

INSTITUTO FEDERAL DO SERTÃO PARAIBANO
CAMPUS CAJAZEIRAS

ERIC QUEIROGA DA SILVA

***RETROFIT TECNOLÓGICO DE UM MANIPULADOR ROBÓTICO
INDUSTRIAL APLICADO AO ENSINO DE ENGENHARIA***

Cajazeiras-PB
2026

ERIC QUEIROGA DA SILVA

***RETROFIT* TECNOLÓGICO DE UM MANIPULADOR ROBÓTICO
INDUSTRIAL APLICADO AO ENSINO DE ENGENHARIA**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Coordenação do Curso de Engenharia de Controle e Automação do Instituto Federal do Sertão Paraibano-*Campus* Cajazeiras, como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Controle e Automação sob Orientação do Prof. Raphaell Maciel de Sousa e Coorientação do Prof. Fábio Araújo de Lima.

Cajazeiras-PB
2026

IFPB / Campus Cajazeiras
Coordenação de Biblioteca
Biblioteca Prof. Ribamar da Silva
Catalogação na fonte: Cícero Luciano Félix CRB-15/750

S586r Silva, Eric Queiroga da.
Retrofit tecnológico de um manipulador robótico industrial aplicado ao ensino de engenharia / Eric Queiroga da Silva.– 2026.

19f. : il.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Controle e Automação) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, Cajazeiras, 2026.

Orientador(a): Prof. Raphael Maciel de Sousa.
Coorientador(a): Prof. Fábio Araújo de Lima.

1. Controle automático. 2. Manipulador tecnológico. 3. Controle PID. 4. Sistema embarcado. I. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba. II. Título.


ERIC QUEIROGA DA SILVA

**RETROFIT TECNOLÓGICO DE UM MANIPULADOR ROBÓTICO
INDUSTRIAL APLICADO AO ENSINO DE ENGENHARIA**


Trabalho de Conclusão de Curso, sob forma de artigo, submetido à Coordenação do Curso de Engenharia de Controle e Automação do Instituto Federal do Sertão Paraibano, *Campus* Cajazeiras, como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Controle e Automação.

Aprovado em 17 de abril de 2026.


BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 **RAPHAELL MACIEL DE SOUSA**
Data: 07/05/2026 10:51:57-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Raphaell Maciel de Sousa – IFPB-*Campus* Cajazeiras
Orientador

Documento assinado digitalmente
 **FABIO ARAUJO DE LIMA**
Data: 07/05/2026 09:29:01-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Fábio Araújo de Lima – IFPB-*Campus* Cajazeiras
Coorientador

Documento assinado digitalmente
 **LEANDRO HONORATO DE SOUZA SILVA**
Data: 06/05/2026 16:21:35-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Leandro Honorato de Sousa Silva – IFPB-*Campus* Cajazeiras
Examinador 1

ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

Artigo apresentado à coordenação do curso como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Controle e Automação,

RETROFIT TECNOLÓGICO DE UM MANIPULADOR ROBÓTICO INDUSTRIAL APLICADO AO ENSINO DE ENGENHARIA

ERIC QUEIROGA DA SILVA
eric.queiroga@academico.ifpb.edu.br
RAPHAELL MACIEL DE SOUSA
raphaell.maciel@academico.ifpb.edu.br
FÁBIO ARAÚJO DE LIMA
fabio.araujo@academico.ifpb.edu.br

RESUMO

A crescente demanda por plataformas experimentais no ensino de Engenharia de Controle e Automação evidencia a necessidade de soluções acessíveis para atividades práticas, enquanto o alto custo de novos manipuladores robóticos e a obsolescência dos sistemas de controle tornam muitos equipamentos mecanicamente operacionais inutilizados em laboratórios didáticos. Nesse contexto, este trabalho tem como objetivo realizar o retrofit tecnológico de um manipulador robótico industrial de quatro eixos, visando sua aplicação como plataforma didática de baixo custo. A proposta consiste na atualização dos sistemas de controle e acionamento utilizando microcontroladores ESP32 com comunicação via protocolo ESP-NOW, além da reestruturação do cabeamento elétrico, implementação de um painel de segurança, desenvolvimento de uma placa de circuito impresso (PCB) e embarque de um controlador PID digital para a rotina de *homing*. A metodologia é de natureza aplicada e experimental, envolvendo a modernização do sistema e a avaliação de desempenho por meio de ciclos repetidos de reposicionamento. Os resultados demonstraram elevada precisão e repetibilidade, com resolução angular de $0,18^\circ$ por contagem e comportamento estável, evidenciando a eficácia do retrofit como solução robusta, modular e de baixo custo para ensino e pesquisa

Palavras-Chave: *retrofit* tecnológico; manipulador robótico; controle PID; sistemas embarcados; engenharia de controle e automação.

ABSTRACT

The growing demand for experimental platforms in Control and Automation Engineering education highlights the need for accessible solutions for practical activities, while the high cost of new robotic manipulators and the obsolescence of control systems render many mechanically operational devices unusable in educational laboratories. In this context, this work aims to perform the technological retrofit of a four-axis industrial robotic manipulator, with the goal of applying it as a low-cost educational platform. The proposed approach consists of updating the control and drive systems using ESP32 microcontrollers with communication via the ESP-NOW protocol, in addition to restructuring the electrical wiring, implementing a safety panel, developing a printed circuit board (PCB), and embedding a digital PID controller for the *homing* routine. The methodology is applied and experimental in nature, involving system modernization and performance evaluation through repeated repositioning cycles. The results demonstrated high precision and repeatability, with an angular resolution of 0.18° per count and stable behavior, highlighting the effectiveness of the retrofit as a robust, modular, and low-cost solution for teaching and research.

Keywords: technological *retrofit*; robotic manipulator; PID control; embedded systems; control and automation engineering.

1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda por recursos experimentais na área de Engenharia de Controle e Automação evidencia a necessidade de plataformas robóticas atualizadas que auxiliem os docentes nas atividades práticas de aprendizado. Entretanto, o alto custo de aquisição de novos equipamentos ainda limita sua implementação em diversas instituições de ensino (Lyman; Wilcox; Sanford, 2019).

Paralelamente, muitos manipuladores robóticos industriais antigos, utilizados em fábricas ou laboratórios, permanecem mecanicamente operacionais, porém tecnologicamente defasados devido à obsolescência de seus sistemas de controle e acionamento. Diante disso, surge a seguinte questão de engenharia: é possível modernizar esses sistemas por meio de técnicas de *retrofit* tecnológico, tornando-os novamente úteis como plataformas didáticas para o ensino de Engenharia de Controle e Automação?

Nesse contexto, o *retrofit* tecnológico torna-se uma alternativa viável para a modernização e o reaproveitamento desses equipamentos, permitindo a atualização dos sistemas eletrônicos e de controle sem a necessidade de substituição completa da estrutura mecânica do robô (Pereira *et al.*, 2012). Além de reduzir custos de infraestrutura laboratorial, essa abordagem contribui para ampliar o acesso a plataformas experimentais utilizadas em atividades de ensino e pesquisa.

Dessa forma, este trabalho tem como objetivo realizar o *retrofit* tecnológico de um manipulador robótico industrial legado, por meio da atualização dos sistemas eletrônicos, reorganização estrutural e implementação de uma nova arquitetura de controle baseada em sistemas embarcados, visando avaliar sua viabilidade como plataforma didática para o ensino, pesquisa e desenvolvimento em Engenharia de Controle e Automação. Para atingir esse objetivo, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- - Modernizar o sistema de controle do manipulador por meio da implementação de uma arquitetura distribuída baseada em microcontroladores ESP32 e protocolo ESP-NOW;
- - Realizar manutenção preventiva e corretiva nos componentes do braço robótico, abrangendo a reorganização da fiação elétrica, dimensionamento e substituição de correias de transmissão;
- - Desenvolver um painel elétrico de acionamento, contemplando botão de emergência com contator e sinalização por LEDs;
- - Desenvolver e embarcar um controlador PID digital para a execução da rotina de reposicionamento (*homing*) dos eixos do robô;
- - Avaliar a repetibilidade e a precisão do sistema por meio de ciclos repetidos de *homing* e análise estatística dos erros de posicionamento;
- - Avaliar o manipulador modernizado como plataforma didática multidisciplinar, demonstrando sua aplicabilidade prática no contexto do curso de Engenharia de Controle e Automação.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Esta seção apresenta os fundamentos conceituais que embasam o trabalho, incluindo *retrofit* tecnológico e sua relação com a Indústria 4.0, manipuladores robóticos e seus sistemas de acionamento. Também são abordados os princípios de controle em malha fechada, com ênfase em controladores PID, além de sistemas embarcados, comunicação sem fio, normas de

segurança e conceitos de precisão e repetibilidade. Essa revisão sustenta as decisões metodológicas e a análise dos resultados.

2.1 *RETROFIT* TECNOLÓGICO E INDÚSTRIA 4.0

O retrofit tecnológico consiste na modernização de equipamentos por meio da incorporação de componentes eletrônicos, sensores e sistemas de controle, sem a substituição da estrutura mecânica (Oliveira, 2007). Essa abordagem apresenta menor custo em relação à aquisição de novos equipamentos, sendo especialmente relevante em instituições de ensino com limitações orçamentárias (Lyman; Wilcox; Sanford, 2019).

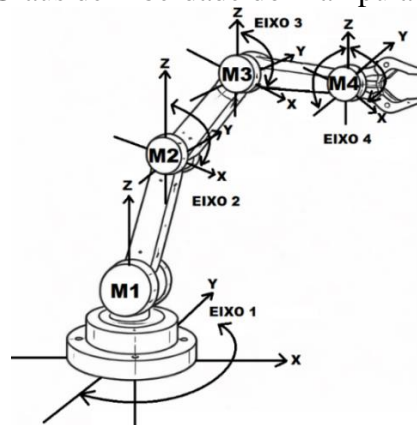
Nesse contexto, permite o reaproveitamento de sistemas mecanicamente operacionais, porém tecnologicamente defasados, por meio da atualização do hardware de controle, dos sistemas de acionamento e da arquitetura de comunicação, ampliando o acesso a plataformas experimentais (Pereira et al., 2012).

Em geral, as intervenções concentram-se nos sistemas eletrônicos e de controle, mantendo a estrutura mecânica original. No contexto educacional, o retrofit permite adaptar equipamentos legados às demandas atuais de ensino por meio da integração de tecnologias digitais, como comunicação sem fio e aquisição de dados em tempo real, favorecendo atividades práticas em laboratório (Etz; Brantner; Kastner, 2020; Urso et al., 2020). Assim, contribui para a modernização de recursos didáticos. No presente trabalho, esse processo é exemplificado pelo retrofit de um manipulador robótico, evidenciando a transição de um equipamento obsoleto para uma plataforma funcional (Figura 5).

2.2 MANIPULADORES ROBÓTICOS E ACIONAMENTOS ELÉTRICOS

A literatura especializada define um robô manipulador como um dispositivo mecânico programável capaz de realizar movimentos semelhantes aos de um braço humano, sendo composto por diferentes articulações e elos que possibilitam a execução de movimentos complexos com precisão e repetibilidade (Craig, 2005). Essa definição fundamenta a compreensão da estrutura sobre a qual se aplicam técnicas de modernização e controle, uma vez que manipuladores robóticos são amplamente utilizados tanto em aplicações industriais quanto em ambientes de ensino e pesquisa, assim nesse contexto a Figura 1 apresenta os graus de liberdade e elos que compõem o manipulador robótico.

Figura 1 - Graus de Liberdade do Manipulador Robótico



Fonte: Autor (2026)

No que se refere ao acionamento desses sistemas, os motores de passo destacam-se como uma das soluções mais empregadas em aplicações que exigem controle preciso de posicionamento e velocidade. Franchi (2008) destaca que o desempenho desses sistemas é

diretamente influenciado pela evolução da eletrônica de potência e pelas técnicas de controle empregadas, sendo fundamental a escolha adequada dos *drivers* de potência para garantir eficiência energética e confiabilidade operacional.

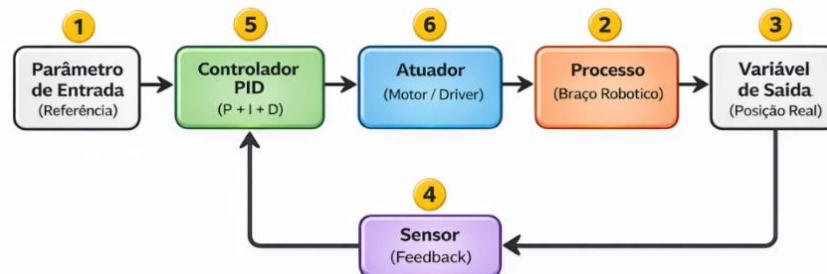
Um dos principais desafios na área de robótica industrial, conforme apontado por Bomfim (2013), é a adoção de arquiteturas de controle fechadas pelos fabricantes, o que inviabiliza a intercambialidade de componentes e gera dependência técnica para reparos e modificações. Essa característica torna os equipamentos legados particularmente difíceis de manter e modernizar, uma vez que os sistemas de controle originais frequentemente não podem ser facilmente substituídos ou adaptados para incorporar novas tecnologias.

2.3 SISTEMAS DE CONTROLE EM MALHA FECHADA E CONTROLADORES PID

Os sistemas de controle podem ser classificados fundamentalmente em malha aberta e malha fechada. De acordo com Groover (2011, p. 63), os sistemas de controle em malha fechada, também denominados sistemas de controle por realimentação, são aqueles em que "a variável de saída é comparada a um parâmetro de entrada, sendo a diferença entre eles utilizada para ajustar a saída de modo a atender ao valor desejado". O autor destaca ainda que um sistema de malha fechada é composto por seis elementos básicos: (1) parâmetro de entrada, (2) processo, (3) variável de saída, (4) sensor de realimentação, (5) controlador e (6) atuador.

Entre as estratégias de controle mais amplamente utilizadas em sistemas de posicionamento, destaca-se o controlador PID (Proporcional-Integral-Derivativo), cuja popularidade se deve à sua simplicidade conceitual de ensino e aplicação, se destacando por sua eficácia em uma ampla gama de aplicações e facilidade de implementação em sistemas embarcados, sendo apresentado na Figura 2, onde o fluxograma corresponde ao processo de malha fechada aplicada no manipulador robótico.

Figura 2 – Fluxograma de Controle em Malha Fechada



Fonte: Autor (2026)

O controlador PID contínuo é matematicamente descrito pela Equação 1, onde $C(s)$ representa a função de transferência do controlador no domínio de Laplace e s é a variável complexa.

$$C(s) = Kp + \frac{Ki}{s} + Kd \cdot s \quad (1)$$

O termo proporcional Kp responde ao erro atual, o termo integral Ki atua sobre o acúmulo de erros passados, eliminando o erro em regime permanente, enquanto o termo derivativo Kd antecipa tendências futuras do erro com base em sua taxa de variação, contribuindo para a estabilidade do sistema (Nise, 2011; Ogata, 2010).

Para a análise teórica de sistemas eletromecânicos, como os manipuladores robóticos, é comum adotar um modelo rotacional simplificado de segunda ordem. Considerando a inércia equivalente J e o coeficiente de atrito viscoso B , a dinâmica de cada junta pode ser descrita pela Equação 2.

$$J\ddot{\theta}(t) + B\dot{\theta}(t) = \tau(t) \quad (2)$$

Aplicando a Transformada de Laplace com condições iniciais nulas, obtém-se a função de transferência em malha aberta apresentada na Equação 3.

$$G(s) = \frac{1}{Js^2 + Bs} \quad (3)$$

Nise (2011) e Ogata (2010) destacam que a resposta transitória de sistemas de segunda ordem pode ser caracterizada por parâmetros como frequência natural ω e coeficiente de amortecimento ζ , que determinam o comportamento dinâmico do sistema, incluindo o tempo de subida, sobre-elevação e tempo de acomodação. A função de transferência de segunda ordem padrão é expressa pela Equação 4.

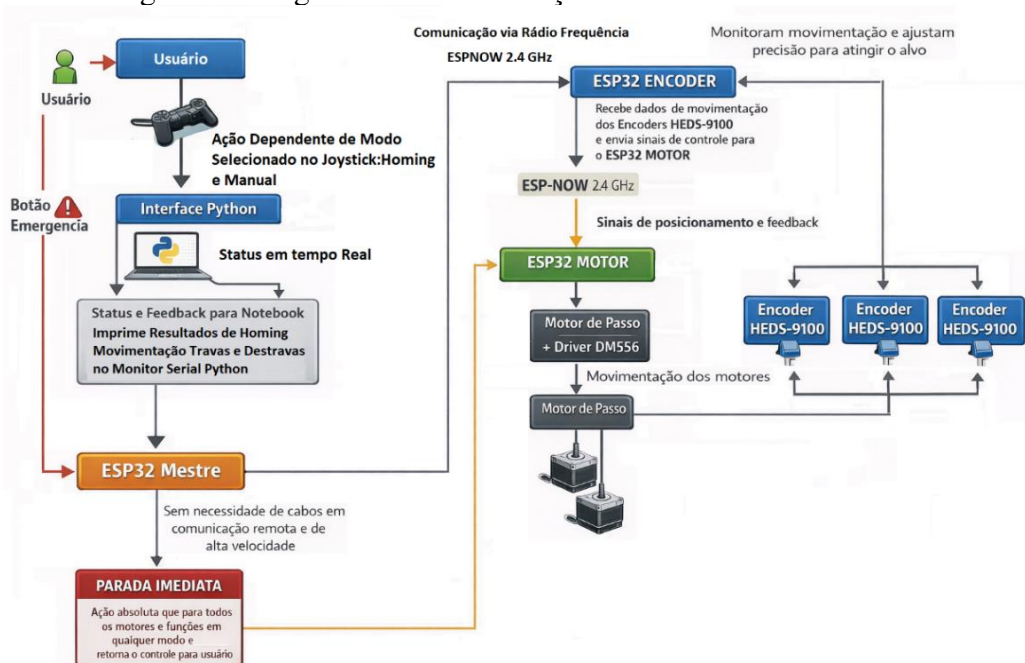
$$G_{eq} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (4)$$

Em aplicações que priorizam estabilidade e segurança operacional, como em ambientes educacionais, de pesquisa e experimentação, são frequentemente preferidas respostas criticamente amortecidas ($\zeta = 1$) ou superamortecidas ($\zeta > 1$), pois evitam oscilações e sobre-elevação excessiva durante o posicionamento.

2.4 SISTEMAS EMBARCADOS E COMUNICAÇÃO SEM FIO

A implementação de sistemas de controle modernos em equipamentos submetidos a processos de *retrofit* frequentemente envolve a utilização de sistemas embarcados. Marwedel (2011) define esses sistemas como estruturas computacionais especializadas que integram *hardware* e *software* para executar funções específicas dentro de um sistema maior, sendo amplamente aplicados em contextos industriais devido à sua eficiência, confiabilidade e capacidade de operação em tempo real. Nesse contexto, a Figura 3 apresenta a arquitetura de comunicação adotada no sistema desenvolvido.

Figura 3 - Diagrama de Comunicação via Protocolo ESP-NOW



Fonte: Autor (2026)

No âmbito da Indústria 4.0, a comunicação entre dispositivos embarcados torna-se um requisito fundamental para a integração em ambientes de manufatura inteligente. A adoção de arquiteturas sem fio permite maior flexibilidade, modularidade e redução da complexidade de cabeamento, facilitando a expansão das funcionalidades do sistema (Etz; Brantner; Kastner, 2020).

Protocolos de comunicação de baixa potência e baixa latência, como o ESP-NOW, são adequados para sistemas embarcados distribuídos. O ESP-NOW é um protocolo proprietário da Espressif que permite comunicação direta entre dispositivos ESP32 via rádio frequência, sem necessidade de rede Wi-Fi convencional. Essa abordagem reduz a latência e simplifica a arquitetura do sistema. Neste trabalho, foi utilizado para a troca de dados entre os módulos de controle e aquisição, permitindo a transmissão de sinais de posicionamento e feedback em tempo real.

2.5 NORMAS E SEGURANÇA EM SISTEMAS ROBÓTICOS

A segurança operacional é um aspecto fundamental em sistemas robóticos, especialmente em ambientes educacionais. No Brasil, a NR-12 estabelece requisitos mínimos de segurança, destacando a obrigatoriedade de dispositivos de parada de emergência para prevenção de riscos (Brasil, 2019).

Além disso, a organização do cabeamento e a separação entre circuitos de potência e sinal são essenciais para garantir a integridade do sistema. A ABNT NBR 5410 (2004) recomenda que as instalações elétricas sejam identificadas de forma a facilitar inspeções, manutenção e modificações.

Em processos de *retrofit*, a observância dessas normas é indispensável, pois a correta implementação dos dispositivos de segurança e a adequada organização dos circuitos contribuem para a confiabilidade, segurança e manutenção do sistema. Nesse contexto, a Figura 4 apresenta o painel elétrico de acionamento.

Figura 4 - Painel Elétrico de Acionamento



Fonte: Autor (2026)

2.6 PRECISÃO E REPETIBILIDADE EM SISTEMAS DE POSICIONAMENTO

Em sistemas de posicionamento robótico, dois parâmetros são fundamentais para a avaliação do desempenho: precisão e repetibilidade. A precisão refere-se à capacidade do sistema de atingir uma posição desejada, enquanto a repetibilidade diz respeito à capacidade de retornar consistentemente à mesma posição em múltiplos ciclos de operação (Craig, 2005).

A resolução do sistema de medição influencia diretamente esses parâmetros. Em sistemas que utilizam *encoders* incrementais, a resolução angular é determinada pelo número de pulsos por revolução e pela técnica de decodificação empregada. A decodificação em

quadratura permite quadruplicar a resolução do *encoder*, uma vez que cada ciclo elétrico gera quatro contagens, aumentando significativamente a capacidade de detecção de pequenos deslocamentos (Nise, 2011).

Para a avaliação estatística da repetibilidade, técnicas de análise de dados são empregadas, utilizando a média amostral e o desvio padrão como métricas fundamentais. A média amostral, calculada conforme a Equação 5, fornece uma estimativa do erro médio de posicionamento.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{\{i=1\}}^{\{n\}} xi \quad (5)$$

Enquanto o desvio padrão amostral, expresso pela Equação 6, quantifica a dispersão dos erros em torno da média.

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (xi - \bar{x})^2} \quad (6)$$

Essas métricas permitem avaliar a consistência do sistema de posicionamento e são amplamente utilizadas em processos de validação de sistemas robóticos, fornecendo subsídios para a otimização dos parâmetros de controle e para a garantia da qualidade operacional do sistema.

3 MÉTODO DA PESQUISA

Quanto à natureza, esta pesquisa classifica-se como aplicada, por visar a modernização de um manipulador robótico para fins didáticos. Em relação aos objetivos, é exploratória (levantamento bibliográfico e familiarização com tecnologias de *retrofit*) e descritiva (registro e análise dos fenômenos observados nos ensaios). Quanto aos procedimentos técnicos, trata-se de uma pesquisa experimental e estudo de caso, envolvendo a construção de protótipos, implementação de controle em malha fechada e realização de ciclos repetidos de reposicionamento automático para validação estatística de precisão. A execução prática foi concluída integralmente, sendo apresentado, na Figura 5 o estado atual do manipulador robótico após o processo de *retrofit*. Na seção 4, são apresentados os resultados obtidos, bem como a respectiva análise.

Figura 5 – Resultado do Processo de *Retrofit*



Fonte: Autor (2026)

Esta seção descreve os materiais, técnicas e procedimentos adotados no desenvolvimento do *retrofit* e na avaliação experimental do manipulador robótico. Inicialmente, apresenta-se o conceito de *retrofit* tecnológico, conforme discutido no Referencial Teórico, destacando sua aplicação na atualização funcional do sistema sem substituição da estrutura mecânica. Em seguida, são descritos o ambiente experimental, a arquitetura de controle e as principais intervenções realizadas, como dimensionamento da correia, reorganização da fiação, montagem do painel e desenvolvimento da PCB, além dos procedimentos de coleta de dados e critérios de avaliação de desempenho, cujos resultados são apresentados na seção seguinte.

3.1 DIMENSIONAMENTO DE CORREIA TRAPEZOIDAL

O dimensionamento da correia foi necessário devido ao desgaste do componente original, que apresentava ressecamento, corrosão e perda de dentes, comprometendo a transmissão de movimento. A substituição foi definida a partir de medições com paquímetro e cálculo do comprimento da correia, permitindo a seleção de um modelo adequado ao sistema, cujos parâmetros estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Dimensionamento de Correia

Eixo	Distância Entre Dentes	Tipo de Dente	Tipo de matéria
0	2,4 mm	Trapezoidal	Poliuretano com Cordonéis de Aço

Fonte: Autor (2026)

O comprimento da correia foi determinado com base na geometria do sistema, considerando os diâmetros das polias e a distância entre centros, conforme a Equação 7.

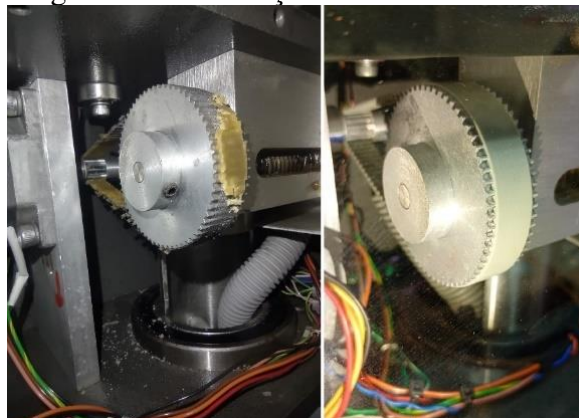
$$L = 2C + L = 2C + \frac{\pi}{2}(D_1 + D_2) \frac{+(D_2 + D_1)^2}{4C} \quad (7)$$

Assim obtendo a Equação 8.

$$L \approx 2 * (105) + \frac{\pi}{2} * (9,17 + 48,89) \frac{+(9,17 + 48,89)^2}{4 * (105)} \quad (8)$$

A partir dos valores medidos, obteve-se um comprimento aproximado de 305 mm, compatível com correias comerciais e equivalente a cerca de 127 dentes para um passo de 2,4mm. Esse resultado garante o adequado tensionamento e funcionamento da transmissão. Após a seleção, a correia foi substituída no sistema, conforme ilustrado na Figura 6, restabelecendo o funcionamento do conjunto mecânico.

Figura 6 - Substituição de Correia Dentada

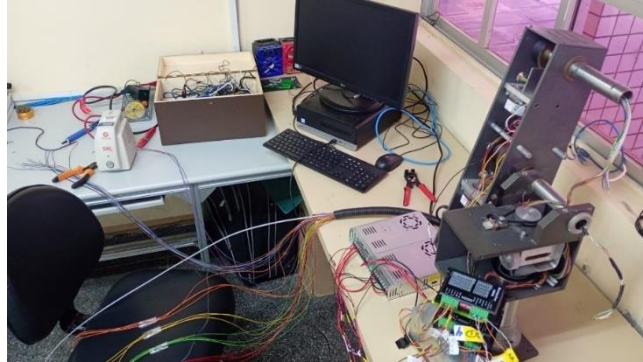


Fonte: Autor (2026)

3.2 PROTOTIPAGEM DE *PROTOBOARD*

A reconstrução do cabeamento elétrico foi realizada com o objetivo de garantir a integridade dos sinais, reduzir interferências eletromagnéticas e aumentar a confiabilidade do sistema, em conformidade com a ABNT NBR 5410 (2004), que recomenda a adequada identificação das linhas elétricas. O sistema original apresentava fiação desorganizada e sem identificação, dificultando sua reutilização, sendo necessária a reorganização dos cabos, a separação entre circuitos de potência e sinal, bem como a adoção de boas práticas, como identificação e uso de fixação adequada, conforme ilustrado na Figura 7.

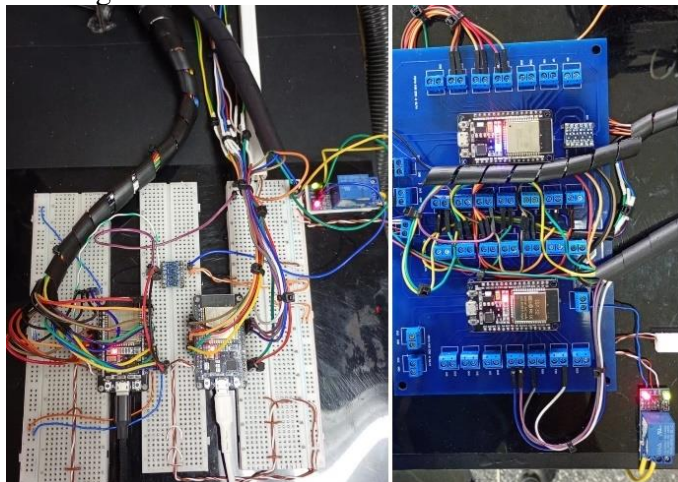
Figura 7 - Reestruturação de Cabeamento Elétrico para o Braço Robótico



Fonte: Autor (2026)

Paralelamente, foi desenvolvida uma placa de circuito impresso (PCB), no aplicativo EasyEDA para substituir a montagem em *Protoboard*, eliminando problemas de mau contato e ruídos que comprometiam a leitura dos *encoders* e a estabilidade do sistema, proporcionando maior robustez e confiabilidade; a montagem inicial e a solução implementada são apresentadas nas Figuras 8.

Figura 8 - Desenvolvimento de *Protoboard*



Fonte: Autor (2026)

4 RESULTADOS DA PESQUISA

A avaliação da precisão e da repetibilidade do sistema foi conduzida por meio da realização de 10 ciclos repetidos de *homing*. A frequência média efetiva de aquisição foi de aproximadamente 72 Hz , valor compatível com a capacidade de processamento do microcontrolador e adequado para o controle de posicionamento em tempo real.

4.1 ESTRATÉGIA DE CONTROLE

O controle de reposicionamento (*homing*) foi implementado por meio de um controlador PID digital embarcado em microcontrolador ESP32, utilizando realimentação de *encoders* incrementais com resolução efetiva de 2000 contagens por volta (equivalente a $0,18^\circ$ por contagem), o que permite elevada precisão angular no posicionamento das juntas.

Partindo dessa ideia, o controle implementado baseia-se no princípio de sistemas de controle em malha fechada, também conhecidos como sistemas de controle por realimentação, de acordo com Groover (2011).

Com o objetivo de aumentar a robustez do sistema, foram adotadas estratégias como a implementação de uma zona morta de ± 5 contagens, visando evitar oscilações próximas ao ponto de referência, a limitação da saturação do sinal de controle e a utilização de mecanismos de *anti-windup* na ação integral. Tais medidas contribuíram para a garantia da estabilidade do sistema, mesmo diante de variações de carga e pequenas não linearidades mecânicas.

Para a análise teórica da planta mecânica, adotou-se um modelo rotacional simplificado de segunda ordem, abordagem clássica na modelagem de sistemas eletromecânicos (Nise, 2011; Ogata, 2010). Considerando a inércia equivalente J e o coeficiente de atrito viscoso B , a dinâmica de cada junta pode ser descrita pela Equação 9.

$$J\ddot{\theta}(t) + B\dot{\theta}(t) = \tau(t) \quad (9)$$

Aplicando a Transformada de Laplace (condições iniciais nulas), obtém-se a função de transferência em malha aberta mostrada na Equação 10.

$$G(s) = \frac{1}{Js^2 + Bs} \quad (10)$$

O controlador PID contínuo é descrito pela Equação 11.

$$C(s) = Kp + \frac{Ki}{s} + Kd \cdot s \quad (11)$$

Substituindo os ganhos encontrados experimentalmente que foram aplicados ($Kp = 1.1$), ($Ki = 0.010$) e ($Kd = 0.15$) obtém-se a Equação 12.

$$C(s) = \frac{0.15s^2 + 1.1s + 0.010}{s} \quad (12)$$

A função de transferência em malha aberta torna-se a Equação 13.

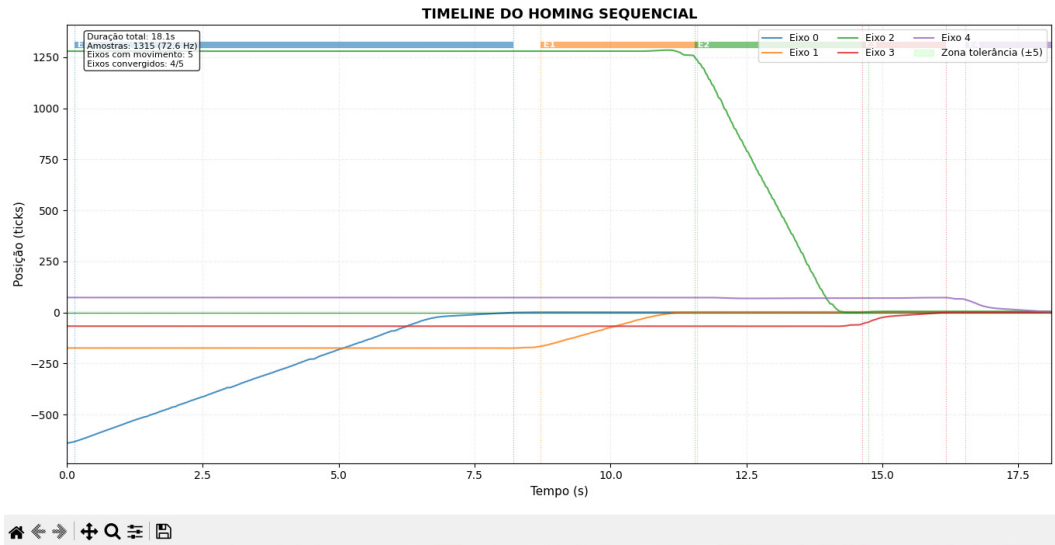
$$L(s) = \frac{0.15s^2 + 1.1s + 0.010}{s^2(Js + B)} \quad (13)$$

Considerando realimentação unitária, a função de transferência em malha fechada é correspondente a Equação 14.

$$T(s) = \frac{0.15s^2 + 1.1s + 0.010}{Js^3 + (B + 0.15)s^2 + 1.1s + 0.010} \quad (14)$$

O sistema em malha fechada é de terceira ordem, resultante da dinâmica mecânica de segunda ordem associada à ação integral do controlador PID. A implementação digital utilizou frequência média de aquisição de aproximadamente 72 Hz, compatível com o ESP32, garantindo atualização do controle e estabilidade do algoritmo, cujo comportamento no processo de *homing* é apresentado na Figura 9.

Figura 9 - Resposta Dinâmica do Reposicionamento (*Homing*) Utilizando Controlador PID Digital Embarcado.



Fonte: Autor (2026)

Embora o sistema completo seja de terceira ordem, o comportamento transitório observado experimentalmente é compatível com uma dinâmica dominante de segunda ordem. Assim, pode-se associar qualitativamente a resposta aos parâmetros frequência natural (ω_n) e coeficiente de amortecimento (ζ), conforme discutido por Nise (2011), assim, pode ser expressa na Equação 15.

$$G_{eq} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (15)$$

Os ensaios indicam ausência de sobre-elevação significativa e rápida convergência ao ponto de referência, comportamento compatível com um regime criticamente amortecido ou ligeiramente superamortecido. Essa condição é desejável em aplicações didáticas e laboratoriais, pois prioriza a estabilidade e a segurança operacional.

4.2 ANÁLISE ESTATÍSTICA

O controle de reposicionamento (*homing*) foi implementado por meio de um controlador PID discreto executado na unidade ESP32 responsável pela leitura dos *encoders*. O objetivo do controlador é conduzir cada eixo do manipulador à posição de referência (*home*), definida como $\theta_{ref} = 0$.

O erro de controle é definido pela Equação 16.

$$e(t) = \theta(t) - \theta_{ref} \quad (16)$$

A posição angular $\theta(t)$ é obtida por *encoders* incrementais ópticos HEDS-9100 (500 CPR), que operam com sinais em quadratura (A e B). Segundo o fabricante, o quadro de equivalência é mostrado na Equação 17.

$$1 \text{ volta mecânica} = 500 \text{ ciclos elétricos} = 360^\circ \quad (17)$$

Com decodificação em quadratura completa, cada ciclo elétrico gera quatro contagens, resultando na Equação 18.

$$N_{cont} = 4 \times 500 = \frac{2000 \text{ contagens}}{\text{volta}} \quad (18)$$

Assim, a resolução angular é: dada pela Equação 19.

$$\Delta\theta = \frac{360}{2000} = 0,18^\circ \text{ por contagem} \quad (19)$$

Conforme ilustrado na Figura 9, a resolução obtida experimentalmente está diretamente relacionada à Equação 11, evidenciando que o sistema de medição apresenta resolução angular superior ao incremento de movimento do motor. O motor de passo utilizado apresenta ângulo de passo de $1,8^\circ$, o que corresponde a 200 passos por revolução. Já o sistema de medição, baseado em *encoder* com resolução de 500 pulsos por volta e decodificação em quadratura, resulta em 2000 contagens por revolução, proporcionando uma resolução angular de $0,18^\circ$ por contagem.

Dessa forma, observa-se que o sistema de medição possui resolução superior ao incremento angular do motor, permitindo maior precisão no controle de posicionamento. Logo, a posição angular discreta utilizada pelo controlador é dada pela Equação 20.

$$\theta(k) = N(k)\Delta\theta \quad (20)$$

Para avaliar a repetibilidade do sistema, foram realizados 10 ciclos independentes de *homing* para cada eixo. O erro considerado corresponde à diferença entre a posição final medida pelo *encoder* e a posição de referência ($\theta_{ref} = 0$).

A média amostral dos erros foi calculada pela Equação 21.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{\{i=1\}}^{\{n\}} x_i \quad (21)$$

A dispersão dos resultados determinada por meio do desvio padrão amostral, definido pela Equação 22.

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (22)$$

Onde x_i representa o erro observado em cada ciclo de *homing*, \bar{x} corresponde à média amostral e n é o número total de amostras.

O desvio padrão, apresentado na Tabela 2, é calculado em relação à posição de referência (0 contagens), e não em relação à zona morta de ± 5 contagens, uma vez que esta constitui apenas um critério operacional do controlador. Dessa forma, a análise estatística considera o erro real de posicionamento, permitindo uma avaliação mais precisa da repetibilidade e da precisão do processo de *homing*.

O maior desvio padrão obtido (1,4967 contagens, no Eixo 0) é inferior à zona morta do controlador (± 5 contagens), indicando baixa dispersão dos erros e elevada repetibilidade do processo de *homing*. Assim, os resultados confirmam a consistência no reposicionamento, mantendo margem de segurança em relação ao limite de tolerância.

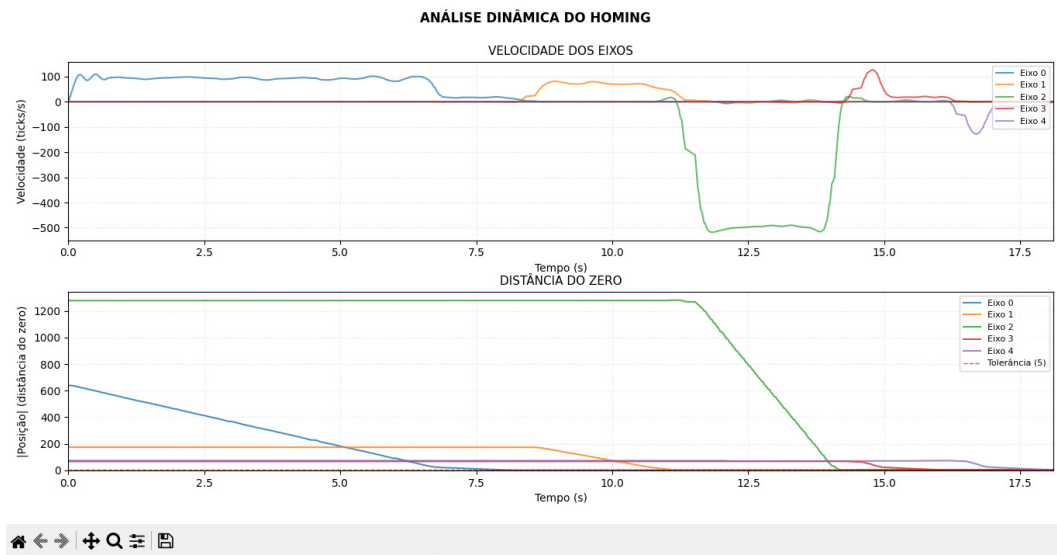
Tabela 2 - Desvio Padrão do Erro Final em Relação à Posição de Referência (0 contagens)

<i>Encoders</i>	Desvio Padrão (contagens)	Eixo
0	1,4967	0
1	1,2000	1
2	1,0954	2
3	0,8307	3
4	1,3748	

Fonte: Autor (2026)

Observou-se ainda convergência estável de todos os eixos para a faixa de tolerância, sem oscilações sustentadas, conforme apresentado na Figura 10, sendo os tempos de acomodação apresentados na Tabela 3.

Figura 10 - Curvas Experimentais de Convergência Angular Durante Ciclos Repetidos de *Homing*.



Fonte: Autor (2026)

Tabela 3 – Tempo médio de acomodação experimental

<i>Encoders</i>	Tempo de Acomodação (s)	Eixo
0	8,06	0
1	2,89	1
2	3,18	2
3	1,54	3
4	1,58	

Fonte: Autor (2026)

Observa-se um maior tempo de estabilização no *encoder* correspondente ao eixo 0, o que é coerente com a maior inércia mecânica associada à sua estrutura.

Considerando a aproximação por uma dinâmica dominante de segunda ordem e a ausência de sobre-elevação significativa, pode-se estimar a frequência natural aproximada a partir da Equação 23.

$$T_s \approx \frac{4}{\zeta \omega_n} \quad (23)$$

Assumindo $\zeta \approx 1$, o tempo de acomodação é apresentado na Equação 24.

$$T_s \approx \frac{4}{\omega_n} \quad (24)$$

Com base nessa aproximação, os valores estimados de ω_n situam-se aproximadamente entre 0,5 rad/s e 2,6 rad/s para os diferentes eixos, sendo compatíveis com sistemas eletromecânicos acionados por motores de passo.

Tabela 4 - Precisão Final Média dos Eixos

<i>Encoders</i>	Precisão final média (mm)	Eixo
0	0,025	0
1	0,075	1
2	0,125	2
3	0,025	3
4	0,178	

Fonte: Autor (2026)

Os resultados indicam elevada repetibilidade do sistema, mesmo após múltiplos ciclos de reposicionamento.

O desvio padrão do erro final permaneceu significativamente inferior à banda de tolerância implementada no controlador, reforçando a estabilidade do ajuste adotando os ganhos ($Kp = 1,1$), ($Ki = 0,010$) e ($Kd = 0,15$).

Não foram observadas oscilações sustentadas para os ganhos selecionados. O comportamento dinâmico observado é compatível com uma resposta superamortecida ou próxima ao amortecimento crítico, característica desejável em aplicações educacionais por priorizar estabilidade, segurança operacional e previsibilidade do movimento.

Para complementar a análise experimental e demonstrar o funcionamento do manipulador robótico após o processo de *retrofit* tecnológico, foi disponibilizado um vídeo demonstrativo do sistema em operação.

O acesso ao vídeo pode ser realizado por meio do QR Code apresentado na Figura 11, permitindo a visualização do comportamento dinâmico do manipulador durante a execução dos movimentos programados.

Figura 11 - QR Code para Acesso ao Vídeo Demonstrativo do Manipulador Robótico em Operação após o Processo de *Retrofit* Tecnológico.



Fonte: Autor (2026)

4.3 ANÁLISE CRÍTICA DO SISTEMA

Embora os resultados indiquem que o sistema atende aos objetivos propostos, a análise crítica evidencia limitações e oportunidades de melhoria. Observou-se comportamento estável,

porém com pequenas oscilações no regime transitório, indicando a necessidade de melhor ajuste dos parâmetros do controlador PID. Também foram identificados ruídos nas medições, afetando a precisão, o que sugere a adoção de técnicas de filtragem mais robustas ou sensores de maior resolução. Do ponto de vista mecânico, folgas, atrito não modelado e desalinhamentos contribuem para diferenças entre o modelo teórico e o comportamento real, enquanto limitações de processamento e da taxa de atualização podem impactar o desempenho em tempo real. Como perspectivas, destacam-se o refinamento do controlador, o uso de filtragem avançada, melhorias mecânicas, sensores mais precisos e a aplicação de estratégias de controle mais sofisticadas, como controle adaptativo ou preditivo. Do ponto de vista educacional, o manipulador modernizado demonstrou potencial como plataforma didática multidisciplinar, permitindo a integração de conceitos de controle, eletrônica, programação e sistemas embarcados, além de possibilitar a realização de atividades práticas com sistemas reais. Assim, o sistema contribui para a formação aplicada no curso de Engenharia de Controle e Automação, evidenciando sua aplicabilidade como ferramenta de ensino e pesquisa.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve como objetivo a recuperação e modernização de um braço robótico anteriormente inoperante e sem utilidade prática, o qual apresentava ausência de controle adequado e limitações estruturais e eletrônicas que inviabilizavam seu uso. A partir da implementação de um *retrofit*, foi possível restabelecer sua funcionalidade, transformando-o em um sistema operacional com potencial de aplicação em atividades de ensino, pesquisa e desenvolvimento na área de Engenharia de Controle e Automação. A utilização de microcontroladores e a aplicação de técnicas de controle, especialmente o controlador PID, proporcionaram melhorias significativas na precisão, repetibilidade e estabilidade dos movimentos. Os resultados evidenciam uma evolução expressiva, passando de um sistema inutilizável para um equipamento funcional, com resolução angular de $0,18^\circ$ por contagem, elevada repetibilidade e comportamento estável, sem oscilações significativas. Esses resultados demonstram a viabilidade técnica, econômica e sustentável do *retrofit*, além de seu potencial de expansão. Por fim, destacam-se possibilidades de aprimoramento, como o ajuste dos parâmetros de controle, uso de sensores mais precisos, adoção de técnicas avançadas de programação, desenvolvimento de gêmeo digital e aplicação de estratégias de controle mais sofisticadas, abrindo perspectivas para trabalhos futuros.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5410**: instalações elétricas de baixa tensão. Rio de Janeiro: ABNT, 2004. 209 p.
- BOMFIM, M. H. S. **Remanufatura de manipuladores robóticos industriais utilizando arquitetura aberta**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.
- BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. **NR-12**: segurança no trabalho em máquinas e equipamentos. Brasília: MTE, 2019.
- CRAIG, J. J. **Introduction to robotics: mechanics and control**. 3. ed. Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall, 2005.
- ETZ, D.; BRANTNER, H.; KASTNER, W. Smart manufacturing *retrofit* for brownfield systems. **Procedia Manufacturing**, v. 42, p. 327–332, 2020. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.02.085>. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978920306508>. Acesso em: 12 mar. 2026.

FRANCHI, C. M. **Acionamentos elétricos**. 4. ed. São Paulo: Érica, 2008.

GROOVER, M. P. **Automação industrial e sistemas de manufatura**. Tradução: Jorge Ritter, Luciana do Amaral Teixeira. 3. ed. São Paulo: Pearson, 2011.

LYMAN, G.; WILCOX, J.; SANFORD, R. Robotics *retrofit*: renovating outdated robotics platforms to meet current curriculum requirements driven by industry demand. In: CONFERENCE FOR INDUSTRY AND EDUCATION COLLABORATION, 2019. Washington, DC: American Society for Engineering Education, 2019.

MARWEDEL, P. **Embedded system design: embedded systems foundations of cyber-physical systems**. 2. ed. Dordrecht: Springer, 2011.

NISE, N. S. **Control systems engineering**. 6. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2011.

OGATA, K. **Modern control engineering**. 5. ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2010.




OLIVEIRA, A. S. de. **Retrofitting de robôs manipuladores com incorporação de controle de posição e força**: aplicação em um robô industrial. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis-SC, 2007.


PEREIRA, T. A.; ROESNER, A. A.; THIAGO, F. E. S. S.; CRISTOFOLINI, I.; WEIZENMANN, G. S.; BONACORSO, N. G. Readequação tecnológica de baixo custo de robôs cartesianos – *retrofitting* robô sankyo. **Revista Ilha Digital**, Florianópolis, v. 3, p. 65–70, 2012. Disponível em:
<https://ilhadigital.florianopolis.ifsc.edu.br/index.php/ilhadigital/article/view/36>. Acesso em: 12 mar. 2026.

SILVA, E. Q. da. **Funcionamento do manipulador robótico após retrofit tecnológico**. YouTube, 2026. Disponível em: <https://youtu.be/hEo6ZZ6q0Qk>. Acesso em: 05 mar. 2026.

URSO, O.; CHIACCHIO, F.; COMPAGNO, L.; D'URSO, D. An RFID application for the process mapping automation. **Procedia Manufacturing**, v. 42, p. 8–15, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978920305564>. Acesso em: 12 mar. 2026.

MATERIAL COMPLEMENTAR

<p>Seguindo o processo de desenvolvimento do protocolo de comunicação baseado no ESP-NOW, vale complementar e ressaltar que a arquitetura foi modularizada por meio da utilização de três microcontroladores ESP32, responsáveis pela comunicação entre si para o controle, monitoramento sensorial e tratamento de dados do manipulador robótico. Nesse contexto, faz-se necessária a apresentação da codificação de cada unidade, a qual é disponibilizada por meio do primeiro QR Code ao lado apresentado, que direciona para um repositório online contendo os respectivos códigos de cada ESP32, conforme suas funções específicas.</p>	
<p>O segundo QR Code direciona para uma pasta contendo os arquivos do projeto da placa de circuito impresso (PCB), desenvolvida por meio do software EasyEDA, incluindo o diagrama esquemático e a visualização tridimensional (3D) da placa.</p>	
<p>O terceiro QR Code direciona para uma pasta contendo as tabelas de custos dos materiais utilizados na implementação do <i>retrofit</i>, bem como uma análise comparativa de preços em relação a manipuladores robóticos comerciais disponíveis atualmente no mercado.</p> <p>Dessa forma, busca-se complementar as informações apresentadas no corpo do trabalho, proporcionando maior detalhamento técnico e transparência quanto aos aspectos construtivos e econômicos do sistema desenvolvido.</p>	

	INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA PARAÍBA
	Campus Cajazeiras - Código INEP: 25008978
	Rua José Antônio da Silva, 300, Jardim Oásis, CEP 58.900-000, Cajazeiras (PB)
	CNPJ: 10.783.898/0005-07 - Telefone: (83) 3532-4100

Documento Digitalizado Ostensivo (Público)

Entrega de TCC

Assunto:	Entrega de TCC
Assinado por:	Eric Queiroga
Tipo do Documento:	Dissertação
Situação:	Finalizado
Nível de Acesso:	Ostensivo (Público)
Tipo do Conferência:	Cópia Simples

Documento assinado eletronicamente por:

- Eric Queiroga da Silva, DISCENTE (202112240040) DE BACHARELADO EM ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO - CAMPUS CAJAZEIRAS, em 08/05/2026 09:38:48.

Este documento foi armazenado no SUAP em 08/05/2026. Para comprovar sua integridade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifpb.edu.br/verificar-documento-externo/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 1856570

Código de Autenticação: f36a496f5f

