

# **Desenvolvimento de uma controladora de baixo custo para um robô manipulador didático baseada em sistema microcontrolado**

Proponente:

**Erick Nathan Martins Alves**

Orientador:

**Prof. Dr. Renato de Sousa Dâmaso**

Coorientador:

**Prof. Dr. Alan Mendes Marotta.**

O presente trabalho tem como objetivo projetar e desenvolver uma controladora para o manipulador robótico de 5 GDL e uma garra presente no laboratório de robótica: o ED-7255. O modelo educacional a ser utilizado possui uma controladora nativa, porém com recursos limitados e que vinha acumulando erros de posicionamento. Propõe-se então a implementação de um sistema de controle independente por junta, com a utilização de processamento paralelo baseado em sistema microcontrolado. Assim, pretende-se aproveitar a estrutura e construção mecânica do robô, buscando melhorias e uma maior variedade de recursos, como a possibilidade de uma IHM moderna, conexão *wireless* e até mesmo uma programação aberta, em linguagens de alto nível e de propósito geral, como o *Python*, por exemplo. Visando um *hardware* compacto, de baixo custo e eficiente, serão utilizados microcontroladores como o PIC, ESP32 ou até mesmo o *Raspberry Pi*, possibilitando a implementação dos modos de programação pretendidos: manual ou automático. O desenvolvimento abordará a obtenção dos modelos cinemáticos direto e inverso do manipulador, além do controle de posição dos motores CC presentes no modelo utilizado, a fim de implementar uma biblioteca que encapsulará as funções de movimentação do robô, de modo similar ao utilizado em controladoras industriais

**Palavras-chave:** Robótica industrial; Controle independente por junta; Sistemas microcontrolados; Modelos didáticos; Processamento paralelo.

**Indicação da(s) grande(s) área(s):**

- ☒ Eletrônica;
- ☒ Computação;
- ☒ Controle;
- ☐ Mecânica.

Divinópolis, 6 de novembro de 2023.

# 1 Apresentação do Problema

A robótica é um campo relativamente novo de tecnologia moderna que atravessa os limites da engenharia. Compreender a complexidade dos robôs e suas aplicações requerem conhecimentos de engenharia elétrica, engenharia mecânica, sistemas e engenharia industrial, ciência da computação, economia e matemática. Novas disciplinas de engenharia, como engenharia de produção, engenharia de aplicações e engenharia do conhecimento surgiram para lidar com a complexidade do campo da robótica e da automação industrial [1].

Nesse âmbito, os modelos robóticos educacionais têm sido amplamente difundidos e utilizados com o objetivo de viabilizar o estudo da robótica nas universidades e centros de ensino. A vantagem de plantas e protótipos é a possibilidade de aplicar na prática os conhecimentos vistos, através de dispositivos mecatrônicos que possuem funcionamento similar aos manipuladores industriais comerciais.

Dessa forma, é possível o estudo de princípios cinemáticos e dinâmicos do robô, bem como a programação dos mesmos, sem a exigência de se possuir modelos renomados, como os da *Comau*, *Kuka* ou *ABB*, por exemplo. Outrossim, os fabricantes citados possuem lógica de controle fechada e protegida sob direitos autorais, não sendo possível modificá-los ou visualizá-los. Nesse aspecto, os modelos didáticos podem ser mais flexíveis e, além de possibilitar uma implementação de mais baixo nível (livre e de total controle), pode servir ainda como um intermédio para o avanço no campo da robótica, ou seja, um estudo mais detalhado a cerca do controle do robô para, posteriormente, iniciar os trabalhos em um robô fechado e utilizado em meio industrial.

O modelo educacional *ED-7255* presente no laboratório de robótica do CEFET-MG de Divinópolis, mostrado na Figura 1, encontra-se subaproveitado, em virtude de defeitos elétricos. Em um primeiro momento, há a necessidade de realizar a manutenção do atuador. Foi sugerido ainda, o desenvolvimento de uma controladora com o objetivo de corrigir alguns problemas observados no modelo, como a instabilidade do controle de posição, bem como a baixa precisão e repetibilidade. Ademais, será vantajoso a inserção de novas características ao projeto, como a ampliação e modernização da IHM (Interface Homem Máquina) e conectividade, visando um ganho de possibilidades e recursos didáticos oferecidos pelo sistema.

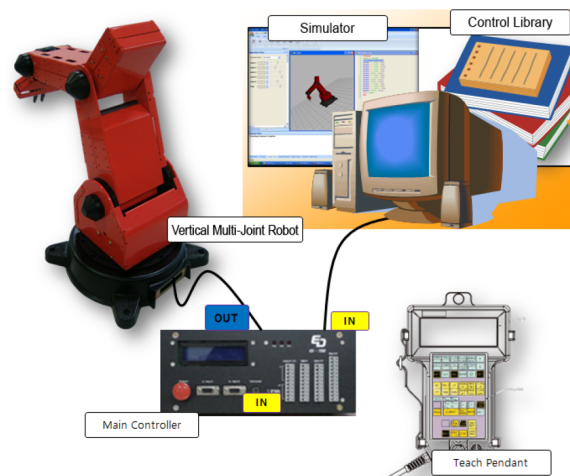


Figura 1: Modelo educacional ED-7255 e seus componentes.

Em 1934, Hazen, que introduziu o termo servomecanismos para sistemas de controle de posição, discutiu o projeto de servomecanismos a relé, capazes de acompanhar uma variação de entrada com acurácia. Durante a década de 1940, métodos de resposta em frequência (especialmente os métodos com base nos diagramas de Bode) possibilitaram aos engenheiros projetar sistemas de controle linear de malha fechada que satisfizessem o desempenho requerido. Muitos sistemas de controle industrial das décadas de 1940 e 1950 usavam controladores PID no controle de posição, pressão, temperatura etc [2].

Propõe-se portanto, a partir das ferramentas supracitadas, a implementação de um servomecanismo com controle PID independente por junta, visando uma resposta mais estável e com maior acurácia, com a sintonia dos controladores individualmente, a partir da comparação de modelos caixa cinza e caixa preta e a seleção do melhor desempenho para aplicar ao sistema proposto.

## 1.1 Objetivos da Pesquisa

O objetivo principal é o desenvolvimento de um sistema de controle para o manipulador robótico em questão, retomando conceitos de eletrônica, robótica, sistemas digitais e controle, com a finalidade de aprimorar a controladora original em aspectos como: acurácia, repetibilidade, recursos disponíveis para o aprendizado, interface homem-máquina e até mesmo propor um sistema/técnica de controle distinto do empregado nativamente no modelo.

São objetivos específicos:

- Garantir o pleno funcionamento do manipulador (mecânica e elétrica);
- Obter os modelos cinemáticos do ED-7255;
- Obter os modelos caixa cinza dos motores CC;
- Projetar, sintonizar e simular os controladores PID;
- Projetar e desenvolver as unidades de controle microcontroladas independentes;
- Projetar e desenvolver a unidade central e controladora como um todo;
- Finalizar a implementação com a parte de *software*, programação e IHM.

## 2 Metodologia de Trabalho

Assim como todo sistema robótico, a estruturação do modelo educacional deve possuir esquema de componentes e sentido de comunicação conforme Figura 2 [1].

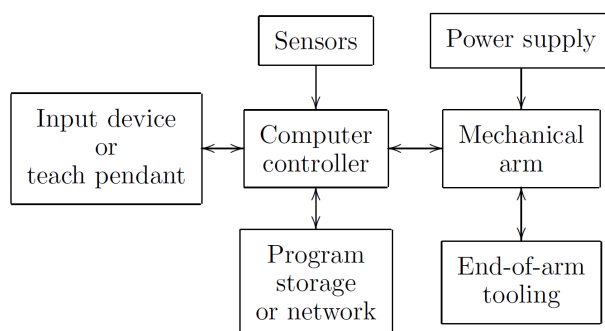


Figura 2: Componentes de um sistema robótico.

Após a realização da manutenção do manipulador, o braço mecânico, sensores e atuadores estarão prontos para uso e passa-se então para a implementação proposta no trabalho: a controladora, que envolve o dispositivo de entrada (IHM), a fonte de alimentação, a parte eletrônica e o controlador, a ser implementado em um microcontrolador.

Faz-se necessária a obtenção dos modelos cinemáticos direto e inverso do robô, a partir das formulações de Denavit Hartenberg, composição dos diagramas e tabelas e consequente extração das matrizes de transformação homogêneas. Ainda no campo de cinemática e modelagem diferencial, utiliza-se o jacobiano de velocidades para que, associado a um processo de planejamento e geração de trajetória, o servomecanismo do robô possa ser implementado na unidade central de processamento.

A malha de controle a ser implementada segue o padrão mostrado na Figura 3, em que a entrada é a referência de trajetória desejada, o compensador é o controlador PID a ser desenvolvido que passa por um módulo de potência para acionamento dos motores, o distúrbio é inerente ao sistema e pode ser proveniente de folgas e falhas na construção mecânica, bem como de ruídos dos sensores. O sinal de cada motor entra na planta (braço robótico) e a posição é realimentada na malha através dos sensores de posição absolutos presentes no modelo utilizado.

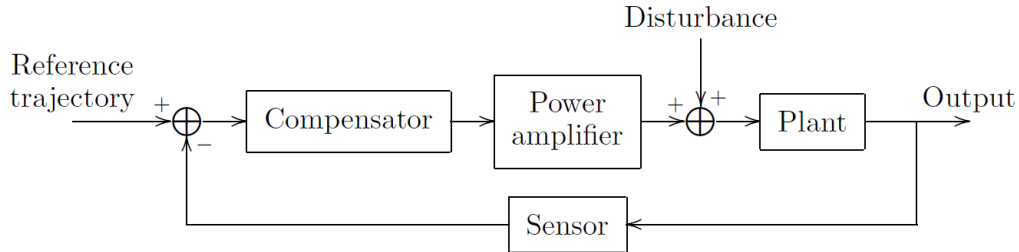


Figura 3: Diagrama da malha fechada de controle do atuador.

A obtenção dos modelos matemáticos para os motores serão dados a partir de ensaios a vazio (plena tensão e corrente nominais) e de rotor bloqueado (ensaio de *stall*) dos motores, a fim de obter os parâmetros dos motores conforme modelagem proposta no circuito equivalente da Figura 4 [2].

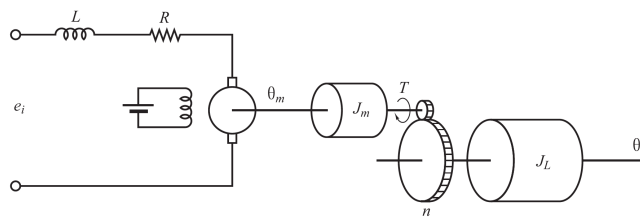


Figura 4: Circuito equivalente de um motor de corrente contínua e redução mecânica do atuador.

A partir do diagrama, circuito equivalente e ensaios citados, obtêm-se os modelos matemáticos e sintonia dos controladores PID para seguimento de referência e rejeição de distúrbio, mediante os requisitos de projeto a serem estabelecidos. Para simulação do sistema, será utilizada a biblioteca *Python Control*. Graças à técnica do controle independente por junta, é possível fracionar um sistema MIMO em alguns subsistemas SISO, de forma que a referência seja gerada por uma unidade de processamento central e repassada a cada sub-circuito que será responsável pelo controle cada junta individualmente.

De posse dos controladores e modelos desejados, segue o projeto e desenvolvimento da parte eletrônica, incluindo a fonte de alimentação adequada para o *hardware* a ser utilizado; os módulos de controle e potência individuais para cada motor, baseados em um microcontrolador de menor porte, a citar um modelo como o PIC10F200, por exemplo; e a unidade central, que possivelmente será baseada em um microcontrolador com mais recursos embutidos, como a presença de *Wi-Fi* e um poder de processamento consideravelmente superior, uma vez que, os cálculos de cinemática e trajetória serão realizados nele e a comunicação com os sub-circuitos será realizada via protocolo *i2C*.

Posteriormente, inicia-se a fase de programação e implementação do *software*, que envolve a programação de cada um dos controladores discretizados nos sub-sistemas e a codificação do microcontrolador central. Os modelos de comunicação aberta baseados em arranjos Cliente-Servidor, assim como o *C5G-Open* [3] [4] [5] serão utilizadas como referência para a programação das funcionalidades do robô, como funções de movimentação automáticas, registro de posições, movimentação em coordenadas cartesianas e em modo angular (*joint*), possibilidade de controle via código externo, TP (*Teach Pendant*) e ainda a possibilidade de monitoramento de posição em tempo real e trajetórias, a fim de gerar curvas que possam ser utilizadas para estudo da robótica em meio acadêmico.

### 3 Resultados e Impactos Esperados

Ao final do trabalho espera-se obter uma controladora com todos os dispositivos e sistemas necessários para realizar o controle dos motores CC presentes no manipulador ED-7255, de forma a viabilizar a retomada da utilização desse modelo didático nas aulas de robótica, com uma possível contribuição na melhoria de desempenho dos controladores ou, minimamente contribuir com a inserção de novos recursos e possibilidades para a aproximação entre o aluno e a robótica, tanto em nível técnico quanto graduação.

### 4 Recursos e Infraestrutura Necessários

O presente trabalho deverá ser desenvolvido, em sua maioria, no laboratório de robótica. Alguma parte específica pode envolver a necessidade de recursos presentes nos laboratórios de eletrônica, protótipos e de automação industrial. Parte dos materiais a serem utilizados já se encontram no laboratório de robótica, enquanto que outros serão custeados pelo próprio proponente do trabalho. A mão de obra empregada no trabalho será oriunda exclusivamente do aluno e possíveis auxílios dos orientadores, uma vez que, todos os ensaios, confecção de placas e parte estrutural serão realizados no próprio campus do CEFET-MG.

### 5 Referências

- [1] M. Spong, S. Hutchinson, and M. Vidyasagar, *Robot Modeling and Control*. Wiley, 2005.
- [2] K. Ogata, *Engenharia de Controle Moderno*. Pearson Education, 5 ed., 2010.
- [3] T. O. Campagnani and R. S. Dâmaso, “Arranjo cliente servidor para um robô industrial com controladora aberta,” *SBAI*, 2021.
- [4] Comau, “Comau open controller - c5g,” 2019.
- [5] G. Antonelli, S. Chiaverini, V. Perna, and F. Romanelli, “A modular and task-oriented architecture for open control system: the evolution of c5g open towards high level programming,” *ICRA*, pp. 30–37, 2010.

## Plano de Trabalho

**1. Objetivos das Atividades:** Projeto e desenvolvimento de ferramentas e mecanismos mecatrônicos de baixo custo para controle de um manipulador robótico educacional, com controle independente por junta, baseado em sistema microcontrolado e interface *IOT*.

### 2. Descrição das Atividades:

1.1 Revisão e manutenção eletromecânica do ED-7255.

2.1 Obtenção dos modelos cinemáticos do manipulador.

2.2 Planejamento e geração de trajetória: Formulação matemática e simulação da movimentação do robô.

3.1 Modelagem dos atuadores: ensaios, obtenção de parâmetros e simulação.

3.2 Projeto e sintonia dos controladores PID e simulação via *Python Control*.

4.1 Unidade de controle individual: projeto, desenvolvimento eletrônico e testes.

4.2 Unidade central e de potência: projeto, desenvolvimento eletrônico e testes.

5.1 Implementação do *software*: programação, protocolos de comunicação e IHM.

6.1 Comparação e divulgação dos resultados: publicação de artigo e apresentação em congressos e eventos da área.

### 3. Cronograma de Atividades:

| Atividade (↓) Mês.(→) | 1º | 2º | 3º | 4º | 5º | 6º | 7º | 8º | 9º | 10º | 11º | 12º |
|-----------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|
| 1.1                   | ✓  |    |    |    |    |    |    |    |    |     |     |     |
| 2.1                   |    | ✓  | ✓  |    |    |    |    |    |    |     |     |     |
| 2.2                   |    |    | ✓  | ✓  |    |    |    |    |    |     |     |     |
| 3.1                   |    |    |    | ✓  | ✓  |    |    |    |    |     |     |     |
| 3.2                   |    |    |    |    | ✓  | ✓  |    |    |    |     |     |     |
| 4.1                   |    |    |    |    |    | ✓  | ✓  |    |    |     |     |     |
| 4.2                   |    |    |    |    |    |    | ✓  | ✓  |    |     |     |     |
| 5.1                   |    |    |    |    |    |    |    | ✓  | ✓  | ✓   |     |     |
| 6.1                   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     | ✓   | ✓   |

Tabela 1: Cronograma de atividades.

**4. Local de Desenvolvimento das Atividades:** Laboratório de robótica, laboratório de eletrônica, laboratório de automação industrial e laboratório de protótipos (*maker*).

### 5. Metodologia de Acompanhamento:

O trabalho será realizado sob tutela do orientador e supervisão do coorientador. Os encontros para discussão e tutoria terão frequência semanal e apresentação dos resultados mensalmente, assim como a avaliação do andamento do trabalho em conformidade com o cronograma de atividades.



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL  
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS  
CAMPUS DIVINÓPOLIS  
Coordenação de Curso de Graduação em Engenharia Mecatrônica

### **Termo de Compromisso de Orientação**

Eu, professor Dr. Renato de Sousa Dâmaso professor lotado no Departamento de Engenharia Mecatrônica - DEMDV concordo em orientar o discente Erick Nathan Martins Alves em seu trabalho de conclusão de curso cujo título é Desenvolvimento de uma controladora de baixo custo para um robô manipulador didático baseada em sistema microcontrolado.

*Renato Damaso*

---

**Assinatura do Professor Orientador**