desejado ao atingir o alvo



O controlador PID é ideal para esta aplicação porque combina resposta rápida (proporcional), eliminação de erro residual (integral) e suavidade no movimento (derivativo). Esta combinação permite que o robô convirja de forma estável para a pose desejada, compensando perturbações e dinâmicas não modeladas.

# Estrutura dos Controladores PID



## P para velocidade linear

Gera comandos de velocidade de translação com base no erro de distância ao objetivo. Reduz a velocidade conforme o robô se aproxima para evitar ultrapassagem.



## PID para velocidade angular

Controla a velocidade de rotação com base nos erros angulares. Permite ao robô orientar-se para o objetivo e alcançar a orientação final desejada.

### Termo Proporcional (P)

Produz uma resposta diretamente proporcional ao erro atual. Maior erro gera maior ação corretiva.

### Termo Integral (I)

Acumula o erro ao longo do tempo, eliminando desvios persistentes e erros de estado estacionário.

### Termo Derivativo (D)

Prevê a tendência do erro, amortecendo oscilações e proporcionando estabilidade ao sistema.

# Equações de Controle de Velocidade para Rodas

Os controladores PID geram velocidades de referência no espaço do robô (linear\_speed e angular\_speed). Estas devem ser convertidas em velocidades específicas para cada roda através das seguintes equações fundamentais:

Velocidade da roda direita ( $v_r$ )

$$v_r = \frac{(2 \cdot \text{linear\_speed}) + \text{angular\_speed} \cdot L}{2 \cdot R}$$

A roda direita aumenta sua velocidade quando o robô gira para a esquerda (angular\_speed positivo) e a diminui ao girar para a direita.

Velocidade da roda esquerda ( $v_l$ )

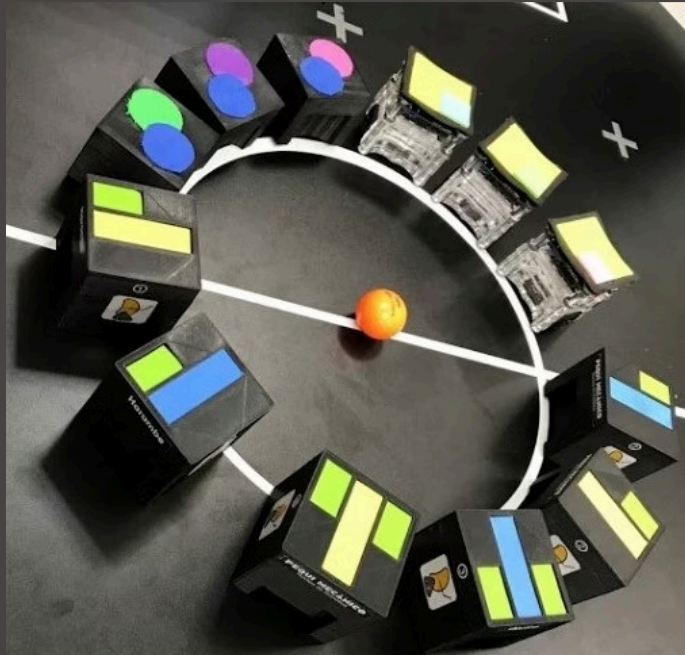
$$v_l = \frac{(2 \cdot \text{linear\_speed}) - \text{angular\_speed} \cdot L}{2 \cdot R}$$

A roda esquerda diminui sua velocidade quando o robô gira para a esquerda e a aumenta ao girar para a direita, criando o torque diferencial.

- ❏ **Parâmetros chave:** L representa a distância entre os centros das rodas (largura do eixo), enquanto R é o raio de cada roda. Estes valores geométricos são específicos de cada plataforma robótica e devem ser calibrados com precisão para garantir um controle exato.



# Robôs Utilizados na Implementação



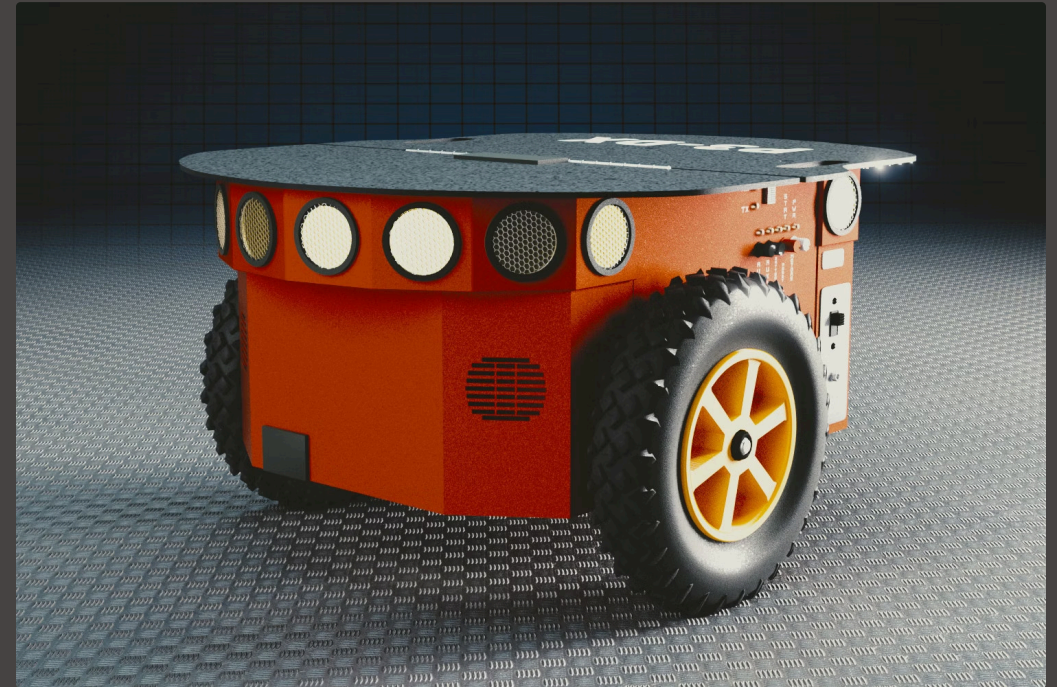
## Robôs VSSS

Os robôs da categoria Very Small Size Soccer são plataformas compactas projetadas para competições de futebol robótico.

Principais características:

- Dimensões reduzidas ( $\approx 8$  cm de diâmetro)
- Configuração diferencial de 2 rodas
- Alta manobrabilidade e velocidade
- Ideais para validar algoritmos de controle em tempo real

Ambas as plataformas permitem demonstrar a versatilidade do controlador PID, adaptando-se a diferentes escalas e dinâmicas mediante ajuste de parâmetros.



## Robô Pioneer

O Pioneer é uma plataforma móvel de pesquisa amplamente utilizada em laboratórios acadêmicos. Características:

- Configuração de 2 ou 4 rodas com tração diferencial
- Maior estabilidade e capacidade de carga
- Sensores integrados e arquitetura modular
- Excelente para testes de algoritmos robustos

# Integração do PID com o Modelo Diferencial

01

## Cálculo de erros

O sistema calcula continuamente os erros de posição, orientação e distância entre a pose atual e a pose objetivo desejada.

02

## Processamento PID

Cada controlador PID (linear e angular) processa seu respectivo erro aplicando os ganhos proporcional, integral e derivativo calibrados.

03

## Geração de velocidades

Os PIDs produzem os sinais de controle: **linear\_speed** (velocidade de translação) e **angular\_speed** (velocidade de rotação).

04

## Conversão cinemática

As velocidades são convertidas em comandos específicos para cada roda (vr e vl) usando as equações diferenciais que consideram os parâmetros L e R.

05

## Execução de comandos

Os motores de cada roda recebem suas consignas de velocidade, executando o movimento coordenado que aproxima o robô da pose objetivo.



# Resultados e Comportamento do Sistema



## Rastreamento de trajetória

O robô converge suavemente para a pose objetivo, demonstrando a característica redução progressiva do erro típica do controle PID bem ajustado.

## Vantagens observadas

- Movimentos suaves sem mudanças bruscas de direção
- Capacidade de compensar perturbações externas
- Precisão no posicionamento final
- Tempo de estabelecimento previsível

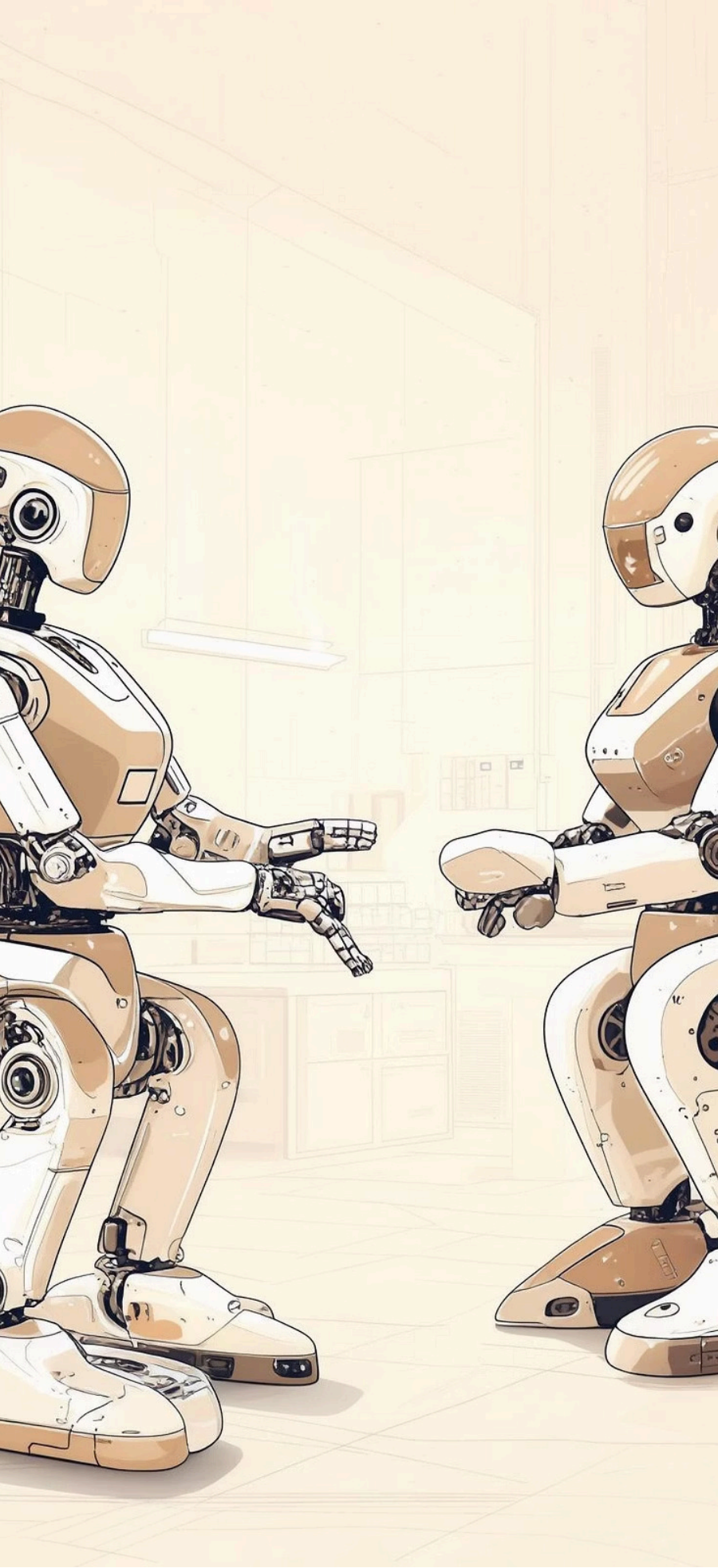


## Convergência ao objetivo

Os gráficos de erro vs. tempo mostram uma diminuição exponencial sem oscilações excessivas, indicando parâmetros PID adequadamente ajustados.

## Desafios de ajuste

- Requer calibração específica para cada robô
- Equilíbrio entre velocidade de resposta e estabilidade
- Sensibilidade a variações na superfície de rolagem



# Conclusões e Referências



## Eficácia comprovada

O controle PID demonstra ser uma solução robusta e prática para o controle de pose em robôs diferenciais, aplicável a diversas escalas e configurações.



## Implementação acessível

A simplicidade conceitual do PID e sua integração direta com o modelo cinemático diferencial facilitam a implementação em sistemas embarcados com recursos limitados.



## Versatilidade demonstrada

Validado com sucesso em plataformas VSSS e Pioneer, a abordagem é adaptável mediante ajuste de parâmetros a diferentes dinâmicas e requisitos de desempenho.

**Fundamentação acadêmica:** Todo o conteúdo apresentado é baseado no curso do Georgia Tech sobre controle de robôs móveis, disponível na seguinte lista de reprodução:

Control of Mobile Robots - Georgia Tech