

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS**

**Flavia Camila Siroma Bernal**

**Projeto de automação para controle de velocidade e  
alinhamento em processos de bobinagem**

**São Carlos**

**2025**



**Flavia Camila Siroma Bernal**

**Projeto de automação para controle de velocidade e  
alinhamento em processos de bobinagem**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Elétrica com Ênfase em Sistemas de Energia e Automação, da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Fábio Romano Lofrano Dotto

**São Carlos  
2025**

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,  
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS  
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da  
EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

S517p Siroma Bernal, Flavia Camila  
Projeto de automação para controle de velocidade  
e alinhamento em processos de bobinagem / Flavia Camila  
Siroma Bernal; orientador Fábio Romano Lofrano Dotto.  
São Carlos, 2025.

Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica com  
ênfase em Sistemas de Energia e Automação) -- Escola de  
Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo,  
2025.

1. Automação industrial. 2. Bobinagem. 3.  
Controle de velocidade. 4. SoftPLC. 5.  
Microcontrolador. 6. Inversor de frequência. I. Título.



# FOLHA DE APROVAÇÃO

Nome: Flavia Camila Siroma Bernal

Título: "Projeto de Automação para Controle de Velocidade e Alinhamento em Processos de Bobinagem"

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado  
em 25/06/25,

com NOTA 10,0 ( Dez ), pela Comissão  
Julgadora:

Prof. Dr. Fabio Romano Lofrano Dotto - Orientador SEL/EESC/USP

Prof. Dr. Pedro de Oliveira Conceição Júnior - SEL/EESC/USP

Prof. Associado Elmer Pablo Tito Cari - SEL/EESC/USP

Coordenador da CoC-Engenharia Elétrica - EESC/USP:  
Professor Associado José Carlos de Melo Vieira Júnior



*Dedico este trabalho à INCA Soluções Mecânicas Industriais, pela  
confiança, pelo apoio técnico e pela oportunidade de aplicar meus  
conhecimentos na construção do meu primeiro projeto.*



## AGRADECIMENTOS

À minha **família**, aos **amigos** e às minhas companheiras Fifi e Chiquinha, pelo suporte constante e pela paciência durante a realização deste trabalho.

À **Universidade de São Paulo**, pelas inúmeras experiências incríveis, e aos bons **professores**, com os quais aprendi.

A todos que, com generosidade, dedicaram seu tempo para me ensinar, orientar e partilhar conhecimentos ao longo dos últimos anos. Cada explicação, conselho e gesto de paciência contribuiu para minha formação, não apenas como profissional, mas também como pessoa. Meus agradecimentos a cada um que, direta ou indiretamente, participou deste percurso de aprendizado.



*“Se você quer algo que nunca teve, precisa estar disposto a fazer algo que nunca fez.”*

*Thomas Jefferson*





## RESUMO

BERNAL, F. C. S. **Projeto de automação para controle de velocidade e alinhamento em processos de bobinagem.** 2025. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2025.

A automação industrial é crucial para a eficiência de diversos processos produtivos, incluindo os sistemas de bobinagem, usados para o acondicionamento de uma vasta gama de materiais como papéis, têxteis, plásticos e metais. Este trabalho apresenta o desenvolvimento e a validação de um sistema de automação para o processo de bobinagem de fitas metálicas, visando o controle preciso da velocidade e do alinhamento, com aplicação na fabricação de grampos para concertina. O objetivo principal foi criar uma solução flexível, capaz de garantir a uniformidade do enrolamento, manter a velocidade superficial constante e incorporar funcionalidades de detecção de falhas e interface intuitiva com o operador, superando limitações de sistemas preexistentes. A metodologia envolveu o projeto de um sistema microcontrolado com um ATmega328P, o controle de um atuador linear elétrico com ponte H para o alinhamento horizontal, e a programação de um inversor de frequência com SoftPLC em Ladder para o controle dinâmico da velocidade de um motor de indução trifásico. Sensores como encoder rotativo para contagem de voltas e sensor fotoelétrico para detecção de rompimento da fita foram integrados. Uma estratégia de filtragem multifásica foi implementada para assegurar a imunidade a ruídos eletromagnéticos. Os resultados experimentais demonstraram a eficácia do sistema em manter a velocidade superficial constante ao longo de múltiplas camadas, produzir um enrolamento homogêneo e seguro, e responder adequadamente a comandos do operador. O protótipo validou a viabilidade da solução proposta, solucionando um problema real de engenharia da empresa parceira deste projeto e construindo uma base sólida para futuras implementações industriais.

**Palavras-chave:** Automação industrial. Bobinagem. Controle de velocidade. SoftPLC. Microcontrolador. Inversor de frequência.



## **ABSTRACT**

BERNAL, F. C. S. "**Automation project for speed control and alignment in winding processes**". 2025. Monograph (Conclusion Course Paper) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2025.

Industrial automation is crucial for the efficiency of various production processes, including winding systems used for packaging a wide range of materials such as paper, textiles, plastics, and metals. This work presents the development and validation of an automation system for the winding process of metallic strips, aiming for precise control of speed and alignment, with application in the manufacturing of clips for concertina fencing. The main objective was to create a flexible solution capable of ensuring winding uniformity, maintaining a constant surface speed, and incorporating fault detection features and an intuitive operator interface, overcoming limitations of preexisting systems. The methodology involved the design of a microcontroller-based system using an ATmega328P, the control of a linear electric actuator with an H-bridge for horizontal alignment, and the programming of a frequency inverter with SoftPLC in Ladder for dynamic speed control of a three-phase induction motor. Sensors such as a rotary encoder for turn counting and a photoelectric sensor for strip break detection were integrated. A multi-stage filtering strategy was implemented to ensure immunity to electromagnetic noise. Experimental results demonstrated the system's effectiveness in maintaining a constant surface speed over multiple layers, producing a homogeneous and reliable winding, and responding adequately to operator commands. The prototype validated the feasibility of the proposed solution, solving a real engineering problem of the partner company and establishing a solid foundation for future industrial implementations.

**Keywords:** Industrial automation. Winding. Speed control. SoftPLC. Microcontroller. Frequency inverter.



## LISTA DE FIGURAS

|                                                                               |    |
|-------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 – Dimensões de rolo e grampos . . . . .                              | 35 |
| Figura 2 – Prensa de grampos CL-37 . . . . .                                  | 36 |
| Figura 3 – Dispositivo de alinhamento horizontal . . . . .                    | 37 |
| Figura 4 – PCB do sistema original . . . . .                                  | 39 |
| Figura 5 – Esquemático do circuito eletrônico original . . . . .              | 40 |
| Figura 6 – Inversor CFW300 . . . . .                                          | 45 |
| Figura 7 – Conexões de controle do CFW300 na configuração NPN . . . . .       | 47 |
| Figura 8 – Ambiente de programação WPS . . . . .                              | 47 |
| Figura 9 – Atuador linear elétrico: vista explodida . . . . .                 | 51 |
| Figura 10 – Módulo ponte H L298N . . . . .                                    | 53 |
| Figura 11 – Arduino Nano . . . . .                                            | 57 |
| Figura 12 – Diagrama em blocos do sistema . . . . .                           | 65 |
| Figura 13 – Desenho do sistema . . . . .                                      | 65 |
| Figura 14 – Fluxograma: Rotina inicial . . . . .                              | 68 |
| Figura 15 – Fluxograma: Parada do sistema . . . . .                           | 69 |
| Figura 16 – Fluxograma: Interface com o usuário . . . . .                     | 70 |
| Figura 17 – Fluxograma: Controle de velocidade do enrolamento . . . . .       | 73 |
| Figura 18 – Fluxograma: Controle de deslocamento horizontal . . . . .         | 76 |
| Figura 19 – Fluxograma: Detecção de rompimento da fita . . . . .              | 78 |
| Figura 20 – Entrada digital flutuante com inversor desligado . . . . .        | 81 |
| Figura 21 – Entrada digital flutuante com inversor ligado . . . . .           | 81 |
| Figura 22 – Sinal após aplicação do optoacoplador . . . . .                   | 82 |
| Figura 23 – Sinal após aplicação do optoacoplador e filtro RC . . . . .       | 82 |
| Figura 24 – Sinal restaurado após isolamento e condicionamento . . . . .      | 83 |
| Figura 25 – Montagem dos componentes do protótipo . . . . .                   | 89 |
| Figura 26 – Circuito de controle montado em protoboard . . . . .              | 90 |
| Figura 27 – Telas do display LCD apresentadas durante a operação . . . . .    | 91 |
| Figura 28 – Resultado do enrolamento demonstrando a homogeneidade das camadas | 93 |
| Figura 29 – Sequência do processo de enrolamento com tempo por camada medido  | 95 |



## LISTA DE TABELAS

|          |   |                                                                                                                                 |    |
|----------|---|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 | – | Especificações técnicas do motor trifásico utilizado . . . . .                                                                  | 44 |
| Tabela 2 | – | Parâmetros comuns e relevantes para SoftPLC do inversor CFW300 . .                                                              | 49 |
| Tabela 3 | – | Principais componentes do atuador elétrico linear . . . . .                                                                     | 52 |
| Tabela 4 | – | Rotação do rolo e do motor por camada com redutor 1:50 . . . . .                                                                | 74 |
| Tabela 5 | – | Tempo teórico de enrolamento de cada camada com base na velocidade<br>superficial constante de $v = 0,08 \text{ m/s}$ . . . . . | 94 |
| Tabela 6 | – | Comparação entre tempo teórico e tempo experimental de enrolamento<br>por camada . . . . .                                      | 94 |





## LISTA DE QUADROS

|                                                                                                  |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Quadro 1 – Comparação entre a abordagem original e a abordagem proposta neste trabalho . . . . . | 96 |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----|



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|                        |                                                                                                                  |
|------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ADC                    | Conversor Analógico-Digital                                                                                      |
| AI                     | Analog Input (Entrada Analógica, referente ao inversor CFW300)                                                   |
| BCD                    | Binary-Coded Decimal (Decimal Codificado em Binário)                                                             |
| CI                     | Circuito Integrado                                                                                               |
| CLP                    | Controlador Lógico Programável                                                                                   |
| cv                     | Cavalo-Vapor (unidade de potência)                                                                               |
| DC                     | Direct Current (Corrente Contínua)                                                                               |
| DC-DC                  | Direct Current to Direct Current (referente a conversor de tensão)                                               |
| DI                     | Digital Input (Entrada Digital, referente ao inversor CFW300)                                                    |
| DO                     | Digital Output (Saída Digital, referente ao inversor CFW300)                                                     |
| EEPROM                 | Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory (Memória Programável Somente Leitura Apagável Eletricamente) |
| EMI                    | Interferência Eletromagnética                                                                                    |
| FFT                    | Fast Fourier Transform (Transformada Rápida de Fourier)                                                          |
| GND                    | Ground (Terra elétrico)                                                                                          |
| I2C (I <sup>2</sup> C) | Inter-Integrated Circuit (protocolo de comunicação)                                                              |
| IDE                    | Integrated Development Environment (Ambiente de Desenvolvimento Integrado, e.g., Arduino IDE)                    |
| IEC                    | International Electrotechnical Commission (Comissão Eletrotécnica Internacional)                                 |
| IHM                    | Interface Homem-Máquina                                                                                          |
| IP                     | Ingress Protection (Grau de Proteção, e.g., IP20, IP55)                                                          |
| LCD                    | Liquid Crystal Display (Display de Cristal Líquido)                                                              |
| LED                    | Light Emitting Diode (Diodo Emissor de Luz)                                                                      |
| NO                     | Normally Open (Normalmente Aberto, configuração de contato)                                                      |

|         |                                                                                                             |
|---------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| NPN     | Negative-Positive-Negative (tipo de transistor bipolar)                                                     |
| PCBs    | Printed Circuit Boards (Placas de Circuito Impresso)                                                        |
| PNP     | Positive-Negative-Positive (tipo de transistor bipolar)                                                     |
| PPR     | Pulsos Por Rotação (resolução de encoder)                                                                   |
| PWM     | Pulse Width Modulation (Modulação por Largura de Pulso)                                                     |
| RC      | Resistor-Capacitor (referente a configuração de circuito, e.g., filtro RC)                                  |
| RFI     | Radio Frequency Interference (Interferência de Radiofrequência)                                             |
| RPM     | Rotações Por Minuto                                                                                         |
| RX      | Receive (Recepção, em comunicação serial)                                                                   |
| SCL     | Serial Clock Line (Linha de Clock Serial, para comunicação I2C)                                             |
| SDA     | Serial Data Line (Linha de Dados Serial, para comunicação I2C)                                              |
| SoftPLC | Software Programmable Logic Controller (funcionalidade de CLP integrado em software, e.g., no inversor WEG) |
| SRAM    | Static Random-Access Memory (Memória Estática de Acesso Aleatório)                                          |
| TEFC    | Totally Enclosed Fan-Cooled (Totalmente Fechado com Ventilação Externa, tipo de carcaça de motor)           |
| TX      | Transmit (Transmissão, em comunicação serial)                                                               |
| USB     | Universal Serial Bus (Interface de comunicação)                                                             |
| V/f     | Relação Tensão/Frequência (método de controle escalar para motores)                                         |
| WPS     | WEG Programming Suite (Software da WEG)                                                                     |

## LISTA DE SÍMBOLOS

|                   |                                                             |
|-------------------|-------------------------------------------------------------|
| $A, B$            | Sinais de quadratura do encoder                             |
| $f_c$ (ou $f_0$ ) | Frequência de corte de um filtro RC (Hz)                    |
| $h$               | Altura ou espessura do material (e.g., mm, m)               |
| $I_a$             | Corrente de partida do motor (A)                            |
| $I_n$             | Corrente nominal de operação do motor (A)                   |
| $L$               | Largura da fita (e.g., mm, m)                               |
| $m$               | Número de camadas de material enroladas (adimensional)      |
| $P$               | Perímetro do rolo (m)                                       |
| $R$               | Raio do rolo (e.g., cm, m)                                  |
| $R_i$             | Raio inicial do rolo (e.g., cm, m)                          |
| RPM               | Rotação por minuto (usado como variável em equações)        |
| $v_s$             | Velocidade superficial do rolo (m/s)                        |
| $Z$               | Sinal de índice (referência) do encoder                     |
| $\alpha$          | Fator de amortecimento em filtro exponencial (adimensional) |
| $\pi$             | Constante matemática (aproximadamente 3.14159)              |
| $\tau$            | Constante de tempo de um filtro RC (s)                      |
| $\omega$          | Velocidade angular (rad/s)                                  |



## SUMÁRIO

|            |                                                                      |           |
|------------|----------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b>   | <b>INTRODUÇÃO</b>                                                    | <b>27</b> |
| <b>1.1</b> | <b>Contexto e motivação</b>                                          | <b>28</b> |
| <b>1.2</b> | <b>Objetivos</b>                                                     | <b>29</b> |
| <b>1.3</b> | <b>Estrutura do trabalho</b>                                         | <b>29</b> |
| <b>2</b>   | <b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>                                         | <b>31</b> |
| <b>2.1</b> | <b>Indústria 4.0 e automação de processos</b>                        | <b>31</b> |
| 2.1.1      | Sistemas industriais de enrolamento                                  | 32        |
| 2.1.2      | Trabalhos acadêmicos relacionados                                    | 33        |
| <b>2.2</b> | <b>Contexto aplicado: fita de grampos para máquina de concertina</b> | <b>34</b> |
| 2.2.1      | Definição da solução como projeto original                           | 36        |
| 2.2.2      | Problemas enfrentados no processo atual                              | 41        |
| <b>3</b>   | <b>EMBASAMENTO TEÓRICO</b>                                           | <b>43</b> |
| <b>3.1</b> | <b>Motor de Indução Trifásico</b>                                    | <b>43</b> |
| <b>3.2</b> | <b>Inversor de Frequência</b>                                        | <b>44</b> |
| 3.2.1      | SoftPLC                                                              | 47        |
| 3.2.2      | Parametrização                                                       | 48        |
| 3.2.3      | Ruído                                                                | 49        |
| <b>3.3</b> | <b>Atuador Linear Elétrico</b>                                       | <b>50</b> |
| <b>3.4</b> | <b>Ponte H</b>                                                       | <b>52</b> |
| 3.4.1      | Módulo Ponte H L298N                                                 | 53        |
| <b>3.5</b> | <b>Sensores</b>                                                      | <b>54</b> |
| 3.5.1      | Encoder                                                              | 54        |
| 3.5.2      | Sensor Fotoelétrico                                                  | 55        |
| 3.5.3      | Potenciômetro                                                        | 55        |
| <b>3.6</b> | <b>Microcontrolador ATmega328P</b>                                   | <b>56</b> |
| <b>3.7</b> | <b>Filtros</b>                                                       | <b>57</b> |
| 3.7.1      | Filtro RC                                                            | 57        |
| 3.7.2      | Optoacoplador                                                        | 58        |
| 3.7.2.1    | Modelo PC817                                                         | 59        |
| 3.7.3      | Schmitt Trigger                                                      | 59        |
| 3.7.3.1    | CI 74HC14                                                            | 60        |
| <b>3.8</b> | <b>Display LCD e protocolo I2C</b>                                   | <b>61</b> |
| <b>4</b>   | <b>DESENVOLVIMENTO</b>                                               | <b>63</b> |

|            |                                                                     |            |
|------------|---------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>4.1</b> | <b>Requisitos de projeto</b>                                        | <b>63</b>  |
| <b>4.2</b> | <b>Descrição geral do sistema proposto</b>                          | <b>64</b>  |
| <b>4.3</b> | <b>Metodologia por módulos</b>                                      | <b>66</b>  |
| 4.3.1      | Interface com o usuário                                             | 67         |
| 4.3.2      | Controle de velocidade do enrolamento                               | 71         |
| 4.3.3      | Controle de deslocamento horizontal                                 | 74         |
| 4.3.4      | Deteção de rompimento da fita                                       | 77         |
| 4.3.5      | Unidade central de controle                                         | 79         |
| 4.3.6      | Robustez e imunidade a ruído                                        | 79         |
| 4.3.6.1    | Optoacoplador                                                       | 83         |
| 4.3.6.2    | Filtro RC                                                           | 84         |
| 4.3.6.3    | Schmitt Trigger                                                     | 84         |
| 4.3.6.4    | Filtragem aplicada no código                                        | 85         |
| 4.3.7      | Montagem do circuito de controle                                    | 85         |
| 4.3.7.1    | Alimentação do sistema                                              | 86         |
| <b>5</b>   | <b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>                                      | <b>89</b>  |
| <b>5.1</b> | <b>Validação funcional dos módulos e funcionalidades do sistema</b> | <b>90</b>  |
| 5.1.1      | Interface com o usuário e lógica de comando                         | 90         |
| 5.1.2      | Sistema de detecção de rompimento de fita                           | 91         |
| 5.1.3      | Funcionalidade de retomada de processo                              | 92         |
| 5.1.4      | Sistema de alinhamento horizontal                                   | 92         |
| <b>5.2</b> | <b>Validação experimental do controle de velocidade</b>             | <b>93</b>  |
| <b>5.3</b> | <b>Análise comparativa com a abordagem original</b>                 | <b>96</b>  |
| <b>6</b>   | <b>CONCLUSÃO</b>                                                    | <b>97</b>  |
|            | <b>REFERÊNCIAS</b>                                                  | <b>101</b> |
|            | <b>APÊNDICES</b>                                                    | <b>105</b> |
|            | <b>APÊNDICE A – FLUXOGRAMAS DE PROJETO</b>                          | <b>107</b> |
|            | <b>APÊNDICE B – CÓDIGO LADDER DO INVERSOR</b>                       | <b>109</b> |
|            | <b>APÊNDICE C – CÓDIGO DO ATMEGA328P</b>                            | <b>115</b> |
|            | <b>APÊNDICE D – CIRCUITO DE CONTROLE DO SISTEMA</b>                 | <b>123</b> |
|            | <b>APÊNDICE E – AUTORIZAÇÃO PARA DIVULGAÇÃO DE INFORMAÇÕES</b>      | <b>125</b> |



## 1 INTRODUÇÃO

A automatização de máquinas nos processos de fabricação industrial representa um movimento de grande relevância no mercado. Ao assumir tarefas repetitivas, esse processo reduz erros humanos e acelera a produção, diminuindo custos a longo prazo e aumentando os lucros por volume. A tendência nas grandes fábricas é que menos operários estejam diretamente na linha de produção, enquanto mais profissionais atuem no controle e supervisão de máquinas. Contudo, como uma linha de produção envolve diferentes processos, como solda, deslocamento, montagem e pintura, a automatização deve ser planejada cuidadosamente e implementada de maneira lenta, pois interrupções podem gerar custos expressivos.

Verifica-se assim uma área com inúmeras possibilidades de projetos e com grande demanda de mercado. A engenharia elétrica, como um dos principais campos que impulsionam a automação industrial, destaca-se por viabilizar soluções inovadoras e eficientes. Nesse contexto, justifica-se o desenvolvimento de um trabalho de conclusão de curso voltado à resolução de um problema prático relacionado à automação de processos produtivos.

Dentro de processos de fabricação é comumente desejado que a etapa final seja a responsável por preparar o produto para ser transportado e comercializado. Fios de lã precisam ser enrolados em carretéis, folhas de papel são empilhadas em resmas e garrafas são agrupadas em fardos. O processo de enrolamento em específico é aplicado para o armazenamento de diversos materiais além do fio de lã. Cordas, fios elétricos, cabos, arame, tubos flexíveis, fitas adesivas, papel plástico, fitas de grampos para clipagem de concertina, entre outros diversos materiais exemplificam isso.

A concertina é um dispositivo de segurança formado por espirais de arame com lâminas cortantes, que é instalado em formato helicoidal como uma proteção perimetral em muros e portões. A instalação utiliza grampos de clipagem, com a finalidade de manter as espiras unidas, dando segurança estrutural e evitando deformação.

O processo produtivo desses grampos começa com o desbobinamento da matéria-prima, geralmente uma bobina de chapa metálica de aço galvanizado. Em seguida, a chapa é estampada e cortada em uma prensa, resultando em grampos interligados por um fio de nylon e alinhados em uma fita. Por fim, essa fita é bobinada em um carretel, ficando pronta para comercialização. Contudo, tal processo de enrolamento não é algo trivial.

A fita de grampos sai da prensa a uma velocidade determinada pelo processo de estampagem, que pode ser considerada constante. Para que ela seja enrolada no carretel de maneira homogênea e sem folgas significativas, o carretel precisa rotacionar de maneira que sua velocidade superficial sempre seja igual à velocidade de saída da fita. Como a

fita tem uma altura considerável, cerca de 10 mm, o diâmetro do carretel aumenta a cada camada de fita enrolada, e a velocidade de rotação precisa ser ajustada para que a velocidade superficial permaneça constante. Além disso, o deslocamento horizontal da fita deve ser controlado, caso o operador deseje um carretel com mais de uma volta de fita em seu comprimento.

O presente trabalho tem como objetivo desenvolver um protótipo para automatizar o processo de enrolamento de fitas de grampos para clipagem de concertina, para ser utilizado como etapa final do processo de fabricação desse material. Além de resolver os desafios destacados, o protótipo incluirá funcionalidades adicionais, como a detecção de rompimento da fita, com parada automática do sistema. Essas funcionalidades aprimoram a eficiência e a confiabilidade do processo, agregando valor à produção.

Dessa forma, este trabalho propõe a realização de uma revisão bibliográfica de soluções atuais para problemas similares, considerando tecnologias e abordagens aplicadas em processos de automação. Com base nessa revisão, serão determinados os objetivos específicos do projeto, incluindo a lógica de funcionamento e os critérios de desempenho esperados para a máquina. Por fim, pretende-se construir e validar um protótipo funcional que não apenas atenda aos requisitos previamente estabelecidos, mas também seja capaz de demonstrar a viabilidade prática da solução proposta.

## 1.1 Contexto e motivação

Este trabalho foi desenvolvido em parceria com a empresa Inca Soluções Mecânicas Industriais, sediada em Bauru, SP. Fundada em 2008, a Inca é especializada na fabricação de equipamentos voltados à segurança no transporte industrial, com destaque para dispositivos destinados à movimentação de tambores e bombonas. Além de sua linha regular de produtos, a empresa atua fortemente no desenvolvimento de soluções sob demanda, voltadas a necessidades específicas do setor produtivo.

Entre seus projetos personalizados, destaca-se o desenvolvimento de uma máquina para produção de concertinas, dentre outros equipamentos relacionados. Durante a restauração de uma prensa utilizada na fabricação de grampos de clipagem para concertinas, a Inca desenvolveu uma solução automatizada para o processo de enrolamento da fita de grampos, etapa final do processo produtivo. A solução desenvolvida pela Inca atendeu aos critérios do cliente, sendo implementada com sucesso e permanecendo em operação.

Apesar da funcionalidade alcançada, a empresa identificou oportunidades de aprimoramento no sistema, que pode ser replicado em projetos futuros, sobretudo no que se refere à confiabilidade e à possibilidade de agregar funcionalidades adicionais, como monitoramento de falhas operacionais. A partir desse cenário, foi estabelecida uma colaboração com a autora deste trabalho, com o objetivo de investigar, propor e validar uma solução

aprimorada para o processo de enrolamento.

A proposta deste projeto, portanto, insere-se no contexto de pesquisa e desenvolvimento aplicada, visando consolidar e expandir os resultados já obtidos pela empresa. A Inca contribuiu com informações técnicas, histórico do processo e acesso ao problema real, enquanto este trabalho retorna à empresa uma proposta técnica estruturada, validada experimentalmente, com potencial de aplicação prática.

## 1.2 Objetivos

O objetivo deste trabalho é desenvolver uma solução automatizada para o processo de enrolamento de fitas de grampos utilizadas na montagem de concertina, com foco em garantir alinhamento, uniformidade e confiabilidade operacional. O sistema proposto deverá ser capaz de adaptar-se às variações do processo, manter o controle da velocidade superficial do enrolamento e possibilitar a distribuição homogênea da fita no carretel.

Além disso, busca-se incorporar funcionalidades que ampliem a segurança e a robustez do processo, como a interrupção automática em caso de falha e uma interface intuitiva de operação. O projeto será estruturado com base em princípios consolidados de automação e controle, considerando também versatilidade de aplicação e integração física com o ambiente industrial.

A partir da definição dos requisitos e do estudo da solução atualmente empregada pela empresa parceira, o trabalho propõe a elaboração de um protótipo funcional que reflita os avanços propostos e permita a validação experimental da solução desenvolvida.

## 1.3 Estrutura do trabalho

Este trabalho está organizado em seis capítulos, distribuídos de forma a acompanhar a progressão lógica do projeto — desde a contextualização do problema até a validação da solução proposta.

O Capítulo 1 apresenta a introdução ao tema, contextualizando a motivação do projeto, sua origem na parceria com a indústria e os objetivos a serem alcançados.

O Capítulo 2 reúne a revisão bibliográfica, abordando inicialmente conceitos de automação e sua relação com a Indústria 4.0, em seguida explorando aplicações industriais similares e trabalhos acadêmicos correlatos. Na sequência, apresenta o contexto específico da fita de grampos utilizada para clipagem de concertinas, a solução industrial anteriormente desenvolvida para esse processo e os desafios observados.

O Capítulo 3 apresenta os fundamentos teóricos necessários para a compreensão do projeto, com destaque para os princípios de funcionamento dos componentes aplicados ao sistema.

O Capítulo 4 trata do desenvolvimento da solução proposta. Sua organização parte da definição dos requisitos do projeto e da apresentação geral do sistema, avançando progressivamente para uma descrição mais detalhada por módulos.

O Capítulo 5 expõe os resultados obtidos, descrevendo a estratégia de testes, os dados coletados e a análise técnica da solução.

Por fim, o Capítulo 6 apresenta as conclusões do trabalho, com uma síntese dos principais resultados e considerações finais sobre a aplicabilidade e o potencial de evolução da proposta desenvolvida. Também discute as limitações observadas e propõe possíveis melhorias.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo reúne os fundamentos teóricos e os referenciais técnicos que embasam o desenvolvimento do projeto. Inicia-se com uma contextualização da automação industrial no cenário da Indústria 4.0 e sua aplicação em processos anteriormente manuais. Em seguida, são discutidos sistemas de enrolamento utilizados em diferentes setores produtivos, com foco nos desafios técnicos associados. São apresentados também trabalhos acadêmicos relacionados, que, embora com escopos distintos, ofereceram suporte metodológico e inspiração para as decisões do projeto. Por fim, aborda-se o contexto específico da produção de grampos CL-37, com base nas informações fornecidas pela empresa parceira, descrevendo a solução original implementada e as limitações que motivaram a proposta de uma nova abordagem.

### 2.1 Indústria 4.0 e automação de processos

A automação industrial é um dos pilares da modernização dos sistemas produtivos, promovendo a transição de atividades repetitivas e manuais para operações controladas por sistemas eletrônicos e computacionais. Essa transição tem como objetivo principal aumentar a eficiência, a confiabilidade e a segurança dos processos, reduzindo a variabilidade inerente à operação humana e otimizando o uso de recursos (LAMB, 2013).

Desde meados do século XX, a automação evoluiu da simples mecanização com relés e temporizadores para sistemas integrados que combinam sensores, atuadores, controladores e algoritmos. A substituição de circuitos lógicos discretos por controladores programáveis foi um marco dessa evolução. No entanto, a automação atual vai além dos CLPs, incorporando também inversores de frequência, sensores inteligentes, atuadores lineares e interfaces homem-máquina, compondo soluções completas para controle de processos industriais (MAZUR; WEINDORF, 2020).

Essa ampliação de ferramentas reflete o cenário industrial contemporâneo, que demanda maior flexibilidade e capacidade de adaptação dos sistemas de automação. Diferentemente das soluções engessadas do passado, as aplicações modernas buscam sistemas modulares, reconfiguráveis e compatíveis com uma variedade de dispositivos de entrada e saída. Assim, além de controlar operações, esses sistemas também são capazes de interagir com o ambiente e ajustar seu comportamento em tempo real.

Entre as aplicações mais representativas dessa transformação estão os processos de movimentação e manipulação de materiais — como linhas de transporte, empacotamento, corte e enrolamento. Tradicionalmente realizados de forma manual, esses processos vêm sendo substituídos por sistemas automatizados que oferecem maior precisão, repetibilidade

e padronização. O caso específico do enrolamento de materiais, por exemplo, exige controle simultâneo da velocidade, tensão mecânica e avanço coordenado de atuadores, o que demanda uma solução integrada de hardware e software.

Portanto, a automação de processos industriais não apenas representa um avanço tecnológico, mas também uma resposta prática às exigências atuais de produção enxuta, qualidade constante e adaptabilidade. É nesse contexto que se insere o desenvolvimento do sistema automatizado proposto neste trabalho, cuja finalidade é substituir uma operação manual por uma solução mais precisa, segura e eficiente.

### 2.1.1 Sistemas industriais de enrolamento

Os sistemas industriais de enrolamento consistem em máquinas e mecanismos projetados para enrolar materiais contínuos em bobinas, carretéis ou rolos para facilitar seu manuseio, armazenamento ou processamento subsequente. Esses sistemas estão presentes em diversos setores industriais e são considerados muito comuns em aplicações que envolvem papel, têxteis, filmes plásticos, folhas metálicas e outros materiais similares. Em cada uma dessas áreas, o enrolamento cumpre o papel crucial de acondicionar produtos de comprimento contínuo de forma compacta e organizada, viabilizando etapas de transporte e uso posterior no processo produtivo. São diversos os exemplos representativos em diferentes segmentos industriais, bem como os desafios técnicos e a evolução desses mecanismos.

No setor de fios e cabos, os sistemas de enrolamento são fundamentais para produtos como arames elétricos, cabos de energia ou bobinas magnéticas de motores e transformadores. Nesses casos, o material geralmente é enrolado em carretéis ou bobinas cilíndricas, garantindo que possa ser desenrolado posteriormente sem emaranhamentos. A precisão da tensão durante o enrolamento é crítica: o processo de enrolar fios em bobinas exige controle rigoroso de tensão, pois variações podem afetar diretamente a qualidade final do produto. Além disso, pesquisas apontam que falhas no controle de tensão durante a fabricação de cabos podem reduzir suas propriedades físicas, mecânicas e elétricas, prejudicando o desempenho desses produtos (HUANG *et al.*, 2020).

Em indústrias de papel, filmes plásticos, laminados metálicos e têxteis, o enrolamento de material em formato de web (faixa contínua) é uma etapa indispensável da produção. Por exemplo, fábricas de papel produzem enormes rolos contínuos que precisam ser enrolados a altas velocidades e larguras consideráveis, podendo alcançar milhares de metros por minuto. Nesses sistemas, manter a tensão adequada ao longo de todo o processo é o principal objetivo operacional, pois variações podem causar defeitos graves: tensões insuficientes levam à formação de rugas ou dobras, enquanto tensões excessivas podem provocar o rompimento do material. Ambos os casos afetam a qualidade do produto final e a produtividade da linha. Um desafio adicional é que a velocidade do material e a tensão estão fortemente acopladas – mudanças de velocidade ou desacelerações bruscas durante o

enrolamento tendem a gerar oscilações na tensão e vice-versa. Para lidar com isso, sistemas de enrolamento de papel e filmes incorporam sensores e algoritmos de controle avançado que ajustam continuamente freios ou motores, mantendo a tensão estável mesmo com variações de diâmetro do rolo ou interferências externas (HOU *et al.*, 2018).

Os mecanismos de enrolamento evoluíram significativamente ao longo das décadas, acompanhando os avanços da engenharia mecânica e de controle. Historicamente, muitas operações de enrolar eram realizadas manualmente ou com máquinas puramente mecânicas, o que exigia grande habilidade dos operadores e limitava a repetibilidade. No contexto de enrolamento de bobinas elétricas, por exemplo, aponta-se que antigamente esse processo era feito à mão ou em equipamentos simples; atualmente, entretanto, tornou-se um campo interdisciplinar que abrange ciência dos materiais, tecnologia de processos, engenharia mecânica, controle e engenharia elétrica. De forma geral, a incorporação de acionamentos eletrônicos e sistemas de controle computadorizados possibilitou aos enroladores modernos atingirem velocidades mais altas e maior precisão (HAGEDORN; BLANC; FLEISCHER, 2018).

Os exemplos e desafios apresentados evidenciam que os sistemas de enrolamento desempenham um papel vital em uma ampla gama de indústrias modernas. Seja enrolando fios condutores, grandes bobinas de papel ou filmes plásticos finos, a demanda por máquinas confiáveis e eficientes de enrolamento é elevada e contínua no setor industrial. Essa onipresença justifica tanto o interesse quanto a especialização direcionada ao tema pela autora deste projeto.

### 2.1.2 Trabalhos acadêmicos relacionados

A fim de orientar o desenvolvimento do presente projeto — de caráter essencialmente prático e com aplicação industrial específica — foi realizada uma pesquisa direcionada a trabalhos acadêmicos que, embora não tratem diretamente do enrolamento de fita de grampos, abordam soluções técnicas relevantes em automação de sistemas mecatrônicos. O objetivo dessa investigação foi de identificar abordagens semelhantes em termos de arquitetura de controle, tipos de acionamento, escolha de sensores e estrutura lógica dos sistemas. Esses trabalhos funcionaram como uma base de referência para a tomada de decisões técnicas, fornecendo exemplos reais de implementação e validação de conceitos fundamentais.

Um exemplo relevante é a dissertação de Raniel (2011), que aborda o desenvolvimento e a implementação de um sistema de controle de posição e velocidade para uma esteira transportadora, utilizando um inversor de frequência e um microcontrolador. O autor empregou um encoder incremental para garantir precisão no posicionamento e um sensor indutivo como referência no deslocamento da esteira. Embora o objeto de estudo seja diferente de um bobinador, o uso de um microcontrolador associado a um inversor

para controle de velocidade, bem como a aplicação de sensores para realimentação do sistema, apresenta paralelos importantes com este projeto.

O trabalho de Caldas (2021) aborda a automação de um sistema de desenrolamento e enrolamento de fio têxtil, apresentando soluções que compartilham semelhanças com este projeto, especialmente no que se refere ao uso de um CLP para controle de movimentação. Nesse estudo, são discutidos requisitos de projeto, fluxogramas de operação e a modelagem do controle através de GRAFCETs para implementação em ladder. Embora o objeto de estudo esteja voltado para a indústria têxtil, os métodos empregados, como a estruturação lógica do controle e a sistematização dos fluxos operacionais, foram referência para a documentação detalhada e organização do presente projeto de automação, reforçando a importância de um planejamento estruturado para a implementação de um sistema.

O trabalho de Silva (2013) apresenta a automação de uma bobinadeira, propondo uma abordagem mais prática, com a construção de uma máquina para o enrolamento de bobinas eletromagnéticas. O sistema desenvolvido emprega um microcontrolador no circuito de controle, um motor de corrente contínua para a rotação do carretel e um motor de passo para o deslocamento do fio de cobre em duas direções, permitindo também o ajuste do comprimento de enrolamento. Um diferencial relevante do projeto foi a implementação de um display LCD, utilizado como uma interface homem-máquina (IHM) simples para a configuração dos parâmetros de entrada. Embora a proposta possua um escopo mais voltado para aplicações laboratoriais, diversas estratégias empregadas, como o controle preciso da movimentação do fio e o uso de um microcontrolador para gerenciar as operações do sistema, apresentam similaridades com o presente projeto. A principal distinção entre os trabalhos está no caráter industrial da solução almejada.

Devido aos objetivos práticos e específicos deste projeto, não foi possível encontrar trabalhos que abordassem diretamente um enrolador de grampos CL-37. Projetos industriais são tratados como propriedade intelectual, mas os conceitos aplicados são facilmente encontrados na literatura. Assim, os trabalhos analisados apresentaram soluções análogas, servindo como referência para algumas escolhas do presente estudo. Isso reforça a necessidade de integrar diferentes conceitos da engenharia elétrica na automação e destaca seu amplo potencial de aplicação.

## **2.2 Contexto aplicado: fita de grampos para máquina de concertina**

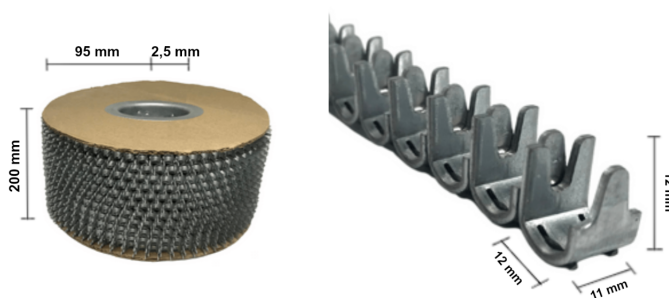
O entendimento da solução originalmente implementada é essencial para contextualizar os avanços propostos neste trabalho. Antes de apresentar os circuitos, os mecanismos e as limitações identificadas, é necessário compreender como o processo de fabricação dos grampos ocorre e qual é a função da etapa de bobinagem nesse sistema. Esta seção descreve o funcionamento da prensa utilizada na produção dos grampos CL-37, a dinâmica de alimentação do material e o contexto em que a bobinagem foi inserida de forma



complementar à operação.

A matéria-prima utilizada para a produção dos grampos é uma fita metálica. Após a produção, o grampo CL-37 normalmente é fornecido em formato de rolo ou bobina, como exemplificado na figura 1, que também apresenta uma vista dos grampos. A prensa utilizada é automática e realiza a estampagem por meio de moldes, sem a necessidade de acionamento manual a cada ciclo. O molde é selecionado de acordo com as características do grampo CL-37, podendo ser trocado conforme as especificações do produto a ser fabricado.

Figura 1 – Dimensões de rolo e grampos



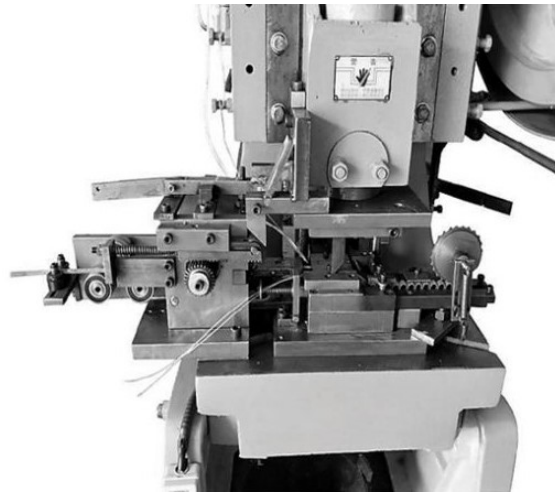
Fonte: Brasil Grampos (2025)

A prensa conta com um sistema automatizado que gerencia o ciclo de estampagem. Por meio de um motor, o material é tracionado, posicionado e prensado, em um movimento intermitente. A figura 2 ilustra a prensa e o mecanismo utilizado, destacando o caminho da fita metálica desde sua entrada até sua saída da máquina. Como resultado, obtém-se uma fita de grampos — ou seja, a fita metálica já estampada — em que os grampos são interligados por fios de nylon, fixados à estrutura pela própria prensa.

A velocidade de funcionamento da prensa trabalhada é de 108 estampagens por minuto, sendo que cada estampagem gera um grampo de 12 mm de comprimento (INCA SOLUÇÕES, 2024). Mesmo com o movimento intermitente do sistema, é possível estimar a velocidade média de deslocamento da fita metálica. Ao final do processo, o material sai da prensa finalizado e pronto para ser comercializado. Assim, aproveitando o deslocamento contínuo da fita provocado pela tração da prensa, realiza-se o enrolamento da fita. Como o produto é vendido nesse formato, o enrolamento deve ser homogêneo e padronizado, garantindo um bom acondicionamento do material para transporte e uso.

Durante a operação, é papel do operador supervisionar o funcionamento da máquina e intervir quando necessário. Uma das principais situações que exigem parada imediata é o rompimento da fita, que compromete tanto a continuidade do processo quanto a integridade do produto.

Figura 2 – Prensa de grampos CL-37



Fonte: MWM Technic - Empresa de Máquinas (2025)

### 2.2.1 Definição da solução como projeto original

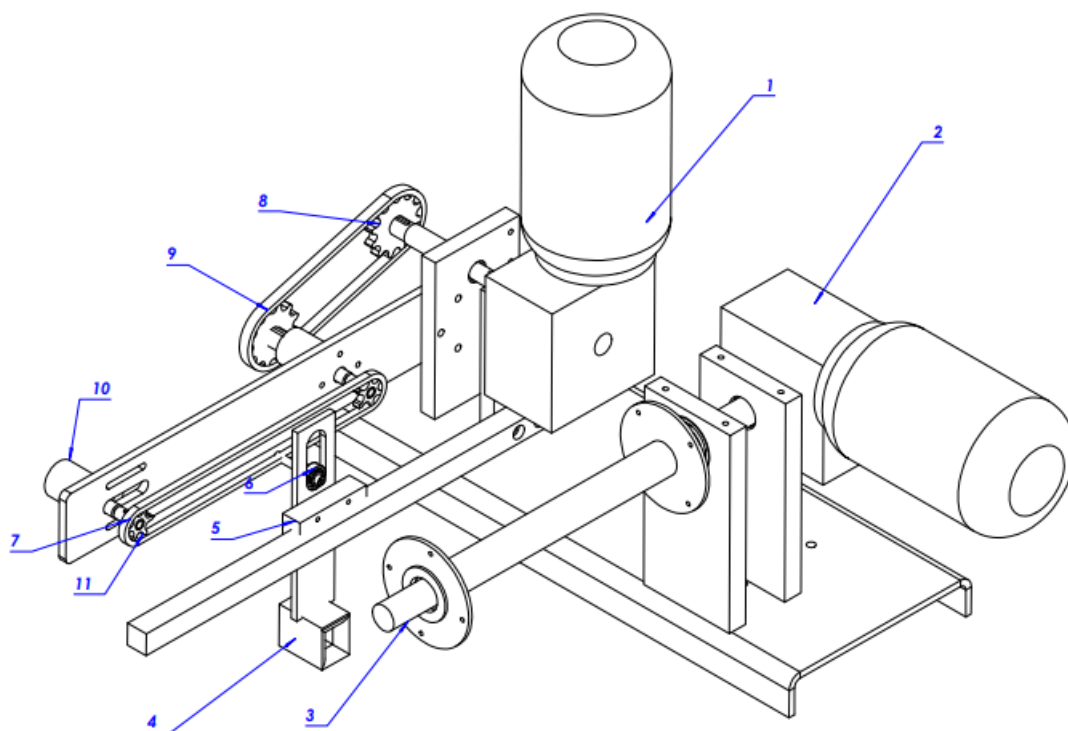
A primeira solução desenvolvida para a etapa de bobinagem foi concebida pela própria empresa parceira, atendendo às demandas iniciais de produção e comercialização do produto. Embora funcional, essa solução apresentou limitações que motivaram as melhorias propostas neste trabalho. A seguir, apresenta-se uma visão geral da solução original, destacando os mecanismos utilizados e a lógica implementada para garantir o enrolamento da fita de grampos. O sistema é composto por um conjunto mecânico de alinhamento horizontal e de um circuito de controle. Compreender a estrutura e o funcionamento desse sistema é fundamental para identificar os pontos críticos de melhoria e para justificar as decisões de projeto adotadas posteriormente.

#### **Alinhamento mecânico**

Para a realização do alinhamento horizontal no processo de enrolamento, utiliza-se um dispositivo mecânico, acionado pelo mesmo motor utilizado no eixo do rolo. A figura 3 apresenta o dispositivo. Nessa representação, dois motores diferentes são ilustrados para facilitar a compreensão do funcionamento. A seguir, tem-se também a lista descrevendo cada peça ilustrada.

1. Motor redutor do leva e traz
2. Motor redutor do carretel
3. Eixo e flange do carretel
4. Guia de passagem dos grampos

Figura 3 – Dispositivo de alinhamento horizontal



Fonte: INCA SOLUÇÕES (2024)

- 5. Guia linear horizontal
- 6. Rolamento guia vertical
- 7. Corrente leva e traz
- 8. Engrenagem motriz do sistema leva e traz
- 9. Corrente de transmissão
- 10. Mancal do eixo da engrenagem 11
- 11. Engrenagem
- 12. Chapa suporte fixada na guia horizontal

Para a realização do alinhamento horizontal do rolo, a fita de grampos deve se deslocar horizontalmente na mesma medida da largura da fita a cada rotação realizada pelo motor do rolo. Assim, completa-se uma camada ao percorrer todo o comprimento do rolo, e inicia-se outra ao repetir o movimento horizontal no sentido contrário. Faz-se isso até atingir-se o número de camadas necessárias. Para realizar esse processo, utiliza-se um dispositivo mecânico, que também é acionado pelo motor do rolo.

O rolo é fixado no dispositivo em um eixo, através de flanges, realizando apenas o movimento de rotação. Adiante do rolo, tem-se o guia linear horizontal, que atua como um trilho para a peça que sustenta a fita. Essa peça seria o guia de passagem da fita de grampo, esse guia atua como uma corredeira. A passagem da fita é feita por uma cavidade estreita e chanfrada, que permite que a fita corra, mas evita desvios e rompimentos.

O guia de passagem da fita é movimentado através de um rolamento, e este apresenta um eixo conectado entre os dentes da corrente leva e traz. Essa corrente é acionada por uma engrenagem que divide seu eixo com outra engrenagem, que por sua vez é responsável por transmitir o movimento da engrenagem motriz através de uma correia. A engrenagem motriz é movimentada pelo motor que também controla o eixo do rolo.

A corrente tem o mesmo comprimento do rolo, e permite deslocar o guia horizontalmente respeitando os limites estabelecidos. Devido ao diâmetro das engrenagens que sustentam a corrente, existe um pequeno deslocamento vertical, que é sanado através de um rasgo vertical correspondente. Assim, nos momentos que há esse deslocamento, o enrolamento e o rasgo do trilho atuam, permitindo que o guia apenas se movimente horizontalmente, mas em ambos os sentidos.

A corrente possui um dente de mesma largura que o passo da engrenagem que a movimenta, que também é a largura da fita de grampos, 12 mm. A cada rotação que o motor realiza, tem-se o deslocamento de um dente, e conseqüentemente, o deslocamento da largura da fita, permitindo o deslocamento perfeito entre as rotações.

### **Circuito de controle**

O circuito eletrônico utilizado no funcionamento original da máquina foi projetado em uma PCB, apresentada na figura 4.

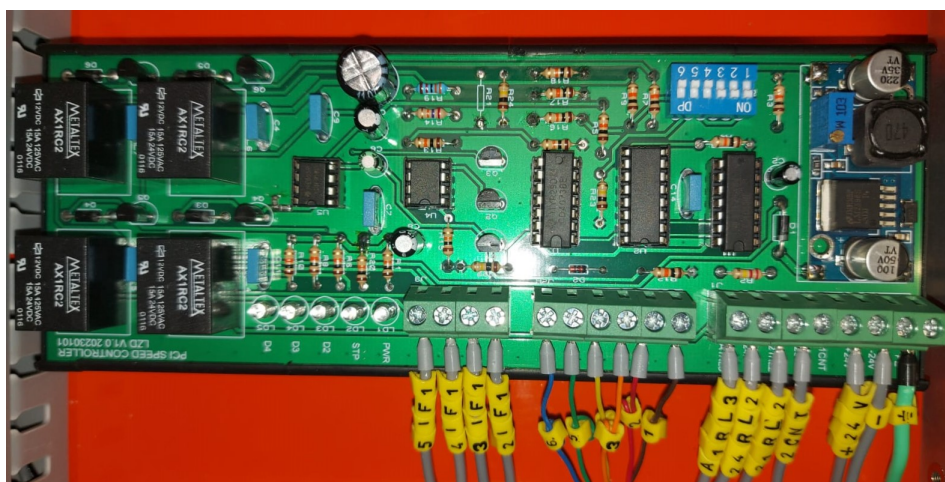
Para compreender o funcionamento do circuito eletrônico, primeiramente são definidos os sinais de entrada. Além da alimentação de 24 V, tem-se as entradas dos relés respectivos aos botões de RESET (relé 1), STOP (relé 2) e de um contador digital (relé 3).

O sinal de entrada do contador digital informa quando uma camada foi completada. Para isso, tem-se um encoder no eixo do motor do rolo a ser bobinado, e tem-se o conhecimento prévio de quantas voltas são necessárias para completar uma camada no rolo. Assim, sabendo também a resolução de pulsos do encoder, o contador é configurado para enviar um pulso para o circuito de controle sempre que uma camada for completada, ou seja, quando a contagem de pulsos do encoder chegar a:

$$\text{Contagem} = \text{resolução do encoder} \times n^{\circ} \text{de voltas } p / \text{camada}$$

Após uma camada, o diâmetro do rolo aumenta. Ajusta-se a velocidade do rolo, para que continue sendo a mesma da saída da fita, mas faz-se a observação que para enrolar

Figura 4 – PCB do sistema original



Fonte: INCA SOLUÇÕES (2024)

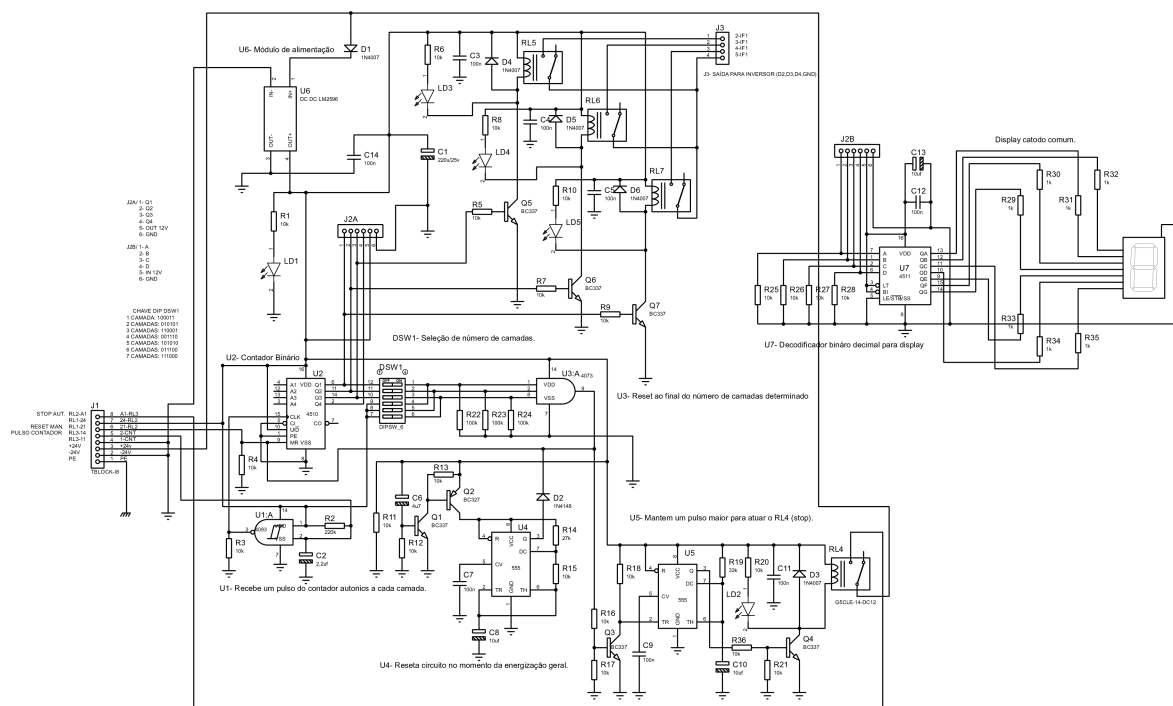
a nova camada é necessário utilizar mais material devido o aumento da circunferência. Então, regula-se a velocidade, e o tempo de enrolamento da nova camada obrigatoriamente aumenta. Justifica-se então a necessidade do encoder, visto que esse valor de tempo não é constante.

Além de conhecer o número de voltas necessárias para completar uma camada no rolo, determina-se a velocidade a ser adotada pelo motor do rolo em cada camada. A velocidade de superfície do rolo deve ser sempre igual à velocidade de saída da fita da prensa. A circunferência do rolo apenas se altera com o fim do enrolamento de uma camada, e nesse ponto, deve-se calcular a nova velocidade do motor do rolo para compensar o aumento do diâmetro, sendo a nova velocidade inversamente proporcional a esse aumento. Assim, conhecendo-se o diâmetro inicial do rolo, e as dimensões da fita a ser enrolada, faz-se os cálculos para determinar as sete velocidades a serem utilizadas durante o processo, visto que neste projeto foram consideradas sete camadas.

Com isso, conclui-se a parte de pré-funcionamento. Em seguida, é apresentada a explicação da lógica de circuito utilizada para que a cada fim de enrolamento de uma camada, a respectiva velocidade da camada seguinte seja implementada no motor do rolo. Como referência, tem-se a figura 5, que apresenta o diagrama esquemático do circuito.

O circuito é energizado, o motor começa a operar com a velocidade inicial, de condição zero, e o contador inicia. Quando uma camada de enrolamento é completada, o contador emite um pulso, e esse pulso é transmitido ao circuito de controle, para um contador, CI 4510, no canal de clock. Assim, ao identificar uma borda de subida no clock, os quatro pinos de saída fornecem o resultado da contagem, que é incrementada em 1. Observa-se que este CI opera em código BCD.

Figura 5 – Esquemático do circuito eletrônico original



Fonte: INCA SOLUÇÕES (2024)

Cada saída do contador é conectada a um relé, sendo estes especificados no circuito por relé 5, 6 e 7. Dos relés, partem as saídas que se conectam ao inversor de frequência. O inversor, com as velocidades pré-programadas, passa a operar o motor de enrolamento de acordo com a camada indicada pela contagem do contador, cujo valor é transmitido pelos relés.

As saídas do contador também são conectadas a uma porta AND de três entradas. Como tem-se um máximo de 7 camadas, a contagem em BCD chega até 0111, sem a necessidade de usar o 4º dígito. Sendo assim, as saídas válidas do contador são conectadas na porta AND, que tem saída lógica 1 se todas as entradas forem ativadas, ou seja, ao se atingir a camada 7. Isso indica que a camada 7 foi completada e envia-se um pulso para o trigger de um CI 555.

O CI 555 tem como objetivo atuar o relé 4 para o STOP do circuito e do sistema. Sendo assim, opera no modo monoestável, mantendo o pulso por mais tempo para atuar o relé e tirar a energização do circuito.

O contador é reiniciado sempre que o circuito é energizado, garantindo que a velocidade inicial seja para o enrolamento de condição zero. Para isso, utiliza-se outro CI 555, que emite um pulso quando é energizado, e então envia um sinal conectado ao MR VSS do contador 4510, que é o pino de reset.

Compondo o circuito, tem-se também o uso do CI 4511, um decodificador BCD para display de 7 segmentos. As saídas do contador são conectadas às entradas deste CI, que, por meio de um display cátodo comum, conta e exibe o número de camadas completadas no processo de enrolamento no painel da máquina.

Por fim, o circuito conta com um módulo regulador de tensão, conversor DC-DC LM2596, que recebe como entrada 24 V e tem como saída 12 V, sendo utilizado para alimentar a placa eletrônica.

### 2.2.2 Problemas enfrentados no processo atual

Embora funcional, a solução originalmente adotada pela empresa parceira deixou a desejar em aspectos considerados essenciais para projetos futuros. Segundo a INCA SOLUÇÕES (2024), o principal deles foi a ausência de memória: após qualquer desligamento ou interrupção, o sistema perdia seu estado e reiniciava do zero, exigindo reconfiguração manual e comprometendo a continuidade do processo.

O circuito de controle era baseado em lógica discreta com componentes fixos, dificultando alterações e manutenções. As velocidades de enrolamento eram parametrizadas diretamente no inversor, com valores fixos, tornando o sistema pouco adaptável a mudanças de configuração, criando-se a necessidade de acessar diretamente o inversor para ajustar parâmetros de operação. Isso exige conhecimento técnico específico, inviabilizando adaptações rápidas ou ajustes frequentes no processo.

O alinhamento horizontal da fita era totalmente mecânico, sem controle programável, o que impedia ajustes dinâmicos para diferentes larguras de fita. Além disso, não havia instrumentação para detectar falhas como o rompimento da fita.

A interface com o operador era limitada: o sistema dispunha apenas de botões físicos e um display de 7 segmentos para contagem de camadas, sem diagnóstico de falhas ou exibição de mensagens. O botão de emergência não era complementado por mecanismos de parada automática em caso de falha.

Esses fatores motivaram o desenvolvimento de uma nova solução, com foco em flexibilidade, retomada automática do processo, maior sensoramento e capacidade de interação mais eficiente com o operador.





### 3 EMBASAMENTO TEÓRICO

Este capítulo apresenta os fundamentos teóricos que sustentam o desenvolvimento deste trabalho, com ênfase nos princípios físicos e eletrônicos associados aos componentes utilizados. São abordados conceitos essenciais para a compreensão do funcionamento do sistema proposto, bem como as bases técnicas que orientaram as decisões de projeto e implementação.

#### 3.1 Motor de Indução Trifásico

Motores de indução trifásicos são máquinas elétricas rotativas utilizadas para a conversão de energia elétrica em energia mecânica, operando a partir da aplicação de tensões alternadas trifásicas defasadas entre si em  $120^\circ$ . O princípio de funcionamento baseia-se na indução eletromagnética: um campo magnético girante gerado no estator induz correntes no rotor, produzindo o torque necessário para o acionamento mecânico. O tipo mais comum em aplicações industriais é o motor de indução do tipo gaiola de esquilo, devido à sua construção robusta, operação confiável e baixo custo de manutenção (FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 2006).

Para aplicações com controle por inversores de frequência, os motores devem apresentar projeto eletromecânico adequado à operação em ampla faixa de velocidades, com isolamento reforçado e ventilação compatível com baixos regimes de rotação. Motores industriais como os da linha WEG IR2 são desenvolvidos para esse tipo de operação, garantindo desempenho satisfatório em situações críticas de torque e aquecimento. Tais motores atendem aos requisitos das normas internacionais de eficiência energética (como a IEC 60034-30) e são compatíveis com variação de velocidade sem necessidade de sobredimensionamento ou ventilação forçada adicional (WEG EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS S.A., 2023c).

No sistema automatizado desenvolvido, foi utilizado um motor de indução trifásico WEG com potência nominal de 0,5 cv, tensão de operação 220 V (ligação triângulo) e frequência de 60 Hz. As principais especificações do motor estão organizadas na Tabela 1.

É importante considerar a corrente de partida em motores de indução trifásicos corresponde a um valor várias vezes maior que a corrente nominal, devido à ausência, no instante inicial, da força contraeletromotriz (FCEM) que é induzida no rotor quando este está em movimento. Sem essa FCEM para se opor à tensão aplicada, a corrente inicial é limitada principalmente pela impedância do estator e do rotor bloqueado. Normalmente, essa corrente é indicada pela relação  $I_a/I_n$ , onde  $I_a$  representa a corrente absorvida na partida e  $I_n$  a corrente nominal de operação do motor. Tal relação, tipicamente encontrada

Tabela 1 – Especificações técnicas do motor trifásico utilizado

| Característica       | Valor             |
|----------------------|-------------------|
| Potência nominal     | 0,5 cv (0,368 kW) |
| Tensão nominal       | 220 V             |
| Frequência nominal   | 60 Hz             |
| Velocidade nominal   | 1690 rpm          |
| $I_n$                | 1,77 A            |
| $I_a/I_n$            | 4,8               |
| Tipo de rotor        | Gaiola de esquilo |
| Grau de proteção     | IP55 (TEFC)       |
| Classe de isolamento | F                 |
| Tipo de montagem     | B3 (com pés)      |

Fonte: WEG EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS S.A. (2022b)

nas especificações técnicas do fabricante, permite estimar a corrente inicial requerida para o correto dimensionamento dos dispositivos de proteção elétrica e condutores de alimentação, garantindo operação segura e confiável do sistema.

Outro fator importante é o aterramento do motor elétrico, uma etapa fundamental na montagem de sistemas elétricos industriais, visando garantir segurança operacional e proteção contra choques elétricos em situações de falha ou fuga de corrente. A conexão adequada ao sistema de aterramento reduz o risco de acidentes e protege o equipamento. Conforme preconizado pela ABNT NBR 5410 para instalações elétricas de baixa tensão seguras, a carcaça do motor deve ser conectada ao condutor de proteção (PE) da edificação. Em sistemas como o TN-S, onde este condutor PE é distinto do neutro, garante-se um caminho seguro e de baixa impedância para a terra, essencial para a rápida atuação dos dispositivos de proteção da instalação em caso de falha no motor. O motor trifásico utilizado no projeto já possui um ponto específico para essa conexão, havendo um parafuso fixado à carcaça, indicado pelo fabricante, ao qual deve ser conectado o condutor terra.

### 3.2 Inversor de Frequência

O inversor de frequência é um dispositivo eletrônico de potência utilizado para controlar a velocidade e o torque de motores de indução, variando a frequência e a amplitude da tensão fornecida ao motor. Seu princípio de funcionamento baseia-se na conversão da corrente alternada (CA) da rede elétrica em corrente contínua (CC), seguida da reconversão em uma corrente alternada com frequência e tensão ajustáveis, por meio de modulação por largura de pulso (PWM). Essa flexibilidade permite otimizar a operação do motor conforme a demanda do processo, reduzindo perdas e proporcionando maior eficiência energética (CHAPMAN, 2012).

Em muitos inversores, adota-se o controle escalar V/f, que ajusta proporcionalmente a tensão de saída em função da frequência, mantendo constante a razão V/f com o objetivo de preservar o fluxo magnético no entreferro. Essa abordagem garante que o motor opere com torque adequado ao longo da faixa de velocidade, evitando saturação em baixas frequências e enfraquecimento de campo em altas. Esse controle é simples, eficaz em aplicações de torque constante e pode ser facilmente implementado via modulação PWM no estágio inversor (CHAPMAN, 2012).

Uma etapa essencial no uso do inversor é a parametrização, que consiste no processo de configuração dos parâmetros internos do dispositivo, definindo as condições específicas de operação do motor e adequando o sistema às necessidades do processo controlado. Essa etapa envolve ajustes como seleção do modo de controle (escalar ou vetorial), frequência e tensão de referência, tempo das rampas de aceleração e desaceleração, limites de corrente e torque, além das funções associadas às entradas e saídas digitais e analógicas.

No sistema proposto, foi utilizado o modelo CFW300A02P6S1NB20, da WEG. Esse modelo pertence à linha CFW300, apresentada na figura 6, caracterizada pelo seu tamanho compacto, alta performance, e integração facilitada em painéis de controle. O sufixo 02P6 indica capacidade nominal de saída de 2,6 A, enquanto o código S1 indica alimentação monofásica com tensão de entrada de 110–127 Vca (WEG EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS S.A., 2023a).

Figura 6 – Inversor CFW300



Fonte: WEG EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS S.A. (2023a)

O CFW300 permite a seleção entre modos de controle escalar (V/f) e vetorial (VVW), além de recursos avançados como rampa de aceleração, controle PID, compensa-

ção de escorregamento e frenagem CC. Possui interface de operação incorporada (IHM), composta por display e teclas de navegação, permitindo ajuste de parâmetros e monitoramento direto, conta também com comunicação via RS-485 e recurso de *SoftPLC* para programação lógica interna. O dispositivo é compatível com módulos de expansão, que ampliam suas funcionalidades conforme a aplicação.

Um ponto de destaque é a quantidade de entradas e saídas incorporadas no próprio inversor. O modelo padrão conta com:

- **4 entradas digitais (DI1 a DI4):** configuráveis como PNP ou NPN, utilizadas para comandos como partida, parada, reversão e seleção de velocidades;
- **1 entrada analógica (AI1):** que pode operar com sinal de 0–10 V ou 4–20 mA, comum em controle por potenciômetro ou sensor analógico;
- **1 saída analógica (AO1):** configurável, utilizada para monitoramento da variável controlada (por exemplo, velocidade ou corrente);
- **1 saída a relé (DO1):** com capacidade de 0,5 A em 250 Vca, normalmente utilizada para sinalização de estado ou falha.

A distribuição dos blocos internos do inversor e a representação das conexões de I/O são apresentadas na Figura 7, a qual ilustra também a arquitetura básica do controle, alimentação e comunicação do equipamento (WEG EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS S.A., 2022a). Uma característica importante deste inversor é a flexibilidade de configuração de suas entradas digitais (DI), que podem operar tanto em lógica NPN quanto PNP. Essa versatilidade é valiosa para a integração com diversos tipos de circuitos de controle. Para o presente projeto, a opção pela lógica NPN foi considerada vantajosa, principalmente pela possibilidade de utilizar a fonte interna de +10V, disponibilizada pelo próprio inversor, para referenciar os sinais de comando das DIs, simplificando assim a interface elétrica externa necessária.



Para utilizar as capacidades do SoftPLC, uma interface de comunicação entre o computador que executa o WPS e o inversor é essencial. Para dispositivos como o CFW300, o módulo de comunicação CFW300-CUSB desempenha essa função, provendo conectividade USB V2.0 Plug and Play (WEG DRIVES & CONTROLS, 2020). Este módulo permite a transferência do programa lógico Ladder desenvolvido no WPS para a memória interna do inversor, onde o SoftPLC executa o código. Adicionalmente, ele facilita a parametrização, o envio de comandos e o monitoramento online dos dados operacionais do inversor por meio do software WPS. O ambiente WPS fornece as ferramentas para a criação da lógica de controle, depuração e gerenciamento da aplicação, enquanto o módulo USB atua como o elo crucial para a programação do SoftPLC embarcado no inversor e para a observação de seu comportamento.

Adicionalmente, o WPS oferece a funcionalidade “Forçar E/S” (Entradas e Saídas), uma ferramenta de diagnóstico e comissionamento. Com esta função, o usuário pode manipular os valores das entradas digitais e analógicas que serão lidos pelo programa SoftPLC, independentemente do seu estado físico real no inversor. Isso permite, por exemplo, simular a ativação de uma entrada digital para testar a lógica do programa Ladder sem a necessidade de atuar fisicamente no sensor ou dispositivo conectado ao inversor.

### 3.2.2 Parametrização

A parametrização de um inversor de frequência, como o WEG CFW300, é o processo de configurar seus parâmetros para adequar o funcionamento do equipamento às necessidades específicas da aplicação e do motor acionado. A configuração pode ser realizada diretamente na HMI presente no inversor ou através de um software de programação WPS conectado ao inversor, via módulo USB CFW300-CUSB. Pela HMI, o usuário navega utilizando teclas específicas para selecionar e alterar os valores dos parâmetros. O modo de parametrização tipicamente possui níveis: um para selecionar o número do parâmetro e outro para editar seu valor. Alguns parâmetros só podem ser modificados com o motor parado para garantir a segurança e a correta assimilação da nova configuração. O inversor também permite carregar configurações padrão de fábrica (ex: 50 Hz ou 60 Hz) ou um conjunto de parâmetros previamente salvo pelo usuário.

A seguir, apresenta-se a tabela 2 com alguns dos parâmetros mais comumente utilizados no inversor CFW300, incluindo os dados nominais do motor, o parâmetro de corrente máxima e exemplos de parâmetros relevantes para a utilização da funcionalidade SoftPLC integrada.

Tabela 2 – Parâmetros comuns e relevantes para SoftPLC do inversor CFW300

| Parâm. | Função/Descrição       | Faixa de Valores | Observação/Usos Específicos               |
|--------|------------------------|------------------|-------------------------------------------|
| P100   | Tempo Aceleração       | 0,1 a 999,9 s    | Rampa 0 Hz a Freq.Máx.(P134).             |
| P101   | Tempo Desaceleração    | 0,1 a 999,9 s    | Rampa Freq.Máx.(P134) a 0 Hz.             |
| P133   | Frequência Mínima      | 0,0 a 400,0 Hz   | Limite inf. ref. frequência.              |
| P134   | Frequência Máxima      | 0,0 a 400,0 Hz   | Limite sup. ref. frequência; Base rampas. |
| P135   | Corrente Máx. Saída    | 0,0 a 40,0 A     | Nível limitação corrente (prot.).         |
| P202   | Tipo de Controle       | 0, 1, 5          | Método: 0=V/f, 1=V/f Quad, 5=VVW.         |
| P400   | Tensão Nom. Motor      | 0 a 480 V        | Conforme placa do motor.                  |
| P401   | Corrente Nom. Motor    | 0,0 a 40,0 A     | Conforme placa do motor.                  |
| P402   | Rotação Nom. Motor     | 0 a 24000 rpm    | Conforme placa do motor.                  |
| P403   | Freq. Nominal Motor    | 0 a 400 Hz       | Conforme placa do motor.                  |
| P404   | Potência Nom. Motor    | 0 a 14           | Conforme placa do motor.                  |
| P220   | Sel. Fonte LOC/REM     | 0 a 11           | Fonte comut. Op. 11: SoftPLC.             |
| P221   | Sel. Referência Local  | 0 a 17           | Fonte ref. veloc. Op. 12: SoftPLC.        |
| P222   | Sel. Referência Remoto | Ver P221         | Fonte ref. veloc. Op. 12: SoftPLC.        |
| P224   | Sel. Gira/Para Local   | 0 a 5            | Fonte cmd Gira/Para. Op. 5: SoftPLC.      |
| P231   | Função Sinal AI1       | 0 a 17           | Define uso da AI1. Op. 7: SoftPLC.        |
| P275   | Função Saída DO1       | 0 a 47           | Define uso da DO1. Op. 28: SoftPLC.       |
| P900   | Estado da SoftPLC      | 0 a 4 (ro)       | Status app SoftPLC: Rodando, Parado.      |
| P901   | Comando p/ SoftPLC     | 0 ou 1           | 0=Para, 1=Executa app SoftPLC.            |
| P903   | Aplicação SoftPLC      | 0 ou 1           | Programa: 0=Usuário, 1=PID embarc.        |

Fonte: Adaptado de WEG EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS S.A. (2023b)

### 3.2.3 Ruído

A Interferência Eletromagnética (EMI) é uma consequência inerente e indesejável em sistemas que utilizam inversores de frequência e circuitos eletrônicos, especialmente quando há motores envolvidos, decorrente do funcionamento fundamental dos conversores de eletrônica de potência. Esses conversores promovem a conversão eficiente de energia por meio da comutação rápida de dispositivos semicondutores. No entanto, essa comutação de alta velocidade gera ruído elétrico de alta frequência. Esse ruído se manifesta principalmente como harmônicos — múltiplos da frequência de chaveamento do conversor — que se sobrepõem às formas de onda desejadas (ERICKSON; MAKSIMOVIĆ, 2001).

O ruído gerado por inversores está diretamente relacionado às transições abruptas de corrente e tensão durante o chaveamento. Essas transições excitam elementos parasitas do circuito, como capacitâncias de saída dos transistores e indutâncias de fuga ou de interconexão. Essa combinação frequentemente resulta em oscilações ressonantes e picos de tensão que, além de comprometerem a integridade dos dispositivos semicondutores, podem irradiar ou conduzir EMI (PAUL, 2006). Em motores de indução alimentados por inversores, o ruído pode se propagar pelas linhas de alimentação e também por caminhos de modo comum, como a carcaça ou estruturas aterradas, especialmente quando não há

blindagem ou aterramento adequado.

Para mitigar esses efeitos, diferentes estratégias são aplicadas em nível de projeto. Técnicas de comutação suave, como o Zero-Voltage Switching (ZVS), reduzem a geração de ruído ao eliminar transições abruptas de tensão, enquanto filtros de entrada projetados com atenção à atenuação e ao amortecimento contribuem para reduzir as emissões conduzidas e garantir conformidade com os limites regulatórios. Fabricantes de inversores, como a WEG, disponibilizam módulos dedicados para esse fim, como o filtro RFI, que atua na supressão de interferências eletromagnéticas geradas pelo chaveamento interno. Embora um filtro RFI dedicado não tenha sido implementado neste protótipo, que se concentrou em estratégias de filtragem e isolamento diretamente nos circuitos de controle mais sensíveis, sua menção é pertinente por se tratar de uma solução industrial consolidada para a mitigação de EMI na fonte. Além das soluções aplicadas ao próprio inversor, é importante considerar que, em projetos que integram circuitos eletrônicos sensíveis, como microcontroladores e sistemas de controle, a EMI pode se acoplar aos sinais de baixa potência, prejudicando sua operação. Nesses casos, estratégias adicionais de filtragem, desacoplamento, aterramento apropriado e, principalmente, técnicas de isolamento são fundamentais para proteger a integridade dos sinais e garantir a imunidade eletromagnética do sistema como um todo (ERICKSON; MAKSIMOVIĆ, 2001; PAUL, 2006).

### 3.3 Atuador Linear Elétrico

Os atuadores lineares elétricos são dispositivos responsáveis por converter sinais elétricos de controle em movimento translacional. Quando se utilizam motores DC, essa conversão se dá de forma indireta: o motor fornece movimento rotacional contínuo que, por meio de mecanismos como fuso de avanço, fuso de esferas ou sistemas de cremalheira e pinhão, é transformado em deslocamento linear. Essa arquitetura modular permite ajustar parâmetros como força, velocidade e curso, além de oferecer maior precisão e controle em comparação com atuadores diretos, como solenóides. A escolha do mecanismo de conversão está diretamente relacionada às exigências do sistema, como atrito, rigidez e capacidade de carga (BOLTON, 2015).

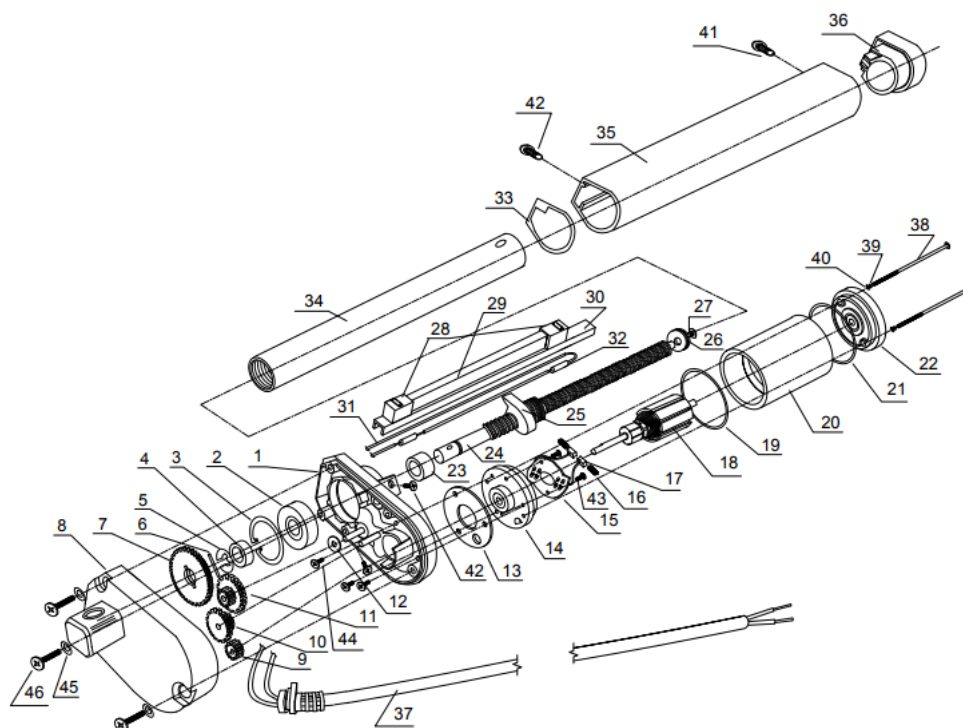
O motor DC utilizado nesses atuadores pode ser do tipo com escovas (brushed) ou sem escovas (brushless). Motores com escovas possuem comutação mecânica por meio de escovas e anéis coletores, oferecendo controle simples via variação de tensão no enrolamento do induzido, mas exigem manutenção periódica. Já os motores brushless realizam a comutação eletrônica através de sensores de posição e transistores chaveadores, apresentando maior durabilidade, menor ruído e capacidade de operação em velocidades mais elevadas. O controle da velocidade, e consequentemente do movimento linear, é geralmente feito por modulação por largura de pulso (PWM), enquanto a reversão do sentido de movimento é obtida com circuitos em ponte H. Essa configuração também



permite a implementação de controle em malha fechada para aplicações que exigem precisão de posição ou velocidade (BOLTON, 2015).

Em sistemas mecatrônicos, atuadores lineares baseados em motor DC são empregados em tarefas que exigem deslocamentos mais longos, força significativa e controle contínuo, como em braços robóticos, sistemas de posicionamento de precisão e equipamentos de automação industrial. A associação com fusos de esferas é particularmente eficaz em aplicações que requerem alta eficiência e rigidez mecânica. No projeto em questão, foi utilizado um atuador linear de 12 V com motor DC com escovas (brushed), curso de 300 mm, força nominal de 700 N e velocidade de 20 mm/s. A figura 9 apresenta uma fiel descrição do equipamento, com uma vista explodida, cujos componentes principais são apresentados na tabela 3.

Figura 9 – Atuador linear elétrico: vista explodida



Fonte: ETOSEC (2025)

Tabela 3 – Principais componentes do atuador elétrico linear

| Item | Descrição                        | Qtd. |
|------|----------------------------------|------|
| 1    | Base do atuador                  | 1    |
| 2    | Rolamento do eixo                | 1    |
| 7    | Engrenagem do eixo               | 1    |
| 9    | Engrenagem do motor elétrico     | 1    |
| 10   | Engrenagem intermediária pequena | 1    |
| 11   | Engrenagem intermediária média   | 1    |
| 14   | Base do motor elétrico           | 1    |
| 16   | Escova do motor elétrico         | 2    |
| 18   | Rotor do motor elétrico          | 1    |
| 20   | Estator com carcaça do motor     | 1    |
| 24   | Fuso com rosca trapezoidal       | 1    |
| 28   | Chave fim de curso               | 2    |
| 37   | Cabo de alimentação              | 1    |

Fonte: Adaptado de ETOSEC (2025)

### 3.4 Ponte H

A ponte H é uma configuração eletrônica fundamental amplamente utilizada em sistemas mecatrônicos para o controle de atuadores, especialmente motores de corrente contínua. Sua estrutura é composta por quatro elementos de comutação — geralmente transistores — organizados em um arranjo que se assemelha à letra “H”, com a carga conectada entre os ramos centrais. Essa topologia permite aplicar tensão nos dois sentidos sobre a carga, viabilizando a reversão da corrente e, conseqüentemente, do sentido de rotação de motores (BOLTON, 2015).

O funcionamento da ponte H baseia-se na comutação coordenada dos transistores diagonais. Para girar o motor em um sentido, um par de transistores (por exemplo, superior esquerdo e inferior direito) é ativado, criando um caminho de corrente em uma direção. Para inverter o giro, esse par é desligado e o par oposto (superior direito e inferior esquerdo) é acionado, invertendo o fluxo de corrente. Além disso, é possível implementar frenagem dinâmica ao ativar simultaneamente os transistores inferiores, causando o curto-circuito das extremidades do motor e promovendo a dissipação da energia cinética. Um cuidado essencial no controle da ponte H é evitar o chamado "shoot-through", que ocorre quando dois transistores da mesma perna vertical são ligados ao mesmo tempo, resultando em curto-circuito direto da fonte. Para mitigar esse risco, utiliza-se tempo morto (*dead time*) entre comutações.

Além dos transistores, a ponte H conta com diodos de roda livre conectados em paralelo com cada elemento de comutação. Esses diodos protegem os transistores contra as tensões induzidas (força contra-eletromotriz) geradas pelo desligamento brusco de cargas

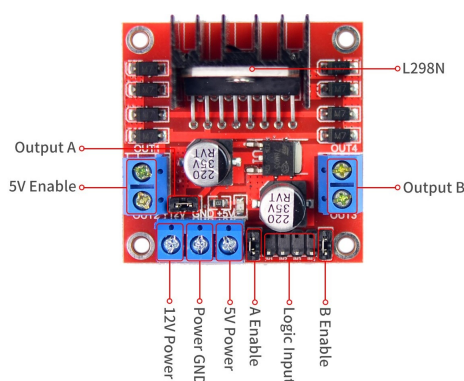
indutivas, como os motores. Para o controle de velocidade, a ponte H pode ser operada em conjunto com a modulação por largura de pulso, uma técnica que consiste em ligar e desligar rapidamente a alimentação do motor com um ciclo de chaveamento fixo. A variação do tempo em que a tensão permanece ligada em cada ciclo, chamado de ciclo de trabalho (duty cycle), altera a tensão média efetiva aplicada ao motor. Dessa forma, é possível controlar a velocidade de rotação de maneira eficiente e com mínimas perdas de energia, já que os transistores operam apenas nos estados totalmente ligados ou desligados.

#### 3.4.1 Módulo Ponte H L298N

O módulo **L298N** é um driver de ponte H amplamente utilizado para o controle de motores DC e motores de passo em aplicações de automação e robótica, muito útil em projetos de prototipação. Ele é baseado no circuito integrado L298 da STMicroelectronics, um driver com dois canais full-bridge capazes de operar cargas indutivas como relés, solenoides e motores até 46 V e 2 A por canal, e conta com dissipador térmico acoplado para suportar correntes elevadas.

Este módulo disponibiliza dois canais independentes (OUT A e OUT B), permitindo controlar dois motores de forma separada ou um motor de passo bipolar. Cada canal possui dois pinos de entrada lógica (IN1, IN2 e IN3, IN4) para controle da direção e um pino de **Enable** (ENA, ENB), normalmente utilizado para controle de velocidade via PWM. A alimentação lógica pode ser feita diretamente com 5 V, enquanto a alimentação do motor pode ser fornecida com tensões de até 12 V ou mais, dependendo do projeto. O módulo também oferece proteção por diodos de roda livre integrados (D1–D8) para absorção da energia regenerativa dos motores. A figura 10 apresenta o módulo e suas conexões.

Figura 10 – Módulo ponte H L298N



Fonte: RC Gear BD (2025)

### 3.5 Sensores

#### 3.5.1 Encoder

Encoders são dispositivos de medição digital utilizados para converter movimento mecânico — linear ou angular — em sinais digitais compatíveis com sistemas de controle e computação. Os encoders fazem parte das técnicas ópticas de medição, especialmente no contexto da modulação de intensidade luminosa por meio de grades e obturadores. Sua principal função é fornecer informações precisas de posição a partir da interação de padrões ópticos com detectores, classificando-se como sensores de posição fundamentais para sistemas modernos de automação e controle (BENTLEY, 2005).

Existem dois tipos principais de encoders: incrementais e absolutos. Encoders incrementais geram pulsos relativos ao movimento a partir de um ponto de referência, exigindo uma rotina de homing após a energização para determinar a posição inicial. Eles utilizam discos com ranhuras uniformemente espaçadas, pelos quais um feixe de luz é projetado; à medida que o disco gira, a luz é alternadamente bloqueada e liberada, sendo detectada por sensores ópticos que geram dois sinais defasados (canais A e B). Essa defasagem, característica da codificação em quadratura, permite a determinação da direção do movimento. Já os encoders absolutos empregam discos com múltiplas trilhas concêntricas contendo padrões binários ou Gray; cada combinação de passagens ou bloqueios de luz por essas trilhas gera um código digital único para cada posição angular, permitindo que a posição exata seja conhecida imediatamente ao ligar o sistema, sem necessidade de movimento prévio.

Na prática, encoders são empregados em uma ampla gama de aplicações industriais e tecnológicas que exigem controle preciso de posição, como sistemas de automação, robótica, controle de motores e equipamentos CNC. Encoders incrementais são indicados para aplicações que toleram recalibração com movimento de referência, enquanto os absolutos são ideais para cenários que demandam informações contínuas de posição, mesmo após reinicializações.

Neste projeto, foi utilizado um encoder incremental rotativo modelo E6B2-CWZ6C, com resolução de 800 pulsos por rotação (PPR). Ele possui três saídas: A e B, que fornecem dois sinais defasados para determinar a direção do movimento, e Z, que emite um único pulso por rotação para indicar uma posição de referência (indexação) única por volta. As saídas são do tipo NPN open collector, ou seja, os terminais de saída atuam como interruptores conectados ao terra (GND), exigindo resistores de pull-up externos para produzir níveis lógicos compatíveis com os circuitos de leitura. Alimentado com 12 V, este encoder fornece sinais digitais correspondentes ao deslocamento angular do eixo, permitindo o monitoramento preciso da rotação do motor.

### 3.5.2 Sensor Fotoelétrico

Sensores fotoelétricos são dispositivos não-contato utilizados amplamente em sistemas mecatrônicos para detectar a presença, ausência ou, em certos casos, a posição de objetos. Seu princípio básico envolve a emissão e recepção de luz, geralmente proveniente de um LED, e a análise da interação dessa luz com o objeto-alvo. Por serem sensores óticos, oferecem vantagens significativas como alta velocidade de resposta, ausência de desgaste mecânico e facilidade de integração em sistemas de automação industrial (BOLTON, 2015).

O funcionamento dos sensores fotoelétricos pode ocorrer por dois métodos principais: interrupção do feixe de luz ou reflexão da luz emitida. No modo de feixe interrompido (through-beam), a detecção ocorre quando o objeto bloqueia diretamente o feixe de luz entre o emissor e o receptor, garantindo alta confiabilidade e alcance. No modo de reflexão difusa, o mesmo dispositivo emite a luz e recebe a parte refletida pelo objeto, tornando a instalação mais simples, embora mais sensível às características da superfície detectada. A eficácia de ambos os métodos está diretamente relacionada ao uso de componentes semicondutores como fotodiodos e fototransistores, que convertem a luz recebida em sinais elétricos proporcionais à sua intensidade.

O sensor escolhido para este projeto é do tipo fotoelétrico com reflexão difusa, modelo E3F-DS10, caracterizado por seu corpo cilíndrico único, o que facilita a instalação em suportes padrão de automação industrial. Esse sensor emite luz infravermelha e detecta objetos, com base na luz refletida diretamente pela superfície do próprio alvo, dispensando o uso de refletores externos. Sua faixa de detecção é ajustável entre 0 e 10 cm, permitindo flexibilidade conforme o ambiente e o tipo de material detectado. Opera com alimentação de 12V e possui saída NPN normalmente aberta (NO), o que significa que o fio de saída se conecta ao terra quando um objeto é detectado, e permanece em estado aberto quando não há detecção.

### 3.5.3 Potenciômetro

O potenciômetro é um sensor de deslocamento amplamente utilizado em sistemas de medição para transduzir movimentos mecânicos – lineares ou angulares – em sinais elétricos proporcionais. Sua construção básica consiste em um elemento resistivo de resistência uniforme por unidade de comprimento ou ângulo, sobre o qual um cursor móvel se desloca. Esse cursor divide a resistência total em duas partes, funcionando como divisor de tensão. Quando não há carga conectada à saída, a tensão de saída é diretamente proporcional à fração do deslocamento do cursor, o que permite relacionar diretamente a posição mecânica à tensão elétrica. Essa proporcionalidade é expressa como:

$$V_o = V_s \cdot x$$

onde  $V_s$  é a tensão de alimentação e  $x$  representa o deslocamento fracionário (BOLTON, 2015).

O funcionamento ideal do potenciômetro depende de condições de circuito aberto; contudo, na prática, a presença de uma carga conectada à saída introduz efeitos de carregamento que geram erros de não linearidade. Essa carga é o dispositivo eletrônico ao qual o potenciômetro está conectado – por exemplo, um microcontrolador, display, circuito amplificador ou sistema de aquisição de dados. Como esses dispositivos possuem resistência de entrada finita ( $R_L$ ), eles consomem corrente da saída do potenciômetro, distorcendo a divisão de tensão ideal. A magnitude do erro de não linearidade depende da razão entre a resistência total do potenciômetro ( $R_P$ ) e a resistência da carga ( $R_L$ ). Quando essa razão  $R_P/R_L$  é pequena, o erro pode ser desprezado. No contexto deste projeto, ao utilizar um potenciômetro  $10\text{ k}\Omega$  conectado a uma entrada analógica do microcontrolador Arduino Nano, este efeito de não linearidade por carregamento é minimizado. Isso se deve à característica intrinsecamente alta da impedância de entrada DC das portas analógicas do microcontrolador (tipicamente na ordem de  $100\text{ M}\Omega$ ), que é ordens de magnitude superior à resistência de potenciômetros comuns, garantindo assim uma medição de posição com boa linearidade para a aplicação

Potenciômetros são utilizados em aplicações que requerem medição direta de deslocamentos físicos com simplicidade e baixo custo, como em controles manuais, sistemas automotivos e interfaces homem-máquina.

### 3.6 Microcontrolador ATmega328P

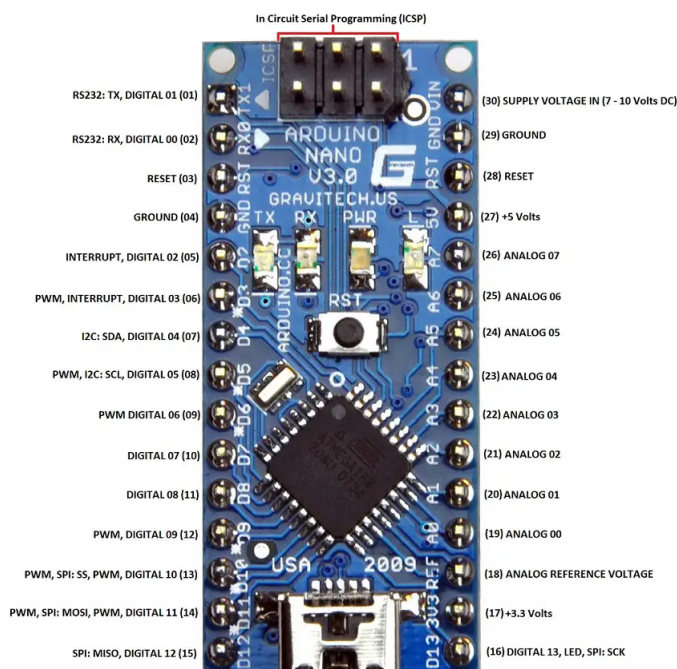
Microcontroladores são circuitos integrados programáveis que combinam unidade de processamento, memória e interfaces de entrada e saída em um único chip. Eles são amplamente utilizados em sistemas embarcados para monitoramento e controle de processos físicos, como leitura de sensores, acionamento de motores e comunicação com periféricos digitais. O avanço das plataformas de desenvolvimento baseadas em microcontroladores permitiu a criação de ambientes integrados que simplificam a programação e a integração com circuitos externos.

Neste projeto, utilizou-se o microcontrolador ATmega328P, da família AVR da Microchip, responsável pela execução das tarefas de controle embarcado. Esse microcontrolador foi implementado fisicamente por meio da placa Arduino Nano, uma plataforma de prototipagem que integra o ATmega328P a recursos de alimentação, comunicação USB e acesso a pinos em formato compatível com protoboards (BLUM, 2013).

A placa Arduino Nano, apresentada na figura 11, disponibiliza 14 pinos digitais, numerados de D0 a D13, dos quais 6 (D3, D5, D6, D9, D10 e D11) suportam modulação por largura de pulso (PWM), permitindo controle de intensidade ou velocidade em cargas

como LEDs e motores. Também possui 8 entradas analógicas (A0 a A7) conectadas a um conversor analógico-digital (ADC) de 10 bits, utilizado para leitura de sinais contínuos provenientes de sensores. Pinos de alimentação incluem 5V, 3.3V, GND, Vin (7–12V) e referência analógica (AREF). Além disso, os recursos de memória incluem 32 KB de Flash, 2 KB de SRAM e 1 KB de EEPROM.

Figura 11 – Arduino Nano



Fonte: Circuits Today (2025)

A programação do ATmega328P na plataforma Arduino é realizada por meio da IDE da Arduino, utilizando uma linguagem baseada em C/C++, com estrutura de inicialização (setup) e laço contínuo (loop), característica de aplicações embarcadas. O carregamento do código é feito via USB, utilizando um conversor USB-serial integrado à placa.

O Arduino Nano é particularmente indicado para aplicações com restrições de espaço físico ou integração direta em placas de circuito impresso personalizadas. Exemplos típicos incluem sistemas embarcados compactos, nós de sensores distribuídos, pequenos dispositivos de automação e controle de motores em robôs.

## 3.7 Filtros

### 3.7.1 Filtro RC

Os filtros RC são circuitos eletrônicos compostos por resistores ( $R$ ) e capacitores ( $C$ ), amplamente utilizados para modificar o espectro de frequência de sinais elétricos.

Dependendo da disposição dos componentes, eles podem ser configurados como filtros passa-baixa ou passa-alta de primeira ordem. Em um filtro passa-baixa, sinais de baixa frequência passam com pouca atenuação, enquanto sinais de alta frequência são suprimidos. Já o filtro passa-alta bloqueia componentes de baixa frequência e permite a passagem das mais altas. O princípio de funcionamento desses filtros baseia-se na impedância dependente da frequência do capacitor, que diminui com o aumento da frequência. Essa característica é explorada para conduzir ou bloquear seletivamente componentes de frequência em diversas aplicações analógicas, como desacoplamento, acoplamento e modelagem de resposta em sistemas dinâmicos (SEDRA; SMITH, 2004).

O dimensionamento de um filtro RC está diretamente relacionado à constante de tempo  $\tau = RC$ , que define a frequência de corte (ou frequência de  $-3$  dB) do circuito. Essa frequência é o ponto em que a amplitude do sinal de saída é reduzida a  $1/\sqrt{2}$  do valor da entrada, correspondente a uma atenuação de 3 dB. A fórmula que define essa frequência de corte em hertz é:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC} \quad (3.1)$$

Dessa forma, ao escolher valores apropriados para  $R$  e  $C$ , é possível ajustar precisamente a frequência a partir da qual o filtro atenua o sinal. Essa característica torna o filtro RC especialmente útil em sistemas que necessitam eliminar ruído de alta frequência, bloquear componentes DC ou condicionar sinais para posterior processamento digital.

Na prática, os filtros RC são utilizados em contextos diversos. Filtros passa-baixa são aplicados para suavizar sinais em fontes de alimentação, reduzindo a ondulação (*ripple*), ou para remover ruídos de alta frequência em circuitos de medição. Já os filtros passa-alta são comuns em sistemas de áudio, permitindo a passagem de sinais AC enquanto bloqueiam DC, o que é essencial no acoplamento entre estágios amplificadores. A simplicidade de construção, aliada à eficácia no controle espectral do sinal, consolida os filtros RC como componentes essenciais no projeto de sistemas eletrônicos.

### 3.7.2 Optoacoplador

Os optoacopladores, também conhecidos como optoisoladores, são dispositivos semicondutores que realizam o acoplamento de sinal entre dois circuitos eletricamente isolados por meio de luz. Um optoacoplador típico é composto por um diodo emissor de luz (LED) na entrada e um fototransistor na saída. A corrente elétrica que circula pelo LED gera uma emissão luminosa proporcional, que é detectada pelo fototransistor, convertendo novamente o sinal óptico em sinal elétrico. Como não há ligação condutiva entre os dois lados do componente, o optoacoplador garante isolamento galvânico, protegendo circuitos sensíveis contra ruídos, sobretensões e diferenças de potencial entre terras (SEDRA; SMITH, 2004).



Os optoacopladores são discutidos principalmente por sua capacidade de isolamento elétrico, sendo eficazes na separação de domínios de tensão e na proteção de circuitos sensíveis. Apesar disso, esses dispositivos possuem limitações operacionais, como a largura de banda finita, determinada pela velocidade de comutação do LED e pelo tempo de resposta do fotodetector. Quando necessário tratar o conteúdo espectral do sinal, é comum empregar circuitos adicionais, como redes RC externas, responsáveis pela filtragem de frequência.

Os optoacopladores são amplamente utilizados em sistemas embarcados e de automação para isolar microcontroladores de cargas de potência, evitar laços de terra e suprimir interferências eletromagnéticas. Aplicações comuns incluem acionamento de relés, leitura de sensores isolados, comunicação entre diferentes domínios de tensão e proteção de portas de entrada. Sua robustez, baixo custo e simplicidade de uso tornam esses dispositivos ideais para circuitos que exigem confiabilidade e imunidade a ruídos, especialmente em ambientes industriais e em fontes chaveadas.

#### 3.7.2.1 Modelo PC817

O optoacoplador utilizado neste projeto é o modelo **PC817**. Ele é um componente encapsulado em DIP de 4 pinos, contendo um LED infravermelho acoplado opticamente a um fototransistor. Abaixo estão as principais especificações que devem ser consideradas no seu uso (SHARP CORPORATION, 2003):

- **Tensão máxima coletor-emissor ( $V_{CE}$ ):** 80 V
- **Corrente de entrada recomendada ( $I_F$ ):** 5–20 mA
- **Razão de transferência de corrente (CTR):** mínimo de 50% para  $I_F = 5$  mA,  $V_{CE} = 5$  V
- **Tensão de isolamento:** 5,0 kV rms entre entrada e saída
- **Tempo de resposta típico (subida e descida):** até 18  $\mu$ s
- **Encapsulamento:** DIP-4 padrão, disponível também em variantes SMD

#### 3.7.3 Schmitt Trigger

O Schmitt Trigger é um circuito comparador com histerese, cuja principal função é proporcionar imunidade a ruídos em sinais de entrada. A operação desse circuito é baseada no uso de realimentação positiva para criar dois limiares distintos de comutação: um para transições ascendentes e outro para descendentes. Essa característica evita comutações indesejadas causadas por pequenas variações em torno de um único ponto de referência, como ocorre em comparadores comuns. O resultado é uma saída digital limpa

e estável mesmo quando o sinal de entrada apresenta ruído, lentidão ou flutuações. Tal comportamento é especialmente valioso em aplicações digitais e de condicionamento de sinais analógicos (SEDRA; SMITH, 2004).

O funcionamento do Schmitt Trigger está fundamentado na realimentação positiva aplicada a um amplificador operacional, configurado como multivibrador biestável. O circuito mais comum apresentado é o de configuração não inversora, onde a entrada é aplicada ao terminal não inversor e a realimentação é feita por meio de um divisor resistivo. O nível de tensão de saída (em saturação positiva ou negativa) influencia o valor do limiar de comutação da entrada, resultando em dois pontos de transição bem definidos:  $V_{TH}$  e  $V_{TL}$ , com uma largura de histerese  $V_H = V_{TH} - V_{TL}$ . A modelagem matemática desses limiares depende das resistências da malha de realimentação e dos níveis de saturação do amplificador. Valores maiores de histerese oferecem mais imunidade a ruídos, enquanto valores menores aumentam a sensibilidade do circuito.

Além da filtragem de ruído, o Schmitt Trigger é amplamente utilizado em tarefas de conversão de sinais analógicos em formas digitais bem definidas. Exemplos incluem o tratamento de formas de onda senoidais ou distorcidas para produção de pulsos quadrados, e a eliminação de bouncing mecânico em teclas e botões.

#### 3.7.3.1 CI 74HC14

O circuito integrado **74HC14** é um inversor com entrada Schmitt Trigger, composto por seis portas lógicas independentes com realimentação positiva, encapsuladas em invólucro DIP-14 ou SOIC-14. Esse componente é amplamente utilizado para conversão de sinais analógicos ruidosos ou de bordas lentas em sinais digitais limpos, aproveitando-se da histerese entre os níveis de comutação (ON SEMICONDUCTOR, 2007).

As principais características operacionais incluem:

- **Tensão de alimentação ( $V_{CC}$ ):** 2,0 V a 6,0 V
- **Tensão típica de histerese ( $V_H$ ):** entre 0,2 V e 2,25 V, dependendo de  $V_{CC}$
- **Limiar de comutação típico para  $V_{CC} = 5 V$ :**
  - $V_{T+} \approx 3,15V$
  - $V_{T-} \approx 2,00V$
- **Tempo de propagação típico (@  $V_{CC} = 5 V$ ):** cerca de 15 ns
- **Imunidade a ruído:** alta, característica de dispositivos CMOS
- **Capacidade de corrente por saída:** até 25 mA

Devido à sua histerese bem definida, o 74HC14 é ideal para aplicações de debounce, osciladores, detecção de nível e regeneração de sinais ruidosos em ambientes sujeitos a interferência.

### 3.8 Display LCD e protocolo I2C

Displays LCD (Liquid Crystal Display) são dispositivos de saída visual que utilizam a modulação de luz por cristais líquidos para exibir informações em formato alfanumérico ou gráfico. São amplamente utilizados em sistemas embarcados devido ao baixo consumo de energia, boa visibilidade e fácil integração. Os modelos alfanuméricos operam com base em controladores dedicados, como o HD44780, que gerenciam os dados e comandos recebidos por uma interface paralela entre o display e o microcontrolador.

Para simplificar essa interface, é comum o uso do protocolo I<sup>2</sup>C (Inter-Integrated Circuit), uma tecnologia de comunicação serial que permite a troca de dados entre um microcontrolador (mestre) e diversos dispositivos periféricos (escravos) utilizando apenas duas linhas: SDA (Serial Data Line) e SCL (Serial Clock Line). O sinal de clock (SCL) é gerado pelo mestre e sincroniza a transmissão dos bits na linha de dados (SDA). Cada comunicação começa com uma condição de start, seguida pelo envio de um endereço de 7 bits que identifica o dispositivo escravo desejado. Em seguida, são transmitidos bytes de dados ou comandos. No caso de displays LCD, utiliza-se um CI como o PCF8574, que atua como expensor de pinos: ele recebe os dados em série via I<sup>2</sup>C e converte esses sinais em saídas digitais paralelas que controlam os pinos do display. Essa técnica reduz significativamente a quantidade de conexões físicas entre o microcontrolador e o LCD, libera pinos de uso geral e permite que vários dispositivos compartilhem o mesmo barramento, desde que possuam endereços distintos.

Neste trabalho foi utilizado um display LCD com formato de exibição de 20 caracteres por 4 linhas, tensão de alimentação de 5 V e módulo I<sup>2</sup>C integrado: HW-061. Esse módulo incorpora o circuito integrado PCF8574, um expensor de entrada/saída digital que opera como escravo no barramento I<sup>2</sup>C. Ele recebe comandos seriais do microcontrolador e os converte em sinais paralelos para acionar os pinos do controlador do display.



## 4 DESENVOLVIMENTO

O presente capítulo descreve as etapas envolvidas no desenvolvimento da nova solução para o sistema de enrolamento. Inicialmente, são apresentados os requisitos de projeto, definidos com base na análise da solução original e nas demandas operacionais observadas. Em seguida, é apresentada uma visão geral da arquitetura da solução desenvolvida, destacando os principais componentes e o funcionamento integrado do sistema. Por fim, o capítulo é organizado em seções que detalham individualmente cada parte do sistema, evidenciando como cada uma contribui para o atendimento dos requisitos estabelecidos e quais foram os passos tomados no processo de desenvolvimento.

### 4.1 Requisitos de projeto

Os requisitos de projeto foram definidos em conjunto com a empresa parceira INCA Soluções, com base na análise crítica da solução previamente desenvolvida pela própria empresa. O sistema original consistia na automatização da regulação da velocidade de rotação do rolo de enrolamento, por meio do controle de um motor trifásico comandado por inversor de frequência. Essa automatização visava garantir a sincronização entre a velocidade de enrolamento e a velocidade de alimentação da prensa, mesmo com o aumento do diâmetro do rolo devido à sobreposição de camadas de material, fundamental para a produção contínua e rolos homogêneos. No desenvolvimento deste trabalho, essa etapa inicial foi reimplementada como base funcional do sistema, garantindo o controle automático da velocidade de enrolamento. A partir disso, o projeto atual passa a incorporar um conjunto de novos requisitos voltados à melhoria da usabilidade, versatilidade e inteligência do sistema de controle. A seguir, são descritos os principais requisitos funcionais e de aprimoramento que orientam o desenvolvimento da nova solução.

#### 1. Retomada de operação após paradas:

Na versão anterior do equipamento, qualquer interrupção no funcionamento — seja por desligamento não programado ou parada manual — acarretava a perda total do progresso no processo de enrolamento. O operador era então obrigado a reiniciar o ciclo desde o início, o que demandava, muitas vezes, o descarte do rolo incompleto ou a finalização manual do processo. Portanto, o sistema proposto deve ser capaz de armazenar o estado atual da operação e permitir sua retomada a partir do ponto de parada, sem prejuízo da contagem de voltas, ajuste de velocidade ou controle de deslocamento.

#### 2. Interface mais informativa e interativa:

O sistema original fazia uso de um display de sete segmentos com funcionalidade restrita à contagem das camadas de enrolamento. Considerando a necessidade de maior

interação e monitoramento por parte do operador, tornou-se requisito deste projeto o desenvolvimento de uma interface mais completa. Essa interface deve exibir, além da contagem de voltas, mensagens de aviso, estados operacionais da máquina e informações adicionais relevantes ao processo.

### **3. Controle aprimorado do deslocamento horizontal:**

O deslocamento lateral do cabeçote no sistema anterior era realizado mecanicamente por meio de um conjunto acionado pelo próprio motor do rolo, utilizando corrente dentada. Tal abordagem limita a flexibilidade do sistema, especialmente quando há necessidade de alterar a largura do material a ser enrolado, o que exige ajustes na amplitude do deslocamento. Deste modo, definiu-se como requisito a implementação de um sistema de controle eletrônico e programável para o deslocamento horizontal, permitindo fácil adaptação a diferentes larguras de material.

### **4. Versatilidade no cálculo de velocidades:**

Na solução original, as velocidades de enrolamento para cada camada foram previamente calculadas e parametrizadas diretamente no inversor de frequência. Essa abordagem dificulta a adaptação do sistema a novos parâmetros de operação. Para aumentar a versatilidade e facilitar a adequação a diferentes condições de trabalho, o novo projeto deverá calcular dinamicamente as velocidades de rotação com base nos parâmetros inseridos pelo operador, dispensando a necessidade de pré-configuração no inversor.

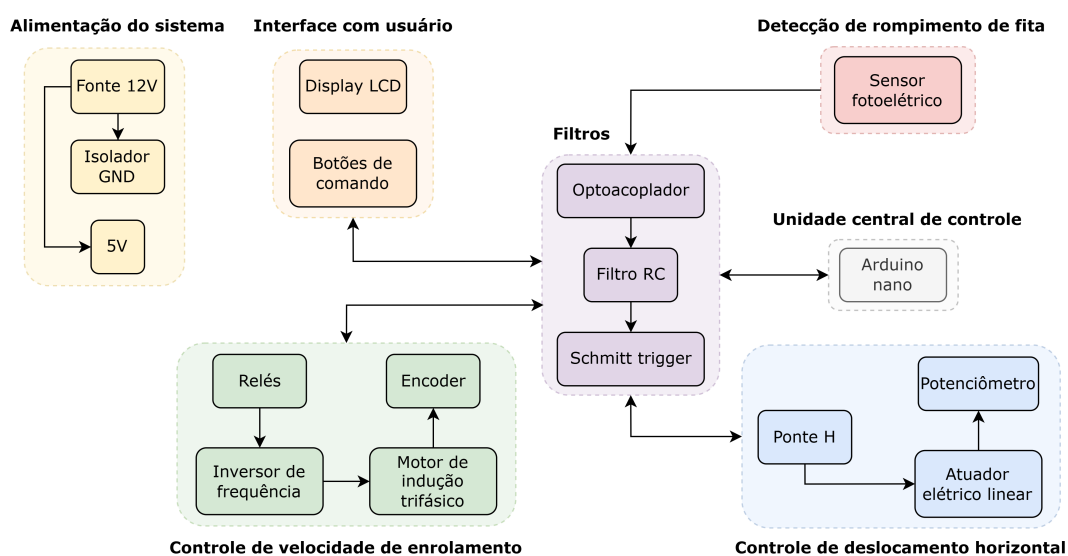
## **4.2 Descrição geral do sistema proposto**

As seções seguintes possuem como objetivo descrever detalhadamente o desenvolvimento do sistema implementado, apresentando o funcionamento de cada malha de controle, os circuitos associados e a lógica adotada. Antes disso, propõe-se uma visão geral da arquitetura do sistema, a fim de contextualizar o leitor quanto à disposição dos elementos e à lógica de interconexão entre os blocos funcionais.

A Figura 12 apresenta o diagrama em blocos do sistema, evidenciando os principais componentes utilizados e sua organização em malhas funcionais. Cada malha representa uma parte específica da solução implementada, como controle de velocidade de enrolamento, controle de deslocamento horizontal, interface com o usuário, alimentação, filtragem de sinais e detecção de falhas. Essa estrutura modular permite compreender como os subsistemas atuam de forma integrada.

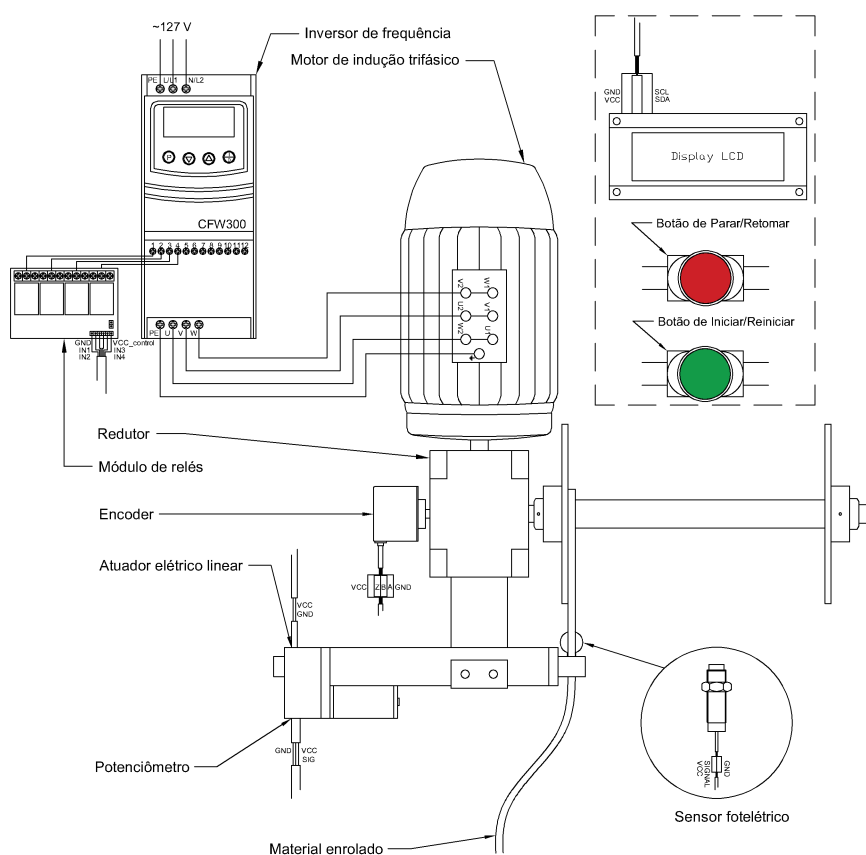
A Figura 13 ilustra a arquitetura geral do projeto, incluindo a disposição física dos componentes e as interligações realizadas entre os módulos. Essa visualização oferece uma noção concreta de como o sistema foi planejado, evidenciando conexões elétricas e posicionamento dos sensores.

Figura 12 – Diagrama em blocos do sistema



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 13 – Desenho do sistema



Fonte: Elaborado pela autora.

Cabe destacar que algumas conexões não foram representadas diretamente na figura, pois são feitas internamente no circuito de controle — o qual será tratado em maior nível de detalhe em seções posteriores, com o auxílio de diagramas específicos. A seguir, cada uma das malhas será discutida individualmente, com a descrição do princípio de funcionamento, critérios de projeto, integração ao sistema e validação prática.

### 4.3 Metodologia por módulos

Para organizar o desenvolvimento do sistema proposto, optou-se por uma divisão modular da arquitetura, na qual cada função principal do protótipo é tratada como um subsistema relativamente independente, com responsabilidades bem definidas. Essa abordagem visa facilitar a análise, implementação e validação de cada parte do projeto, bem como permitir eventuais modificações ou substituições futuras sem comprometer o funcionamento geral.

Os módulos definidos neste projeto são os seguintes:

- **Controle de Velocidade do Enrolamento:** responsável por manter a velocidade superficial constante do rolo de enrolamento, compensando o aumento de diâmetro ao longo do tempo.
- **Controle de Deslocamento Horizontal:** realiza o movimento lateral do atuador linear, de forma sincronizada com a rotação do rolo, garantindo o empilhamento correto da corda em camadas sucessivas.
- **Deteção de Rompimento da Fita:** monitora continuamente a presença do material sendo enrolado, interrompendo o processo em caso de falha.
- **Interface com o Usuário:** fornece meios de interação homem-máquina por meio de botões e display, permitindo iniciar, pausar, reiniciar e acompanhar o estado do sistema.
- **Unidade Central de Controle:** executa a lógica de operação, coordenando as ações entre os módulos e processando os sinais dos sensores e comandos do usuário.
- **Robustez e Imunidade a Ruído:** reúne as estratégias adotadas para garantir a estabilidade e confiabilidade do sistema frente a interferências eletromagnéticas, especialmente devido à presença do inversor de frequência.
- **Alimentação do Sistema:** compreende a distribuição de energia para os diversos subsistemas, com atenção especial à separação de potenciais e proteção dos circuitos sensíveis.



O desenvolvimento de cada módulo foi precedido por uma etapa de planejamento lógico, na qual fluxogramas foram elaborados com o objetivo de mapear o comportamento desejado e guiar a escolha dos componentes, plataformas de implementação e estratégias de controle a serem empregadas.

Os fluxogramas foram desenhados conforme convenções normativas, utilizando rotinas identificadas por letras para facilitar a conexão entre diferentes partes do processo. Sempre que aplicável, esses fluxogramas serão apresentados antes da explicação técnica de cada malha, servindo como ponto de partida para compreensão da lógica adotada. Ressalta-se que nem todos os módulos exigiram esse tipo de representação — como no caso da malha de robustez e imunidade a ruído, que é composta por medidas físicas e de hardware.

Para uma melhor visualização do conjunto completo de fluxogramas, recomenda-se a consulta ao Apêndice A, no qual todos os diagramas foram organizados lado a lado conforme a lógica do projeto. A figura foi exportada com alto nível de zoom, permitindo que o leitor amplie diretamente no PDF sem perda de qualidade, dispensando o uso de folhas maiores.

#### 4.3.1 Interface com o usuário

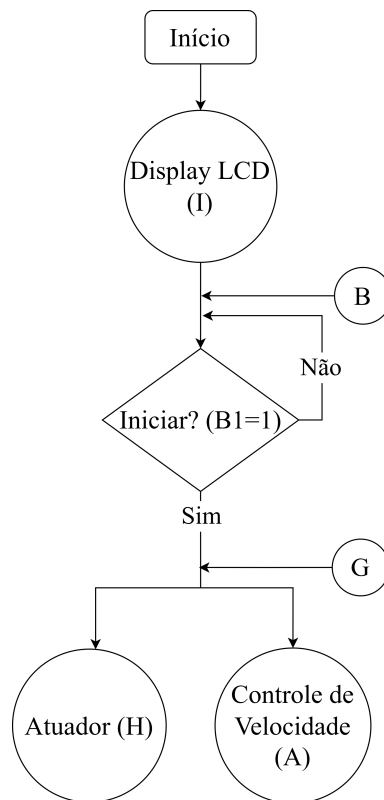
A interação com o usuário é a base para a execução de todas as demais malhas de controle. Assim, este módulo foi desenvolvido primeiramente, guiando o comportamento esperado do sistema desde o momento em que é energizado. O fluxo geral de operação foi inicialmente representado no fluxograma da Figura 14, no qual o sistema aguarda o comando de início por parte do operador.

O sistema permanece em espera até que o botão de iniciar seja pressionado. A partir disso, são acionadas as rotinas responsáveis pela movimentação do atuador e pelo controle da velocidade de enrolamento. Caso o botão de parada seja posteriormente pressionado, a lógica apresentada na Figura 15 é executada, conduzindo o sistema a um estado de pausa controlada, com possibilidade de retomada ou reinício.

Durante todo o processo, o display LCD fornece feedback em tempo real ao operador, conforme a lógica descrita na Figura 16. Essa interface visual informa, por exemplo, se o sistema está pronto, iniciando, pausado, retomado, finalizado ou se houve falha por rompimento de fita.

Como foi possível observar, a proposta previa o uso de quatro botões distintos: iniciar (B1), parar (B2), reiniciar (B3) e retomar (B4). No entanto, o inversor de frequência utilizado no projeto possuía apenas duas entradas digitais livres. Para contornar o problema, o sistema foi inteiramente desenvolvido para funcionar com apenas dois botões físicos, sem prejuízo da lógica geral do processo, que ainda permanece com as quatro funcionalidades,

Figura 14 – Fluxograma: Rotina inicial



Fonte: Elaborado pela autora.

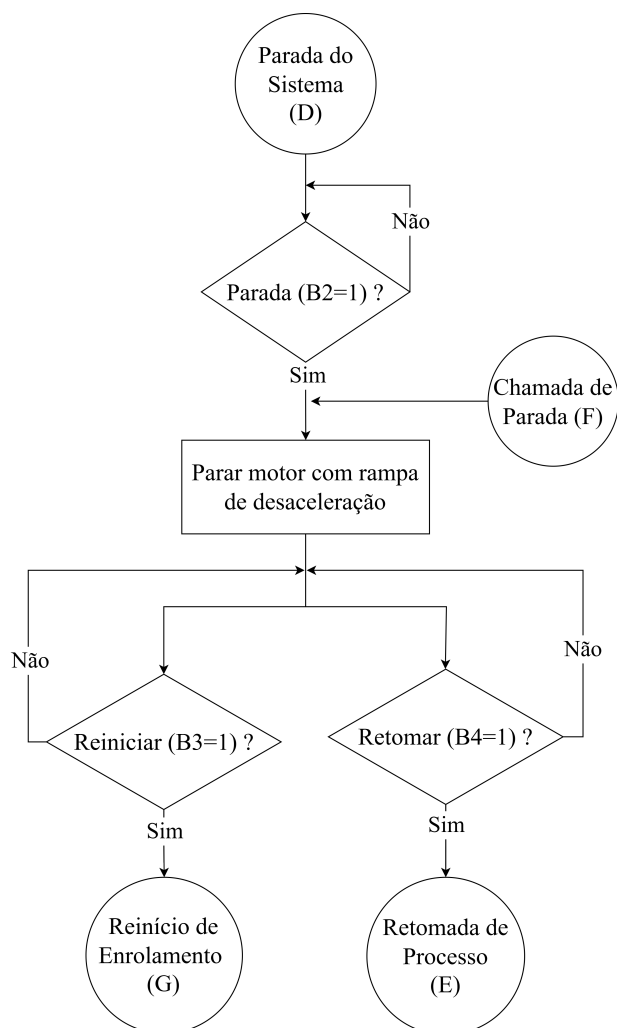
como poderá ser visto nos módulos seguintes. Os botões implementados foram do tipo push button, montados em protoboard e com aplicação de resistores de pull-up.

Embora o uso de apenas dois botões funcione, reconhece-se que quatro botões distintos conectados ao Arduino tornariam a interação mais intuitiva. O Arduino interpretaria cada comando (iniciar, parar, reiniciar ou retomar) e acionaria uma das duas saídas digitais que se comunicam com o inversor, cuja lógica permaneceria inalterada. A limitação está nas entradas do inversor, não na quantidade de botões, sendo essa uma recomendação para futuras implementações.

Por fim, o display LCD é programado com mensagens exibidas ao longo do processo, que têm como objetivo manter o operador informado sobre o estado atual do sistema e auxiliar na tomada de decisão. As telas implementadas foram:

- **Sistema pronto:** indica que o sistema está energizado, aguardando o comando do operador para iniciar o enrolamento;
- **Sistema iniciando:** informa que o sistema foi acionado e que o atuador está retornando para a posição de origem antes de iniciar o processo;

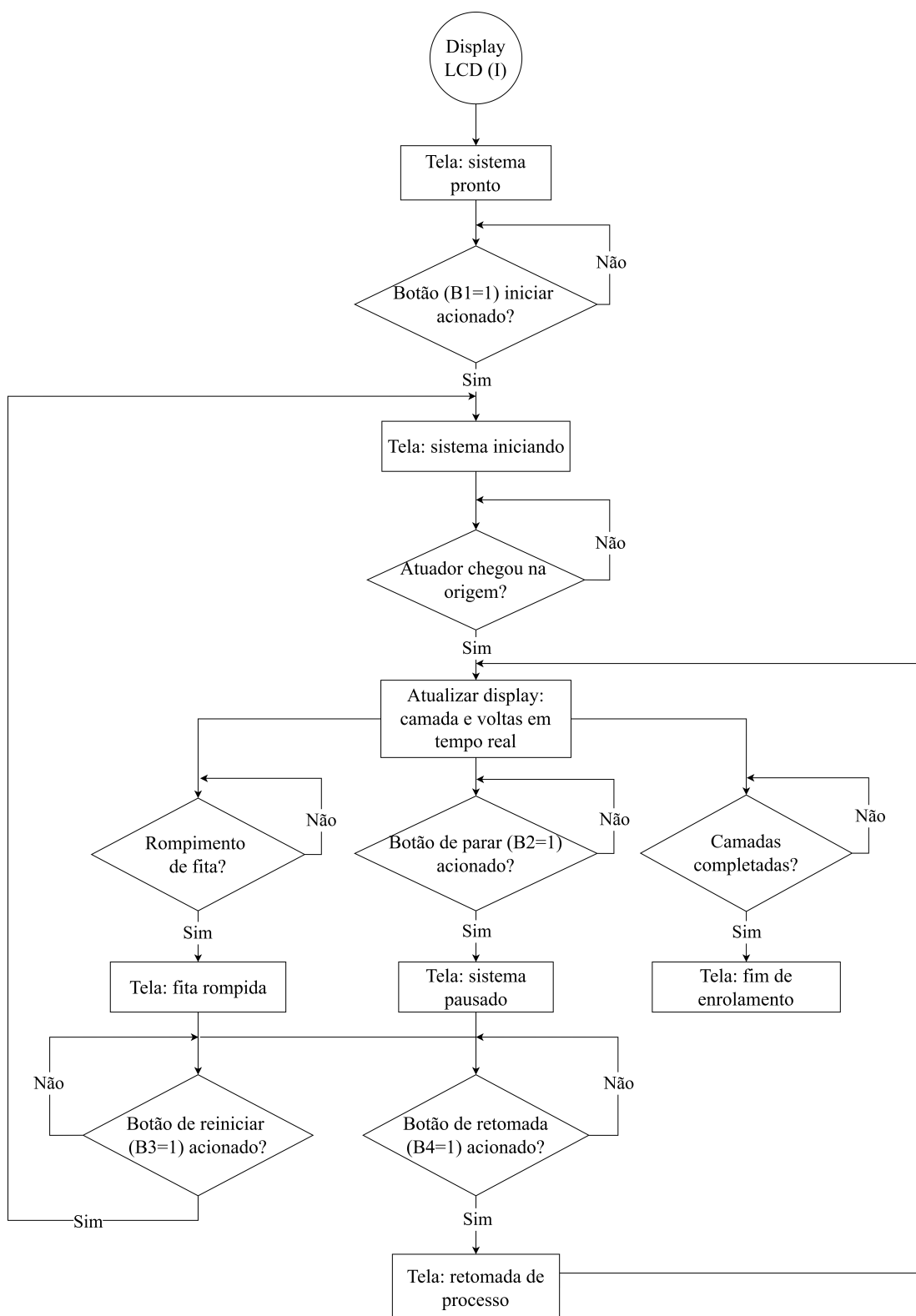
Figura 15 – Fluxograma: Parada do sistema



Fonte: Elaborado pela autora.

- **Sistema pausado:** confirma que o processo foi interrompido após o acionamento do botão de parada;
- **Sistema retomado:** sinaliza que o processo foi continuado a partir do ponto onde havia sido pausado;
- **Fita rompida:** alerta o operador sobre a ausência de material detectado pelo sensor fotoelétrico;
- **Fim de enrolamento:** indica que todas as camadas programadas foram concluídas com sucesso;
- **Progresso em tempo real:** durante a execução, a tela exibe a camada atual e o número de voltas realizadas dentro da camada, permitindo ao operador acompanhar o avanço do processo em tempo real.

Figura 16 – Fluxograma: Interface com o usuário



Fonte: Elaborado pela autora.

### 4.3.2 Controle de velocidade do enrolamento

A implementação da rotina de controle de velocidade de enrolamento é uma das partes centrais deste trabalho. O objetivo principal é garantir que a velocidade superficial do rolo permaneça constante ao longo do processo, mesmo com o aumento progressivo do diâmetro externo causado pelo acúmulo de camadas de material.

Inicialmente, avaliou-se a possibilidade de utilizar sensores de distância para estimar o diâmetro do rolo em tempo real. No entanto, essa abordagem apresentou limitações relevantes para a aplicação. Como o enrolamento alterna a extremidade inicial de cada camada, um único sensor posicionado lateralmente não seria capaz de captar com precisão o crescimento. Seria necessário o uso de sensores em ambas as extremidades, o que aumentaria a complexidade do sistema e a possibilidade de erro por desalinhamento.

Diante disso, optou-se pelo uso de um encoder incremental acoplado ao eixo do rolo, uma solução parecida com a implementada no sistema original. Com a leitura do sinal de índice (canal Z), é possível detectar uma rotação completa, permitindo a contagem precisa de voltas. Sabendo o número de voltas necessárias para completar uma camada e a espessura do material, é possível estimar o novo raio do rolo a cada camada completada e, com isso, recalculer a rotação por minuto (RPM) necessária para manter a velocidade superficial constante.

A base da modelagem é a relação entre velocidade angular e velocidade linear. A velocidade superficial  $v$  de um ponto na borda do cilindro em rotação é dada por:

$$v = \omega \cdot R \quad (4.1)$$

onde  $\omega$  é a velocidade angular em rad/s e  $R$  é o raio do rolo. Sabendo que:

$$\omega = \frac{2\pi \cdot \text{RPM}}{60} \quad (4.2)$$

Essa substituição permite expressar a velocidade linear em termos da rotação do motor, facilitando a obtenção de uma fórmula diretamente aplicável à programação do inversor, cuja referência de velocidade é definida em RPM. Substituindo (2) em (1), temos:

$$v = \frac{2\pi \cdot \text{RPM}}{60} \cdot R \quad (4.3)$$

Isolando RPM, obtemos:

$$\text{RPM} = \frac{60 \cdot v}{2\pi \cdot R} \quad (4.4)$$

Como o raio  $R$  cresce a cada camada completada, a cada atualização o novo valor de raio é dado por:

$$R = R_i + m \cdot h \quad (4.5)$$

em que  $R_i$  é o raio inicial,  $m$  é o número de camadas já enroladas, e  $h$  é a altura (espessura) do material.

Substituindo (5) em (4), obtemos:

$$\text{RPM} = \frac{60 \cdot v}{2\pi \cdot (R_i + m \cdot h)} \quad (4.6)$$

A lógica de controle, baseada nessa equação, foi representada no fluxograma da Figura 17. O sistema inicia com a definição dos parâmetros de entrada: raio inicial, número de rotações por camada, número máximo de camadas e velocidade superficial desejada. A cada rotação detectada pelo encoder (pulso Z), incrementa-se um contador. Ao atingir o número de rotações correspondente a uma camada, o sistema atualiza o número de camadas, calcula o novo raio e aplica a fórmula acima para definir a nova velocidade do motor. Esse processo continua até que o número máximo de camadas seja atingido.

Para a implementação prática, foi utilizado o inversor de frequência WEG CFW300 com recurso de SoftPLC, já previamente apresentado, em conjunto com um motor de indução trifásico acoplado ao eixo do rolo. A lógica apresentada no fluxograma foi inteiramente implementada em linguagem Ladder, diretamente no ambiente WPS, por meio de um módulo USB de programação.

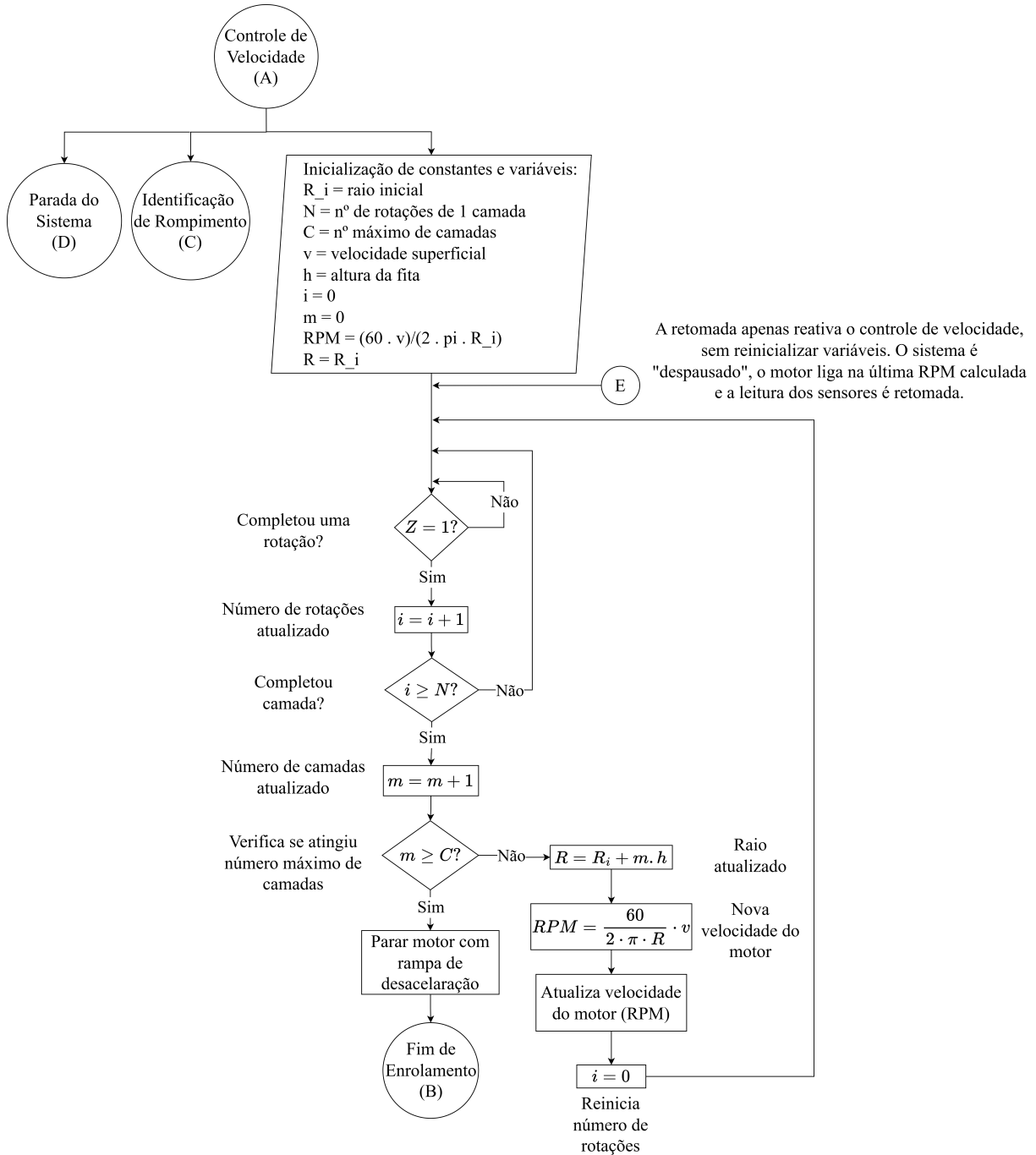
A lógica Ladder implementada pode ser consultada no Apêndice B. O sistema é iniciado quando o botão de início (DI1) é pressionado, ativando os estados `motor_ligado` e `botao_iniciar`, e definindo a rotação inicial com base no diâmetro do rolo sem material, representada por  $\text{RPM}_{\text{inicial}}$ . Conforme o material é enrolado, um encoder na entrada DI3 gera pulsos contados por `CTU_INST_0`; a cada 22 pulsos, o contador `CTU_INST_1` é incrementado. O valor desse contador é usado para atualizar o raio da bobina pela equação  $R = R_i + h \cdot \text{CTU\_INST\_1} \cdot \text{CV}$ , e a nova rotação é calculada pela equação 4.6, garantindo uma velocidade superficial constante. O botão DI1 também atua como reinício quando o sistema está pausado: se `parada_retomada` estiver ativo, a rotação é restaurada para  $\text{RPM}_{\text{inicial}}$ . O botão DI2 alterna o estado `parada_retomada`, e, ao retomar, o sistema recupera a última rotação calculada (caso `CTU_INST_1.CV` seja maior que zero) ou volta à rotação inicial. Por fim, o sensor DI4 detecta o rompimento do material, define a rotação alvo como zero e ativa o estado de pausa.

O encoder foi acoplado ao eixo do rolo, que por sua vez está conectado ao motor por meio de um redutor de velocidade. O objetivo do redutor é permitir que o motor opere próximo à sua rotação nominal enquanto o rolo gira em baixas velocidades, compatíveis com a velocidade superficial desejada.

Neste projeto, estabeleceu-se como velocidade superficial alvo o valor de  $v = 0,08 \text{ m/s}$ , um valor muito próximo da saída de grampos da prensa apresentada anteriormente. Assim, sabendo-se que o rolo tem um raio inicial de  $R_i = 0,025 \text{ m}$ , pode-se calcular

a rotação necessária para manter essa velocidade superficial aplicando a Equação 4.6.

Figura 17 – Fluxograma: Controle de velocidade do enrolamento



Fonte: Elaborado pela autora.

Assim, a rotação máxima necessária no eixo do rolo é de aproximadamente 30,56 RPM. Ao longo do processo de enrolamento, o raio aumenta com a adição de camadas de 11 mm de espessura, reduzindo a rotação necessária. Na quarta camada, o raio atinge 5,8

cm, resultando em uma rotação mínima de aproximadamente 13,17 RPM.

Para que o motor opere dentro de sua faixa nominal — em torno de 1690 RPM —, define-se o redutor de forma que a rotação máxima do rolo (30,56 RPM) corresponda à rotação máxima desejada do motor. Isso resulta em uma razão ideal de redução de aproximadamente 1:55. Assim, optou-se por uma redução de 1:50, amplamente disponível comercialmente e compatível com a faixa de operação planejada.

As velocidades a serem operadas no motor foram então calculadas, para futura validação experimental, e são apresentadas na tabela 4. Com essa relação, o motor opera entre 659 RPM (para 13,17 RPM no rolo) e 1528 RPM (para 30,56 RPM no rolo), valores adequados para o motor de indução utilizado e que garantem operação estável.

Tabela 4 – Rotação do rolo e do motor por camada com redutor 1:50

| Camada | Rotação do rolo (RPM) | Rotação do motor (RPM) |
|--------|-----------------------|------------------------|
| 0      | 30,56                 | 1528                   |
| 1      | 21,22                 | 1061                   |
| 2      | 16,25                 | 813                    |
| 3      | 13,17                 | 659                    |

Fonte: Elaborada pela autora.

Seria possível programar a lógica de controle de velocidade no próprio Arduino Nano usado para o atuador, mas optou-se por implementá-la diretamente no inversor via SoftPLC, visando modularidade, robustez e separação entre os eixos horizontal e vertical. Os botões e sensores têm seus sinais lidos e filtrados pelo Arduino, que aciona o inversor por meio de um módulo de relés, já que suas entradas digitais operam a 10 V em configuração NPN, e os relés utilizam a fonte fornecida pelo próprio inversor. Embora fosse viável acionar os relés diretamente, os sinais também são utilizados na lógica do atuador, o que justifica o uso do microcontrolador. Em sistemas com apenas uma rotação por camada, o controle exclusivo pelo inversor seria suficiente.

Por fim, apesar da lógica intuitiva, a implementação prática exigiu conhecimentos técnicos em elétrica e mecânica, como a ligação correta do motor ao inversor e o acoplamento do encoder.

#### 4.3.3 Controle de deslocamento horizontal

Para viabilizar o avanço lateral da fita a cada volta do rolo, foi adotado um atuador linear elétrico controlado via ponte H L298N, com programação realizada em um Arduino Nano. A escolha dessa solução se deu pela praticidade construtiva, eliminação de acoplamentos mecânicos adicionais e possibilidade de controle digital direto. A alternativa inicialmente considerada — utilizar o mesmo motor do rolo com um novo redutor e corrente



dentada — foi descartada devido à baixa flexibilidade do sistema em caso de variações na espessura do material, além da dificuldade de adaptação comercial da corrente dentada.

O atuador selecionado possui curso de 300 mm, tensão nominal de 12 V, força de 700 N e velocidade de até 20 mm/s. Como o deslocamento lateral no sistema de enrolamento não requer aplicação de força significativa, foi possível trabalhar com uma velocidade alta no atuador em PWM fixo. O objetivo era deslocar o atuador em incrementos equivalentes à largura da fita (11 mm) a cada rotação do rolo, garantindo o posicionamento adjacente das espiras.

Foi considerada a possibilidade de controle por velocidade contínua, com cálculo da velocidade ideal do atuador a cada camada, utilizando a equação:

$$v = \frac{L \cdot v_s}{2\pi r} \quad (4.7)$$

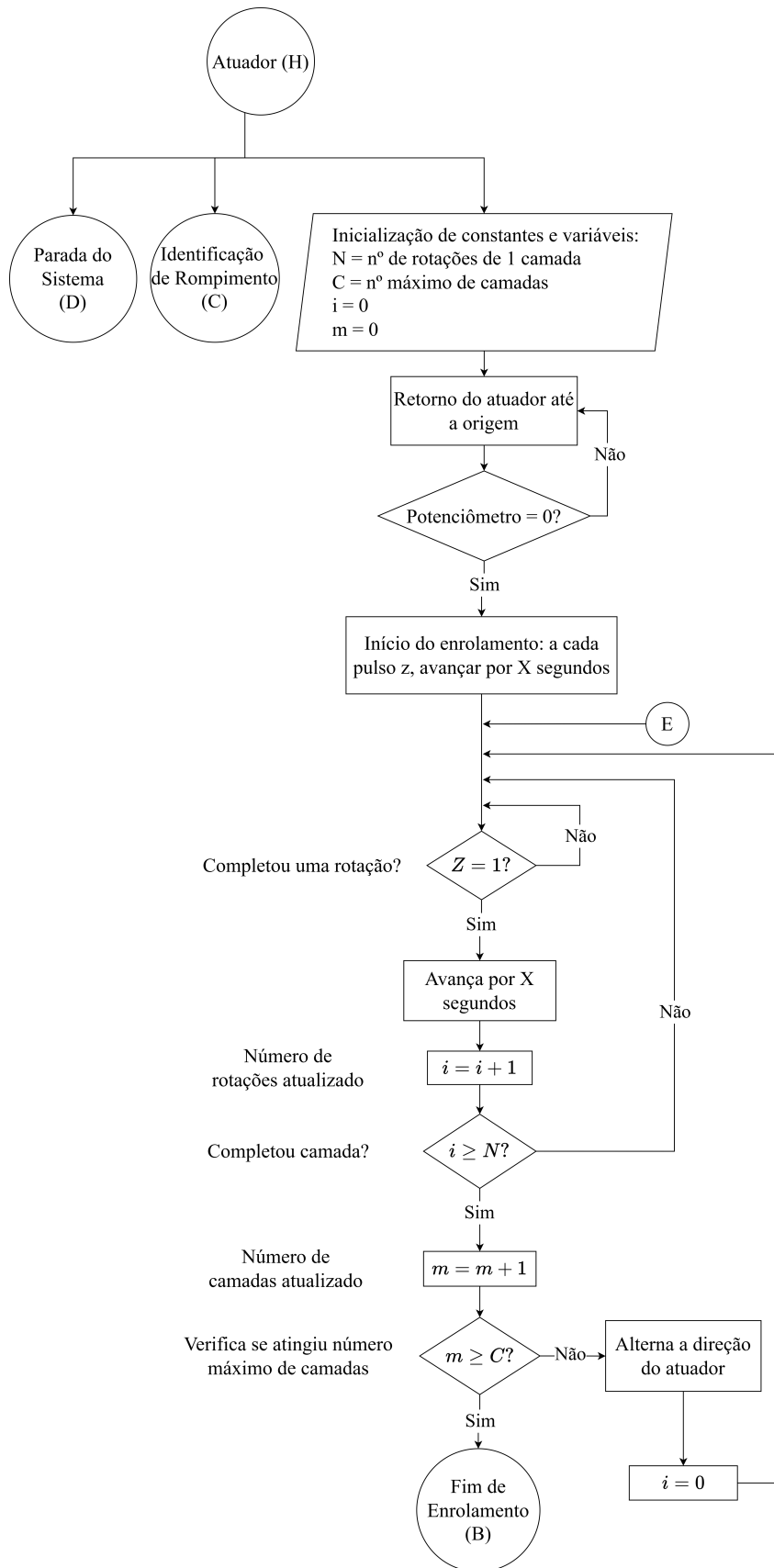
em que  $L$  é a largura da fita,  $v_s$  é a velocidade superficial desejada (0,08 m/s) e  $r$  o raio do rolo. Contudo, observou-se que, para a última camada, seria necessário uma velocidade de 2 mm/s — valor inviável para o atuador utilizado. Diante dessa limitação, optou-se por uma abordagem de controle simplificada, porém robusta para a prototipagem: o atuador avança com um sinal PWM de valor fixo por um tempo precisamente calibrado a cada pulso Z do encoder, visando garantir o deslocamento lateral equivalente à largura da fita (1,1 cm) por rotação do carretel.

Para determinar este tempo calibrado, o atuador foi primeiramente posicionado no início de seu curso e acionado com o mesmo valor de PWM utilizado no controle. O tempo total para que o atuador percorresse seu curso completo foi cronometrado diversas vezes. A média desses tempos permitiu calcular numericamente a velocidade linear média do atuador sob aquela condição de PWM. Com base nessa velocidade média e conhecendo o deslocamento desejado de 1,1 cm, calculou-se o intervalo de tempo necessário para o atuador percorrer essa distância, resultando nos 733 ms implementados.

A lógica de controle foi implementada conforme ilustrado no fluxograma da Figura 18. Inicialmente, o sistema realiza a inicialização das variáveis e o retorno do atuador à posição inicial, verificado via leitura de um potenciômetro acoplado ao eixo do atuador. O deslocamento é então sincronizado com o sinal Z do encoder do rolo, avançando por tempo fixo a cada pulso, até que o número de rotações por camada seja atingido. Ao final de cada camada, a direção do atuador é invertida. Esse ciclo se repete até o número máximo de camadas ser atingido.

O atuador também responde às mesmas condições de controle global do sistema: parada, reinício e retomada após interrupção ou detecção de rompimento de fita. O controle da ponte H, a leitura do potenciômetro, os pulsos do encoder e os sinais digitais de controle são todos realizados via código do microcontrolador, apresentado no Apêndice C.

Figura 18 – Fluxograma: Controle de deslocamento horizontal



Fonte: Elaborado pela autora.

#### 4.3.4 Detecção de rompimento da fita

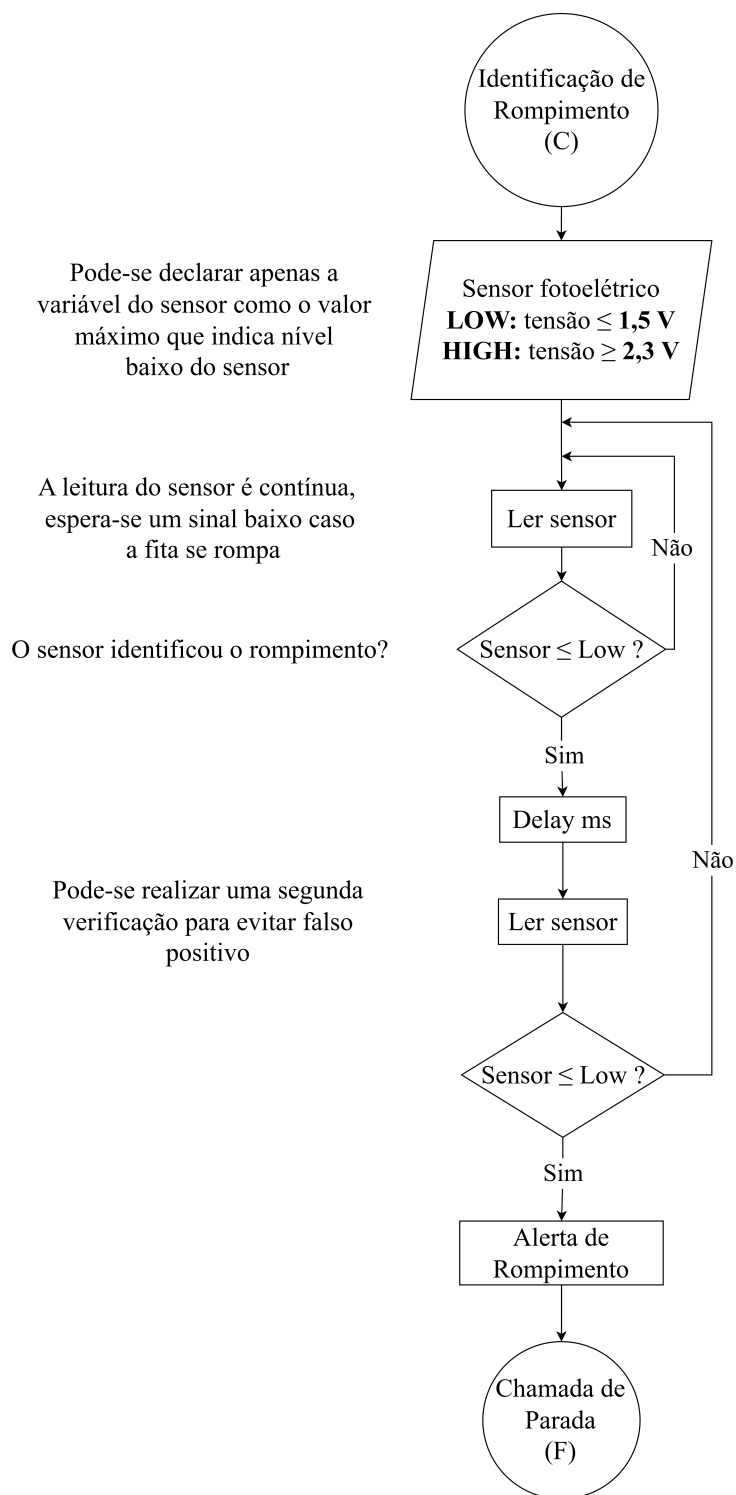
A interrupção do processo de enrolamento devido ao rompimento da fita é uma das principais falhas a serem monitoradas. Para essa finalidade, optou-se pela utilização de um sensor fotoelétrico com reflexão difusa, modelo NPN do tipo *normally open* (NO), com faixa de detecção ajustável de 0 a 10 cm. A escolha desse sensor se deu por sua facilidade de instalação, baixo custo e confiabilidade em aplicações industriais. No protótipo desenvolvido, o sensor foi posicionado de forma que o material passasse diretamente sobre ele. Quando há fita presente, a luz refletida é suficiente para manter o sinal em nível alto. Caso o material se rompa, o sensor deixa de detectar presença, e sua saída permanece em nível lógico baixo (tensão  $\leq 1,5$  V), sinalizando a falha.

A lógica de verificação foi implementada tanto no microcontrolador Arduino Nano quanto na lógica Ladder do inversor de frequência. A Figura 19 apresenta o fluxograma correspondente à lógica implementada para esse monitoramento.

Conforme ilustrado, o sinal do sensor é lido continuamente pelo Arduino. No entanto, diferentemente do fluxograma representado, que propõe uma dupla verificação após um breve intervalo, a implementação prática no código C utiliza uma abordagem baseada em temporização contínua, mais confiável. Especificamente, o sinal de nível lógico baixo precisa ser mantido por pelo menos 500 ms para que a condição de rompimento de fita seja confirmada. Essa estratégia visa evitar falsos positivos decorrentes de oscilações momentâneas ou ruídos no sinal do sensor, garantindo que apenas falhas reais interrompam o processo de enrolamento.

Uma vez detectado o rompimento, o Arduino aciona a subrotina de parada do sistema, desativando o atuador e exibindo a mensagem **FITA ROMPIDA** no display LCD. O inversor também é pausado por meio da lógica Ladder, replicando a função do botão de parada. O sistema permanece travado até que o operador realize o reparo — seja por substituição do rolo, emenda do material ou nova alimentação da fita. Somente após a presença do material ser novamente detectada (sinal HIGH do sensor) e o operador pressionar o botão de **reiniciar** ou **retomar**, o processo é restabelecido.

Figura 19 – Fluxograma: Detecção de rompimento da fita



Fonte: Elaborado pela autora.

#### 4.3.5 Unidade central de controle

A coordenação de todas as ações do sistema automatizado de enrolamento foi atribuída ao microcontrolador ATmega328P, embarcado na placa Arduino Nano, que atuou como unidade central de controle. Sua principal função foi realizar a leitura dos sensores (fotoelétrico, encoder, potenciômetro), interpretar os sinais dos botões físicos (início/reinício e parada/retomada), aplicar as lógicas de controle desenvolvidas e, com base nisso, acionar os dispositivos periféricos do sistema: ponte H, relés de comando do inversor e display LCD.

A escolha da placa Arduino Nano foi motivada por sua versatilidade, tamanho reduzido e compatibilidade com a prototipagem em protoboard, o que facilitou a integração de todos os módulos eletrônicos. A ligação dos pinos foi realizada com jumpers diretos, respeitando as limitações elétricas do microcontrolador. Dentre essas limitações, destaca-se a limitação no fornecimento de corrente.

Para garantir a integridade do sistema frente às condições industriais — como ruídos elétricos oriundos do inversor de frequência —, foi necessário realizar o tratamento dos sinais de entrada por meio de filtros passivos e técnicas de isolamento. Dessa forma, evitou-se que oscilações ou picos de tensão danificassem o microcontrolador ou interferissem na lógica de controle.

O uso do microcontrolador também desempenhou um papel essencial na expansão da capacidade lógica do sistema. Embora os sensores utilizados (encoder e sensor fotoelétrico) e os dois botões pudessem, em teoria, serem conectados diretamente às quatro entradas digitais do inversor, o SoftPLC interno não seria capaz de executar, ao menos não sem módulos adicionais, toda a lógica necessária para o controle do atuador linear, detecção de falhas, exibição no display LCD e estratégias de reinício. O uso do ATmega328P permitiu a implementação de funcionalidades que extrapolam as capacidades do inversor, como o controle da ponte H com base na leitura de um potenciômetro, a interrupção automática por rompimento da fita e a gestão do display LCD. Além disso, o sistema pôde ser facilmente depurado e testado com agilidade, graças à plataforma de desenvolvimento Arduino IDE, o que acelerou o processo de validação de cada funcionalidade.

Por fim, o uso do microcontrolador garantiu maior flexibilidade ao projeto, permitindo alterações rápidas de lógica e a expansão futura do sistema, caso novos sensores ou funcionalidades venham a ser incorporados.

#### 4.3.6 Robustez e imunidade a ruído

A presença de ruído eletromagnético no sistema desenvolvido tornou-se um dos principais desafios para a integridade do circuito de controle. Esse ruído é caracterizado como interferência eletromagnética (EMI), gerada principalmente pelo chaveamento de

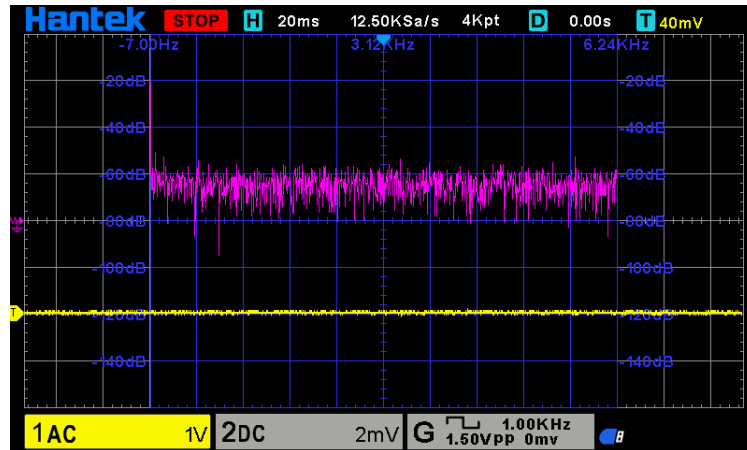
alta frequência do inversor de frequência, utilizado para acionar o motor trifásico. Durante sua operação, o inversor emite perturbações tanto por condução, através das linhas de alimentação e sinal, quanto por irradiação, devido aos campos eletromagnéticos gerados por suas trocas de estado em alta velocidade. Essas perturbações eletromagnéticas podem induzir tensões em condutores próximos, principalmente nos fios conectados a circuitos de baixa potência, como os utilizados no Arduino. Como resultado, pinos digitais com alta impedância passam a atuar como antenas, sensíveis a pequenas variações de campo elétrico e magnético, apresentando comportamentos instáveis mesmo quando não há nenhum componente fisicamente conectado a eles.

Na prática, o ruído manifestou-se como leituras falsas nos pinos digitais do Arduino, que alternavam de estado como se houvesse um botão sendo pressionado continuamente. Isso ocorreu mesmo com os canais completamente desconectados, apenas devido à proximidade com o inversor energizado. O fenômeno se deve ao acoplamento capacitivo e indutivo entre as fontes de ruído e as trilhas ou fios do circuito de controle, em especial em ambientes sem blindagem eletromagnética ou sem planejamento de separação entre malhas de potência e malhas de sinal. O ruído comum também desempenhou papel relevante, afetando o potencial de referência (terra) entre partes distintas do sistema e comprometendo a interpretação lógica dos níveis de tensão. Portanto, antes de qualquer medida corretiva, foi necessário compreender a natureza do ruído presente no sistema e reconhecer que sua origem não se restringia à integridade dos sinais de entrada, mas envolvia o ambiente eletromagnético como um todo.

Para caracterizar a interferência eletromagnética (EMI) e seu impacto no microcontrolador, foi inicialmente realizada uma medição de referência com o inversor desligado, representada na Figura 20. Nessa condição, observou-se que o pino de entrada do Arduino, mantido em estado flutuante e sem nenhum filtro, permanecia relativamente estável, apresentando apenas pequenas variações de tensão associadas ao ruído de fundo natural do ambiente. No entanto, ao energizar o circuito de potência (inversor e motor), a condição do mesmo pino se alterou drasticamente. A Figura 21 apresenta, na parte superior, a Transformada Rápida de Fourier (FFT) do sinal captado nesse cenário. A análise espectral revela componentes de ruído significativas: um acúmulo em baixas frequências próximas a DC, um pico proeminente em aproximadamente 2,5 kHz (marcado pelo cursor AX) e outro em aproximadamente 5 kHz (marcado pelo cursor BX), além de outras componentes relevantes. A natureza deste ruído é predominantemente atribuída à operação de chaveamento em alta frequência do inversor de frequência, que utiliza modulação por largura de pulso (PWM) para controlar o motor. O pico em 2,5 kHz pode representar a frequência fundamental do PWM, enquanto o pico em 5 kHz corresponde provavelmente a seu segundo harmônico — um comportamento comum em sistemas de potência com formas de onda não senoidais. Concomitantemente, a forma de onda no domínio do tempo, exibida na parte inferior da Figura 21, evidencia oscilações de tensão abruptas e erráticas. Essa análise confirma que

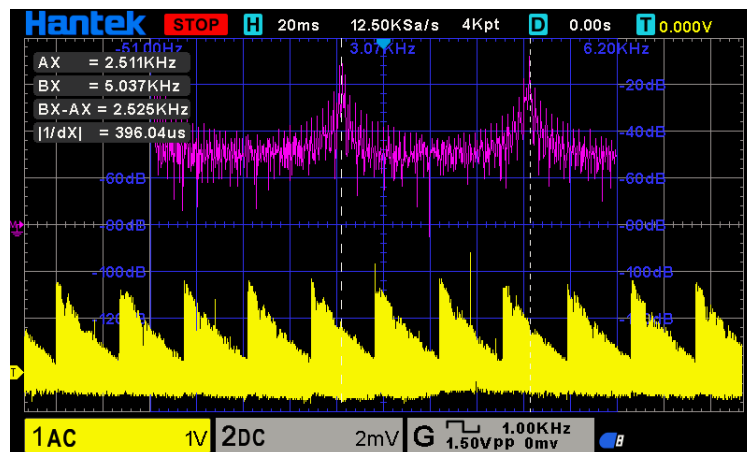
o pino de entrada, quando não filtrado, capta EMI severa oriunda do chaveamento do inversor e de sua interação com o motor, sendo um risco direto à confiabilidade da leitura digital no sistema.

Figura 20 – Entrada digital flutuante com inversor desligado



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 21 – Entrada digital flutuante com inversor ligado



Fonte: Elaborado pela autora.

Diante da caracterização do ruído presente no sistema, foi necessário adotar uma cadeia de filtragem que garantisse a estabilidade dos sinais digitais recebidos pelo Arduino. Assim, implementou-se uma estratégia de condicionamento de sinal em três estágios, com o objetivo de assegurar a integridade das leituras mesmo em ambiente sujeito a interferência eletromagnética. O primeiro estágio é composto por um optoacoplador, responsável por realizar o isolamento galvânico entre o ambiente ruidoso do sensor ou botão e o circuito

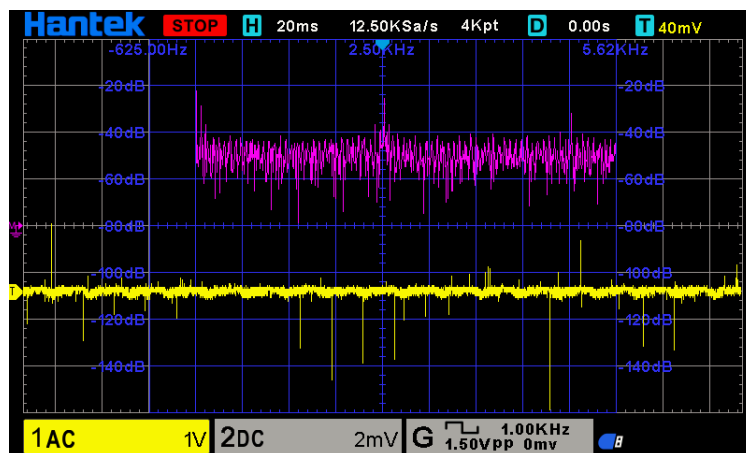
lógico do microcontrolador, eliminando loops de terra e bloqueando a propagação de ruído em modo comum. O resultado desse estágio é apresentado na figura 22. Em seguida, o sinal isolado é direcionado a um filtro RC do tipo passa-baixas, cuja função é atenuar componentes de alta frequência ainda presentes, suavizando a resposta e reduzindo a influência de harmônicos como os observados anteriormente. O resultado é apresentado na figura 23. Por fim, a saída do filtro é conectada a uma porta com disparador de Schmitt (CI 74HC14), que restaura as transições digitais com clareza e rejeita flutuações residuais por meio da sua histerese de comutação. A Figura 24 apresenta o resultado obtido ao final dessa cadeia: observa-se que os picos periódicos de alta frequência foram eliminados, e a forma de onda resultante apresenta transições limpas.

Figura 22 – Sinal após aplicação do optoacoplador



Fonte: Elaborado pela autora.

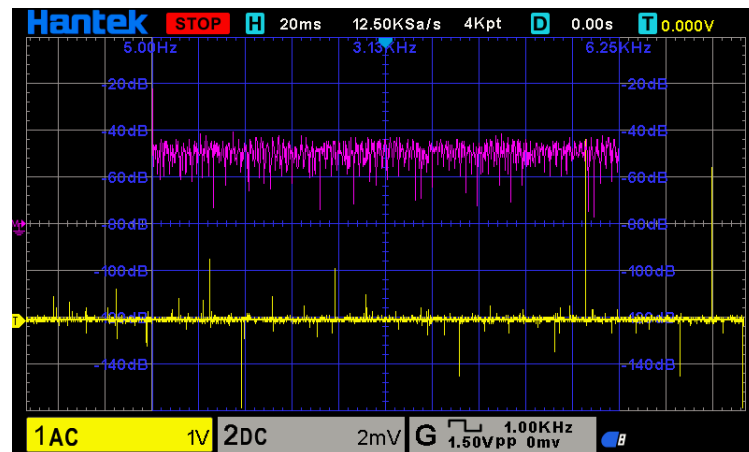
Figura 23 – Sinal após aplicação do optoacoplador e filtro RC



Fonte: Elaborado pela autora.



Figura 24 – Sinal restaurado após isolamento e condicionamento



Fonte: Elaborado pela autora.

Eventuais picos residuais e extremamente curtos ainda podem ocorrer, mas são ignorados na prática pelo próprio tempo de resposta do microcontrolador, não comprometendo a confiabilidade da leitura. O dimensionamento e o funcionamento de cada estágio serão apresentados a seguir.

#### 4.3.6.1 Optoacoplador

O primeiro estágio da cadeia de filtragem foi implementado com um optoacoplador da série PC817BS, utilizado para isolar galvanicamente tanto os botões físicos quanto os sensores presentes no sistema. No circuito, o LED interno do optoacoplador está conectado entre os pinos 1 (ânodo) e 2 (cátodo). O pino 1 é alimentado por uma fonte de 5 V isolada, com um resistor de limitação de corrente em série, enquanto o pino 2 é conectado ao GND da mesma fonte. Quando o botão é pressionado ou o sensor é ativado, o LED conduz e emite luz infravermelha que incide sobre o fototransistor interno, provocando sua condução. O fototransistor está conectado entre os pinos 4 (coletor) e 3 (emissor), sendo o pino 3 referenciado ao GND do Arduino e o pino 4 conectado à entrada digital, acompanhado por um resistor de pull-up.

De acordo com o datasheet do PC817, a corrente contínua máxima recomendada para o LED é de 50 mA. Com alimentação de 5 V e uma queda típica de 1,2 V no LED, o valor de resistor escolhido, de 220  $\Omega$ , limitou a corrente para cerca de 17 mA, valor seguro e eficaz para garantir a ativação do fototransistor e boa taxa de transferência de corrente (CTR). Para que esta proteção seja plenamente efetiva em nível de sistema, é imprescindível que o domínio de alimentação do microcontrolador também seja isolado. No presente projeto, essa condição é assegurada pelo uso do conversor DC-DC B0505S, que fornece uma alimentação de 5V e um referencial de terra próprio e totalmente isolado para

o Arduino e seus periféricos mais sensíveis. Isso garante que o referencial de terra ao qual o circuito de saída do optoacoplador (lado do fototransistor conectado ao Arduino) está ligado seja efetivamente distinto e isolado do referencial de terra utilizado pelo circuito de entrada do optoacoplador (lado do LED, onde atuam os sensores e botões).

#### 4.3.6.2 Filtro RC

Para o estágio de filtragem passiva, foi implementado um filtro do tipo passa-baixas RC em configuração série-paralelo, com resistor em série ao sinal e capacitor conectado ao terra. Esse tipo de filtro permite atenuar componentes de alta frequência ao permitir a passagem de sinais mais lentos (de baixa frequência) enquanto desvia os sinais mais rápidos para o terra. Conforme discutido no embasamento teórico, frequência de corte ( $f_c$ ) do filtro, que define o ponto a partir do qual a atenuação começa a ser significativa, é dada pela equação:

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC}$$

Em que  $R$  representa a resistência (em ohms) e  $C$  a capacitância (em farads). Para este projeto, foram utilizados um resistor de  $R = 1\text{ k}\Omega$  e um capacitor de  $C = 100\text{ nF}$ , resultando em uma frequência de corte de aproximadamente:

$$f_c = \frac{1}{2\pi \cdot 1000 \cdot 100 \times 10^{-9}} \approx 1592\text{ Hz}$$

Essa escolha permite a passagem adequada dos sinais provenientes de sensores mecânicos, como botões, que apresentam comutação lenta, ao mesmo tempo em que atenua significativamente ruídos de alta frequência, como os observados em torno de 2,5 kHz e 5 kHz na análise espectral. O valor de 1 k $\Omega$  também foi selecionado com base na necessidade de limitar a impedância do sinal sem comprometer o tempo de resposta do sistema.

#### 4.3.6.3 Schmitt Trigger

O estágio final da cadeia de condicionamento de sinal foi implementado com um circuito disparador de Schmitt, utilizando o CI 74HC14. Este componente possui entradas com histerese, o que significa que ele define dois limiares distintos para comutação: um para a transição de nível baixo para alto, e outro para a transição de alto para baixo. Essa característica evita que pequenos ruídos ou oscilações na tensão de entrada provoquem múltiplas comutações indesejadas, garantindo uma transição digital limpa e bem definida. No projeto, o CI foi alimentado com 5 V e GND provenientes da mesma fonte regulada que alimenta o Arduino, garantindo compatibilidade elétrica e níveis lógicos consistentes com os pinos digitais do microcontrolador.

O sinal proveniente do estágio anterior — já isolado pelo optoacoplador e suavizado — é aplicado à entrada de uma das portas do 74HC14. Ao cruzar o limiar de comutação definido internamente pelo CI, o sinal é restaurado com bordas nítidas e imunidade a variações residuais.

#### 4.3.6.4 Filtragem aplicada no código

Além da cadeia de condicionamento analógico aplicada no circuito físico, o código do microcontrolador incorpora filtros digitais para reforçar a estabilidade do sistema diante de ruídos residuais e variações abruptas. Foram utilizadas duas estratégias principais: suavização da leitura analógica por filtro passa-baixa digital e aplicação de temporização para antirruído nas entradas digitais.

A leitura do potenciômetro, responsável por indicar a posição do atuador, foi suavizada por meio de uma média exponencial com fator de amortecimento definido por um coeficiente  $\alpha = 0,1$ . Esse valor controla a influência da leitura mais recente sobre o valor acumulado, conforme a equação:

$$\text{leituraFiltrada} = \alpha \cdot \text{leituraAtual} + (1 - \alpha) \cdot \text{leituraFiltrada\_anterior}$$

Com isso, variações rápidas e instabilidades momentâneas do sinal analógico são amortecidas, evitando que oscilações breves resultem em comandos incorretos ao sistema.

Nas entradas digitais, como botões e sensores, foi aplicado um mecanismo de *debounce* por tempo, que desconsidera qualquer nova leitura se ela ocorrer dentro de um intervalo inferior a 50 ms da leitura anterior. Essa abordagem evita a detecção de múltiplos acionamentos causados por ruído eletromagnético ou por vibrações mecânicas típicas de contatos físicos. Além disso, no caso do sensor fotoelétrico, foi implementado um temporizador que exige que o sinal de ausência de material (nível lógico baixo) seja mantido por pelo menos 500 ms antes que o sistema registre um rompimento de fita. Essa lógica protege contra falsas detecções provocadas por oscilações rápidas, sombras momentâneas ou interferência de fundo.

Essas estratégias de filtragem no código complementam os estágios físicos de proteção, contribuindo para um sistema robusto e imune a interferências operacionais típicas de ambientes industriais.

#### 4.3.7 Montagem do circuito de controle

O circuito de controle do sistema foi integralmente montado em uma protoboard, estratégia comum na fase de prototipagem por permitir alterações rápidas, fácil acesso a medições e reorganização modular dos componentes. Seu diagrama esquemático completo está apresentado no Apêndice D. Contudo, o desenho do circuito tem algumas observações

sobre sua implementação, como simplificações adotadas devido à natureza de um protótipo ou a montagem prática dos componentes.

Dentre os módulos utilizados, destaca-se o driver de potência L298N, responsável pelo controle do atuador linear. Por tratar-se de um módulo pronto, já inclui os circuitos de proteção internos como os diodos de flyback, o que elimina a necessidade de adicioná-los externamente.

Além disso, a aplicação de capacitores de desacoplamento se faz uma prática importante para garantir estabilidade elétrica. Assim, na montagem do circuito, deve-se incluir capacitores cerâmicos de 100 nF conectados entre os terminais de alimentação (VCC e GND) de cada circuito integrado. Esses componentes atuam como pequenas reservas locais de carga, atenuando variações rápidas de tensão decorrentes da comutação interna dos CIs. Sua eficácia depende diretamente da distância de montagem, devendo ser posicionados o mais próximo possível dos terminais dos CIs, minimizando a indutância parasita dos condutores.

O circuito foi distribuído em duas protoboards principais, sendo uma terceira reservada exclusivamente para o Arduino Nano. Essa separação favoreceu a organização dos sinais, além de reduzir interferências internas. Como prática recomendada, buscou-se manter os fios de conexão curtos e evitar sobreposições excessivas, uma vez que condutores longos e mal posicionados podem atuar como antenas, captando ruídos eletromagnéticos do ambiente e comprometendo o funcionamento do sistema. Cabe ainda destacar que, por questões de isolamento galvânico, o potenciômetro utilizado para leitura da posição do atuador foi conectado diretamente ao barramento de 5 V isolado do Arduino, visto que é isolado da alimentação do atuador, em VCC e GND, garantindo um sinal analógico limpo e sem necessidade de filtragem adicional ou isolamento.

Essa estrutura de montagem, apesar de provisória, deve ser funcional e robusta para os ensaios do protótipo, permitindo validar o funcionamento dos blocos de hardware em ambiente real de operação.

#### 4.3.7.1 Alimentação do sistema

Durante a fase de prototipagem, a alimentação principal do circuito de controle foi estabelecida em 12 V contínuos, fornecidos por uma fonte de bancada ajustável. Esta escolha ofereceu praticidade para o ambiente de testes, facilitando o monitoramento de tensões e correntes, além de ajustes ágeis. Para uma aplicação industrial definitiva, considera-se a transição para uma fonte chaveada dedicada do tipo colmeia, com saídas otimizadas para as tensões requeridas pelo sistema, como 12 V e 5 V.

Dado que diversos componentes do sistema operam em 5 V, a redução da tensão de 12 V foi realizada por meio de reguladores lineares da série 7805, estrategicamente

distribuídos. O primeiro regulador 7805 foi dedicado exclusivamente à alimentação do módulo de relés de quatro canais. Considerando que cada relé consome entre 70 mA e 80 mA, totalizando um consumo máximo de aproximadamente 320 mA, a dissipação de potência neste regulador é de  $(12\text{ V} - 5\text{ V}) \times 0,32\text{ A} = 2,24\text{ W}$ . Durante os ensaios de prototipagem, que envolveram períodos de acionamento controlados e monitorados dos relés, não foi instalado um dissipador de calor neste componente. No entanto, para uma operação contínua ou em uma versão final do produto, a adição de um dissipador de calor adequado seria indispensável para garantir a confiabilidade a longo prazo e prevenir o superaquecimento do regulador, caso ainda seja utilizado o componente.

O isolamento elétrico crítico do arduino foi efetivamente obtido através de um conversor DC-DC isolado do tipo B0505S. Este módulo, alimentado pelos 5 V provenientes de um segundo regulador, gera uma saída de 5 V completamente isolada, com sua própria referência de terra (GND isolado). Este barramento de 5 V isolado alimenta exclusivamente os seguintes componentes: o microcontrolador Arduino Nano, toda a lógica de interface associada aos optoacopladores (lado do fototransistor e resistores de pull-up), o display LCD I2C (que se comunica diretamente com o Arduino), os circuitos integrados disparadores Schmitt (CI 74HC14 que processam sinais para o Arduino) e o potenciômetro utilizado como entrada analógica. O consumo agregado destes componentes no barramento isolado é inerentemente baixo, consistindo principalmente no microcontrolador em operação normal e na corrente de sinal dos periféricos, o que condiz a capacidade de fornecimento de corrente de módulos compactos como o B0505S. Os botões físicos, por sua vez, acionam os LEDs dos optoacopladores no lado não isolado, referenciados à fonte de 5 V original (não isolada, pré-B0505S).

Já a alimentação do circuito de potência, do motor trifásico, foi realizada de forma independente: o inversor de frequência utilizado possui entrada monofásica de 127 V e foi conectado diretamente a uma tomada compatível, sendo responsável por gerar a tensão trifásica de 220 V aplicada ao motor. Os cabos foram dimensionados de acordo com a corrente de partida do motor e normas, garantindo maior segurança nos testes.

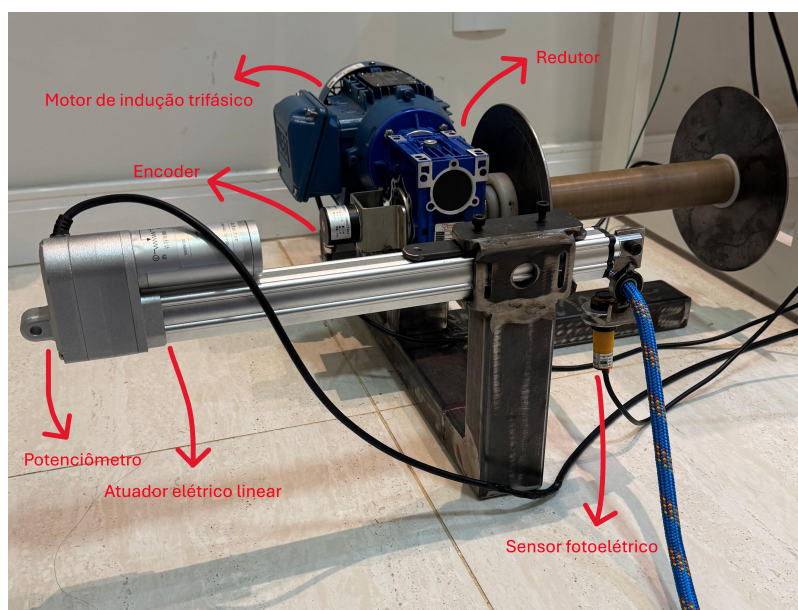


## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta os resultados obtidos com o desenvolvimento e a implementação do protótipo do sistema de automação para bobinagem. Inicialmente, descreve-se a configuração final do protótipo. Em seguida, detalha-se a validação funcional dos diversos módulos e funcionalidades implementadas. Posteriormente, apresenta-se a validação experimental quantitativa do controle de velocidade superficial constante. Por fim, realiza-se uma análise comparativa com a abordagem original.

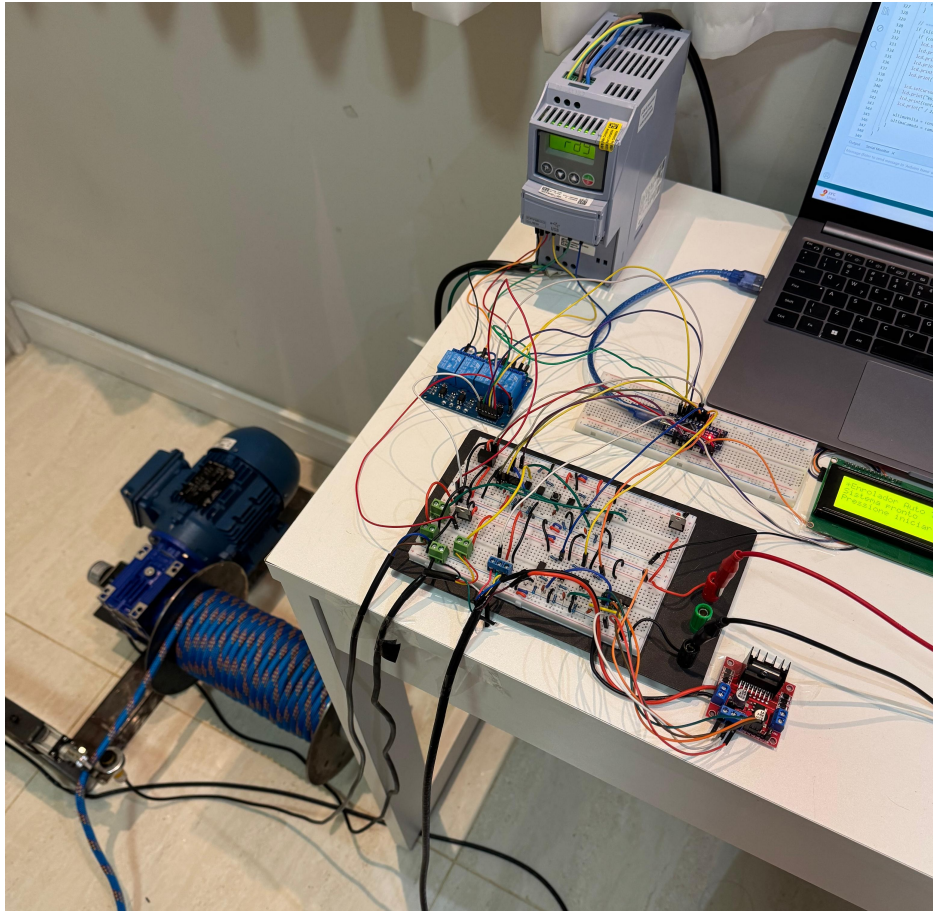
O protótipo do sistema de automação foi montado utilizando os componentes selecionados e seguindo a arquitetura definida. A Figura 25 ilustra a montagem física final dos principais componentes, incluindo o motor de indução trifásico, o inversor de frequência WEG CFW300, o atuador linear elétrico, os sensores (encoder rotativo, sensor fotoelétrico e potenciômetro) e o carretel de bobinagem. O circuito de controle, implementado em protoboard, integra o microcontrolador Arduino Nano, o display LCD para interface com o operador, os relés de acionamento para interface com o inversor e os circuitos de condicionamento de sinal para os sensores, conforme apresentado na Figura 26. Os testes e validações foram conduzidos utilizando-se como material para os ensaios de bobinagem uma corda com espessura de 1,1 cm, escolhida por sua disponibilidade e facilidade de manuseio para os fins de prototipagem e demonstração do conceito.

Figura 25 – Montagem dos componentes do protótipo



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 26 – Circuito de controle montado em protoboard



Fonte: Elaborado pela autora.

## 5.1 Validação funcional dos módulos e funcionalidades do sistema

Nesta seção, descrevem-se os testes realizados para verificar o correto funcionamento de cada componente-chave e funcionalidade implementada no sistema de automação, refletindo os diversos ensaios conduzidos para assegurar a robustez da solução proposta.

### 5.1.1 Interface com o usuário e lógica de comando

**Objetivo do Teste:** Validar a correta resposta do sistema aos comandos do operador via botões (Iniciar/Reiniciar, Parar/Retomar) e a clareza e precisão das informações apresentadas no display LCD.

**Procedimento de Teste:** Foram executadas diversas sequências de acionamento dos botões, incluindo comandos na ordem lógica esperada (e.g., Iniciar -> Parar -> Retomar -> Parar -> Reiniciar) e também tentativas de acionamento fora da sequência prevista (e.g., pressionar “Parar” antes de “Iniciar”, acionar “Iniciar” com



o sistema já em funcionamento, múltiplos acionamentos rápidos). A resposta do sistema e as mensagens exibidas no display LCD foram observadas e registradas para cada cenário.

**Resultados Observados:** O sistema demonstrou comportamento robusto e seguro frente a todas as sequências de comando testadas, ignorando comandos inválidos para o estado atual ou executando as transições de estado apropriadas. As mensagens no display LCD, exemplos compilados na Figura 27, foram exibidas corretamente e em tempo hábil, indicando o estado do sistema, confirmando o funcionamento satisfatório da interface homem-máquina.

Figura 27 – Telas do display LCD apresentadas durante a operação



Fonte: Elaborado pela autora.

### 5.1.2 Sistema de detecção de rompimento de fita

**Objetivo do Teste:** Verificar a eficácia do sensor fotoelétrico e da lógica de controle associada na detecção do rompimento da fita (material de bobinagem) e na subsequente parada segura e sinalização do sistema.

**Procedimento de Teste:** Durante o processo de bobinagem simulado com a corda, o rompimento da fita foi simulado em diferentes momentos, tanto no início quanto durante o enrolamento de uma camada, interrompendo-se manualmente a passagem da corda pelo feixe do sensor fotoelétrico. A resposta do sistema, incluindo o tempo para parada e a sinalização, foi observada.

**Resultados Observados:** Em todas as simulações de falha, o sistema identificou corretamente a ausência de material após o tempo de confirmação configurado no software (500 ms). Imediatamente após a confirmação, o motor de bobinagem e o avanço do atuador linear foram interrompidos, e a mensagem “FITA ROMPIDA” foi exibida no LCD. O sistema permaneceu em estado de falha segura até que a condição fosse virtualmente corrigida (material reposicionado) e um comando de retomada ou reinício fosse acionado pelo operador.

#### 5.1.3 Funcionalidade de retomada de processo

**Objetivo do Teste:** Validar a capacidade do sistema de armazenar o estado atual da bobinagem (camada e número de voltas) e retomar o processo corretamente a partir do ponto de interrupção, seja por uma parada comandada ou após a correção de uma falha.

**Procedimento de Teste:** O processo de bobinagem foi interrompido intencionalmente em diferentes estágios (camadas e número de voltas distintas) utilizando o botão Parar/Retomar. Também se testou a retomada após a simulação de correção de um rompimento de fita. Após um período, o comando de retomada (Parar/Retomar no estado pausado ou após falha) foi acionado.

**Resultados Observados:** Em todos os cenários de teste, o sistema retomou a bobinagem precisamente a partir da contagem de camada e volta em que havia sido interrompido. A velocidade do motor foi reajustada automaticamente para o valor correspondente ao diâmetro da camada de retomada, e o sistema continuou a operação normalmente. Nenhuma perda de dados de progresso do processo foi observada, confirmando a robustez da lógica de armazenamento e recuperação de estado.

#### 5.1.4 Sistema de alinhamento horizontal

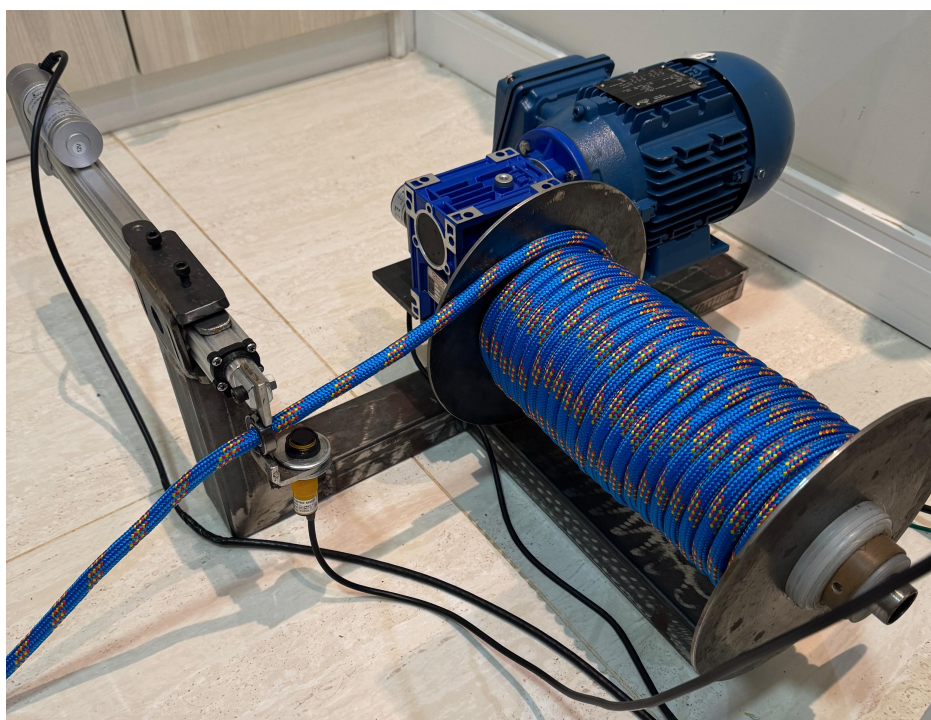
**Objetivo do Teste:** Avaliar a precisão e consistência do movimento do atuador linear e a qualidade do enrolamento resultante em termos de homogeneidade e uniformidade das camadas formadas.

**Procedimento de Teste:** Observou-se o comportamento do atuador linear durante ciclos completos de bobinagem, com foco no avanço lateral a cada pulso Z do encoder e na correta inversão de sentido ao final de cada camada. Foram realizados ensaios variando-se o número total de camadas programadas para verificar a consistência da lógica de alinhamento sob diferentes durações de operação.

**Resultados Observados:** O atuador linear executou o avanço lateral de forma sincronizada e consistente a cada rotação completa do carretel. A inversão de sentido do movimento do atuador ocorreu precisamente ao se completar o número de voltas

programado para cada camada. O resultado visual do processo de enrolamento apresentou boa homogeneidade, conforme exemplificado na Figura 28 para um teste com 4 camadas. Isso indica que o sistema foi capaz de manter a cadência de avanço lateral programada de forma precisa e contínua, resultando em uma distribuição uniforme do material no carretel sem necessidade de intervenção manual.

Figura 28 – Resultado do enrolamento demonstrando a homogeneidade das camadas



Fonte: Elaborado pela autora.

## 5.2 Validação experimental do controle de velocidade

Com o sistema devidamente montado e suas funcionalidades básicas validadas, foi conduzida uma validação experimental mais rigorosa com o objetivo específico de comprovar o cumprimento da proposta de controle da velocidade superficial constante durante o processo de enrolamento. Para isso, foi realizado um ensaio completo com quatro camadas de corda, cada uma composta por 22 voltas. Durante a execução do ensaio, o sistema operou de forma contínua e o tempo de enrolamento de cada camada foi registrado através de um vídeo.

A fim de estimar os tempos teóricos para cada camada, assumindo uma velocidade superficial perfeitamente constante, adotou-se o seguinte procedimento metodológico:

1. Determinou-se o **raio** do rolo no início de cada camada ( $r_i$ ), considerando o raio inicial do carretel e a espessura da corda acumulada nas camadas anteriores.
2. Calculou-se o **perímetro** correspondente a cada camada, com base na equação  $P = 2\pi r_i$ .
3. Multiplicou-se o perímetro pelo número de voltas por camada (22 voltas), obtendo o **comprimento total de corda** estimado para aquela camada ( $L_{camada} = P \times 22$ ).
4. Dividiu-se esse comprimento pela **velocidade superficial constante** desejada ( $v = 0,08 \text{ m/s}$ ), resultando no **tempo teórico** de enrolamento da camada ( $T_{teórico} = L_{camada}/v$ ).

A Tabela 5 apresenta os resultados obtidos a partir desses cálculos para as quatro camadas testadas.

Tabela 5 – Tempo teórico de enrolamento de cada camada com base na velocidade superficial constante de  $v = 0,08 \text{ m/s}$

| Camada | Raio ( $r$ ) [m] | Perímetro [m] | Comprimento total [m] | Tempo Teórico [s] |
|--------|------------------|---------------|-----------------------|-------------------|
| 0      | 0,025            | 0,157         | 3,45                  | 43,2              |
| 1      | 0,036            | 0,226         | 4,97                  | 62,1              |
| 2      | 0,047            | 0,295         | 6,49                  | 81,1              |
| 3      | 0,058            | 0,364         | 8,01                  | 100,2             |

Fonte: Elaborado pela autora.

Durante o ensaio prático, foi registrada uma sequência de imagens que comprova a execução contínua do enrolamento e o tempo medido para a conclusão de cada camada. A Figura 29 apresenta essa sequência no formato de tabela, com as respectivas imagens e tempos medidos em cada estágio do processo.

Para efeito de comparação entre o desempenho teórico esperado e os tempos medidos durante a execução, a Tabela 6 apresenta os resultados observados e o erro absoluto entre os valores previstos e reais para cada camada.

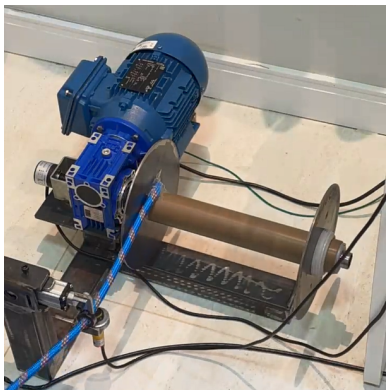
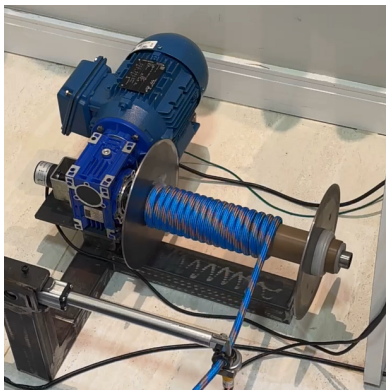
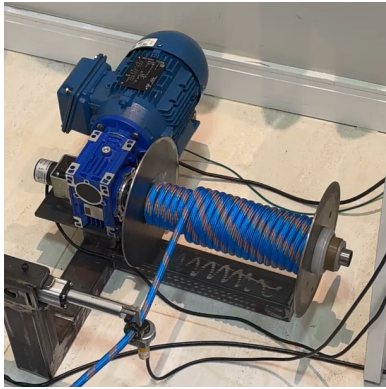
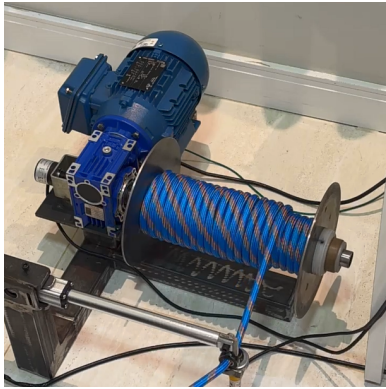
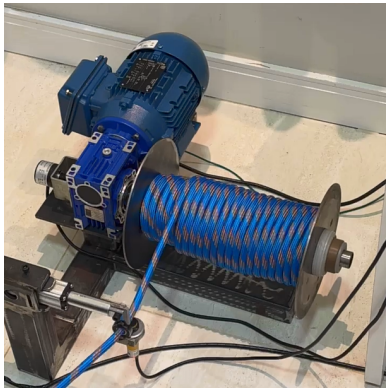
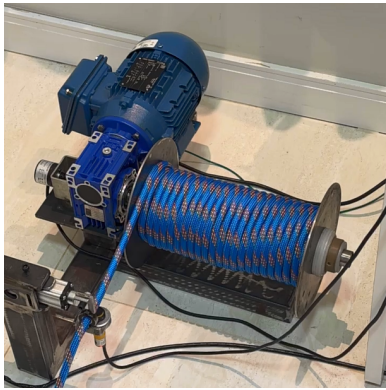
Tabela 6 – Comparação entre tempo teórico e tempo experimental de enrolamento por camada

| Camada | Tempo Teórico [s] | Tempo Medido [s] | Erro Absoluto [s] |
|--------|-------------------|------------------|-------------------|
| 0      | 43,2              | 47               | 3,8               |
| 1      | 62,1              | 62               | 0,1               |
| 2      | 81,1              | 82               | 0,9               |
| 3      | 100,2             | 100              | 0,2               |

Fonte: Elaborada pela autora.



Figura 29 – Sequência do processo de enrolamento com tempo por camada medido

|                                                                                     |                                                                                      |
|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
|    |    |
| Início de enrolamento                                                               | Camada 0: 47 segundos                                                                |
|   |   |
| Camada 1: 62 segundos                                                               | Camada 2: 82 segundos                                                                |
|  |  |
| Camada 3: 100 segundos                                                              | Fim de enrolamento                                                                   |

Fonte: Elaborado pela autora.

A comparação entre os dados teóricos e os resultados experimentais mostra boa concordância, com erros absolutos pequenos a partir da segunda camada. A maior diferença ocorreu na camada 0 (3,8 s), atribuída à rampa de aceleração do motor trifásico, que não é considerada no cálculo teórico. Além disso, o sinal Z do encoder, por marcar um ponto fixo, pode não coincidir exatamente com o início ou fim ideal das voltas, gerando pequenas

variações no comprimento das camadas. Por fim, o modelo adotado assume que o material tem espessura constante, o que é uma aproximação. Ainda assim, os erros reduzidos nas camadas seguintes (0,1 s, 0,9 s e 0,2 s) indicam que o controle de velocidade implementado no SoftPLC ajusta bem a rotação do motor, mantendo a velocidade superficial próxima da desejada.

### 5.3 Análise comparativa com a abordagem original

Após a realização de todos os testes, pôde-se validar a ideia. Para contextualizar os avanços e benefícios da solução desenvolvida neste trabalho, realizou-se uma análise comparativa com a abordagem de automação anteriormente utilizada pela empresa parceira para o mesmo processo de bobinagem. O Quadro 1 sumariza as principais diferenças entre as duas soluções em diversas características funcionais e de controle.

Quadro 1 – Comparação entre a abordagem original e a abordagem proposta neste trabalho

| Característica                          | Abordagem Original                                                             | Abordagem Proposta                                                                                                                  |
|-----------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Circuito eletrônico de controle         | Circuito lógico discreto                                                       | Circuito microcontrolado (ATmega328P)                                                                                               |
| Controle de velocidade do motor         | Velocidades fixas, parametrizado no inversor                                   | Ajustável dinamicamente via SoftPLC do inversor (WEG CFW300)                                                                        |
| Memória e continuidade do processo      | O sistema perde as configurações ao desligar                                   | O sistema mantém estado do processo para retomada após interrupção                                                                  |
| Alinhamento horizontal da fita          | Sistema mecânico, sem flexibilidade para troca de material                     | Atuador linear elétrico com controle via ponte H e microcontrolador                                                                 |
| Sensores/ instrumentação do sistema     | Encoder no eixo do rolo                                                        | Encoder no eixo do rolo, potenciômetro no atuador (posição inicial), sensor fotoelétrico (presença de material)                     |
| Interface com o operador                | Botões físicos de comando e display de 7 segmentos (contador de camadas)       | Botões físicos de comando e display LCD 20x4 para mensagens de status, progresso e falhas                                           |
| Deteção de erros e métodos de segurança | Botão de emergência, sem monitoramento ativo de falhas de processo             | Parada automática ao detectar rompimento da fita                                                                                    |
| Adaptabilidade e versatilidade          | Parâmetros de velocidade ajustáveis apenas com nova parametrização do inversor | Parâmetros (raio inicial, espessura da fita, velocidade superficial) ajustáveis via programação do SoftPLC para diferentes produtos |

Fonte: Elaborado pela autora.

## 6 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo central o desenvolvimento de um sistema de automação aperfeiçoado para o processo de bobinagem de fitas metálicas, especificamente para a fabricação de grampos para concertina. Buscou-se atender a requisitos essenciais como a retomada da operação após paradas, uma interface de operação mais interativa e informativa, controle eletrônico programável para o deslocamento horizontal da fita e versatilidade no cálculo dinâmico da velocidade de enrolamento, visando superar as deficiências de soluções preexistentes e aumentar a eficiência e confiabilidade do processo.

A concretização deste projeto iniciou-se pela imersão no problema industrial, compreendendo as particularidades da fabricação dos grampos e analisando criticamente o sistema de bobinagem original utilizado pela empresa parceira, identificando suas limitações e os pontos que necessitavam de aprimoramento. Seguiu-se uma fase de pesquisa e estudo de tecnologias aplicáveis, que embasou o desenvolvimento da lógica de controle do novo sistema e a seleção dos componentes eletrônicos e eletromecânicos adequados. O desenvolvimento prático ocorreu de forma modular, com a construção e teste individual de cada subsistema – controle de velocidade, alinhamento, interface, detecção de falhas e filtragem de ruídos – culminando na integração completa do protótipo, seguida pela realização de validações experimentais e análise criteriosa dos resultados obtidos.

Como resultado desta abordagem, diversos módulos funcionais foram efetivamente implementados. Foi realizada a parametrização do inversor de frequência WEG CFW300 e a programação do SoftPLC em linguagem Ladder, o que permitiu o controle dinâmico da velocidade de rotação do carretel e, conseqüentemente, a manutenção de uma velocidade superficial constante da fita, resultado este validado experimentalmente com erros operacionais mínimos. Implementou-se também o controle de alinhamento horizontal da fita, utilizando um atuador linear elétrico gerenciado por um microcontrolador ATmega328P, que assegurou a formação de camadas homogêneas de material no carretel através de um avanço preciso e sincronizado. Adicionalmente, desenvolveu-se uma interface homem-máquina com display LCD e botões, fornecendo ao operador feedback em tempo real sobre o estado da bobinagem e permitindo o controle direto do processo. Um sistema de detecção de rompimento da fita, baseado em sensor fotoelétrico, foi integrado para interromper automaticamente a operação em caso de falha, e uma lógica de programação para a retomada do processo a partir do ponto de interrupção foi estabelecida. Por fim, uma estratégia multifásica de filtragem de sinais foi crucial para garantir a imunidade do sistema aos ruídos eletromagnéticos, proporcionando leituras estáveis dos sensores.

Esta nova configuração representa uma evolução substancial em relação ao sistema anterior. A solução original, marcada por um controle predominantemente mecânico,

ajustes manuais, parametrização fixa no inversor, ausência de monitoramento de falhas críticas e uma interface de operador simples, foi transformada em um sistema com maior grau de automação e flexibilidade. A arquitetura proposta introduz controle eletrônico programável, capacidade de cálculo dinâmico de parâmetros de processo, sensoramento ativo de falhas como o rompimento da fita, memorização do estado operacional para retomada eficiente e uma interface de comunicação mais clara e interativa, resultando em um processo de bobinagem mais adaptável e confiável.

Apesar dos resultados positivos, o protótipo atual possui limitações que abrem caminhos para trabalhos futuros. Dentre as principais, destacam-se:

- A atual montagem em protoboard, ideal para desenvolvimento, deve evoluir para uma placa de circuito impresso (PCB) dedicada, com componentes, conexões e blindagem adequados, visando a confiabilidade e a durabilidade em ambiente industrial.
- O uso exclusivo do sinal Z do encoder rotativo para a contagem de voltas e transição de camadas pode ser expandido para incluir os sinais A e B, permitindo um controle de posição angular mais preciso e transições de camada mais exatas.
- A validação experimental, embora tenha comprovado a funcionalidade básica do sistema, foi conduzida com um tipo específico de material (corda) e em um número restrito de ciclos. Recomenda-se a realização de testes exaustivos utilizando as fitas metálicas alvo do processo industrial, sob variadas condições operacionais (velocidades, tensões) e por períodos mais longos, para uma avaliação completa do desempenho, da robustez e da durabilidade do sistema.
- Para incrementar a versatilidade e a autonomia do sistema em um cenário industrial real, futuras versões poderiam incorporar uma interface homem-máquina (IHM) mais completa e intuitiva, possivelmente com tela sensível ao toque, que permita ao operador configurar facilmente todos os parâmetros chave do processo de bobinagem (e.g., número total de camadas, espessura e largura da fita, velocidade desejada).
- A seleção de componentes deve ser criteriosamente revisada para garantir a plena adequação ao ambiente industrial, o que pode incluir a avaliação e possível substituição da placa microcontrolada Arduino Nano por uma versão de grau industrial, bem como a integração de todos os dispositivos de segurança exigidos por normas técnicas, relés térmicos para o motor e botões de parada de emergência claramente identificados e acessíveis.

Em suma, este trabalho apresentou êxito em projetar, implementar e validar um protótipo de sistema automatizado para o controle de velocidade e alinhamento em processos de bobinagem, atendendo aos objetivos e requisitos propostos e solucionando



um problema prático de engenharia. O desenvolvimento permitiu a aplicação e integração de conhecimentos em diversas áreas da engenharia elétrica, como controle de máquinas, eletrônica de potência, microcontroladores e tratamento de sinais. A solução desenvolvida constitui uma prova de conceito importante e uma base sólida para futuras implementações e otimizações, com potencial para aprimorar significativamente o processo de fabricação de grampos para concertina e servir de inspiração para aplicações similares na indústria.



## REFERÊNCIAS

- BENTLEY, J. P. **Principles of measurement systems**. 4. ed. Harlow: Pearson Prentice Hall, 2005.
- BLUM, J. **Exploring Arduino: tools and techniques for engineering wizardry**. Indianapolis: John Wiley & Sons, 2013.
- BOLTON, W. **Mechatronics: electronic control systems in mechanical and electrical engineering**. 6. ed. Harlow: Pearson Education Limited, 2015. ISBN 978-1-292-07668-3.
- Brasil Grampos. **Grampo CL37 galvanizado em rolo**. 2025. Acesso em: 15 jan. 2025. Disponível em: <https://brasilgrampos.com.br/produtos/grampo-cl37-galvanizado-em-rolo/>.
- CALDAS, P. M. de S. **Automação de um sistema de desenrolamento e enrolamento de fio têxtil**. 2021. Dissertação (Mestrado) — Universidade do Minho, Braga, Portugal, 2021. Acesso em: 3 jun. 2025. Disponível em: <https://repositorium.sdum.uminho.pt/handle/1822/77218>.
- CHAPMAN, S. J. **Fundamentos de máquinas elétricas**. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2012.
- Circuits Today. **Arduino Nano tutorial – pinout and schematics**. 2025. Acesso em: 20 mar. 2025. Disponível em: <https://www.circuitstoday.com/arduino-nano-tutorial-pinout-schematics>.
- ERICKSON, R. W.; MAKSIMOVIĆ, D. **Fundamentals of power electronics**. 2. ed. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2001.
- ETOSEC. **Loja virtual**. 2025. Acesso em: 20 mar. 2025. Disponível em: <https://pt.aliexpress.com/store/1103304148>.
- FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY, C.; UMANS, S. **Máquinas elétricas**. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.
- HAGEDORN, J.; BLANC, F. S.-L.; FLEISCHER, J. (ed.). **Handbook of Coil Winding: Technologies for efficient electrical wound products and their automated production**. Berlin, Germany: Springer Vieweg, 2018.
- HOU, H. *et al.* Decentralized coordinated control of elastic web winding systems without tension sensor. **ISA Transactions**, v. 80, p. 350–359, 2018.
- HUANG, H. *et al.* Design and analysis of tension control system for transformer insulation layer winding. **IEEE Access**, v. 8, p. 95068–95082, 2020.
- INCA SOLUÇÕES. **Informações técnicas fornecidas pela empresa sobre o processo de bobinagem da fita de grampos**. 2024. Dados não publicados. Comunicação pessoal com a equipe técnica da INCA.
- LAMB, F. **Industrial automation: hands on**. New York: McGraw-Hill Professional, 2013.

MAZUR, G. A.; WEINDORF, W. J. **Programmable logic controllers: principles and applications**. 3. ed. Orland Park, Illinois: American Technical Publishers, 2020. ISBN 9780826913968.

MWM Technic - Empresa de Máquinas. **Razor wire clips machine**. 2025. Acesso em: 15 fev. 2025. Disponível em: <https://www.mwmtechnic.com/product/razor-wire-clips-machine/>.

ON SEMICONDUCTOR. **74HC14** - Hex Schmitt-Trigger Inverter. 2007. <https://www.onsemi.com/pdf/datasheet/74hc14-d.pdf>. Acesso em: 01 mar. 2025.

PAUL, C. R. **Introduction to electromagnetic compatibility**. 2. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2006.

RANIEL, T. **Desenvolvimento e implementação de um sistema de controle de posição e velocidade de uma esteira transportadora usando inversor de frequência e microcontrolador**. 2011. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual Paulista (UNESP), Ilha Solteira, 2011.

RC Gear BD. **L298N dual H-Bridge DC stepper motor driver controller board Arduino**. 2025. Acesso em: 20 mar. 2025. Disponível em: <https://www.rcgearbd.com/product/l298n-dual-h-bridge-dc-stepper-motor-driver-controller-board-arduino/>.

SEDRA, A. S.; SMITH, K. C. **Microelectronic circuits**. 5. ed. New York: Oxford University Press, 2004.

SHARP Corporation. **PC817 Series** - Photocoupler. 2003. <https://www.sharpsma.com/products/optoelectronics/opto-couplers/pc817>. Acesso em: 01 mar. 2025.

SILVA, F. F. **Automatização de uma bobinadeira**. 2013. Trabalho de Graduação, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas. Disponível em: [https://www.fem.unicamp.br/~lotavio/tgs/2013\\_AutomatizacaoDeUmaBobinadeira\\_TG\\_FernandoFerraretoSilva.pdf](https://www.fem.unicamp.br/~lotavio/tgs/2013_AutomatizacaoDeUmaBobinadeira_TG_FernandoFerraretoSilva.pdf).

WEG AUTOMAÇÃO LTDA. **WPS – WEG Programming Suite: user manual**. 2020. Document code: 10001381480. Acesso em: 01 mar. 2025. Disponível em: <https://www.weg.net>.

WEG DRIVES & CONTROLS. **Módulo de comunicação USB CFW300-CUSB – Guia de instalação, configuração e operação**. 2020. Document code: 10003312263. Acesso em: 01 mar. 2025. Disponível em: <https://www.weg.net>.

WEG EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS S.A. **Manual do usuário – inversor de frequência CFW300**. 2022. Acesso em: 01 mar. 2025. Disponível em: <https://www.weg.net>.

WEG EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS S.A. **W22 Motor elétrico trifásico: Catálogo técnico mercado Brasil**. [S.l.], 2022. Acesso em: 3 jun. 2025. Disponível em: <https://www.weg.net>.

WEG EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS S.A. **CFW300 – Inversor de frequência: Ficha técnica**. 2023. Acesso em: 01 mar. 2025. Disponível em: <https://www.weg.net>.

WEG EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS S.A. **Manual de programação – CFW300 V13.1X**. 2023. Acesso em: 01 mar. 2025. Versão de software: 13.1X. Disponível em: <https://www.weg.net>.

WEG EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS S.A. **Motores de indução alimentados por inversores de frequência PWM**. 2023. Acesso em: 01 mar. 2025. Disponível em: <https://www.weg.net>.

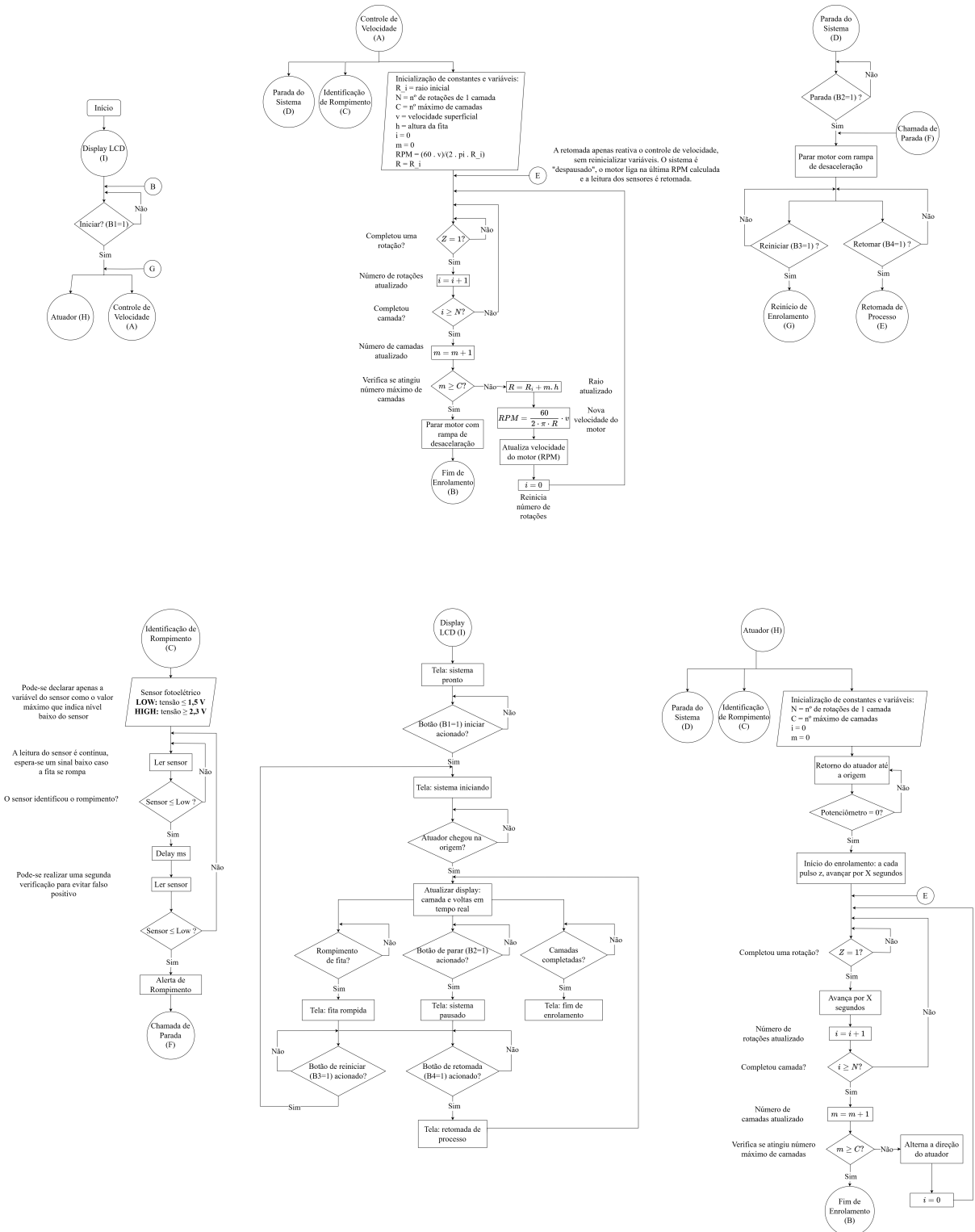


## APÊNDICES





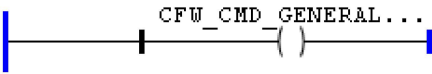
# APÊNDICE A – FLUXOGRAMAS DE PROJETO





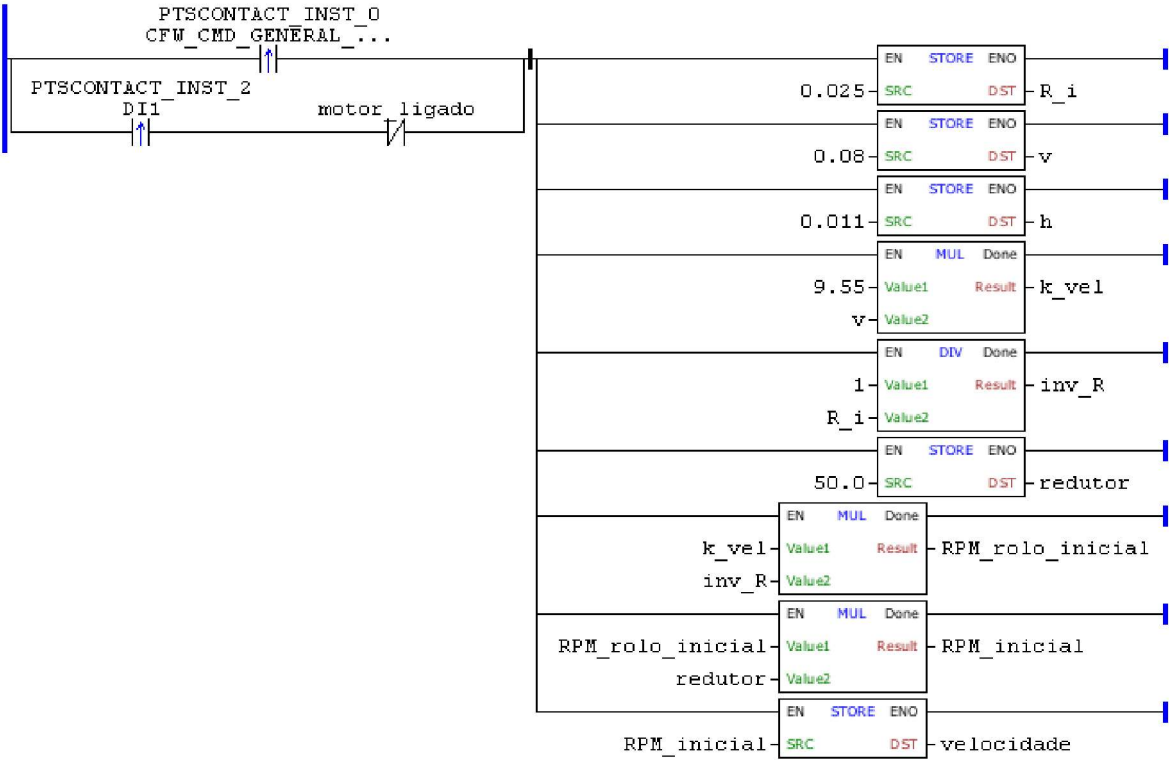
## **APÊNDICE B – CÓDIGO LADDER DO INVERSOR**

1:



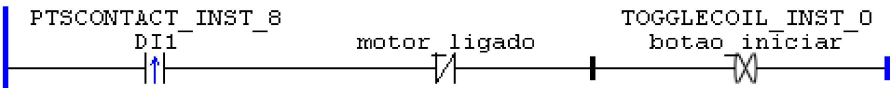
| Tag                    | Group         | Datatype | Comment                                                            |
|------------------------|---------------|----------|--------------------------------------------------------------------|
| CFW_CMD_GENERAL_ENABLE | GLOBAL_SYSTEM | BOOL     | Habilita geral o inversor permitindo a operação do motor (0-Desabi |

2:



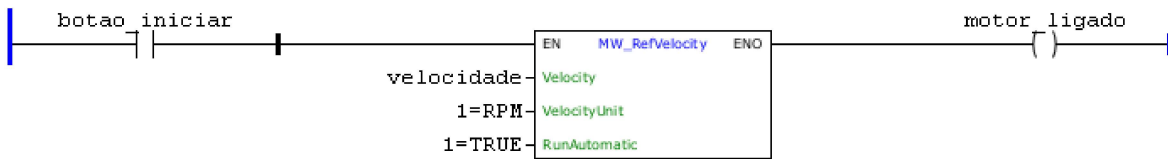
| Tag                    | Group         | Datatype   | Comment                                                            |
|------------------------|---------------|------------|--------------------------------------------------------------------|
| CFW_CMD_GENERAL_ENABLE | GLOBAL_SYSTEM | BOOL       | Habilita geral o inversor permitindo a operação do motor (0-Desabi |
| PTSCONTACT_INST_0      | LOCAL         | PTSCONTACT |                                                                    |
| DI1                    | GLOBAL_IO     | BOOL       | Entrada digital 1                                                  |
| PTSCONTACT_INST_2      | LOCAL         | PTSCONTACT |                                                                    |
| motor_ligado           | LOCAL         | BOOL       |                                                                    |
| R_i                    | LOCAL         | REAL       |                                                                    |
| v                      | LOCAL         | REAL       |                                                                    |
| h                      | LOCAL         | REAL       |                                                                    |
| k_vel                  | LOCAL         | REAL       |                                                                    |
| inv_R                  | LOCAL         | REAL       |                                                                    |
| redutor                | LOCAL         | REAL       |                                                                    |
| RPM_rolø_inicial       | LOCAL         | REAL       |                                                                    |
| RPM_inicial            | LOCAL         | REAL       |                                                                    |
| velocidade             | LOCAL         | REAL       |                                                                    |

3:



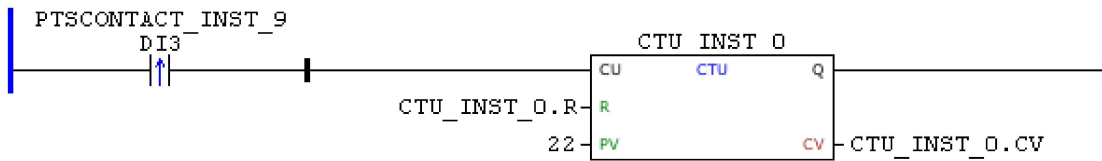
| Tag               | Group     | Datatype   | Comment           |
|-------------------|-----------|------------|-------------------|
| DI1               | GLOBAL_IO | BOOL       | Entrada digital 1 |
| PTSCONTACT_INST_8 | LOCAL     | PTSCONTACT |                   |
| motor_ligado      | LOCAL     | BOOL       |                   |
| botao_iniciar     | LOCAL     | BOOL       |                   |
| TOGGLECOIL_INST_0 | LOCAL     | TOGGLECOIL |                   |

4:



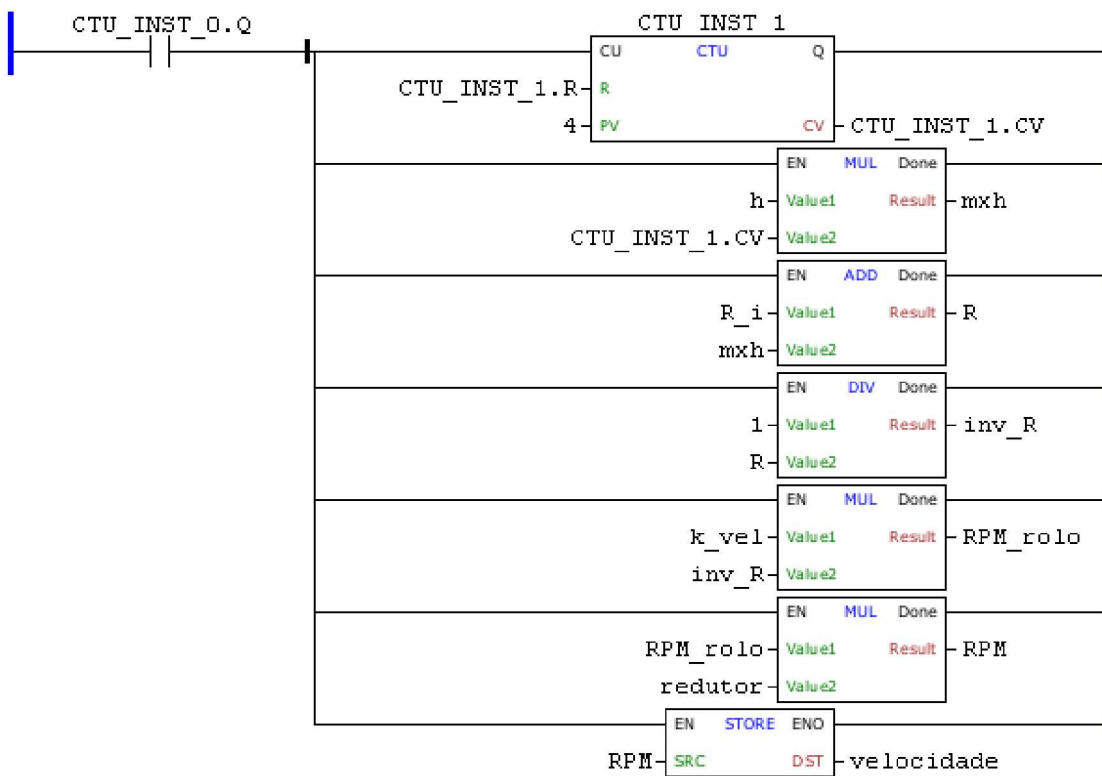
| Tag           | Group | Datatype | Comment |
|---------------|-------|----------|---------|
| botao_iniciar | LOCAL | BOOL     |         |
| velocidade    | LOCAL | REAL     |         |
| motor_ligado  | LOCAL | BOOL     |         |

5:



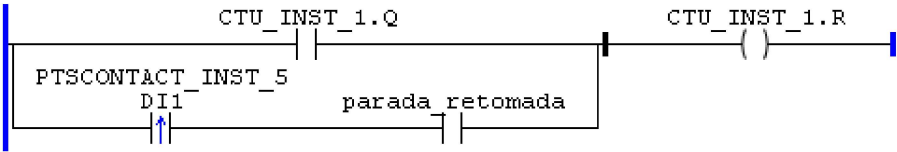
| Tag               | Group     | Datatype   | Comment           |
|-------------------|-----------|------------|-------------------|
| DI3               | GLOBAL_IO | BOOL       | Entrada digital 3 |
| PTSCONTACT_INST_9 | LOCAL     | PTSCONTACT |                   |
| CTU_INST_0        | LOCAL     | CTU        |                   |

6:



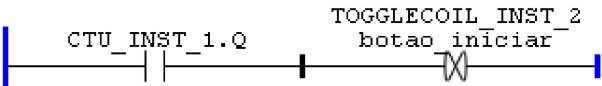
| Tag        | Group | Datatype | Comment |
|------------|-------|----------|---------|
| CTU_INST_1 | LOCAL | CTU      |         |
| h          | LOCAL | REAL     |         |
| mxh        | LOCAL | REAL     |         |
| R_i        | LOCAL | REAL     |         |
| R          | LOCAL | REAL     |         |
| inv_R      | LOCAL | REAL     |         |
| k_vel      | LOCAL | REAL     |         |
| RPM_rolô   | LOCAL | REAL     |         |
| reductor   | LOCAL | REAL     |         |
| RPM        | LOCAL | REAL     |         |
| velocidade | LOCAL | REAL     |         |

7:



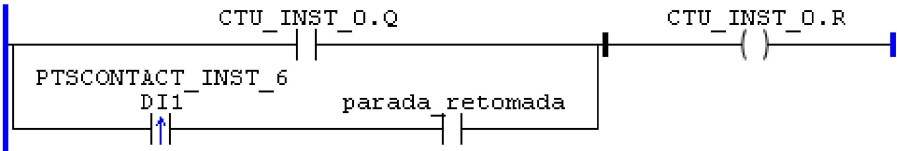
| Tag               | Group     | Datatype   | Comment           |
|-------------------|-----------|------------|-------------------|
| DI1               | GLOBAL_IO | BOOL       | Entrada digital 1 |
| PTSCONTACT_INST_5 | LOCAL     | PTSCONTACT |                   |
| parada_retomada   | LOCAL     | BOOL       |                   |

8:



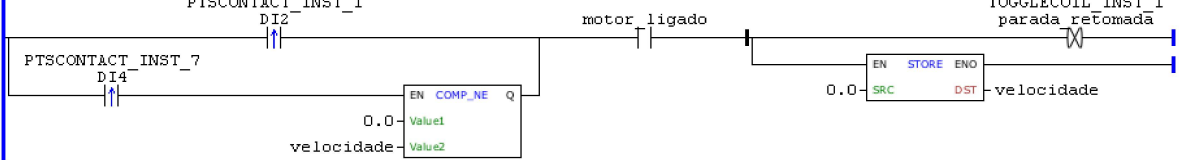
| Tag               | Group | Datatype   | Comment |
|-------------------|-------|------------|---------|
| botao_iniciar     | LOCAL | BOOL       |         |
| TOGGLECOIL_INST_2 | LOCAL | TOGGLECOIL |         |

9:

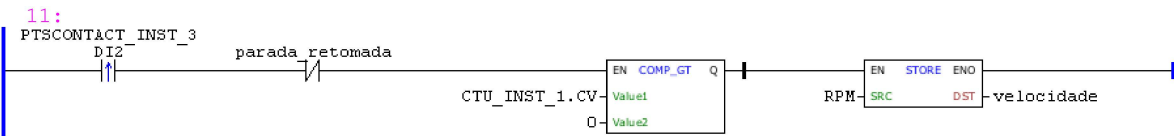


| Tag               | Group     | Datatype   | Comment           |
|-------------------|-----------|------------|-------------------|
| DI1               | GLOBAL_IO | BOOL       | Entrada digital 1 |
| PTSCONTACT_INST_6 | LOCAL     | PTSCONTACT |                   |
| parada_retomada   | LOCAL     | BOOL       |                   |

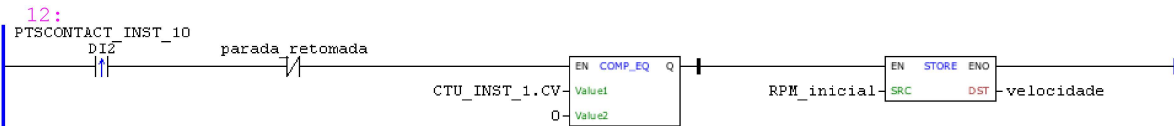
10:



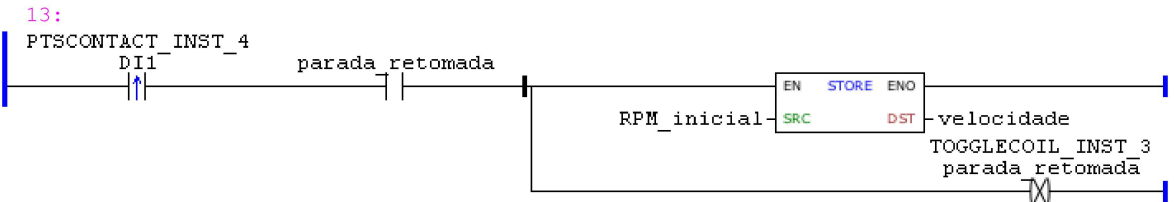
| Tag               | Group     | Datatype   | Comment           |
|-------------------|-----------|------------|-------------------|
| DI2               | GLOBAL_IO | BOOL       | Entrada digital 2 |
| PTSCONTACT_INST_1 | LOCAL     | PTSCONTACT |                   |
| DI4               | GLOBAL_IO | BOOL       | Entrada digital 4 |
| PTSCONTACT_INST_7 | LOCAL     | PTSCONTACT |                   |
| velocidade        | LOCAL     | REAL       |                   |
| motor_ligado      | LOCAL     | BOOL       |                   |
| parada_retomada   | LOCAL     | BOOL       |                   |
| TOGGLECOIL_INST_1 | LOCAL     | TOGGLECOIL |                   |



| Tag               | Group     | Datatype   | Comment           |
|-------------------|-----------|------------|-------------------|
| DI2               | GLOBAL_IO | BOOL       | Entrada digital 2 |
| PTSCONTACT_INST_3 | LOCAL     | PTSCONTACT |                   |
| parada_retomada   | LOCAL     | BOOL       |                   |
| RPM               | LOCAL     | REAL       |                   |
| velocidade        | LOCAL     | REAL       |                   |



| Tag                | Group     | Datatype   | Comment           |
|--------------------|-----------|------------|-------------------|
| DI2                | GLOBAL_IO | BOOL       | Entrada digital 2 |
| PTSCONTACT_INST_10 | LOCAL     | PTSCONTACT |                   |
| parada_retomada    | LOCAL     | BOOL       |                   |
| RPM_inicial        | LOCAL     | REAL       |                   |
| velocidade         | LOCAL     | REAL       |                   |



| Tag               | Group     | Datatype   | Comment           |
|-------------------|-----------|------------|-------------------|
| DI1               | GLOBAL_IO | BOOL       | Entrada digital 1 |
| PTSCONTACT_INST_4 | LOCAL     | PTSCONTACT |                   |
| parada_retomada   | LOCAL     | BOOL       |                   |
| RPM_inicial       | LOCAL     | REAL       |                   |
| velocidade        | LOCAL     | REAL       |                   |
| TOGGLECOIL_INST_3 | LOCAL     | TOGGLECOIL |                   |





## APÊNDICE C – CÓDIGO DO ATMEGA328P

O código-fonte a seguir foi implementado no microcontrolador ATmega328P, embarcado na placa Arduino Nano. Esse código é responsável por controlar o atuador linear, ler sensores e botões, gerenciar o display LCD e enviar sinais digitais ao inversor de frequência.

```

1 /*
2  * Projeto TCC: Enrolador Automatico
3  * Autora: Flavia Bernal
4  * Descricao: Controle de bobinagem automatica com Arduino.
5  */
6
7
8 #include <Wire.h>
9 #include <LiquidCrystal_I2C.h>
10
11 // ===== INSTANCIA LCD =====
12 LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 20, 4); // I2C 0x27, 20x4
13
14 // ===== PINOS =====
15 const int PINO_INICIAR = 7; // botao iniciar/reiniciar
16 const int PINO_PARAR = 6; // botao parar/pausar
17 const int PINO_Z = 5; // encoder
18 const int PINO_SENSOR = 12; // sensor fotoeletrico de rompimento
19 const int POT_PINO = A0; // potenciometro
20
21 const int RELE_INICIAR = 8; // rele iniciar para inversor
22 const int RELE_PARAR = 9; // rele parar para inversor
23 const int RELE_Z = 10; // rele Z para inversor
24
25 const int IN1 = 3; // controle H-bridge direcao A
26 const int IN2 = 2; // controle H-bridge direcao B
27 const int ENA = 11; // enable PWM
28
29 // ===== CONFIGURACOES =====
30 const unsigned long debounce_ms = 50; // antirruído
31 const unsigned long pulso_rele_ms = 650; // duracao pulso rele
32 const int POSICAO_ALVO = 60; // valor ADC de origem
33 const int TOLERANCIA = 5; // margem ADC
34 const unsigned long tempoAvanco = 733; // tempo deslocamento por pulso
35 const int PWM_MOTOR = 150; // duty cycle fixo
36
37 // ===== ESTADOS =====
38 // Flags para debounce de botoes/sensor (LOW = nao pressionado/ativo)
39 bool estadoAnteriorIniciar = LOW;
40 bool estadoAnteriorParar = LOW;
41 bool estadoAnteriorZ = LOW;
42
43 // Timestamps para controle de debounce (em milissegundos)
44 unsigned long tempoIniciar = 0;
45 unsigned long tempoParar = 0;
46 unsigned long tempoZ = 0;
47

```

```

48 // Delay inicial apos ligar o sistema
49 unsigned long bootDelay      = 5000; // espera de 5s antes de aceitar comandos
50 unsigned long inicioBoot;
51
52 // Flags e timestamps para controle de pulso de reles
53 bool ativarParar      = false;
54 bool ativarZ          = false;
55 unsigned long tempoReleParar = 0;
56 unsigned long tempoReleZ    = 0;
57
58 // Flag para indicar retorno a origem
59 bool emRetorno        = false;
60 bool pulsoStartAtivo  = false;
61 unsigned long tempoReleStart = 0;
62
63 // Controle de avanço do motor
64 bool emAvanco         = false;
65 unsigned long tempoInicioAvanco = 0;
66
67 // Filtro passa-baixa para leitura do potenciometro
68 float leituraFiltrada = 0.0;
69 const float alpha     = 0.1;
70
71 // Contadores e variaveis de estado da bobinagem
72 int contadorAvanco     = 0;
73 bool direcaoDireita    = true;
74 int camadaAtual        = 0;
75 const int totalCamadas = 4;
76
77 // Flags de estado geral do sistema
78 bool sistemaParado     = false;
79 bool sistemaIniciado   = false;
80
81 // Deteccao de rompimento de fita
82 unsigned long tempoSensorLowStart = 0;
83 bool sensorLowActive    = false;
84
85 // controle LCD
86 int ultimaVolta = -1;
87 int ultimaCamada = -1;
88 unsigned long tempoInicioMensagemRetomado;
89 bool exibindoMensagemRetomado = false;
90
91 // ===== LEITURA SUAVIZADA =====
92 int leituraSuavizada() {
93     int leituraAtual = analogRead(POT_PIN0);
94     leituraFiltrada = alpha * leituraAtual + (1 - alpha) * leituraFiltrada;
95     return (int)leituraFiltrada;
96 }
97
98 // ===== TELAS LCD =====
99 void mostrarHeader() {
100     lcd.setCursor(0, 0);
101     lcd.print("*Enrolador_␣Auto_␣TCC*");
102 }
103
104 void mostrarTelaPronto() {

```

```
105  lcd.clear();
106  mostrarHeader();
107  lcd.setCursor(0, 1);
108  lcd.print("Sistema_␣pronto");
109  lcd.setCursor(0, 2);
110  lcd.print("Pressione_␣iniciar");
111 }
112
113 void mostrarTelaIniciando() {
114  lcd.clear();
115  mostrarHeader();
116  lcd.setCursor(0, 1);
117  lcd.print("Iniciando_␣bobin.");
118  lcd.setCursor(0, 2);
119  lcd.print("Aguardando_␣origem");
120 }
121
122 void mostrarTelaPausado() {
123  lcd.clear();
124  mostrarHeader();
125  lcd.setCursor(0, 1);
126  lcd.print("Sistema_␣pausado");
127 }
128
129 void mostrarTelaRompida() {
130  lcd.clear();
131  mostrarHeader();
132  lcd.setCursor(0, 1);
133  lcd.print("Fita_␣rompida!");
134 }
135
136 void mostrarTelaRetomado() {
137  lcd.clear();
138  mostrarHeader();
139  lcd.setCursor(0, 1);
140  lcd.print("Sistema_␣retomado");
141 }
142
143 void mostrarTelaFim() {
144  lcd.clear();
145  mostrarHeader();
146  lcd.setCursor(0, 1);
147  lcd.print("Sistema_␣pronto");
148  lcd.setCursor(0, 2);
149  lcd.print("Pressione_␣iniciar");
150 }
151
152 void setup() {
153  // entradas
154  pinMode(PINO_INICIAR, INPUT);
155  pinMode(PINO_PARAR, INPUT);
156  pinMode(PINO_Z, INPUT);
157  pinMode(PINO_SENSOR, INPUT);
158  pinMode(POT_PINO, INPUT);
159
160  // saidas
161  pinMode(RELE_INICIAR, OUTPUT);
```

```
162  pinMode(RELE_PARAR,    OUTPUT);
163  pinMode(RELE_Z,        OUTPUT);
164  pinMode(IN1,           OUTPUT);
165  pinMode(IN2,           OUTPUT);
166  pinMode(ENA,           OUTPUT);
167
168  // reles desligados
169  digitalWrite(RELE_INICIAR, HIGH);
170  digitalWrite(RELE_PARAR,    HIGH);
171  digitalWrite(RELE_Z,        HIGH);
172
173  Serial.begin(9600);
174  lcd.init();
175  lcd.backlight();
176  mostrarTelaPronto();
177
178  leituraFiltrada = analogRead(POT_PINO);
179  inicioBoot = millis();
180 }
181
182 void loop() {
183   unsigned long agora = millis();
184   // bloqueio inicial
185   if (agora - inicioBoot < bootDelay) return;
186
187   // ===== INICIAR / REINICIAR =====
188   bool leituraIniciar = !digitalRead(PINO_INICIAR);
189   if (leituraIniciar && !estadoAnteriorIniciar && (agora - tempoIniciar >
       debounce_ms)) {
190     tempoIniciar = agora;
191     estadoAnteriorIniciar = true;
192
193     // 1) iniciar so quando sistema estiver pronto
194     if (!sistemaIniciado && !sistemaParado) {
195       // reset geral
196       sistemaIniciado = false;
197       sistemaParado = false;
198       emRetorno = true;
199       emAvanco = false;
200       contadorAvanco = 0;
201       camadaAtual = 0;
202       direcaoDireita = true;
203       ultimaVolta = -1;
204       ultimaCamada = -1;
205       mostrarTelaIniciando();
206       Serial.println("INICIAR: retornando a origem...");
207     }
208     // 2) reiniciar so quando estiver pausado
209     else if (sistemaParado) {
210       // reinicia ciclo completo
211       sistemaParado = false;
212       sistemaIniciado = false;
213       emRetorno = true;
214       emAvanco = false;
215       contadorAvanco = 0;
216       camadaAtual = 0;
217       direcaoDireita = true;
```

```

218     ultimaVolta      = -1;
219     ultimaCamada     = -1;
220     mostrarTelaIniciando();
221     Serial.println("REINICIAR:␣retornando␣a␣origem...");
222 }
223 // 3) em qualquer outro estado, nada acontece
224 }
225 if (!leituraIniciar) estadoAnteriorIniciar = false;
226
227 // ===== PARAR =====
228 bool leituraParar = !digitalRead(PINO_PARAR);
229 if (leituraParar && !estadoAnteriorParar && agora - tempoParar > debounce_ms)
230 {
231     tempoParar = agora;
232     estadoAnteriorParar = true;
233     if (sistemaIniciado) {
234         sistemaParado = !sistemaParado;
235         ativarParar = true;
236         tempoReleParar = agora;
237         digitalWrite(RELE_PARAR, LOW);
238         if (sistemaParado) {
239             mostrarTelaPausado();
240             Serial.println("PARAR:␣sistema␣pausado.");
241         } else {
242             mostrarTelaRetomado();
243             Serial.println("PARAR:␣sistema␣retomado.");
244             exibindoMensagemRetomado = true;
245             tempoInicioMensagemRetomado = agora;
246             ultimaVolta = -1;
247             ultimaCamada = -1;
248         }
249     }
250     if (!leituraParar) estadoAnteriorParar = false;
251
252     // ===== SENSOR FOTOELETRICO =====
253     bool leituraSensor = digitalRead(PINO_SENSOR); // HIGH = existe material; LOW
254     = nao existe
255
256     if (leituraSensor == LOW) {
257         // Se acabou de entrar em LOW, marca o inicio da contagem
258         if (!sensorLowActive) {
259             sensorLowActive      = true;
260             tempoSensorLowStart  = agora;
261         }
262         // Se ja estava em LOW e passou de 500 ms, dispara rompimento
263         else if (sensorLowActive && (agora - tempoSensorLowStart >= 500UL)) {
264             // Garante que so dispare uma vez por ocorrencia de rompimento
265             if (sistemaIniciado && !sistemaParado) {
266                 sistemaParado      = true;
267                 ativarParar        = true;
268                 tempoReleParar     = agora;
269                 digitalWrite(RELE_PARAR, LOW);
270                 mostrarTelaRompeida();
271                 Serial.println("Rompimento␣detectado:␣sistema␣pausado.");
272             }
273         }
274     }
275 }

```

```

273 }
274 else {
275     // Sempre que voltar a HIGH (material presente), reseta a deteccao
276     sensorLowActive = false;
277 }
278
279 // ===== PULSO Z =====
280 bool leituraZ = !digitalRead(PINO_Z);
281 if (leituraZ && !estadoAnteriorZ && agora - tempoZ > debounce_ms) {
282     tempoZ = agora;
283     estadoAnteriorZ = true;
284     if (sistemaIniciado && !emRetorno) {
285         ativarZ = true;
286         tempoReleZ = agora;
287         digitalWrite(RELE_Z, LOW);
288         Serial.println("Pulso_Z detectado.");
289         contadorAvanco++;
290         if (contadorAvanco == 22) {
291             camadaAtual++;
292             contadorAvanco = 0;
293             direcaoDireita = !direcaoDireita;
294             if (camadaAtual >= totalCamadas) {
295                 mostrarTelaFim();
296                 sistemaIniciado = false;
297                 Serial.println("Todas as camadas completadas.");
298             }
299         }
300         if (contadorAvanco >= 1 && sistemaIniciado) {
301             digitalWrite(IN1, direcaoDireita ? HIGH : LOW);
302             digitalWrite(IN2, direcaoDireita ? LOW : HIGH);
303             emAvanco = true;
304             tempoInicioAvanco = agora;
305             analogWrite(ENA, PWM_MOTOR);
306         }
307     }
308 }
309 if (!leituraZ) estadoAnteriorZ = false;
310
311 // ===== RETORNO A ORIGEM =====
312 if (emRetorno) {
313     int adc = leituraSuavizada();
314     if (adc > POSICAO_ALVO + TOLERANCIA) {
315         digitalWrite(IN1, LOW);
316         digitalWrite(IN2, HIGH);
317         analogWrite(ENA, PWM_MOTOR);
318     } else if (adc < POSICAO_ALVO - TOLERANCIA) {
319         digitalWrite(IN1, HIGH);
320         digitalWrite(IN2, LOW);
321         analogWrite(ENA, PWM_MOTOR);
322     } else {
323         analogWrite(ENA, 0);
324         digitalWrite(IN1, LOW);
325         digitalWrite(IN2, LOW);
326         emRetorno = false;
327         pulsoStartAtivo = true;
328         tempoReleStart = agora;
329         digitalWrite(RELE_INICIAR, LOW);

```

---

```

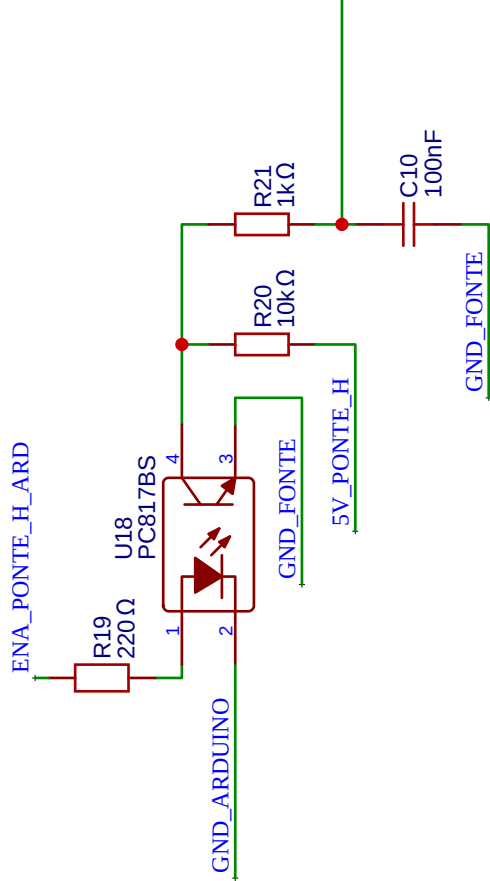
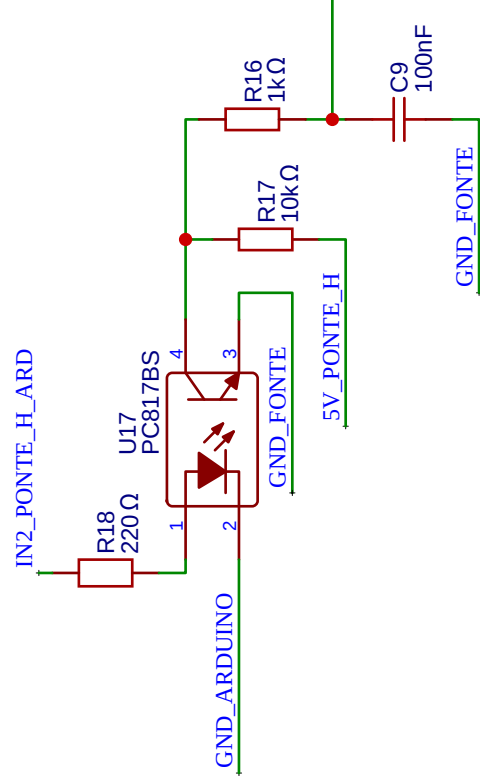
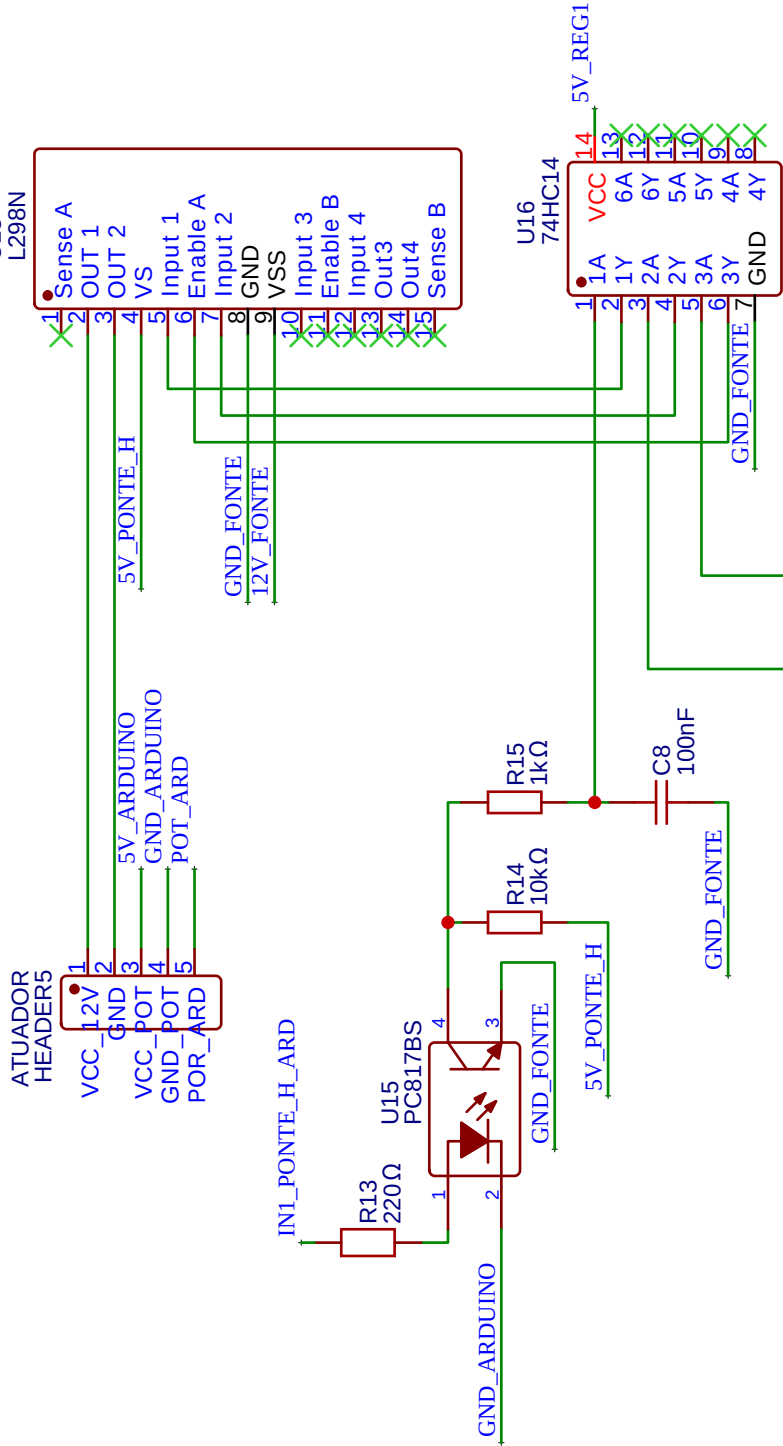
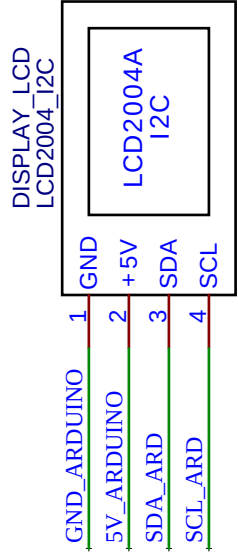
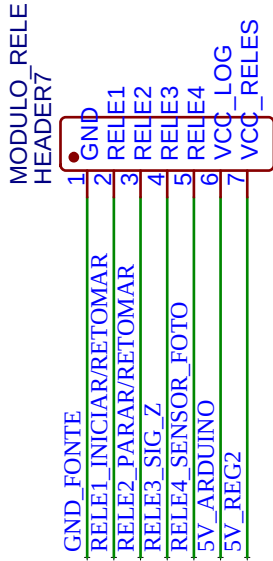
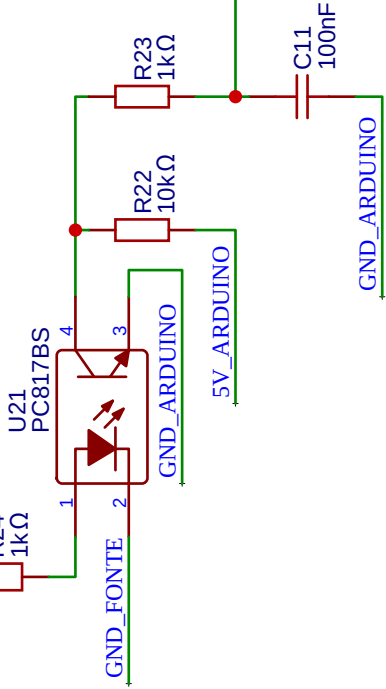
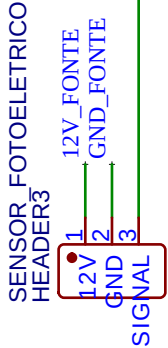
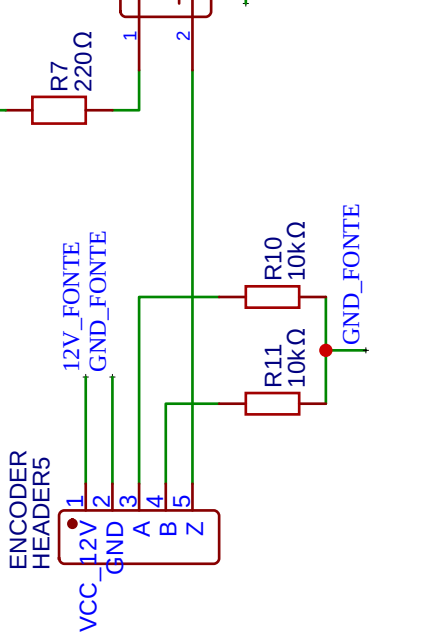
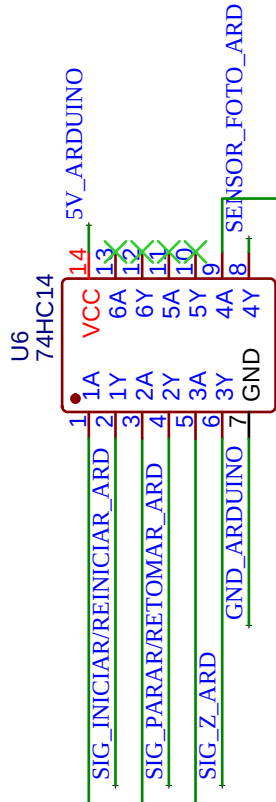
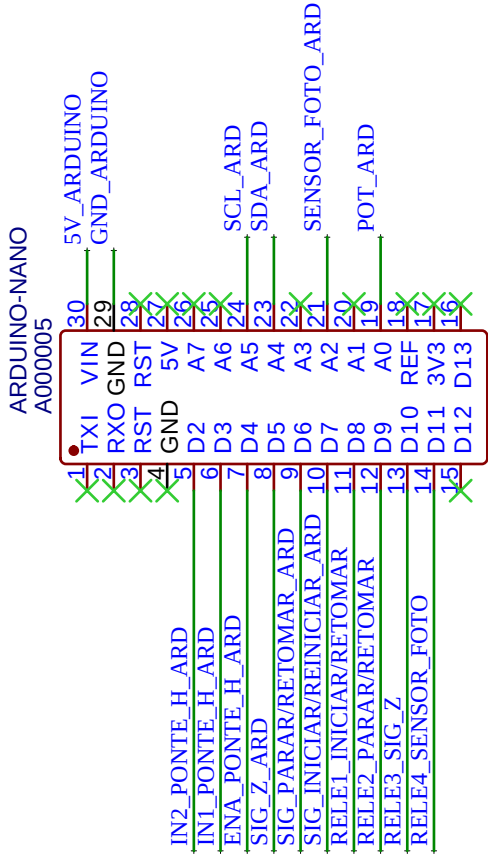
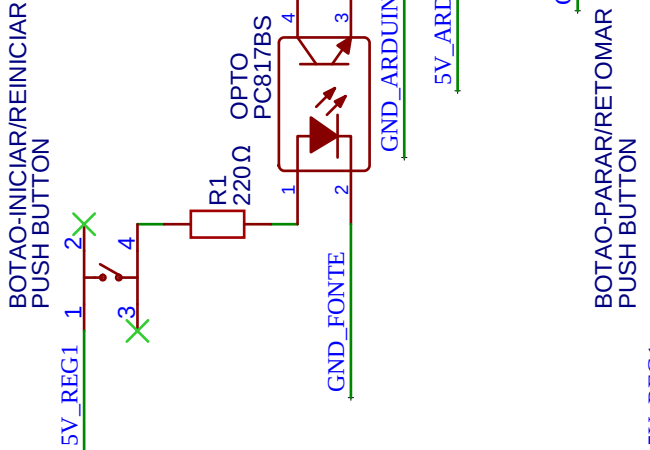
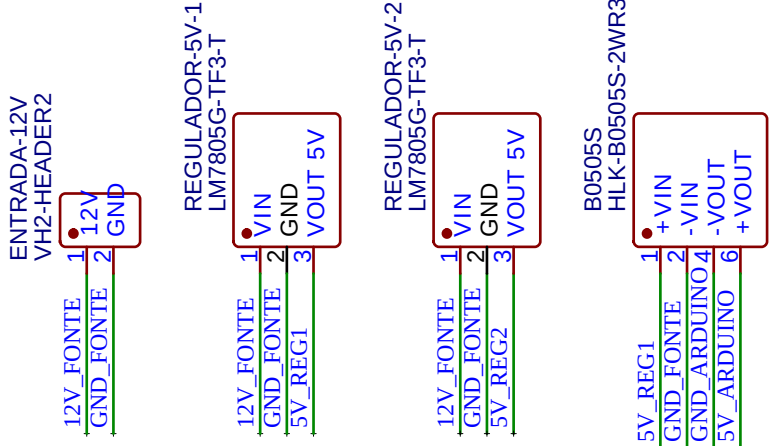
330     sistemaIniciado = true;
331     Serial.println("Chegou na origem. Pronto para bobinar!");
332 }
333 }
334
335 // ===== DESLIGA PULSOS =====
336 if (pulsoStartAtivo && agora - tempoReleStart >= pulso_rele_ms) {
337     digitalWrite(RELE_INICIAR, HIGH);
338     pulsoStartAtivo = false;
339     lcd.clear();
340     mostrarHeader();
341     ultimaVolta = -1;
342     ultimaCamada = -1;
343 }
344 if (ativarParar && agora - tempoReleParar >= pulso_rele_ms) {
345     digitalWrite(RELE_PARAR, HIGH);
346     ativarParar = false;
347 }
348 if (ativarZ && agora - tempoReleZ >= pulso_rele_ms) {
349     digitalWrite(RELE_Z, HIGH);
350     ativarZ = false;
351 }
352
353 // ===== FIM AVANCO =====
354 if (emAvanco && agora - tempoInicioAvanco >= tempoAvanco) {
355     analogWrite(ENA, 0);
356     digitalWrite(IN1, LOW);
357     digitalWrite(IN2, LOW);
358     emAvanco = false;
359 }
360
361 // ===== GERENCIA DISPLAY TEMPORARIO DE MENSAGEM RETOMADO =====
362 if (exibindoMensagemRetomado && (agora - tempoInicioMensagemRetomado >= 1000UL
363     )) {
364     lcd.clear();
365     mostrarHeader();
366     exibindoMensagemRetomado = false;
367 }
368 // ===== ATUALIZA LCD =====
369 if (!exibindoMensagemRetomado && sistemaIniciado && !emRetorno) {
370     if (contadorAvanco != ultimaVolta || camadaAtual != ultimaCamada) {
371         lcd.setCursor(0, 1);
372         lcd.print("Camadas:");
373         lcd.print(camadaAtual);
374         lcd.print("/");
375         lcd.print(totalCamadas);
376         lcd.setCursor(0, 2);
377         lcd.print("Voltas:");
378         lcd.print(contadorAvanco);
379         lcd.print("/21"); //
380         ultimaVolta = contadorAvanco;
381         ultimaCamada = camadaAtual;
382     }
383 }
384 }

```





## **APÊNDICE D – CIRCUITO DE CONTROLE DO SISTEMA**



## APÊNDICE E – AUTORIZAÇÃO PARA DIVULGAÇÃO DE INFORMAÇÕES

A **INCA Soluções Mecânicas Industriais**, inscrita no CNPJ sob o nº 10.466.412/0001-75, com sede em Rua Adib Miguel Axcar, 247, Bauru-SP, neste ato representada por **José Guillen Bernal Pitta**, responsável técnico e sócio da empresa, declara para os devidos fins que **autoriza a utilização e a divulgação das informações técnicas, dados, imagens, esquemas e demais conteúdos** fornecidos à estudante **Flavia Camila Siroma Bernal**, regularmente matriculada no curso de Engenharia Elétrica da Universidade de São Paulo, no desenvolvimento de seu Trabalho de Conclusão de Curso (TCC), intitulado:

*“Projeto de automação para controle de velocidade e alinhamento em processos de bobinagem”*

Esclarecemos que tal autorização abrange a **publicação integral do trabalho** em repositórios institucionais, bibliotecas universitárias e quaisquer outros meios exigidos pela Universidade.

Bauru, 01 de junho de 2025.



**José Guillen Bernal Pitta**

Responsável técnico e sócio da empresa

(14) 99129-6210