

Faculdade de Tecnologia de São Paulo

DEPARTAMENTO DE SISTEMAS ELETRÔNICOS

BRAÇO ROBÓTICO PNEUMÁTICO SELECIONADOR

ANDREA LUCIANO GONÇALVES

HENRIQUE NUNES URBANO

São Paulo - SP

2023

Faculdade de Tecnologia de São Paulo

DEPARTAMENTO DE SISTEMAS ELETRÔNICOS

ANDREA LUCIANO GONÇALVES

HENRIQUE NUNES URBANO

BRAÇO ROBÓTICO PNEUMÁTICO SELECIONADOR

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para a conclusão do curso Superior de Tecnologia em Eletrônica da Faculdade de Tecnologia de São Paulo.

Orientador: Prof. Dr. Mauricio Antônio Deffert

São Paulo - SP

2023

Ficha Catalográfica

Gonçalves, Andrea Luciano; Urbano, Henrique Nunes
BRAÇO ROBÓTICO PNEUMÁTICO SELECIONADOR – 2023

116 f.

Monografia – Curso Superior de Tecnologia em Eletrônica Industrial – Faculdade de Tecnologia de São Paulo, 2023.

Orientador: Prof. Dr. Mauricio Antônio Deffert

1. Braço robótico 2. Braço automatizado, 3. Movimento cinemático

Dedicamos esse projeto de conclusão de curso a pessoas que sempre apoiaram e incentivaram nosso crescimento profissional e pessoal. Pessoas essas que participaram em partes de nossas vidas, com o intuito de orientar nossos passos para um caminho de sucesso em nossos objetivos escolhidos.

Agradecimentos

Agradecemos à Deus por ter me iluminado e dado força para a realização e conclusão deste trabalho.

Somos muito gratos ao meu orientador Prof^o. Dr^o. Mauricio Antônio Deffert pela orientação, esforço, apoio, incentivo e principalmente paciência. À Prof^a Dr^a Maria Lucia Pereira da Silva, que nos ofereceu muito apoio e grandes orientações na parte documental em cada parte do desenvolvimento. E à todas as pessoas que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho, em destaque Lucivane, grande homem e grande profissional e Vilson Souza, excepcional profissional e pessoa.

*Nós podemos mudar o mundo e torná-lo um lugar melhor.
Está em suas mãos fazer a diferença.
Nelson Mandela (1918-2013)*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Pirâmide de automação industrial com implantação de interação por IoT.....	21
Figura 2: Esquema de notação de Elos e Juntas num Braço Robótico	27
Figura 3: Sequência de elos numa junta de um braço robótico	28
Figura 4: Partes do Braço Robótico.....	28
Figura 5: Junta rotacional.....	29
Figura 6: Representação esquemática de juntas.....	29
Figura 7: Representação esquemática de juntas	30
Figura 8: Braço com um e dois graus de liberdade.....	31
Figura 9: Movimentos de um punho com 3 graus de liberdade.....	31
Figura 10: Configuração de um punho TRT na forma compacta	33
Figura 11: Cadeias Cinemáticas.....	34
Figura 12: Volume de trabalho teórico de um robô cilíndrico.....	35
Figura 13: Volume (área) útil do manipulador RS40B (escala em milímetros).....	35
Figura 14: Volume de manipulador KR30HA (escala em milímetros)	36
Figura 15: Diagrama de blocos do controle em malha fechada.....	38
Figura 16: Modelo esquemático do braço robótico pneumático selecionador.....	39
Figura 17: Furadeira e Parafusadeira Bosch 400W 3/8” GSR 7-14 127V.....	39
Figura 18: Esmerilhadeira Angular 4.1/2” 670W GWS 6-115 220V.....	40
Figura 19: Serra Policorte Com Motor 2200W GCO 220V	40
Figura 20: Moto Esmeril 6 Pol 350W Bivolt 9727.....	40
Figura 21: Furadeira de bancada 500 watts mandril de 5/8” monofásica.....	41
Figura 22: Máquina de Solda Transformadora 250ª Bivolt NM250Bi – FG4220.....	41
Figura 23: Base de apoio e fixação (escala em milímetros).....	42
Figura 24: Mancal redondo com rolamento de aço 6002zz com 303 parafuso 10x12 material de aço inoxidável (escala em milímetros).....	42
Figura 25: Pré-elo base: base rotativa rotacional (escala em milímetros).....	43
Figura 26: Tubo de aço ferro carbono quadrado de 20mm por 20mm com 2mm espessura.....	43
Figura 27: Pré-elo base: Arruela modificada para suporte de cilindro (escala em milímetros).....	44
Figura 28: Elo base com suporte do elo braço e do cilindro do elo braço.....	44
Figura 29: Tubo de aço retangular 30mm por 20mm com 2mm espessura.....	45
Figura 30: Parafuso Allen cilíndrico Din912.....	45
Figura 31: Porca M6 Parlock Alta Nylon Rosca UNC MA Grossa Grau 5 Classe 8.....	45
Figura 32: Arruela de fixação do eixo do cilindro pneumático do elo braço (escala em milímetros).....	46
Figura 33: Elo braço com suporte (escala em milímetros).....	46
Figura 34: Elo Antebraço (escala em milímetros).....	47
Figura 35: Garra – Suporte do cilindro de atuação de movimento (escala em milímetros).....	48
Figura 36: Garra – Pinças (escala em milímetros).....	48
Figura 37: Garra – Peças para o mecanismo de abertura e fechamento da garra (escala em milímetros).....	48
Figura 38: Garra de dois dedos com função de pinça, atuada por cilindro pneumático.....	49
Figura 39: Cilindro redondo CPC M20x1,5 Bosch.....	49
Figura 40: Esquemático de vias e posições da válvula 5/2 vias.....	49
Figura 41: Válvula Bosch Pneumática 5/2 vias de Simples Solenoide 24Vcc.....	50
Figura 42: Sick-IME08-04NPSZT0S Sensor indutivo com 4mm de alcance.....	50
Figura 43: Esquema de funcionamento do sensor indutivo.....	51
Figura 44: Sensor capacitivo KI5208 KI-3015-FNKG/NI RT.....	51
Figura 45: Zelio Sr2 B201jd - Módulo Lógico Display 20ES 100240 VCA.....	52
Figura 46: Tela de comandos manuais do Braço Robótico.....	53
Figura 47: Tela de OEE do Braço Robótico.....	53
Figura 48: Tela de Alarmes do Braço Robótico.....	54
Figura 49: Fluxograma de funcionamento do braço e antebraço do Braço Robótico.....	55
Figura 50: Fluxograma de funcionamento da base do Braço Robótico.....	56
Figura 51: Fluxograma de funcionamento da garra do Braço Robótico.....	56

Figura 52: Fluxograma de comandos e acionamentos fundamentais do Braço.	57
Figura 53: Fluxograma de comandos e acionamentos automático do braço robótico.	58
Figura 54: Elo base com suporte do elo braço e do cilindro do elo braço com o apoio de equilíbrio (escala em milímetros).	59
Figura 55: Peça na posição de recebimento.	59
Figura 56: Antebraço levantado na posição inicial.	60
Figura 57: Garra fechada na posição inicial.	60
Figura 58: Braço na posição de retirada da peça.	61
Figura 59: Garra aberta na posição de retirada da peça.	61
Figura 60: Antebraço abaixado, posicionando a garra para retirada da peça.	62
Figura 61: Peça pega pela garra.	62
Figura 62: Antebraço erguido com a peça.	63
Figura 63: Braço erguido com a peça.	63
Figura 64: Braço na posição de entrega da peça.	64
Figura 65: Braço abaixado para entrega da peça.	64
Figura 66: Antebraço abaixado para entrega da peça.	65
Figura 67: Garra aberta, peça entregue.	65
Figura 68: Grafico comparativo entre peças trabalhas e tempo de execução do processo.	67
Figura 69: Gráfico de média de tempo de execução do processo de seleção de peças.	67
Figura 70: Gráfico do crescimento de erro na execução do processo de seleção de peças.	68
Figura 71: Gráfico de peças danificadas no processo de seleção.	69
Figura 72: Gabarito de teste para análise de repetibilidade.	70
Figura 70: Código fonte – Rotina Principal.	77
Figura 71: Código fonte – Rotina de Espelhamento de I/Os.	78
Figura 72: Código fonte – Rotina de Espelhamento de I/Os.	79
Figura 73: Código fonte – Rotina de Espelhamento de I/Os.	80
Figura 74: Código fonte – Rotina de Espelhamento de I/Os.	81
Figura 75: Código fonte – Rotina de Espelhamento de I/Os.	81
Figura 76: Código fonte – Rotina de Espelhamento de I/Os.	82
Figura 77: Código fonte – Rotina de Acionamento Manual.	82
Figura 78: Código fonte – Rotina de Acionamento Manual.	83
Figura 79: Código fonte – Rotina de Acionamento Manual.	83
Figura 80: Código fonte – Rotina de Acionamento Manual.	84
Figura 81: Código fonte – Rotina de Acionamento Manual.	84
Figura 82: Código fonte – Rotina de Acionamento Manual.	85
Figura 83: Código fonte – Rotina de Acionamento Manual.	85
Figura 84: Código fonte – Rotina de Acionamento Manual.	86
Figura 85: Código fonte – Rotina de Acionamento Automático.	86
Figura 86: Código fonte – Rotina de Acionamento Automático.	87
Figura 87: Código fonte – Rotina de Acionamento Automático.	88
Figura 88: Código fonte – Rotina de Acionamento Automático.	88
Figura 89: Código fonte – Rotina de Acionamento Automático.	89
Figura 90: Código fonte – Rotina de Acionamento Automático.	89
Figura 91: Código fonte – Rotina de Acionamento Automático.	90
Figura 92: Código fonte – Rotina de Acionamento Automático.	90
Figura 93: Código fonte – Rotina de Acionamento Automático.	91
Figura 94: Código fonte – Rotina de Acionamento Automático.	92
Figura 95: Código fonte – Rotina de Acionamento Automático.	93
Figura 96: Código fonte – Rotina de Status do Braço.	94
Figura 97: Código fonte – Rotina de Status do Braço.	95
Figura 98: Código fonte – Rotina de OEE – Contabilidade de peças Não-Metálicas trabalhadas.	96
Figura 99: Código fonte – Rotina de OEE – Contabilidade de peças Metálicas trabalhadas.	97
Figura 100: Código fonte – Rotina de OEE – Braço produzindo, parado e falha.	98
Figura 101: Código fonte – Rotina de OEE – Calculo da disponibilidade.	99
Figura 102: Código fonte – Rotina de OEE – Calculo da Quantidade.	99
Figura 103: Código fonte – Rotina de OEE – Calculo da Performance.	100

Figura 104: Código fonte – Rotina de OEE – Calculo do OEE.....	100
Figura 105: Código fonte – Rotina de Alarme de subida do Braço e Antebraço.....	101
Figura 106: Código fonte – Rotina de Alarme de avanço de giro da base e abertura da garra.....	102
Figura 107: Código fonte – Rotina de Alarme de descida do Braço e Antebraço.....	103
Figura 108: Código fonte – Rotina de Alarme de retorno de giro da base e fechamento da garra.....	104
Figura 109: Código fonte – Resumo de Alarmes.....	104
Figura 110: Simulação do circuito elétrico, eletropneumático e logica do PLC no CADe_Simu.....	105
Figura 111: Simulação do acionamento do comando manual para subir o braço.....	106
Figura 112: Simulação da atuação do comando eletropneumático para subir o braço.....	106
Figura 113: Simulação do acionamento do comando manual para descer o braço.....	107
Figura 114: Simulação do acionamento do comando manual para subir o antebraço.....	107
Figura 115: Simulação da atuação do comando eletropneumático para subir o antebraço.....	108
Figura 116: Simulação do acionamento do comando manual para descer o antebraço.....	108
Figura 117: Simulação do acionamento do comando manual para movimento em sentido horário da base.....	109
Figura 118: Simulação da atuação do comando eletropneumático para movimento em sentido horário da base.....	109
Figura 119: Simulação do acionamento do comando manual para movimento em sentido anti-horário da base.....	110
Figura 120: Simulação do acionamento do comando manual para abertura da garra.....	110
Figura 121: Simulação da atuação do comando eletropneumático para abertura da garra.....	111
Figura 122: Simulação do acionamento do comando manual para fechamento da garra.....	111
Figura 123: Circuito eletropneumático e lógica Auto/Manual do PLC no CADe_Simu.....	112
Figura 124: Início da lógica automática por status de posição no CADe_Simu.....	113
Figura 125: Avanço e status do braço; início do avanço do antebraço em automática por status de posição no CADe_Simu.....	113
Figura 126: Avanço e status do antebraço; início do avanço da base em automática por status de posição no CADe_Simu.....	114
Figura 127: Avanço e status da base; início do avanço da garra em automática por status de posição no CADe_Simu.....	115
Figura 128: Recuo e status da garra; recuo da base em automática por status de posição no CADe_Simu.....	115
Figura 129: Recuo e status da base; recuo da garra em automática por status de posição no CADe_Simu.....	116
Figura 130: Recuo e status do antebraço; recuo do braço em automática por status de posição no CADe_Simu.....	116
Figura 131: Recuo e status do braço e finalização da sequência automática por status de posição no CADe_Simu.....	117
Figura 132: Fim da sequência automática, com o status do braço não avançado no CADe_Simu.....	117

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Cobots versus braço robótico tradicional.....	26
Tabela 2: Esquema de notação para designar configurações de robôs.	32
Tabela 3: Esquema de notação para designar configurações do pulso	33
Tabela 4: Comparação EFORT ER10-3-900 com braço robótico pneumático.	69

LISTA DE ABREVIATURAS

PME - Pequenas e Médias Empresas

PLC - Programmable Logic Controller - Controlador Lógico Programável

IoT - Internet of Things - Internet das Coisas

WEF - World Economic Fórum - Fórum Económico Mundial

OEE - Overall Equipment Effectiveness - Eficiência Global do Equipamento

TRR -

CNI - Confederação Nacional da Indústria

SCADA - Supervisory Control And Data Acquisition - Sistema de Supervisão e Aquisição de Dados

ERP - Enterprise Resource Planning - Planejamento de Recursos Empresariais

MES - Manufacturing Execution System - Sistema de Execução de Manufatura

CNC - Computer Numerical Control - Comando Numérico Computadorizado

API - Application Programming Interface - Interface de Programação de Aplicativos

URL - Uniform Resource Locator - Localizador Padrão de Recursos

GL - Graus de Liberdade

NA - Normal Aberto

NF - Normal Fechado

RESUMO

Esta monografia apresenta um protótipo de um braço robótico pneumático selecionador, desenvolvido para atender às necessidades de indústrias de pequeno e médio porte, com o objetivo principal de oferecer uma solução acessível e fácil manuseio, capaz de automatizar processos de seleção de peças, com o intuito de melhorar a eficiência e a produtividade. O braço robótico possui uma estrutura articulada, de construção mecânica simples, composta por três elos e duas juntas, acionados por cilindros pneumáticos. É controlado por uma lógica de programação em PLC e monitorado por um sistema supervisão. O protótipo demonstra desempenho e precisão adequados para a tarefa, comparável com um cobot, comprovada a partir de testes e por comparações com o ser humano. Devido ao custo-benefício, este braço se apresenta como uma solução viável para indústrias que buscam automação de processos e melhoria da eficiência operacional, impulsionando o avanço em direção à Indústria 4.0.

Palavras-chave: *Braço Robótico, Cobot, Automação Industrial, Indústria 4.0.*

ABSTRACT

This monograph presents a prototype of a pneumatic robotic arm for part selection, developed to meet the needs of small and medium-sized industries, with the main objective of offering an accessible and user-friendly solution, capable of automating parts selection processes, with the aim of to improve efficiency and productivity. The robotic arm has an articulated structure, of simple mechanical construction, composed of three links and two joints, driven by pneumatic cylinders. It is controlled by a PLC programming logic and monitored by a supervisory system. The prototype demonstrates adequate performance and accuracy for the task, comparable to a cobot, proven from tests and by comparisons with the human being. Due to its cost-effectiveness, the pneumatic robotic arm emerges as a viable solution for industries seeking process automation and operational efficiency improvement, driving progress towards Industry 4.0.

Keywords: *Robotic Arm, Cobot, Industrial Automation, Industry 4.0.*

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
1.1	OBJETIVOS	17
1.1.1	OBJETIVO GERAL	17
1.1.2	OBJETIVO ESPECÍFICOS	18
1.2	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	18
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1	INDÚSTRIA 4.0.....	19
2.2	AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL.....	20
2.3	ROBÓTICA	23
2.4	BRAÇO ROBÓTICO	24
2.4.1	ANATOMIA DE UM BRAÇO ROBÓTICO.....	27
2.4.2	JUNTAS ROATIVAS	28
2.4.3	GRAU DE LIBERDADE	30
2.4.4	CONFIGURAÇÃO DO ROBÔ	32
2.4.4.1	ROBO ARTICULADO OU REVOLUTO.....	33
2.4.4.2	ÓRGÃO TERMINAL	34
2.4.5	VOLUME DE TRABALHO	34
2.4.6	DINAMISMO DO BRAÇO ROBÓTICO	36
2.4.7	SISTEMA DE CONTROLE.....	37
3	DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO	39
3.1.	MECÂNICA	39
3.2.	ELÉTRO-ELETRÔNICO, PNEUMÁTICO E PROGRAMAÇÃO.....	49
3.3.	SUPERVISÓRIO	52
3.4.	LÓGICA DE PROGRAMAÇÃO	54
3.4.1.	COMANDO MANUAL	55
3.4.2.	COMANDO AUTOMÁTICO.....	57
3.5.	VALIDAÇÃO DO PROJETO	58
4.	CONCLUSÃO	71
4.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	72
5.	REFERÊNCIAS	73
	APÊNDICE A: CÓDIGO FONTE.....	77
	APÊNDICE B: SEQUÊNCIA DE SIMULAÇÃO	105

1 INTRODUÇÃO

A indústria 4.0 é uma revolução na forma como a produção industrial é realizada, por meio da implementação de tecnologias como inteligência artificial, internet das coisas e robótica avançada. Segundo Klaus Schwab (2016), fundador e presidente executivo do Fórum Econômico Mundial, a indústria 4.0 é uma nova fase na revolução industrial que se concentra na interconexão, automatização e digitalização de fábricas e sistemas de produção.

A robotização é uma das principais características da indústria 4.0, e tem impactado de forma significativa a produção mundial. Segundo a Federação Internacional de Robótica, o número de robôs industriais em operação em todo o mundo aumentou em mais de 12% em 2020, com um total de 2,7 milhões de unidades em funcionamento. No Brasil, a robotização também tem crescido, porém em menor escala, com um aumento de 8,5% no número de robôs industriais em operação em 2020.

Além da eficiência, Federação Internacional de Robótica ressalta que a redução de custos e melhoria da qualidade, a indústria 4.0. e a robotização podem trazer outros benefícios significativos para as empresas, tais como:

- Flexibilidade na produção: a utilização de robôs industriais e sistemas automatizados permite que as empresas ajustem sua produção de forma rápida e eficiente para atender às demandas do mercado, permitindo que a produção seja facilmente adaptada para diferentes tamanhos, formatos e volumes.
- Redução de erros: a robotização e a automação de processos produtivos reduzem a possibilidade de erros humanos, o que aumenta a qualidade dos produtos e reduz o desperdício de matéria-prima.
- Maior eficiência energética: a utilização de sistemas automatizados e robôs industriais pode resultar em um uso mais eficiente de energia, reduzindo os custos de produção e diminuindo o impacto ambiental.
- Análise de dados em tempo real: a indústria 4.0 permite a coleta e análise de dados em tempo real, o que possibilita uma melhor tomada de decisões e um planejamento mais eficiente da produção. Isso pode ser feito por meio de sensores e dispositivos *IoT* (Internet das Coisas), que permitem a captura de dados em tempo real.

Apesar dos benefícios da robotização e da indústria 4.0, o alto custo de modernização pode ser um desafio significativo para pequenas e médias empresas (PMEs). A modernização da produção exige altos investimentos em equipamentos, softwares, treinamento de funcionários e infraestrutura, o que pode ser inacessível para muitas.

Porém, as vantagens competitivas que esta modernização proporciona às empresas são irrefutáveis. Segundo o estudo do World Economic Fórum (WEF), a adoção da indústria 4.0 pode resultar em uma redução de custos da produção em até 3,6% ao ano. Embora o alto custo de modernização possa ser uma barreira para as PMEs, é importante que as políticas públicas e os programas de incentivo ajudem as empresas a superar esses desafios, promovendo o desenvolvimento econômico e a competitividade dessas empresas no mercado.

A utilização de braços robóticos pneumáticos de baixo custo pode ser uma opção viável para as pequenas e médias empresas ingressarem na indústria 4.0 e aumentarem sua competitividade no mercado.

Os braços robóticos pneumáticos são dispositivos mecânicos simples e econômicos que utilizam ar comprimido para realizar movimentos precisos e repetitivos. Esses dispositivos podem ser programados para realizar diversas tarefas, como montagem, embalagem, paletização, soldagem, entre outras.

Ao contrário dos braços robóticos tradicionais, que podem ser complexos e caros, os braços pneumáticos são relativamente fáceis de instalar e operar, com baixa necessidade de manutenção e treinamento de pessoal. Além disso, esses dispositivos podem ser integrados a outras tecnologias da indústria 4.0, como sensores e sistemas de controle, para aumentar ainda mais sua eficiência e produtividade.

Partindo-se do que foi apresentado, este trabalho visa desenvolver um braço robótico pneumático simples. Hoje há uma dificuldade por partes das empresas brasileiras de encontrarem braços robóticos com construção, acionamento, controle e funcionabilidade que se adequem as necessidades das suas linhas de produção. Com a construção desse protótipo, o grupo espera incentivar que cada vez mais as PMEs automatizem seus processos produtivos, aumentando assim sua eficiência e produtividade, podendo resultar em uma redução de custos no longo prazo.

1.1 OBJETIVOS

Será realizada uma pesquisa do tipo exploratória, utilizando-se de revisão bibliográfica, para entender as principais tendências e soluções em automação industrial, bem como identificar as principais barreiras e desafios no processo de adoção de tecnologias de automação.

A partir disto, espera-se desenvolver um protótipo limitado, cuja função é ser um selecionador de peças, que poderá ser aplicado em empresas posteriormente, com vista a pilotar a utilização dos braços robóticos pneumáticos, avaliando os resultados e o impacto dessa tecnologia no processo produtivo e na competitividade das empresas.

1.1.1 OBJETIVO GERAL

O propósito principal do trabalho é evidenciar o potencial dos braços robóticos pneumáticos, criando um selecionador de peças, que é comum em linhas de produção, visto seu baixo custo, auxiliando assim as pequenas e médias empresas a ingressarem na indústria 4.0 e a aumentarem sua competitividade no mercado. Este terá 3 elos e 2 juntas, com uma base rotativa rotacional @ atingindo um ângulo de 120 graus, em um formato TRR (Capítulo 2.4.2), com comandos simples, baseados em relés encontrados no mercado, sendo controlado por modelos de PLC mais básicos do mercado, porem, comportaria o controle dos braços robóticos como nosso protótipo, de uma linha completa de produção, apenas inserindo módulos de entrada e saída digital no PLC. Todos comandos, monitoramento de status, alarmes, produtividade, OEE, contagem de peças totais e individuais separadas e armazenadas, será feito por um supervisório, onde o desenvolvimento é baseado em visual studio com uma interface de alto nível para o desenvolvedor, operação e análise. Executará uma gama de movimentos e posicionamentos que possibilitarão atender atividades repetitivas e perigosas de um processo de fabricação. Sua construção e funcionalidade tem o foco em atender, principalmente, pequenas e médias empresas e fábricas, para melhoria de operação e produtividade.

1.1.2 OBJETIVO ESPECÍFICOS

Para se alcançar esse objetivo será necessário passar por tais etapas intermediárias:

- Apresentar os desafios enfrentados pelas micro e pequenas empresas para ingressar na indústria 4.0;
- Levantar as vantagens da automação industrial para as empresas, como a redução de custos, aumento da eficiência e produtividade, entre outros;
- Apresentar as características e vantagens dos braços robóticos pneumáticos de baixo custo;
- Ressaltar a importância de políticas públicas e programas de incentivo para ajudar as micro e pequenas empresas a superar os desafios da automação industrial.

1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

A estrutura do presente trabalho é dividida em 3 capítulos principais, seguidos de suas respectivas subseções e um capítulo final referente a conclusão. O Capítulo 2 aborda a fundamentação teórica do trabalho, que se baseia em pesquisas bibliográficas referente ao tema abordado.

Inicialmente, será realizada uma revisão da literatura, onde serão explorados os conceitos-chave de indústria 4.0 e da automação, passando pela robótica, e pôr fim ao desenvolvimento de um braço robótico pneumático.

O capítulo 3 irá apresentar a elaboração efetiva do protótipo, explicando o método e os materiais utilizados, bem como os resultados obtidos, demonstrando os detalhes de funcionamento e a comprovação de eficiência do mesmo. Já no capítulo 4, tem-se a conclusão, sugestão de projetos futuros e as referências bibliográficas.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 INDÚSTRIA 4.0

A Indústria 4.0, também conhecida como a Quarta Revolução Industrial, como mencionado por Perasso (2016), é um termo utilizado para descrever a integração da tecnologia da informação e da comunicação com a produção industrial, utilizando máquinas conectadas em rede, inteligência artificial e dados em tempo real para aumentar a eficiência e a produtividade. Essa transformação digital representa um grande salto em relação às três revoluções industriais anteriores, que foram marcadas pela mecanização da produção, eletrificação e automação.

No Brasil, a Indústria 4.0 tem ganhado cada vez mais espaço nas empresas, especialmente naquelas que buscam se manter competitivas no mercado global. Segundo estudo realizado pela Confederação Nacional da Indústria (CNI) em 2020, 56% das empresas brasileiras afirmaram ter adotado tecnologias da Indústria 4.0 em algum processo produtivo. Entre as tecnologias que estão sendo mais utilizadas, a automação e a robótica são os pilares principais.

A automação refere-se à utilização de tecnologias para automatizar processos produtivos. Segundo Pereira et al. (2018), a automação é essencial para a eficiência dos processos produtivos, pois permite que tarefas repetitivas e operações que demandam alta precisão sejam realizadas de forma mais rápida e precisa, sem a necessidade de intervenção humana. No Brasil, esta tem sido amplamente adotada em diversos setores, especialmente na indústria automotiva e na produção de alimentos e bebidas.

Quando se fala da Indústria 4.0, a robótica é um dos pilares fundamentais, como analisado pela Confederação Nacional da Indústria (CNI) em 2016. Os robôs industriais são capazes de executar tarefas complexas e perigosas que seriam impossíveis ou perigosas para os seres humanos, além de trabalharem por longas horas sem precisar de descanso. Estes tem sido cada vez mais amplamente utilizados na indústria brasileira, especialmente na automação de linhas de produção e na logística interna das fábricas.

A Indústria 4.0 também se beneficia de outras tecnologias como a inteligência artificial, que permite a criação de sistemas autônomos e a análise de grandes quantidades de dados em

tempo real, e a internet das coisas, que conecta máquinas, dispositivos e sensores em uma rede integrada.

Quando se fala do cenário Brasil, para que a Indústria 4.0 seja efetivamente implementada no país é necessário um investimento significativo em infraestrutura e em mão de obra qualificada. Segundo Pinto et al. (2019), a falta de capacitação técnica é um dos principais desafios enfrentados pelas empresas brasileiras que desejam adotar a Indústria 4.0. É necessário que as universidades e instituições de ensino técnico ofereçam cursos e treinamentos voltados para as tecnologias da Indústria 4.0, tornando os profissionais preparados para lidar com as novas demandas.

Outro desafio enfrentado no Brasil é a falta de padronização e interoperabilidade entre os sistemas e equipamentos utilizados pelas empresas. Segundo Oliveira et al. (2020), a falta de padronização dificulta a integração dos diferentes sistemas, o que pode prejudicar a eficiência e a produtividade das operações produtivas.

Apesar dos desafios enfrentados, a Indústria 4.0 tem um grande potencial de impactar positivamente a economia brasileira. Segundo Lopes et al. (2018), a Indústria 4.0 pode aumentar a produtividade das empresas brasileiras em até 30%, além de reduzir os custos de produção em até 25%. Isso pode tornar as empresas brasileiras mais competitivas. No entanto, sua implementação não é uma tarefa fácil e requer um investimento significativo em tecnologia, capacitação de recursos humanos e mudanças na cultura organizacional das empresas.

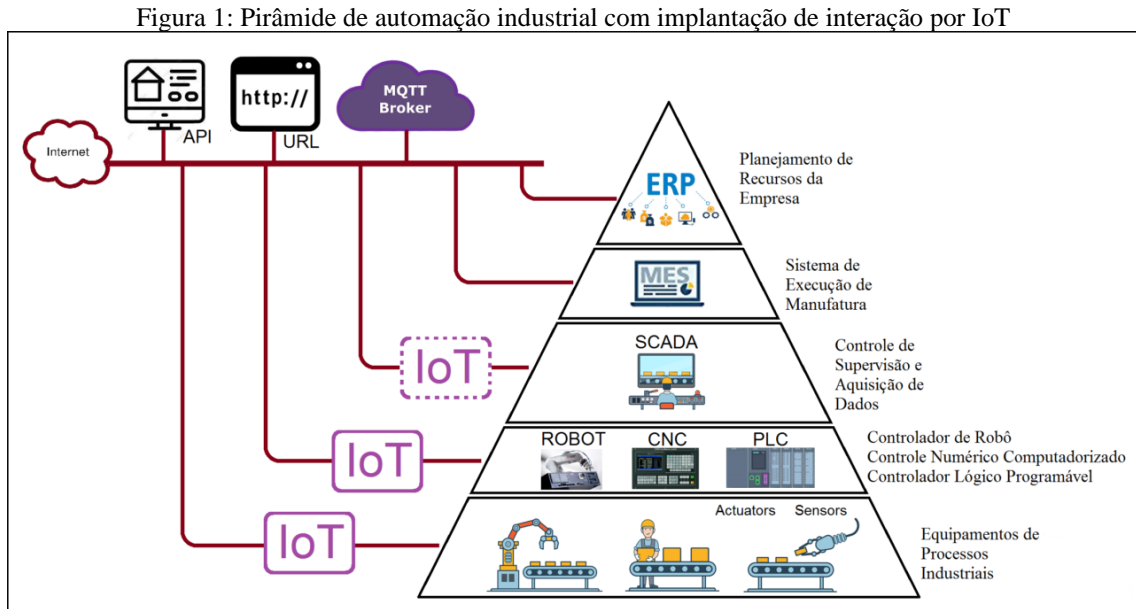
Sendo assim, a Indústria 4.0 representa uma nova era da indústria, que traz consigo uma série de transformações tecnológicas e organizacionais. No Brasil, a automação e a robótica são os principais pilares dessa revolução industrial, e sua adoção pode trazer benefícios significativos para as empresas e para a economia como um todo.

2.2 AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL

A pirâmide de automação industrial (PEIXOTO, A. J. - 2021) é um modelo que vem sendo utilizado há décadas para representar a estrutura hierárquica dos sistemas de automação em uma indústria. Com o advento da Indústria 4.0, essa pirâmide vem sofrendo alterações significativas, especialmente com a adoção de tecnologias como a Internet das Coisas (*IoT*), que permite a interconexão e interação entre todos os níveis da pirâmide. Nesse contexto, a automação e a robótica têm um papel crucial na eficiência e produtividade dos processos

industriais, possibilitando a coleta e análise de dados em tempo real e permitindo a tomada de decisões de forma mais precisa e ágil.

Ela é composta por cinco níveis (conforme Figura 1), sendo que o primeiro nível representa os dispositivos de campo, como sensores e atuadores, e o quinto nível representa os sistemas de gerenciamento empresarial.



No nível mais baixo da pirâmide, como explicado por PEIXOTO, A. J. (2021) os dispositivos de campo são equipados com sensores que coletam dados e os enviam para a camada superior da pirâmide. Na camada seguinte, os dados são processados e transformados em informações úteis para a tomada de decisão. Na camada de supervisão, essas informações são utilizadas para monitorar e controlar os processos produtivos em tempo real.

A camada seguinte é a de gerenciamento de produção, que lida com a programação da produção e a alocação de recursos para garantir a eficiência e a qualidade do processo produtivo, como detalhado por PEIXOTO, A. J. (2021). Na camada mais alta, a de gerenciamento empresarial, as informações são utilizadas para o planejamento estratégico e a tomada de decisões de longo prazo.

Com a implantação e a interação por *IoT*, como dito por PEIXOTO, A. J. (2021), a pirâmide de automação industrial ganhou um novo patamar, permitindo que os dispositivos de campo sejam conectados a um sistema centralizado de gerenciamento, possibilitando o

monitoramento em tempo real de todas as etapas do processo produtivo, bem como a coleta de dados, podendo ser usado para aprimorar a eficiência e a qualidade dos processos produtivos.

Na era atual, a automação se embasa na projeção e implantação de sistemas ciber-físicos, que controlam processos materiais e gerenciam as tomadas de decisões de forma totalmente descentralizada. Com a internet das coisas, esses sistemas ganharam a habilidade de dialogar com diversas máquinas simultaneamente e enviar informações em tempo real para gestores e supervisores (SIEMBRA, 2018)

A interoperabilidade, virtualização, descentralização, capacidade em tempo real, orientação a serviço e modularidade são características fundamentais para a construção dessa pirâmide, permitindo uma maior eficiência e eficácia nos processos industriais, como detalhado por PEIXOTO, A. J. (2021).

A interoperabilidade, por exemplo, permite a integração de diferentes equipamentos e sistemas, independentemente de sua origem ou fabricante, garantindo a comunicação entre eles e a troca de informações por meio da computação na nuvem. A virtualização, por sua vez, permite a simulação e o monitoramento de processos de forma remota, facilitando a identificação de possíveis falhas.

Já a descentralização concede que as máquinas tomem decisões sem intercessão humana e em conformidade com as necessidades por meio dos sistemas ciber-físicos. Sendo que a capacidade em tempo real garante que os dados sejam coletados e processados instantaneamente, entregando insights para tomada de decisões de ações corretivas.

A orientação a serviço, por sua vez, permite que os equipamentos e sistemas sejam operados como serviços, facilitando a sua manutenção e atualização. E por fim, a modularidade possibilita a construção de sistemas mais flexíveis e customizáveis, adaptando-se às necessidades específicas de cada processo.

Pode-se dizer, segundo PEIXOTO, A. J. (2021), que entre os especialistas existe um certo consenso de que os sistemas automatizados proporcionam maior excelência qualitativa, uma vez que as máquinas são projetadas para conduzir os processos sem falhas e sob padrões rigorosos de controle, além de aproveitarem melhor os recursos energéticos e as matérias-primas, bem como proporcionar maior precisão e segurança técnica, garantindo a viabilidade de operações altamente complexas, insalubres ou perigosas, que não poderiam ser realizadas de forma manual pelo ser humano.

2.3 ROBÓTICA

A palavra robô (“robot”) tem origem tcheca, *robotnik*, que significa servo. O termo foi utilizado inicialmente por Karel Capek, em 1923, e desde a sua criação os robôs têm sido utilizados em diversas aplicações, desde a indústria automotiva até a exploração espacial. Com o avanço das tecnologias, a robótica vem desempenhando um papel cada vez mais importante na Indústria 4.0.

A história da robótica remonta à década de 1950, quando George Devol e Joseph Engelberger criaram o primeiro robô industrial, o Unimate. Esse robô era utilizado na linha de produção da General Motors, para realizar tarefas repetitivas, como a soldagem de peças automotivas. Com o passar dos anos, os robôs foram se tornando mais sofisticados e versáteis, e passaram a ser utilizados em outras aplicações, como na montagem de componentes eletrônicos, na indústria farmacêutica e alimentícia, na medicina, entre outras.

Na Indústria 4.0, segundo estudos da Confederação Nacional da Indústria (2016), a robótica tem desempenhado um papel fundamental na automação dos processos produtivos. Os robôs são capazes de realizar tarefas repetitivas e perigosas, aumentando a eficiência e a segurança nas linhas de produção. Além disso, os robôs são capazes de se comunicar com outros equipamentos, como sensores e sistemas de controle, permitindo uma maior integração e interação entre os diversos componentes da fábrica.

A robótica é utilizada em diversas empresas ao redor do mundo, revolucionando a maneira como a produção é realizada. A Volkswagen em Wolfsburg (Alemanha), por exemplo, antes da implantação dos robôs, a produção de veículos na fábrica era realizada de forma manual, o que gerava diversas limitações que impediam a expansão da capacidade produtiva da fábrica.

Com a implantação dos robôs na linha de produção, como mencionado por FONTES, S. G. (2015) onde estes desempenham diversas tarefas tais como soldagem, montagem e pintura, foi possível aumentar significativamente a capacidade produtiva, além de reduzir os custos de produção e melhorar a qualidade dos veículos, uma vez que os robôs são capazes de realizar tarefas de forma mais rápida e precisa do que os trabalhadores humanos. Além disso, estes são capazes de trabalhar por longos períodos sem interrupção, o que aumenta ainda mais a capacidade produtiva.

FONTES, S. G. (2015) menciona que outra vantagem foi a redução do risco de acidentes de trabalho. Como os robôs realizam tarefas perigosas e repetitivas, os trabalhadores humanos podem se concentrar em tarefas que exigem outras habilidades e que não podem ser realizadas por máquinas, diminuindo assim o risco de acidentes.

Outro exemplo de empresa que já aderiu a robótica é a Amazon, que utiliza robôs em seus centros de distribuição para realizar a movimentação de produtos, reduzindo o tempo de processamento e aumentando a eficiência do processo logístico. A Tesla, empresa de carros elétricos, utiliza robôs em sua linha de produção para realizar a montagem de componentes, reduzindo o tempo de produção e aumentando a qualidade dos produtos.

No Brasil, a indústria de bebidas Ambev investiu em robôs colaborativos em suas linhas de produção, o que permitiu maior eficiência e rapidez na produção de garrafas, assim como a Embraer em sua linha de montagem de aeronaves. A fabricante de equipamentos agrícolas John Deere também faz uso de robôs para soldagem de peças de tratores, o que garante maior precisão e rapidez.

Nos dias de hoje, com sistemas de microcomputadores, atuadores, sensores e outros desenvolvimentos que o mundo dos semicondutores trouxe, a robótica está em um contínuo crescimento, e dada essa crescente demanda, as empresas têm buscado soluções, como os braços robóticos. Em uma simples busca pela internet é facilmente encontrado estes à valores acessíveis, além de kits de montagem de protótipos.

2.4 BRAÇO ROBÓTICO

Braço robótico é um dispositivo mecânico programável que é projetado para mover objetos ou ferramentas de um local para outro, executando tarefas que normalmente exigiriam a intervenção humana, é amplamente utilizado no ambiente industrial, além da medicina, comercio, em residências e outros locais, como relatado por Saraiva, Maranhão e Listo (2008).

O surgimento dos braços pode ser atribuído ao trabalho pioneiro do cientista George Devol, este inventou e criou o primeiro braço robótico programável em 1954. Ele fundou a empresa Unimation, que se tornou a primeira fabricante de braços robóticos do mundo. A Unimation licenciou sua tecnologia para a General Motors, que se tornou a primeira empresa a utilizá-los na linha de produção em 1961. A introdução destes na produção da GM permitiu que

a empresa aumentasse sua eficiência e reduzisse os custos de produção, o que levou a um aumento significativo em sua capacidade de produção e lucratividade.

Ao longo das décadas seguintes, os braços robóticos passaram por um processo constante de evolução e aprimoramento. Com a melhoria da tecnologia e dos materiais, os braços se tornaram mais precisos, rápidos e capazes de realizar tarefas cada vez mais complexas. A introdução de sensores e software de controle avançados permitiu que os braços robóticos realizassem tarefas de forma autônoma, sem a necessidade de intervenção humana.

Na década de 1980, eles começaram a ser utilizados em outras indústrias além da manufatura, como a medicina e a exploração espacial. A introdução de braços robóticos cirúrgicos permitiu que os cirurgiões realizassem procedimentos mais precisos e menos invasivos, reduzindo o tempo de recuperação dos pacientes. Estes também foram utilizados em missões espaciais, realizando tarefas em ambientes de gravidade zero que seriam impossíveis de serem realizadas por humanos.

Com o avanço da inteligência artificial e da robótica autônoma, os braços robóticos se tornam mais sofisticados, colaborativos (cobots), capazes de realizar tarefas complexas e adaptar-se a ambientes variados. A evolução deles tem sido fundamental para a melhoria da eficiência e da produtividade em diversos setores da economia, assim como comenta Corrêa e Giansesi (2019, p. 150), “o uso de braços robóticos na manufatura tem aumentado significativamente nas últimas décadas, graças à sua capacidade de realizar tarefas repetitivas e precisas de forma consistente e confiável”.

A Tabela 01 (conforme esquematizada abaixo) fornece informações comparativas entre os cobots e a automação industrial tradicional e as suas aplicações.

Tabela 1: Cobots versus braço robótico tradicional.

SE VOCÊ PRECISA...	ROBÓTICA INDUSTRIAL TRADICIONAL	ROBÓTICA COLABORATIVA (COBOTS)
Velocidade de produção	X	
Rendimento semelhante ao de um trabalhador humano		X
Carga útil alta ou alcance muito longo, especialmente em alta velocidade	X	
Capacidade de programar e configurar o robô internamente		X
Capacidade de reimplantar facilmente o robô para diferentes processos / tarefas		X
Alta precisão, inclusive em alta velocidade	X	
Mudanças mínimas no layout de produção existente		X
Humanos e robôs trabalhando lado a lado, na mesma célula.		X
Opções de integração com outras máquinas e robôs	X	X
Baixo custo inicial e retorno em menos de um ano		X
Capacidade de executar processos com poucos ou nenhum funcionário	X	X
Automação de processos ou produtos que não mudam com o tempo	X	X

Fonte: Universal Robotics.

Em comparação com os custos de implementação inicial de um cobot, que estão dentro do intervalo do salário anual de um operário, o braço robótico industrial tradicional tem o custo da integração que pode ser de dezenas ou mesmo centenas de milhares de dólares:

Robótica industrial tradicional:

- Infraestrutura adicional necessária;
- Itens de segurança, como cortina de luz e scanner de segurança;
- Licença de softwares;
- Mão de obra altamente especializada para operação e programação;
- Manutenção e reparos.

Cobots:

- Custos de implementação;
- Tempo e investimento de ensino de operação

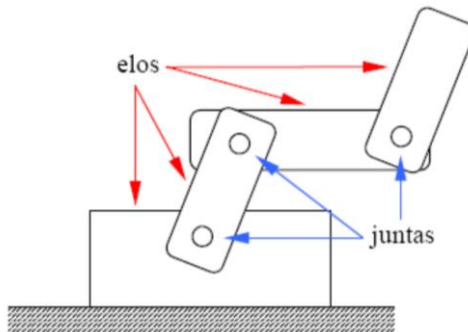
Através destas informações, pode-se dizer que o cobot é um tipo de tecnologia, que apresenta um rápido retorno sobre o investimento, além de rápida adaptação à rotina industrial colaborativa. Por isso, é uma opção de automação importante e viável independentemente do porte da indústria. Enquanto que a automação industrial tradicional é um investimento mais robusto indicado para grandes negócios, que possuem uma segurança financeira maior, até o investimento ser pago.

2.4.1 ANATÔNIA DE UM BRAÇO ROBÓTICO

O braço robótico é composto pelo próprio braço e por um pulso, formado por elos, unidos através de juntas de movimento relativo, onde são acoplados os acionadores para realizarem movimentos individualmente, dotados de capacidade sensorial, e instruídos por um sistema de controle:

- O braço é fixado à base por um lado e ao punho pelo outro.
- O punho consiste em várias juntas próximas entre si, que permitem a orientação do órgão terminal nas posições que correspondem à tarefa a ser realizada.
- O órgão terminal é a mão ou a ferramenta que fica na extremidade do punho, destinada a realização das tarefas exigidas pela aplicação.

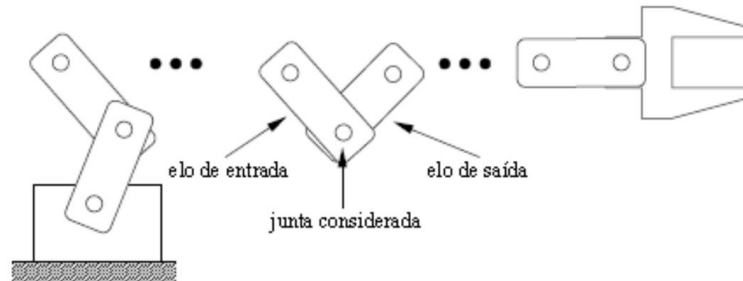
Figura 2: Esquema de notação de Elos e Juntas num Braço Robótico



Fonte: Saraiva, Maranhão e Listo (2008).

Na Figura 3 é visto que em uma junta, o elo que estiver mais próximo da base e denominado elo de entrada. O elo de saída é aquele mais próximo do órgão terminal, como detalhado na Figura 3.

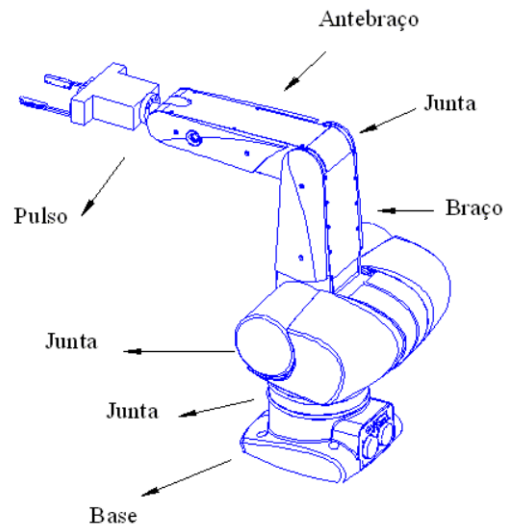
Figura 3: Sequência de elos numa junta de um braço robótico



Fonte: Saraiva, Maranhão e Listo (2008).

Desta forma, pode-se ver na Figura 4, todas as partes que compõem a anatomia de um braço robótico.

Figura 4: Partes do Braço Robótico

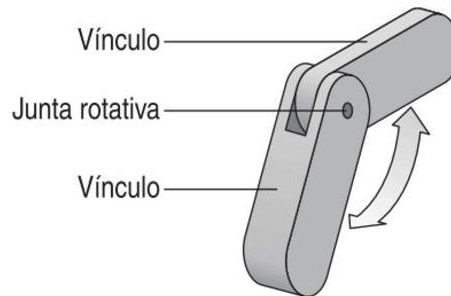


Fonte: Saraiva, Maranhão e Listo (2008).

2.4.2 JUNTAS ROTATIVAS

A junta rotacional (Figura 5) gira em torno de uma linha imaginária estacionária chamada de eixo de rotação. Gira como uma cadeira giratória e abrem e fecham como uma dobradiça.

Figura 5: Junta rotacional.

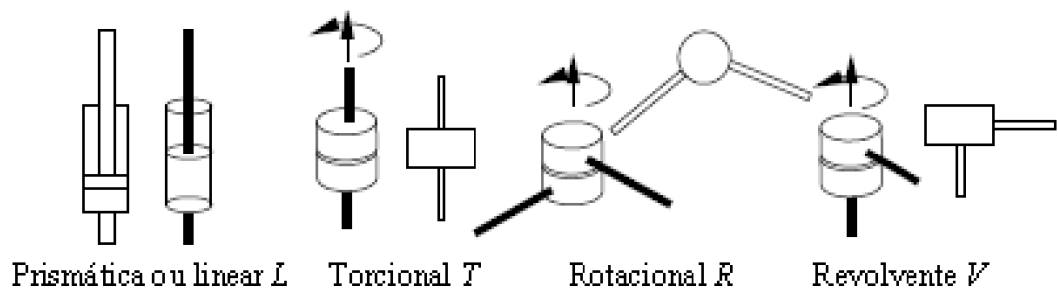


Fonte: Abreu (2018)

Saraiva, Maranhão e Listo (2008) esclarecem que braços robóticos utilizam em geral apenas juntas rotativas e prismáticas. Sendo que, como é mostrado na Figura 6, as rotativas podem ainda ser classificadas de acordo com as direções dos elos de entrada e de saída em relação ao eixo de rotação. Tem-se assim as seguintes juntas rotativas:

- Rotativa de torção ou torcional T: Os elos de entrada e de saída tem a mesma direção do eixo de rotação da junta.
- Rotativa rotacional R: Os elos de entrada e de saída são perpendiculares ao eixo de rotação da junta.
- Rotativa revolvente V: O elo de entrada possui a mesma direção do eixo de rotação, mas o elo de saída é perpendicular a este.

Figura 6: Representação esquemática de juntas.



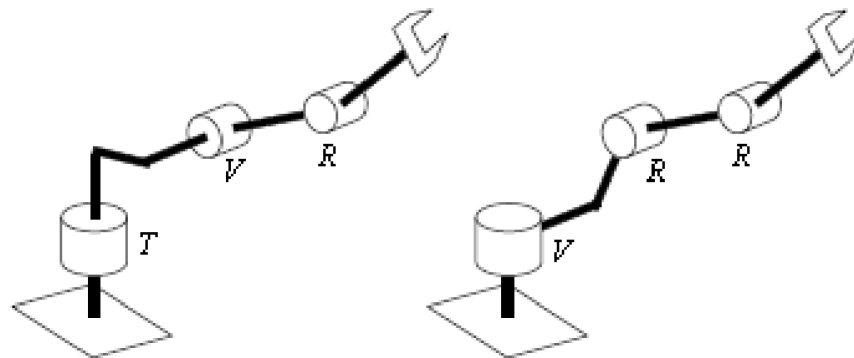
Fonte: Saraiva, Maranhão e Listo (2008).

Um fato reforçado pelos autores é que a nomenclatura do braço pode ser ambígua, dependendo da construção dos elos numa representação esquemática. A Figura 7 ilustra que um

mesmo manipulador pode ser representado de duas formas distintas, podendo ser denominado de TVR ou VRR, indistintamente.

Para tornar a identificação única deve-se buscar uma geometria onde os elos sejam formados por, no máximo, dois segmentos lineares. Neste caso, a configuração VRR seria a correta.

Figura 7: Representação esquemática de juntas

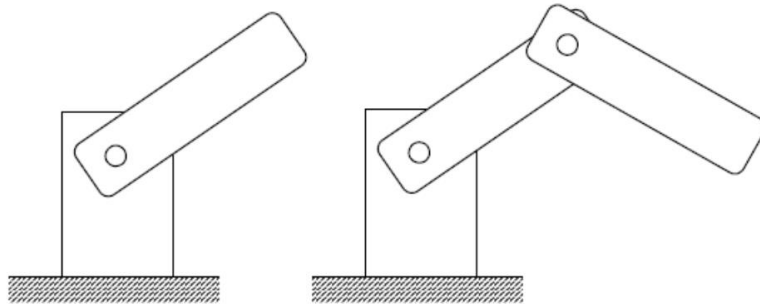


Fonte: SOARES, H. (2016).

2.4.3 GRAU DE LIBERDADE

Seguindo o relatado por Saraiva, Maranhão e Listo (2008), o número de graus de liberdade de um manipulador está associado ao número de variáveis posicionais independentes que permitem definir a posição de todas as partes de forma unívoca. Os graus de liberdade (GL) determinam os movimentos do braço robótico no espaço bidimensional ou tridimensional. Cada junta define um ou dois graus de liberdade, e, assim, o número de graus de liberdade do robô é igual à somatória dos graus de liberdade de suas juntas. Por exemplo, quando o movimento relativo ocorre em um único eixo, a junta tem um grau de liberdade; caso o movimento se dê em mais de um eixo, a junta tem dois graus de liberdade. Observa-se na Figura 8, que quanto maior a quantidade de graus de liberdade, mais complexa é a cinemática, a dinâmica e o controle do manipulador.

Figura 8: Braço com um e dois graus de liberdade

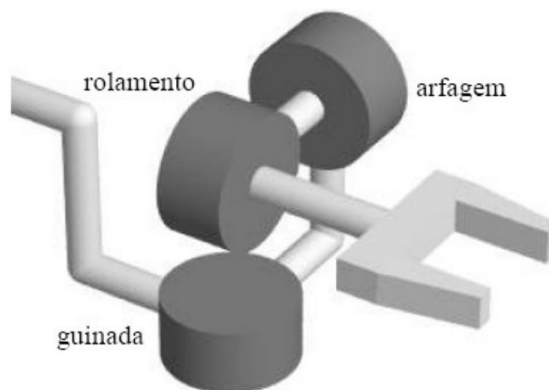


Fonte: SOARES (2016).

Os movimentos do braço e do punho (Figura 9), determinam os movimentos robóticos, de forma que os braços são dotados de 3 acionadores e uma configuração de 3 GL, numa configuração que permita que o órgão terminal alcance um ponto qualquer dentro de um espaço limitado ao redor do braço. Sendo assim, pode-se identificar 3 movimentos independentes em qualquer braço robótico:

- Vertical transversal (Pitch ou arfagem): movimento vertical do punho para cima ou para baixo.
- Rotacional transversal (Yaw ou guinada): movimento do punho horizontalmente para a esquerda ou para a direita.
- Radial transversal (Roll ou rolamento): movimento de aproximação ou afastamento do punho.

Figura 9: Movimentos de um punho com 3 graus de liberdade



Fonte: Saraiva, Maranhão e Listo (2008).

2.4.4 CONFIGURAÇÃO DO ROBÔ

A configuração física dos robôs (GROOVER, 1988) está relacionada com os tipos de juntas que ele possui. Cada configuração pode ser representada por um esquema de notação de letras, como visto anteriormente. Considera-se primeiros os graus de liberdade mais próximos da base, ou seja, as juntas do corpo, do braço e posteriormente do punho.

O braço é ligado a base e esta é fixada ao chão, a parede ou ao teto. Enquanto o braço efetua os movimentos e posiciona o punho. O punho é dotado de movimentos destinados a orientar (apontar) o órgão terminal. O órgão terminal executa a ação, mas não faz parte da anatomia do braço robótico, pois depende da aplicação a ser exercida pelo braço. A movimentação do braço e a orientação do punho são realizadas por juntas, que são articulações providas de motores.

Em resumo, a base sustenta o corpo, que movimenta o braço, que posiciona o punho e orienta o órgão terminal, que executará a ação. Em geral, utilizam-se 3 juntas para o braço e de 2 a 3 juntas para o punho. Os elos do braço são grandes, para permitir um longo alcance. Por outro lado, os elos do punho são pequenos, ou de comprimento nulo, para que o órgão terminal se desloque o mínimo possível durante a orientação do punho.

A Tabela 2 cita a adoção da nomenclatura para os manipuladores com base nos tipos de juntas utilizadas na cadeia de elos, que parte da base em direção ao órgão terminal. Assim um manipulador TRR teria a primeira junta (da base) torcional, e as duas seguintes seriam rotacionais. Na Tabela 3 é caracterizado o esquema de notação para designar configurações do pulso.

Tabela 2: Esquema de notação para designar configurações de robôs.

CONFIGURAÇÃO DO ROBÔ – BRAÇO E CORPO	SÍMBOLO
Configuração Cartesiana	LLL
Configuração Cilíndrica	LVL
Configuração Articulada ou Revoluta	TRR
Configuração Esférica	TRL
Configuração SCADA	VRL

Fonte: Saraiva, Maranhão e Listo (2008).

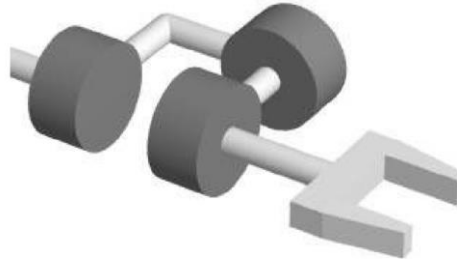
Tabela 3: Esquema de notação para designar configurações do pulso

CONFIGURAÇÃO DO ROBÔ – PULSO	SÍMBOLO
Configuração Pulso de 2 eixos	RT
Configuração Pulso de 3 eixos	TRT

Fonte: Saraiva, Maranhão e Listo (2008).

Na Figura 10 está esquematizada a configuração de um punho TRT.

Figura 10: Configuração de um punho TRT na forma compacta



Fonte: Saraiva, Maranhão e Listo (2008).

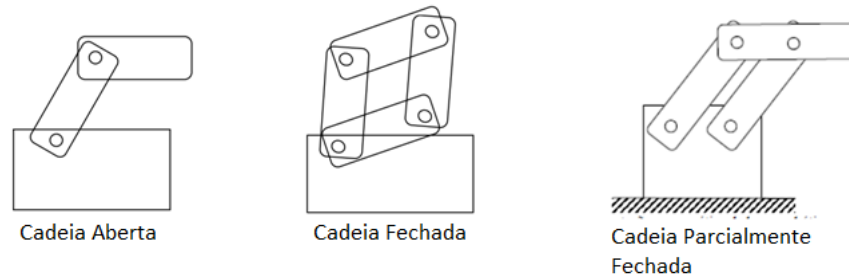
2.4.4.1 ROBO ARTICULADO OU REVOLUTO

Os robôs articulados ou revolutos possuem 3 juntas rotativas, normalmente são mais usados nas indústrias, por terem uma configuração semelhante ao do braço humano, (braço, antebraço e pulso). O pulso é unido a extremidade do antebraço, o que propicia juntas adicionais para orientação do órgão terminal. Esta configuração é a mais versátil dos manipuladores, obtendo maiores movimentos em um espaço compacto.

Como descrito abaixo e mostrado na Figura 11, os braços revolutos podem ser de três tipos:

- Cadeia aberta: pode-se distinguir facilmente a sequência natural formada por elo-junta, ou seja, existe somente um caminho da base até o punho.
- Cadeia fechada: é possível determinar vários caminhos entre a base até o atuador.
- Cadeia parcialmente fechada: há uma mistura entre os dois tipos anteriores sobre os caminhos entre a base e o atuador, sendo que o acionamento deve ser feito com um único motor, conectado a uma das duas articulações da base.

Figura 11: Cadeias Cinemáticas.



Fonte: Mantovani; Oliveira (UNESP, 2020)

2.4.4.2 ÓRGÃO TERMINAL

Na robótica, órgão terminal (GROOVER,1988) é usado para descrever a mão ou ferramenta que está conectada ao pulso, como por exemplo, uma pistola de solda, garras, pulverizadores de tintas, entre outros. O órgão terminal é o responsável por realizar a manipulação de objetos em diferentes tamanhos, formas e materiais, porém esta manipulação depende da aplicação ao qual se destina:

- Garra de dois dedos;
- Garra para objetos cilíndricos;
- Garra articulada.

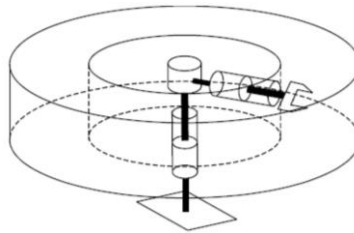
Os órgãos terminais requerem cuidados ao serem projetados, pois é necessário controlar a força que está sendo aplicada num objeto. Para isso, alguns órgãos terminais são dotados de sensores que fornecem informações sobre os objetos.

2.4.5 VOLUME DE TRABALHO

O volume de trabalho (GROOVER, 1988) é o termo que se refere ao espaço que um determinado braço consegue posicionar seu pulso. Este volume, em geral, é estabelecido conforme os limites impostos pelo projeto estrutural do braço, ou seja, a configuração física do braço robótico, os limites dos movimentos das juntas e o tamanho dos componentes do corpo, braço e pulso. Por exemplo, o volume de trabalho de um braço esférico (TRL) seria, teoricamente, o volume da esfera cujo raio é o comprimento do braço esticado.

Os braços robóticos possuem volumes que dependem da geometria e dos limites impostos ao movimento por motivos estruturais ou de controle. O volume, em grande parte, é altamente dependente de detalhes construtivos e raramente aparenta ou aproxima-se do volume teórico. Por exemplo, o volume de um manipulador cilíndrico deveria ser um cilindro, como mostrado na Figura 12, mas em geral não é. O volume de trabalho de um manipulador depende, basicamente, da configuração do braço, dos comprimentos dos elos (braço e punho) e de limites e restrições construtivas à movimentação das juntas.

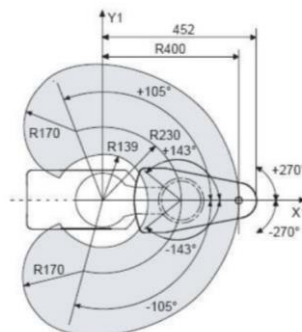
Figura 12: Volume de trabalho teórico de um robô cilíndrico



Fonte: Saraiva, Maranhão e Listo (2008).

Os volumes de trabalho são medidos em unidades volumétricas, porém isto pouco ou nada contribui na seleção de um braço para determinada aplicação, assim os fabricantes de manipuladores robóticos fornecem o volume de trabalho em termos do alcance do braço em um ou mais planos. Na Figura 13 é mostrado a área de trabalho de um braço SCARA em vista superior, produzido pela Stäubli. O deslocamento da terceira junta é de 200 mm, neste braço. Braços articulados ou revolventes apresentam em geral um volume bastante complexo, pois as juntas têm movimentos limitados.

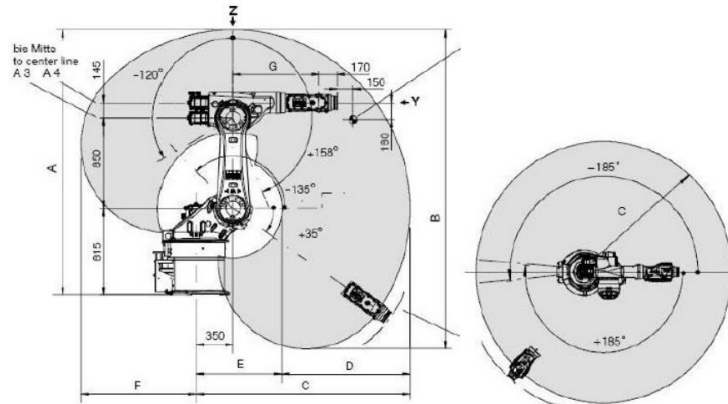
Figura 13: Volume (área) útil do manipulador RS40B (escala em milímetros).



Fonte: Stäubli Robotics.

Na Figura 14 é mostrado o volume do braço KR30HA produzido pela Kuka Robotics. Os volumes, alcances ou áreas de trabalho devem ser expressos sem a presença do órgão terminal, já que este pode alterar significativamente tais valores, dependendo da aplicação.

Figura 14: Volume de manipulador KR30HA (escala em milímetros)



Fonte: Kuka Robotics.

2.4.6 DINAMISMO DO BRAÇO ROBÓTICO

O desempenho dinâmico do braço robótico (GROOVER, 1988) está associado à velocidade de resposta, estabilidade e precisão:

- A velocidade de resposta refere-se à destreza do braço robótico ao mover-se de um lugar para outro num curto período de tempo. Desta forma, o torque existente em cada junta do braço e a aceleração em cada elo devem ser analisadas.
- A estabilidade pode ser estimada com base no tempo necessário para amortecer as oscilações que ocorrem durante o movimento de uma posição para a outra. Se a estabilidade for baixa pode-se aplicar elementos de amortecimento no braço, que melhoram a estabilidade, mas influem na velocidade de resposta.
- A precisão está relacionada com a velocidade e estabilidade, sendo esta a capacidade de um braço posicionar o seu pulso em um ponto marcado dentro do volume de trabalho.

A precisão de movimento do braço robótico está diretamente ligada à:

- Resolução espacial: depende diretamente do controle de sistema e das inexatidões mecânicas do braço robótico. O sistema de controle é o responsável por controlar todos os incrementos individuais das articulações. Já as inexatidões relacionam-se com a qualidade dos componentes que formam as uniões entre as articulações, como as folgas nas engrenagens, tensões nas polias, e histereses mecânicas e magnéticas, entre outros fatores.

- Repetibilidade: capacidade do braço robótico de posicionar repetidamente seu pulso num ponto determinado. Estes movimentos podem sofrer influências de folgas mecânicas, da flexibilidade e das limitações do sistema de controle.

Sobre isso Saraiva, Maranhão e Listo (2008), dizem que conhecendo as precisões (ou resolução do controle) em cada uma das juntas de um braço mecânico, sabe-se qual será a precisão cartesiana, isto é, qual será a precisão do braço num determinado ponto de trabalho.

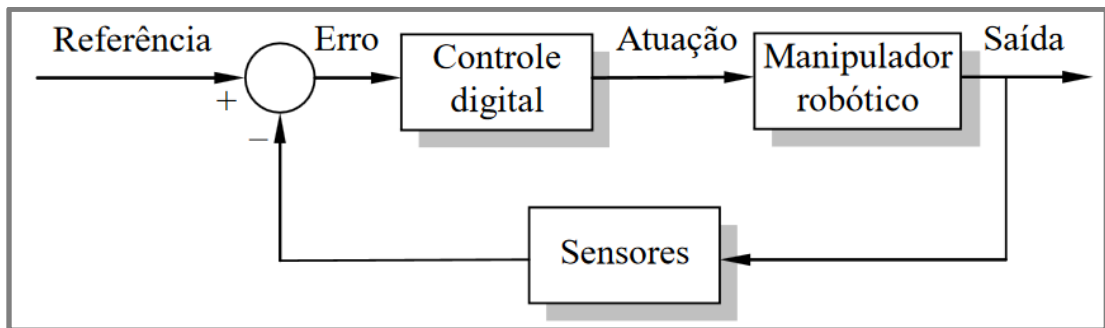
2.4.7 SISTEMA DE CONTROLE

O sistema de controle de um braço robótico é a união e sincronismo de hardware e software.

O software é desenvolvido em uma interface de programação de alto nível e transferido para o microcontrolador do braço, já transformado em uma linguagem de baixo nível (linguagem de máquina), no foco da eficácia do processamento e interfaces do microcontrolador.

O hardware pode constituir de motores de passos, cabos, dispositivo de entrada, sensores e amplificadores de potência, válvulas pneumáticas ou hidráulicas entre outros equipamentos. O uso de sensores, configura um sistema de malha fechada, que consiste em verificar o estado atual do dispositivo a ser controlado e comparar essa medida com um valor predefinido. Esta comparação resultará num erro, ao qual o sistema de controle fará os ajustes necessários para que este seja reduzido a zero. Um esquema simples de malha fechada é apresentado em diagrama de blocos na Figura 15.

Figura 15: Diagrama de blocos do controle em malha fechada.



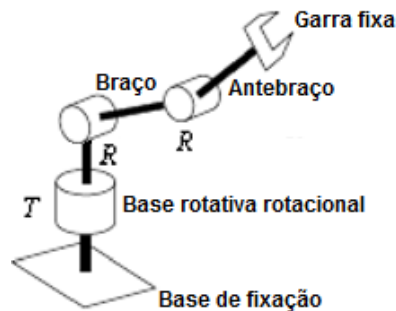
Fonte: Saraiva, Maranhão e Listo (2008).

3 DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO

3.1. MECÂNICA

O braço robótico pneumático selecionador desenvolvido tem três elos e duas junções, com uma base rotativa rotacional \textcircled{R} atingindo um ângulo de 120 graus, em um formato TRR, como esquematizado na Figura 16.

Figura 16: Modelo esquemático do braço robótico pneumático selecionador



Fonte: Saraiva, Maranhão e Listo (2008).

A construção mecânica da estrutura do protótipo de braço robótico pneumático selecionador foi realizada em oficina de serralheria especializada em portões e grades residências e prediais e para isso, foram utilizados, além de ferramentas como chave de fenda, chave Philips, jogo de Allen, jogo de chave de boca fixa em diversos tamanhos; também, foram necessários outros equipamentos (Figura 17 até Figura 22) :

- Furadeira e parafusadeira para uso geral com conjunto de brocas e serra copo de variados tamanhos:

Figura 17: Furadeira e Parafusadeira Bosch 400W 3/8" GSR 7-14 127V



Fonte: Bosch

- Esmerilhadeira com discos de serra para corte, acabamento e polimento:

Figura 18: Esmerilhadeira Angular 4.1/2" 670W GWS 6-115 220V.



Fonte: Bosch

- Serra policorte com disco de corte para ferro:

Figura 19: Serra Policorte Com Motor 2200W GCO 220V



Fonte: Bosch.

- Esmeril com disco para metal:

Figura 20: Moto Esmeril 6 Pol 350W Bivolt 9727



Fonte: Bremen.

- Furadeira de bancada com kit de brocas e serra copo de tamanhos acima de 15mm:

Figura 21: Furadeira de bancada 500 watts mandril de 5/8" monofásica



Fonte: Bremen.

- Máquina de solda com eletrodos revestidos de alta precisão:

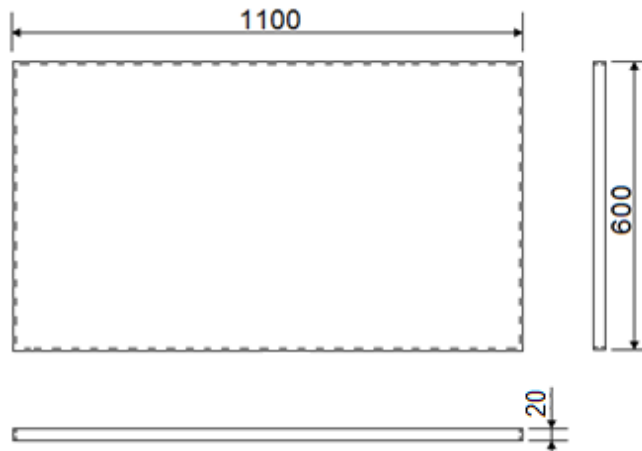
Figura 22: Máquina de Solda Transformadora 250ª Bivolt NM250Bi – FG4220.



Fonte: FortG Ferramentas.

O início da construção do braço robótico pneumático selecionador foi com confecção da base de apoio e fixação (Figura 23). Foi usado uma chapa de aço ferro-carbono, nela foi montada a estrutura do braço, válvulas pneumática, base e botões de comando manual/local, PLC e comando elétrico (relés e fonte), com altura que permite a fixação da estrutura do braço e demais itens e equipamentos que complementam ao projeto.

Figura 23: Base de apoio e fixação (escala em milímetros).



Fonte: Elaborada pelos Autores

A montagem da base rotativa foi desenvolvida principalmente com o uso de um mancal redondo com rolamento, como observado na Figura 24. Esse mancal possibilita o giro da estrutura do braço, inicialmente em 360°, porém para atender a funcionalidade final, esse ângulo de atuação será limitado a 120°.

Figura 24: Mancal redondo com rolamento de aço 6002zz com 303 parafuso 10x12 material de aço inoxidável (escala em milímetros).

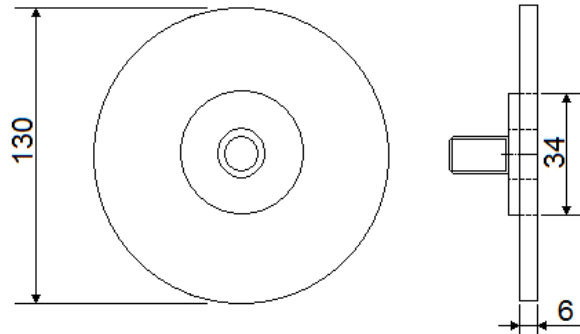


Fonte : Poletto Metalúrgica.

Uma chapa de aço ferro-carbono de espessura de 5mm, cortada em um formato redondo no diâmetro de 140mm e com um furo é fixado ao mancal. Para uma melhor fixação e resistência mecânica, essa junção entre a chapa redonda e o mancal, recebeu pontos de solda com eletrodo revestido, assim formando-se uma peça em formato T, visto na Figura 25, onde a

chapa redonda do aço ferro-carbono é o elo base do braço e o rolamento permite uma liberdade de giro livre do mesmo.

Figura 25: Pré-elo base: base rotativa rotacional (escala em milímetros).



Fonte: Elaborada pelos Autores

A junta entre o elo base T e do elo braço é uma peça de feita de tubo de aço ferro-carbono (Figura 26), que recebeu um trabalho de corte, desbaste e furação.

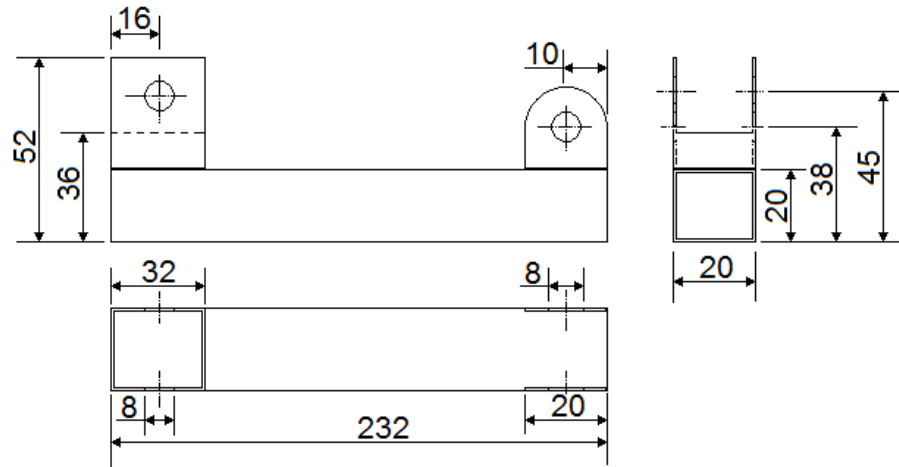
Figura 26: Tubo de aço ferro carbono quadrado de 20mm por 20mm com 2mm espessura.



Fonte: Usiminas

Essa peça foi soldada em uma das extremidades do tubo quadrado. Na outra extremidade foram soldadas com eletrodo revestido, duas peças de chapa de 1,5 mm de espessura de aço ferro carbono, que foram cortadas, furadas e desbastadas (Figura 27), para fixação do cilindro pneumático que fará a movimentação do elo, o puxando no sentido contrário ao elo antebraço, o erguendo e baixando.

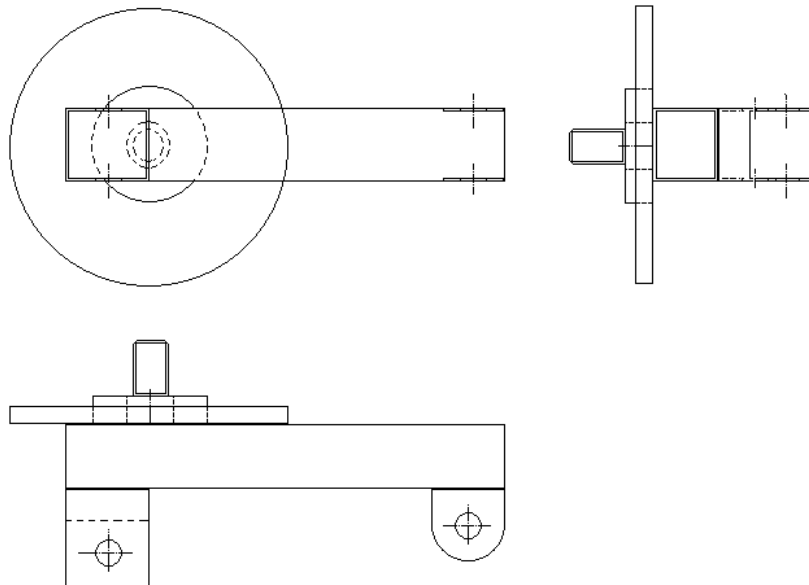
Figura 27: Pré-elo base: Arruela modificada para suporte de cilindro (escala em milímetros).



Fonte: Elaborada pelos Autores

A união do elo base com a peça de suporte do elo braço foi realizada com soldagem de eletrodo revestido, como visto na Figura 28. O elo base foi pintado com tinta esmalte branco areia.

Figura 28: Elo base com suporte do elo braço e do cilindro do elo braço.



Fonte: Elaborada pelos Autores

A confecção do elo braço consiste em um tubo retangular (Figura 29), onde uma das extremidades foi cortada em um ângulo de 45° que foi tampado através de um trabalho de acabamento.

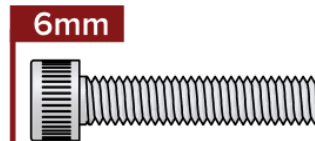
Figura 29: Tubo de aço retangular 30mm por 20mm com 2mm espessura.



Fonte: Usiminas.

Na parte inferior foi feito um furo para fixação no elo base com uso de um parafuso Allen sextavado (Figura 30) e porca travante (Figura 31):

Figura 30: Parafuso Allen cilíndrico Din912



Fonte: Parafusofacil.

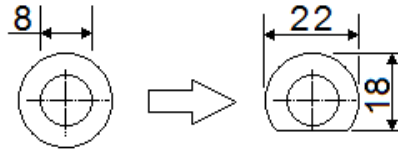
Figura 31: Porca M6 Parlock Alta Nylon Rosca UNC MA Grossa Grau 5 Classe 8.



Fonte: Pires Martins.

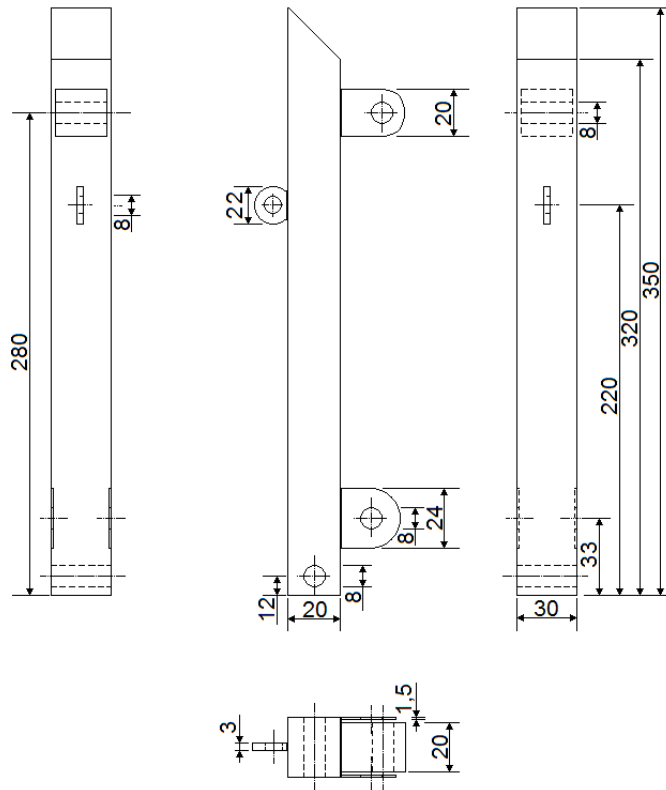
Na parte inferior do elo braço (Figura 33), acima do furo de sua fixação, foram soldadas para estabilização do cilindro de movimentação do elo antebraço, duas peças de chapa de 1,5 mm de espessura de aço ferro carbono, que foram cortadas furadas e desbastadas. Na parte inferior, para fixação do eixo do cilindro pneumático de movimentação do elo braço, foi soldada uma arruela, que foi cortada e adaptada para o fim, como detalhado na Figura 32.

Figura 32: Arruela de fixação do eixo do cilindro pneumático do elo braço (escala em milímetros).



Fonte: Elaborada pelos Autores.

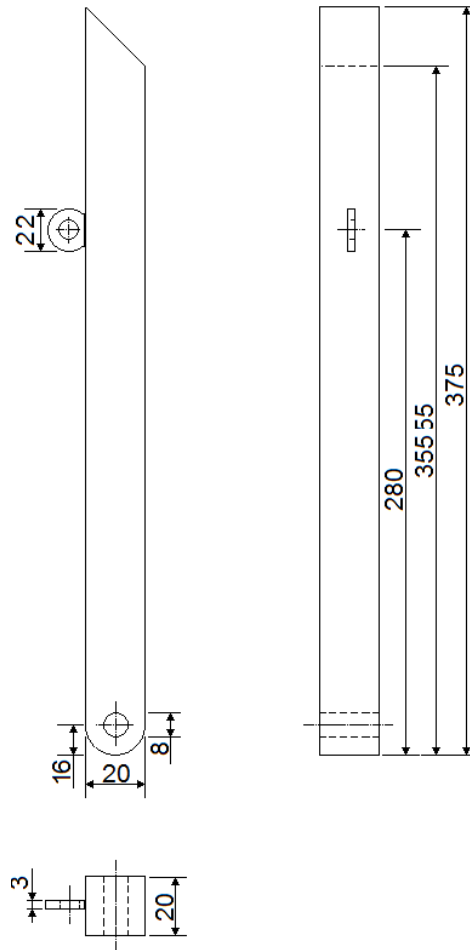
Figura 33: Elo braço com suporte (escala em milímetros).



Fonte: Elaborada pelos Autores.

O elo antebraço (Figura 34) foi desenvolvido, seguindo a mesma ideia do elo braço, porém com o uso de tubo quadrado de aço ferro carbono quadrado. Na sua extremidade inferior, foi realizado um trabalho de corte e furação para que fosse fixado no elo braço, também com uso de um parafuso Allen sextavado e porca travante. E para fixação do eixo do cilindro pneumático de movimentação do elo antebraço, foi soldado uma arruela, cortada na parte inferior.

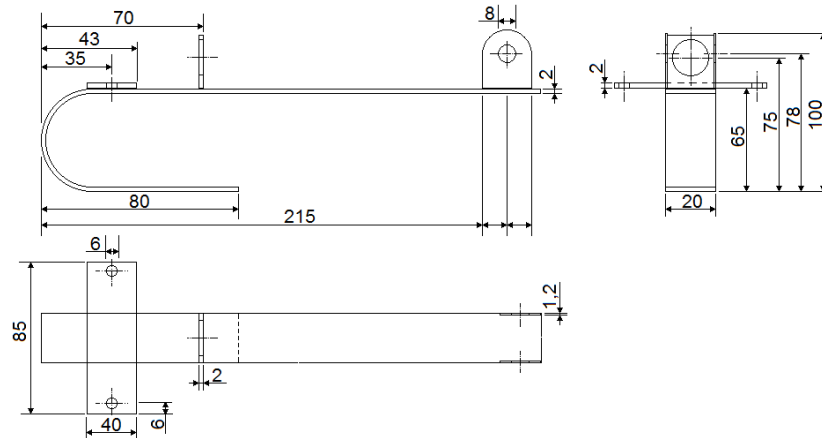
Figura 34: Elo Antebraço (escala em milímetros).



Fonte: Elaborada pelos Autores.

Foi idealizado a construção de uma garra de dois dedos em formato pinça (Figura 38), para a aplicação de seleção de peças em uma planta de área industrial. A base da garra, formada de uma chapa de aço ferro-carbono de 1,5mm de espessura foi dobrada num formato de “U”. Nessa chapa foi soldada duas das peças semelhantes a usada no elo braço para fixação do cilindro de atuação do elo antebraço, que neste caso fará a movimentação das pinças da garra. Esse cilindro também foi fixado com o uso de uma peça do mesmo material dos outros suportes laterais, mas com um furo para fixação da estrutura do cilindro, com uma arruela. A estrutura de fixação do cilindro e base da garra é melhor detalhada na Figura 35.

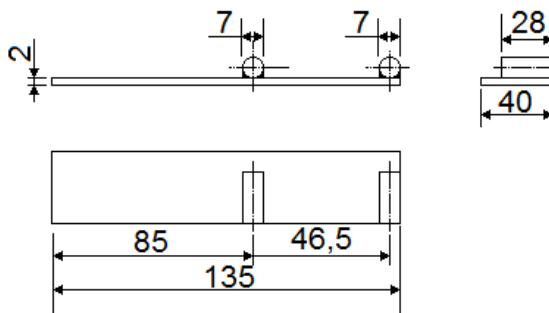
Figura 35: Garra – Suporte do cilindro de atuação de movimento (escala em milímetros).



Fonte: Elaborada pelos Autores.

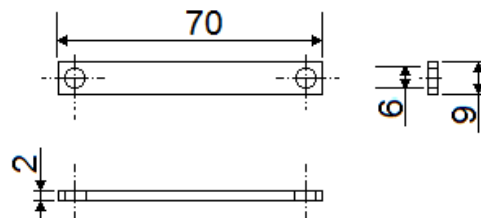
As pinças (Figura 36) foram feitas com chapa de aço ferro-carbono de 1,5mm de espessura com tubos cilíndricos de 8mm de diâmetro interno onde serão colocados os parafusos de fixação das pinças na base da garra e para fixação de peças (Figura 37) do mecanismo de abertura e fechamento das pinças.

Figura 36: Garra – Pinças (escala em milímetros).



Fonte: Elaborada pelos Autores.

Figura 37: Garra – Peças para o mecanismo de abertura e fechamento da garra (escala em milímetros).



Fonte: Elaborada pelos Autores.

Figura 38: Garra de dois dedos com função de pinça, atuada por cilindro pneumático.



Fonte: Elaborada pelos Autores.

3.2. ELÉTRO-ELETRÔNICO, PNEUMÁTICO E PROGRAMAÇÃO

Na atuação das movimentações das partes e articulações do braço são utilizados:

- Cilindros Pneumáticos (Figura 39):

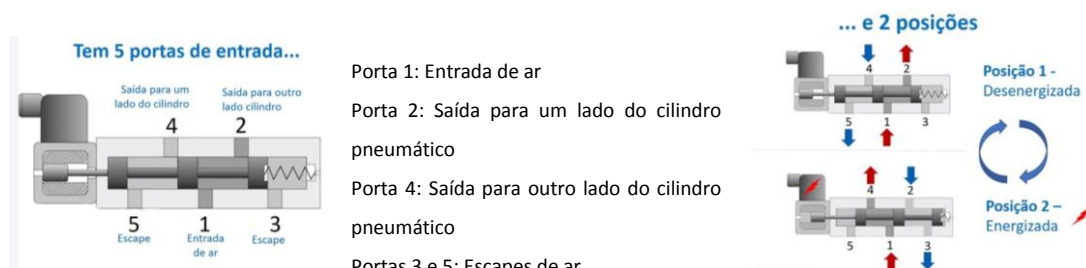
Figura 39: Cilindro redondo CPC M20x1,5 Bosch.



Fonte: Bosch.

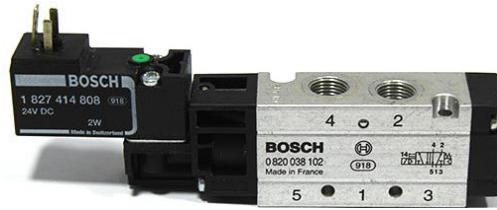
- Válvulas Pneumáticas 5/2 vias Simples Solenoide (Figura 41): A válvula solenoide pneumática 5/2 é a válvula mais comum em um circuito pneumático para atuar um cilindro pneumático de dupla ação. O esquemático desse tipo de válvula é detalhado na Figura 40.

Figura 40: Esquemático de vias e posições da válvula 5/2 vias.



Fonte: Mtibrasil.

Figura 41: Válvula Bosch Pneumática 5/2 vias de Simple Solenoide 24Vcc



Fonte: Bosch.

Para status de posição dos cilindros, do braço robótico e a identificação de peças metálicas para seleção, são utilizados sensores indutivos (Figura 42).

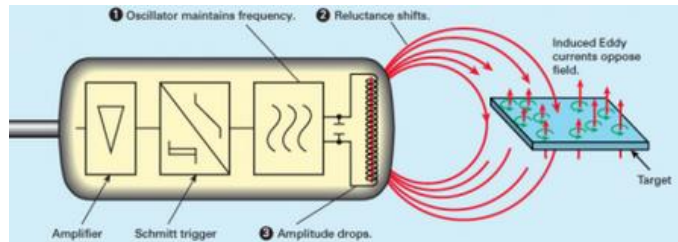
Figura 42: Sick-IME08-04NPSZT0S Sensor indutivo com 4mm de alcance.



Fonte: Sick.

Os sensores indutivos têm a capacidade de detectar objetos metálicos em pequenas distâncias, definido como um sensor de proximidade. Como visto na Figura 43, o princípio de funcionamento do sensor indutivo se dá a partir de um campo eletromagnético variável que é gerado pelo circuito disparador em conjunto com um amplificador (Disparador de Schmitt) em conjunto com a bobina na extremidade do dispositivo. Quando um material metálico penetra este campo, são induzidas pequenas correntes parasitas. Com a indução no metal, ocorre uma diminuição na energia do campo e, conseqüentemente, na amplitude do sinal proveniente do oscilador. Quando este sinal se torna muito baixo, o circuito de disparo percebe a mudança e altera a tensão de saída. Fornecendo uma resposta lógica, de nível alto ou baixo, que pode ser utilizada no controle do processo.

Figura 43: Esquema de funcionamento do sensor indutivo.



Fonte: Citisystems.

A identificação de peças não metálicas será realizada por um sensor capacitivo (Figura 44). Seu funcionamento se dá por meio de incidência de um campo elétrico que é gerado por cargas elétricas em sua face, formando assim um capacitor. É característica de todo capacitor o aumento de sua capacitância quando colocamos algum tipo de massa dielétrica (isolante) entre seus eletrodos (os eletrodos são onde são armazenadas as cargas), sendo assim, quando aproximamos qualquer material líquido ou sólido à face do sensor, ele atuará como massa dielétrica aumentando a capacitância. Por fim, o circuito eletrônico do sensor detecta essa variação de capacitância e atua sua saída, que pode ser um contato NA ou NF para corrente alternada ou contínua, um transistor ou ainda um sinal variável de tensão ou corrente (saída analógica).

Figura 44: Sensor capacitivo KI5208 KI-3015-FNKG/NI RT



Fonte: Ifm Electronic Sensores.

O comando do braço robótico, movimentados por cilindros pneumáticos, pilotados por válvulas 5/2, será realizada pelo Zelio Sr2 B201jd, mostrado na Figura 45. Este PLC que foi escolhido, pois apesar de ser um dos mais simples do mercado, é fabricado pela Schneider, um fabricante bem estabelecido no mercado de eletroeletrônicos industriais e automação, sendo um equipamento que atende todos pré-requisitos exigidos pelo ambiente e tecnologia industrial.

Além de permitir o controle de uma linha de processo de seleção e tratamento de peças com aproximadamente dez braços robóticos pneumáticos selecionadores de peças, bastando para isso o uso de módulos auxiliares de entrada e saída digital.

Figura 45: Zelio Sr2 B201jd - Módulo Lógico Display 20ES 100240 VCA.



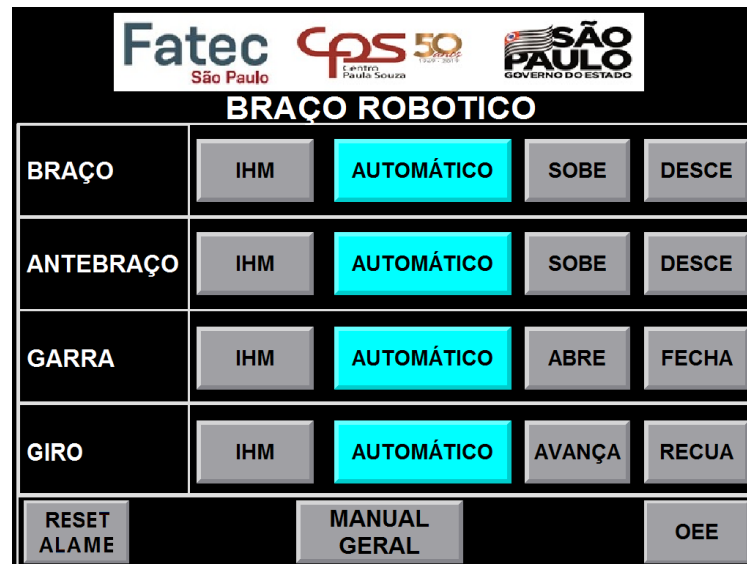
Fonte: Schneider Electric.

3.3. SUPERVISÓRIO

O supervisório (interface de monitoramento e comando) foi desenvolvido em um software de desenvolvimento de uso aberto chamado SCADABR, onde o layout da tela principal é visto na Figura 46). Neste supervisório tem-se:

- Tela de comando:
 - Manual Local: Habilita o movimento de cada articulação do braço robótico para que seja realizado pelo painel de comando local, ao pressionar o botão (físico) correspondente;
 - Manual Remoto: Executa o movimento de cada articulação do braço robótico, ao pressionar o botão correspondente no supervisório;
 - Auto: Habilita a sequência de acionamento do braço para seleção e entrega das peças automaticamente, a partir da identificação da peça (metálica ou não-metálica) com os sensores (indutivo ou capacitivo) e o uso dos sensores (indutivos) de posição dos cilindros pneumáticos para sequenciamento e monitoramento de condições do braço.

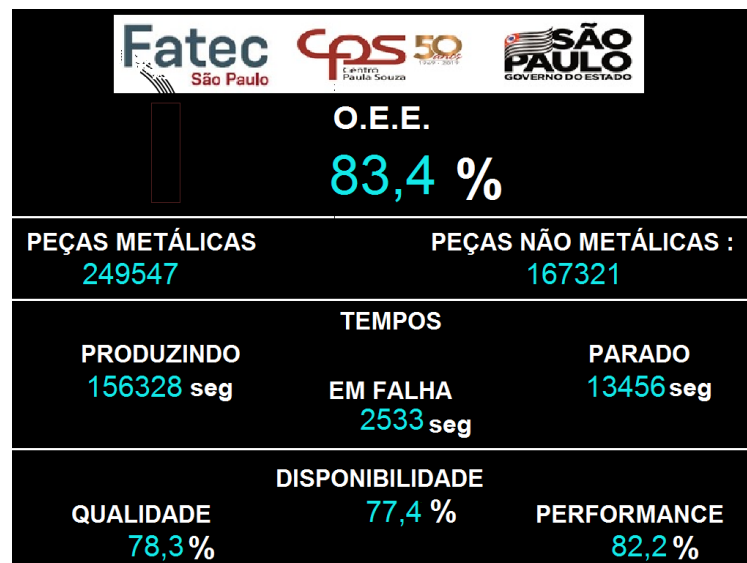
Figura 46: Tela de comandos manuais do Braço Robótico.



Fonte: Elaborada pelos Autores.

- Tela de Produtividade e OEE: Indicação e monitoramento de peças trabalhadas, de tempos (produzindo, parada e em falha), com isso o OEE (Figura 47).

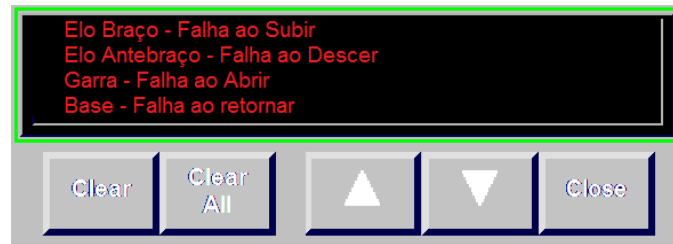
Figura 47: Tela de OEE do Braço Robótico.



Fonte: Elaborada pelos Autores.

- Tela de Falhas: Monitoramento e análise de alarmes de movimento e de falhas de seleção e entrega das peças (Figura 48).

Figura 48: Tela de Alarmes do Braço Robótico.



Fonte: Elaborada pelos Autores.

3.4. LÓGICA DE PROGRAMAÇÃO

Como citado anteriormente, para comando das válvulas eletropneumáticas foi utilizado o PLC Schneider - Zelio Sr2 B201jd, que usa como software de desenvolvimento da lógica de programação o Zelio Soft 2, com linguagem de programação ladder, semelhante a desenho de projetos elétricos e com funções de eletrônica digital, como portas AND, OR E NOT, além de funções específicas como TIMER, MOV, entre outras.

No APÊNDICE A é demonstrado e detalhada a estrutura do código fonte, baseada em orientada a objeto e desenvolvido em linguagem de programação Ladder.

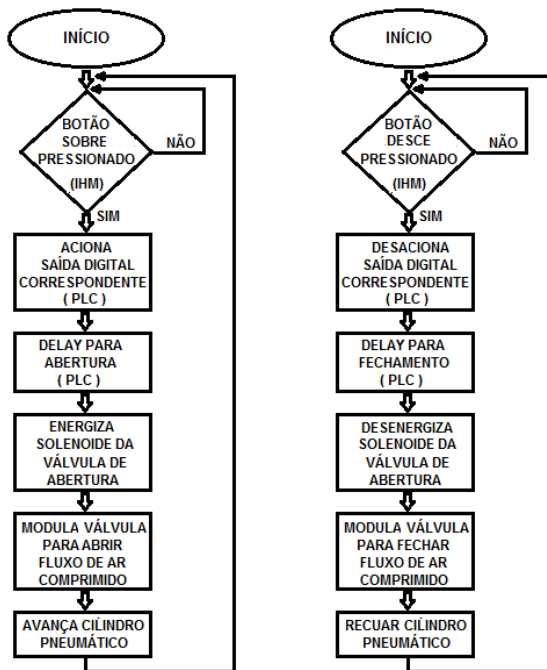
Para a simulação do circuito elétrico, eletropneumático e do código fonte do projeto foi utilizado o CADe_SIMU 4.0. Neste simulador foi utilizado um PLC semelhante ao que será utilizado, de um outro fabricante de mesmo porte e qualidade do que será utilizado no projeto. É possível simular os componentes do sistema eletropneumático com as mesmas características do sistema real, incluindo os acionamentos das articulações e da garra, atuando nos componentes de comando (botões) e visualizando a ação dos atuadores pneumáticos, observando o comportamento da lógica base em funcionamento. No APÊNDICE B é visto toda a evolução da simulação que permitiu uma melhor análise e desenvolvimento do código fonte, circuito elétrico, eletropneumático construído, que chegou a direcionar as melhorias mecânicas e estruturais do braço robótico.

3.4.1. COMANDO MANUAL

Foi idealizado a logica de programação para o comando manual das válvulas eletropneumáticas, com isso os cilindros pneumaticos efetuaram os movimentos dos elos do braço, conforme ilustrado nos fluxogramas (Figura 49 à Figura 51):

- Fluxograma da movimentação manual do braço e antebraço:

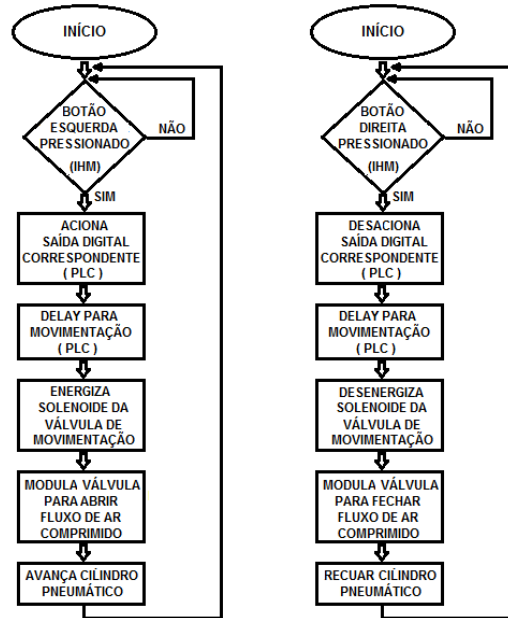
Figura 49: Fluxograma de funcionamento do braço e antebraço do Braço Robótico.



Fonte: Elaborada pelos Autores.

- Fluxograma da movimentação manual da base:

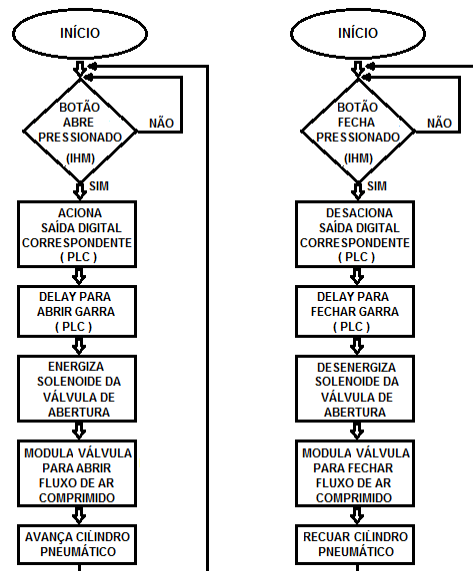
Figura 50: Fluxograma de funcionamento da base do Braço Robótico.



Fonte: Elaborada pelos Autores.

- Fluxograma da movimentação manual da base:

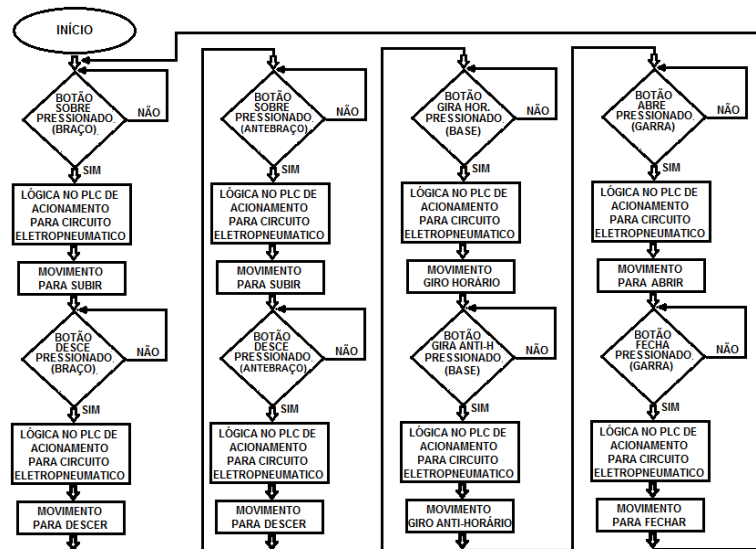
Figura 51: Fluxograma de funcionamento da garra do Braço Robótico.



Fonte: Elaborada pelos Autores.

A Figura 52 contém o fluxograma que ilustra o funcionamento do braço, considerando comandos e atuações manuais, em uma sequência sugerida de ações operacionais que executam todos os movimentos do braço:

Figura 52: Fluxograma de comandos e acionamentos fundamentais do Braço.



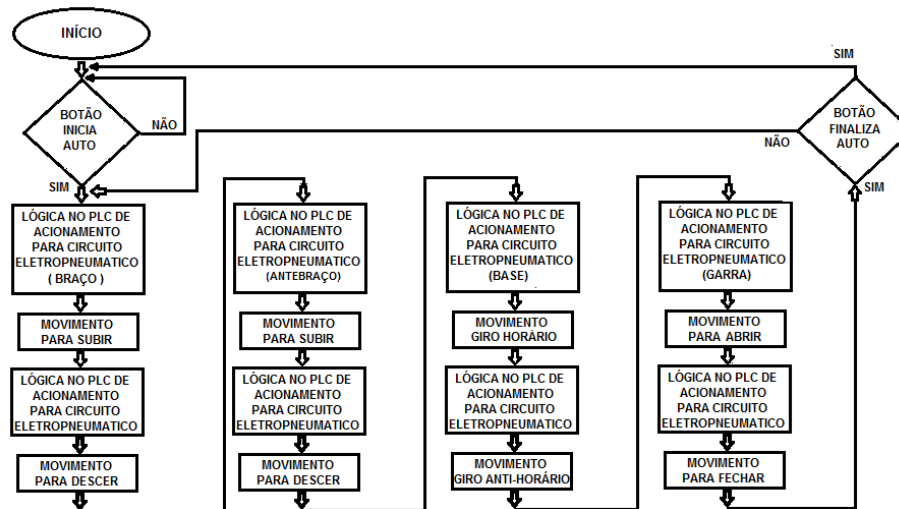
Fonte: Elaborada pelos Autores.

3.4.2. COMANDO AUTOMÁTICO

O acionamento automático do braço robótico foi idealizado para que seja executada uma sequência de ações operacionais que realize todos os movimentos do braço.

A sequência de acionamento é iniciada por um comando único, vinda do supervisorio e a partir de status de posição, fornecidos pelos sensores; recebida pelas entradas digitais interligadas fisicamente a eles. Com isso, o braço atenderá a uma sequência de acionamento das válvulas, de forma que executará os movimentos automaticamente de seleção de peça metálica ou não metálica e entrega os locais de tratamento de cada tipo. O sequenciamento automático é melhor detalhado a partir do fluxograma da Figura 53, além de estar aprofundado na simulação demonstrado no APÊNDICE B.

Figura 53: Fluxograma de comandos e acionamentos automático do braço robótico.



Fonte: Elaborada pelos Autores.

3.5. VALIDAÇÃO DO PROJETO

Para início dos testes físicos e prático de funcionamento do braço em manual foram realizadas a movimentação utilizando os comandos locais com as chaves On/Off, desta forma também o funcionamento das entradas e saídas do PLC.

Foi identificado que um dos comandos locais estava apresentando falha no fechamento para envio do sinal lógico alto (lógico 1, +24Vcc para entrada do PLC) e, portanto, a chave foi substituída.

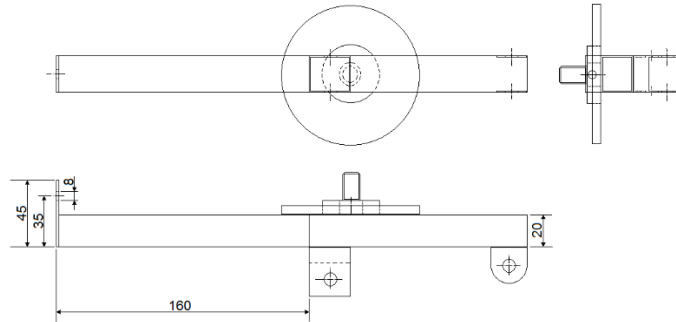
Devido a um pico de tensão na rede de alimentação elétrica, a solenoide de acionamento da válvula pneumática que atua o cilindro de movimentação do antebraço foi danificada, desta forma foi substituída por outra de mesmas características.

Os cilindros estão apresentando uma alta velocidade de atuação, ao ponto de perder precisão de movimento, esforço excessivo das juntas e rolamento da base, além de proporcionar uma força na garra grande ao ponto de danificar as peças movimentadas pelo braço. Para isso, foram instaladas válvulas reguladoras de vazão na entrada e saída de ar comprimido dos cilindros pneumáticos para regulagem final da velocidade de avanço e recuo dos elos do braço.

No movimento de descida do braço e antebraço e na rotação do elo base foi identificado uma grande inconsistência e desalinhamento dos movimentos. Tornou-se necessário uma melhoria no elo base, acrescentando um tubo quadrado do mesmo material do usado no elo

base, com uma chapa soldada na extremidade desse tubo onde foi fixado um rolamento que, ao mesmo tempo, apoia o braço para um movimento de descida mais estável e melhora o movimento de giro. Essa melhoria é detalhada na Figura 54.

Figura 54: Elo base com suporte do elo braço e do cilindro do elo braço com o apoio de equilíbrio (escala em milímetros).

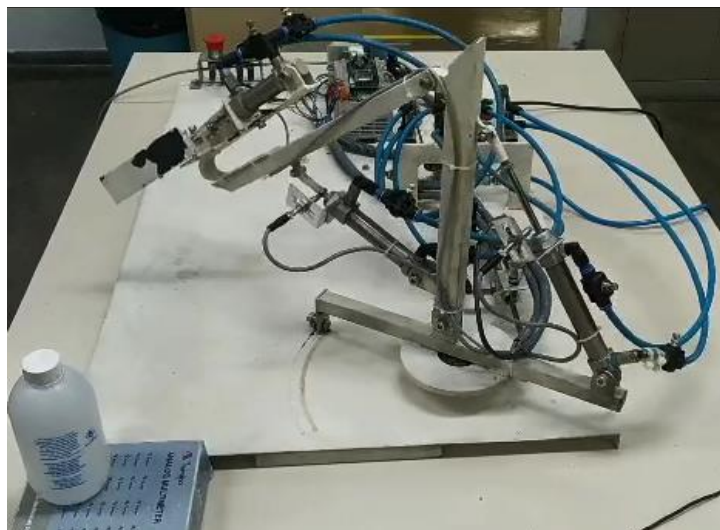


Fonte: Elaborada pelos Autores.

Com o funcionamento dos I/Os, sensores ajustados e velocidade de acionamento dos cilindros regulada, foi feito o teste funcional do sequenciamento automático, demonstrado nas Figura 55 à 67.

- a) A peça é posicionada na área de recebimento;

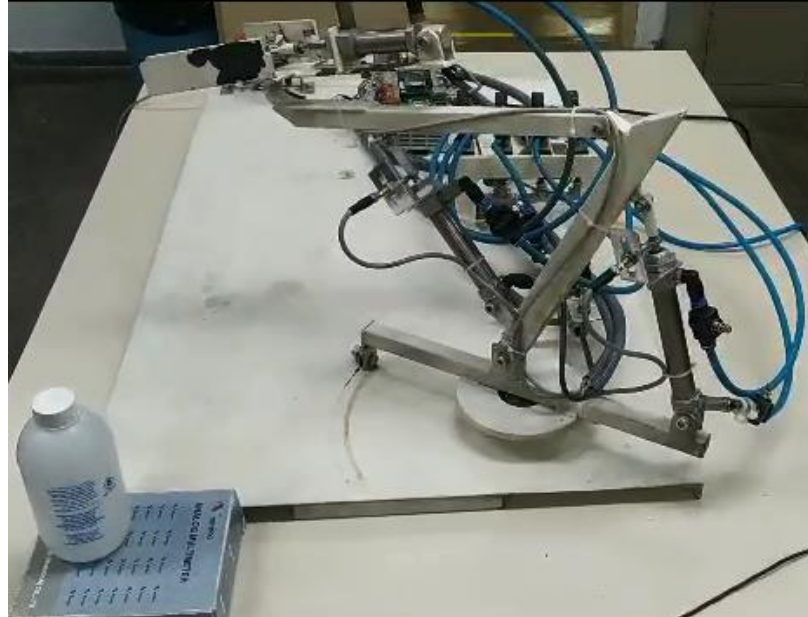
Figura 55: Peça na posição de recebimento.



Fonte: Elaborada pelos Autores.

- b) O elo antebraço sobe com a garra aberta;

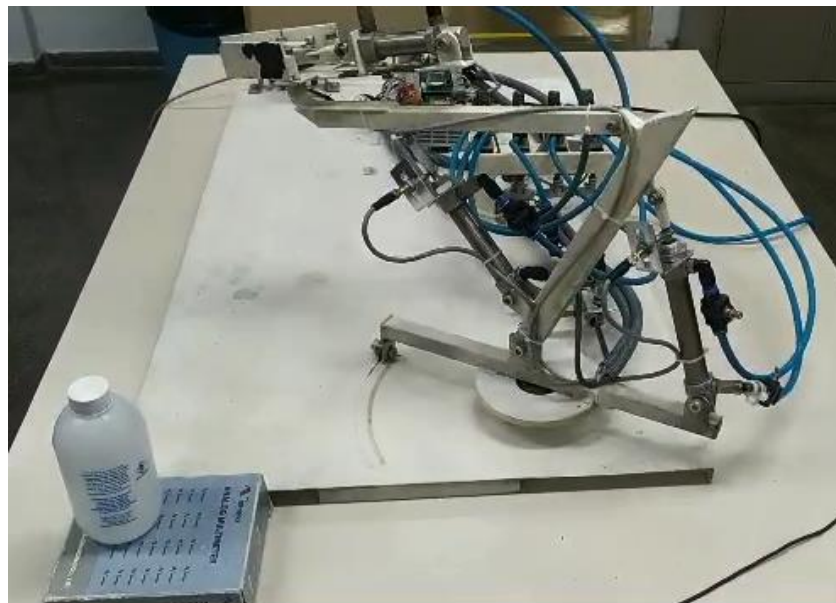
Figura 56: Antebraço levantado na posição inicial.



Fonte: Elaborada pelos Autores.

- c) A garra é fechada;

Figura 57: Garra fechada na posição inicial.



Fonte: Elaborada pelos Autores.

- d) O elo base gira até a posição da peça;

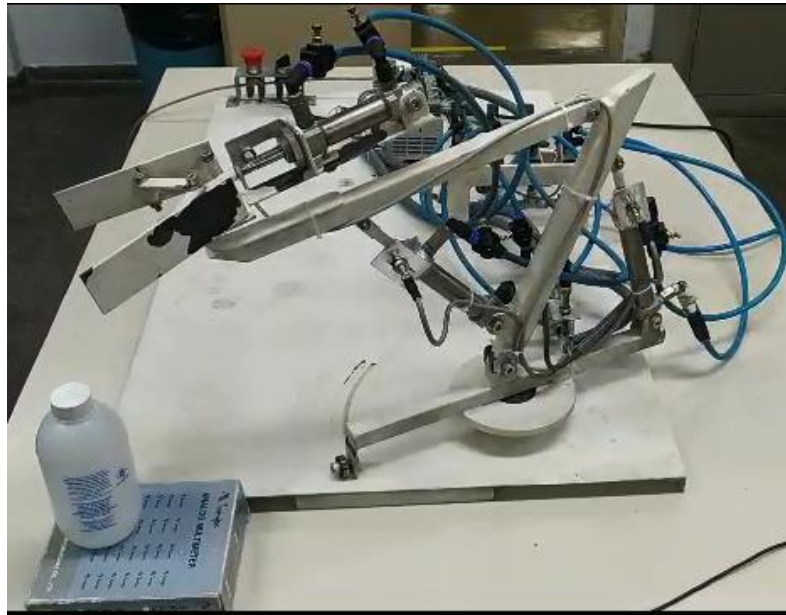
Figura 58: Braço na posição de retirada da peça.



Fonte: Elaborada pelos Autores.

- e) A garra é aberta;

Figura 59: Garra aberta na posição de retirada da peça.



Fonte: Elaborada pelos Autores.

- f) O elo antebraço desce, de forma que a garra fique na posição da peça;

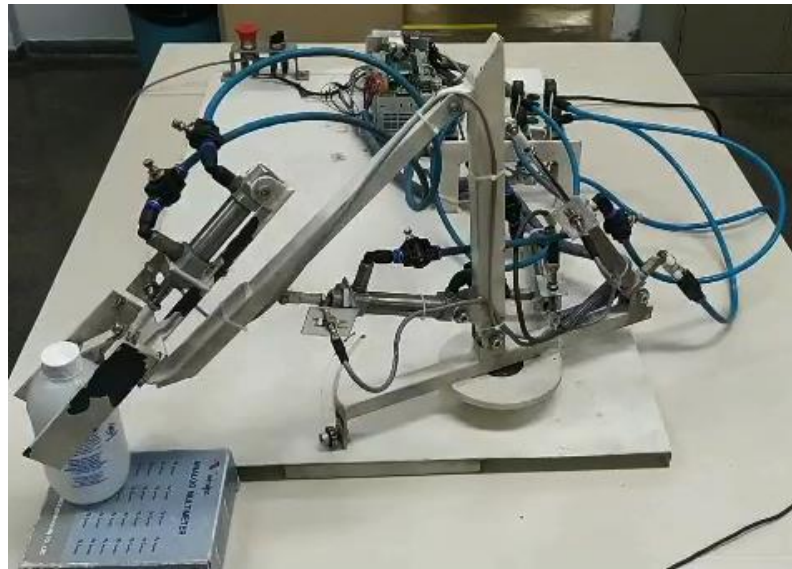
Figura 60: Antebraço abaixado, posicionando a garra para retirada da peça.



Fonte: Elaborada pelos Autores.

- g) A garra fecha, pegando a peça;

Figura 61: Peça pega pela garra.



Fonte: Elaborada pelos Autores.

h) O elo antebraço sobe;

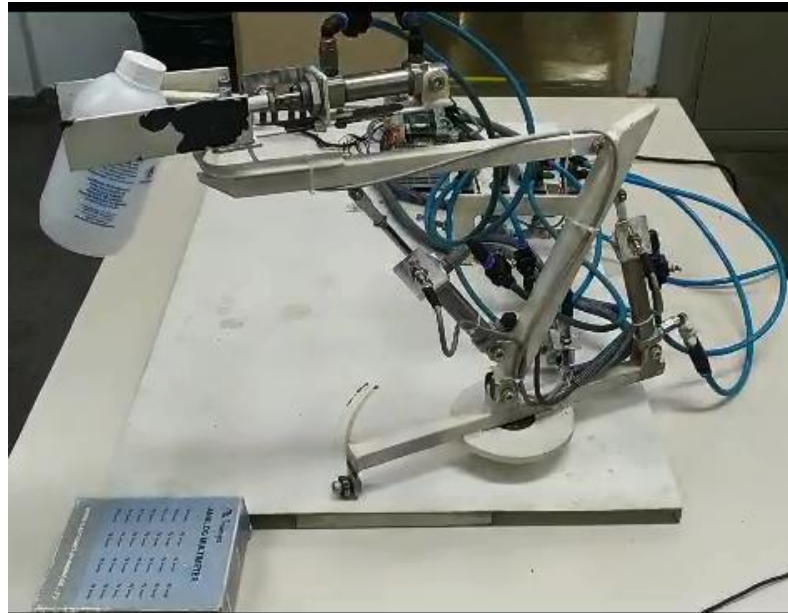
Figura 62: Antebraço erguido com a peça.



Fonte: Elaborada pelos Autores.

i) O elo braço sobe;

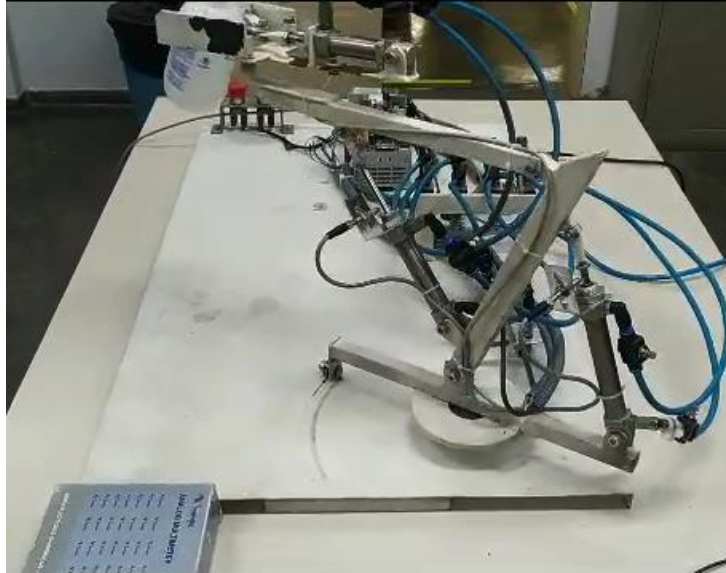
Figura 63: Braço erguido com a peça.



Fonte: Elaborada pelos Autores.

- j) A base gira parando na posição de entrega da peça;

Figura 64: Braço na posição de entrega da peça.



Fonte: Elaborada pelos Autores.

- k) O elo braço desce;

Figura 65: Braço abaixado para entrega da peça.



Fonte: Elaborada pelos Autores.

- l) O elo antebraço desce;

Figura 66: Antebraço abaixado para entrega da peça.



Fonte: Elaborada pelos Autores.

- m) A garra é aberta, entregando a peça para próximos trabalhos.

Figura 67: Garra aberta, peça entregue.



Fonte: Elaborada pelos Autores.

Esses movimentos são identificados pelos sensores e são registrados, armazenados pelo sistema e monitorados pelo supervisor. Os dados são utilizados para análise de falhas/erro, rendimento, produtividade e análise do OEE.

No funcionamento automático foram necessários ajustes de posicionamento dos sensores, devido falhas de sequenciamento por erros na detecção da posição de avanço dos cilindros de giro da base e do elo antebraço.

Na execução da sequência de acionamento automático verificou-se que o braço robótico pneumático é capaz de identificar a peça no ponto de origem, se é metálica ou não, com o uso dos sensores capacitivo e indutivo, retirando a partir do ponto inicial e transferindo para o ponto de entrega em um tempo que pode variar de 7 segundos a 12 segundos. Em um processo manual e visual, realizado por operador, o tempo de execução pode se igualar em alguns momentos, dependendo do operador, porém com uma margem de erro considerável e com necessidade de sistemas auxiliares de identificação de tipo de peça (metálica ou não) para diminuição de erros.

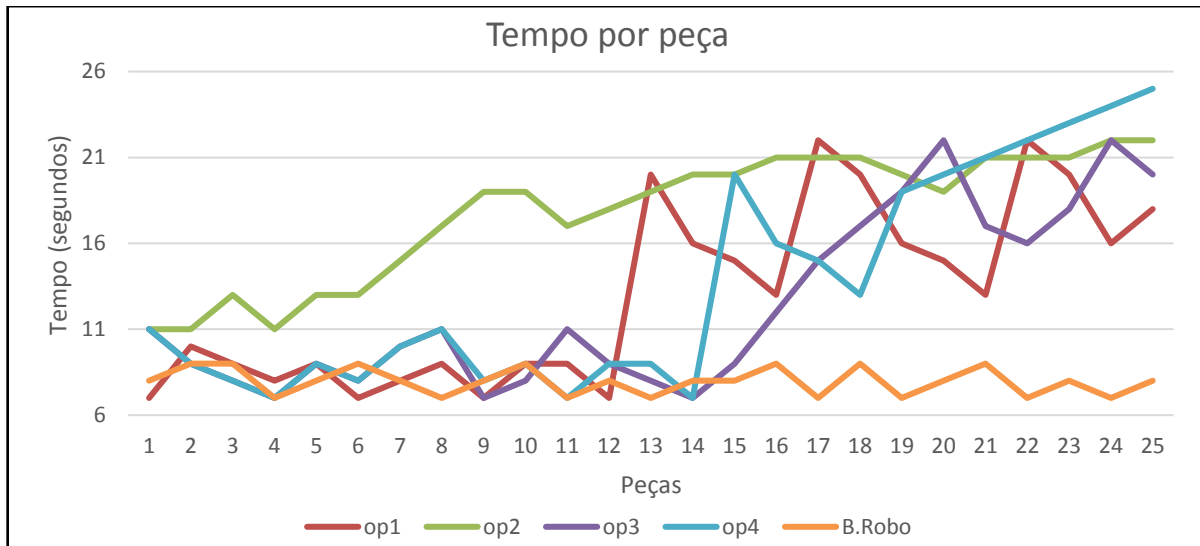
Para uma melhor análise de comparação, foi realizado testes de desempenho e produtividade com o apoio de quatro pessoas com idades que variam de 22 a 65 anos, que executaram o ciclo de forma repetitiva (sem intervalo entre peças), equivalente ao executado pelo braço robótico pneumático, que consiste basicamente em pegar uma peça em um ponto inicial, colocar em um lugar com sensores indutivos para identificar se é metálica e movimentar até o local de entrega.

Características dos participantes do experimento:

- Op1: Homem, 45 anos, 1,85m e 135 Kg,
- Op2: Mulher, 65 anos, 1,65m e 75 Kg,
- Op3: Homem, 42 anos, 1,87m e 90Kg;
- Op4: Mulher, 22 anos, 1,67m e 75Kg.

A Figura 68 apresenta o gráfico onde é observado a análise do tempo de execução em relação a peça trabalhada.

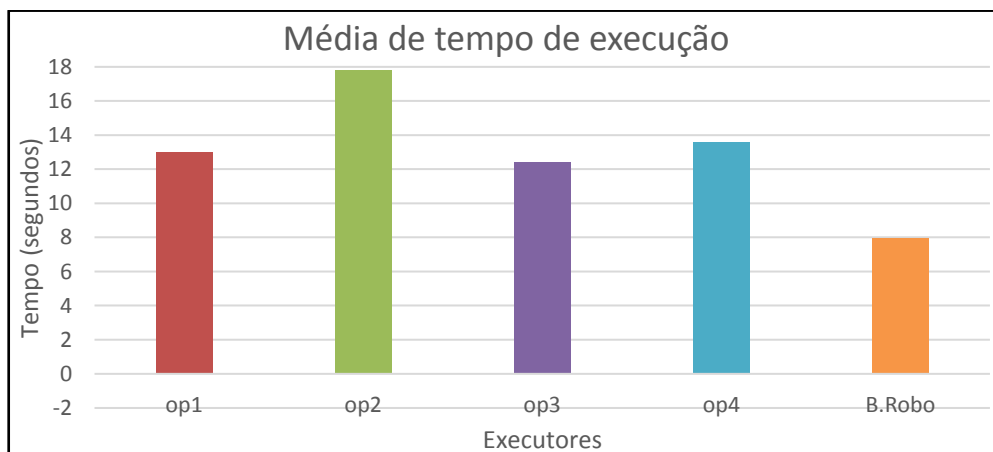
Figura 68: Gráfico comparativo entre peças trabalhadas e tempo de execução do processo.



Fonte: Elaborada pelos Autores.

Neste gráfico é possível verificar que a maior parte dos operadores mantiveram um tempo estável de tempo de execução semelhante ao tempo de execução do braço robótico. Porém, à medida que aumentava a quantidade de peças trabalhadas esse tempo foi aumentando consideravelmente, enquanto o braço robótico manteve uma constância em seu tempo com uma pequena margem de variação. Como é observado no gráfico da Figura 69, que demonstra a média de tempo de execução dos operadores e do braço robótico.

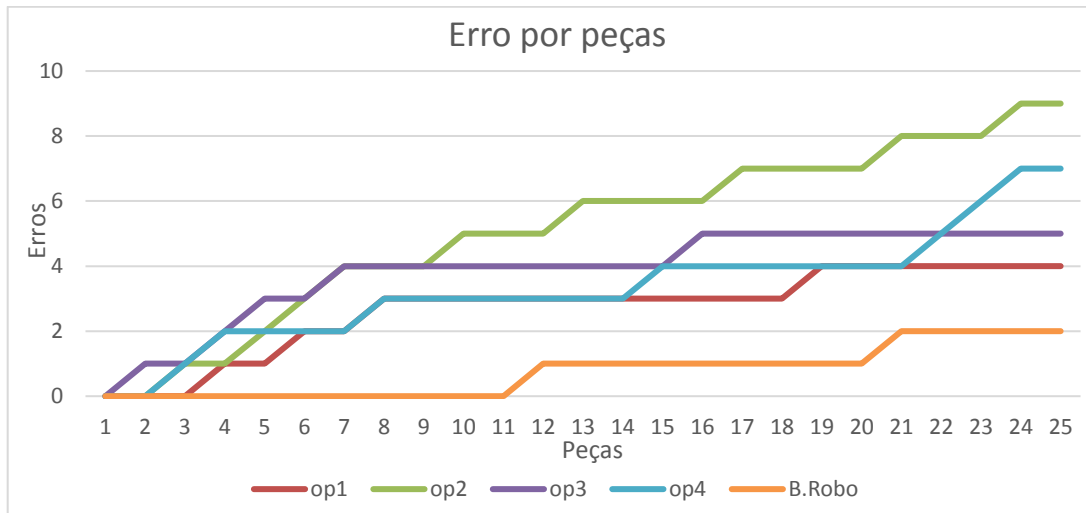
Figura 69: Gráfico de média de tempo de execução do processo de seleção de peças.



Fonte: Elaborada pelos Autores.

Um fato importante, também analisado neste teste de eficiência é a quantidade de erros durante a execução do processo de seleção de peças, observado analisando os dados do gráfico na Figura 70.

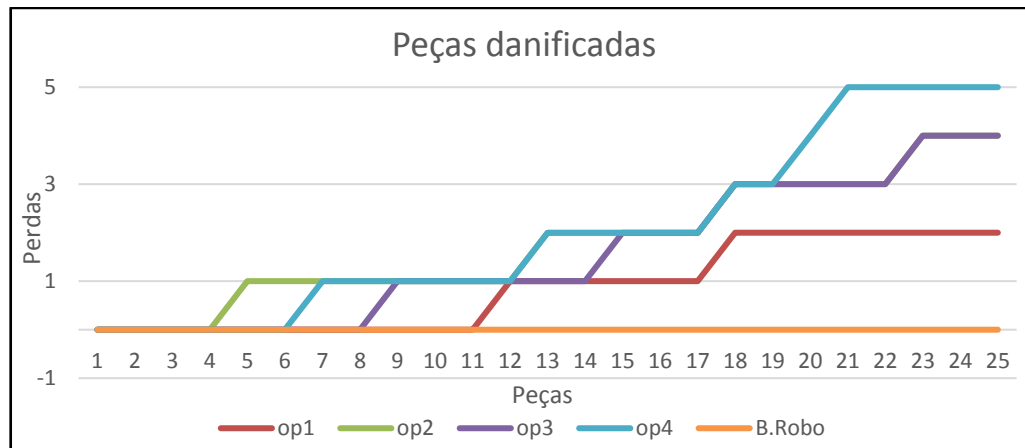
Figura 70: Gráfico do crescimento de erro na execução do processo de seleção de peças.



Fonte: Elaborada pelos Autores.

É possível verificar que à medida que aumenta a quantidade de peças trabalhadas, os erros acontecem com uma maior frequência, sendo o braço robótico mais eficaz, não atingindo mais de dois erros após ter trabalhado as vinte e cinco peças. Desses erros ocorridos, é visto no gráfico da Figura 71, que nenhuma das peças trabalhadas pelo braço robótico apresentou danos e com isso perdas no processo, demonstrando ainda mais a eficiência no processo de seleção de peças.

Figura 71: Gráfico de peças danificadas no processo de seleção.



Fonte: Elaborada pelos Autores.

Na Tabela 4 é visto a comparação com o EFORT ER10-3-900, um cobot de mercado, com o braço robótico pneumático do projeto.

Tabela 4: Comparação EFORT ER10-3-900 com braço robótico pneumático.

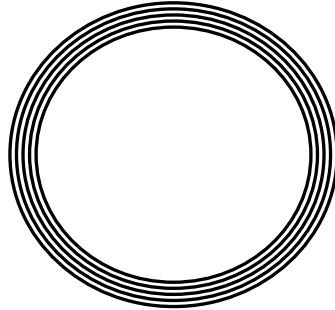
	ER10-3-900	Braço Robótico Pneumático
Tipo	Articulado	Articulado
Número de Eixo	Três	Dois
Função	Manipulação	Manipulação
Montagem	No teto ou base no chão ou linha de produção	Base no chão ou linha de produção
Área de aplicação	Industria plástica	Seleção de peças
Carga Máxima	10 Kg	3 Kg
Alcance	860 mm	420 mm
Repetibilidade	0,05 mm	3 mm
Peso	30 kg	10 kg
Controle	CPU e módulos dedicados para controle de servo motores de alta precisão.	Arduino ou modelos básicos de PLC com módulos de entradas e saídas digitais.
Acionamento	Servo motores de alta precisão.	Cilindros pneumáticos por válvulas eletropneumáticas.
Interface	IHM dedicada e direcionada ao sistema.	Baseada em Visual basic de nível intermediário.

Fonte: Efort Intelligent Equipment

Para análise da repetibilidade do braço robótico pneumático selecionador, foi desenvolvido um gabarito de teste constituído de cinco círculos, a partir do diâmetro da peça metálica movimentada por ele, desenhados no exato local onde a peça foi entregue no final da sequência de trabalho. Os diâmetros dos círculos têm o aumento de dois milímetros, de forma

que entre os ciclos se formou uma lacuna de um milímetro de diâmetro, como visto na Figura 72.

Figura 72: Gabarito de teste para análise de repetibilidade.



Fonte: Elaborada pelos Autores.

Com trinta repetições da sequência de trabalho, o deslocamento da peça na entrega, em cima do gabarito, alcançou uma variação máxima de três milímetros, constatando esse como o valor de repetibilidade do braço robótico pneumático.

Com essa comparação percebe-se que o braço robótico desenvolvido possui limitações em itens exigidos pelas grandes indústrias, como repetibilidade e alcance. Porém, em uma análise comparativa do custo-benefício na montagem e aplicação indica que o braço desenvolvido neste trabalho atenderia com eficácia o fim proposto de selecionar e manipular peças.

Vale ressaltar que os custos do protótipo não alcançaram o valor de R\$1.500, considerando que, por exemplo o PLC escolhido tem o valor aproximado de R\$600, com a adição de mais um módulo de dezesseis saídas digitais no valor de R\$150, poder-se-ia controlar mais quatro braços robóticos pneumáticos. Por outro lado, em pesquisas realizadas pelos autores não foi possível encontrar no mercado um cobot por menos de R\$8.000.

4. CONCLUSÃO

A construção mecânica, o desenvolvimento, simulação do código fonte, a montagem e interligações elétricas e por fim, todas as etapas de testes do braço robótico pneumático selecionador de peça, levou a obtenção de um protótipo com potencial para atender as exigências de linhas de produção de pequenas e médias empresas que demandam por seleção de peças, encontradas em grande parte do meio industrial, por não necessitar de uma estrutura tecnológica complexa.

Nesta visão, pode-se ressaltar que a instalação desse protótipo em uma linha se torna muito acessível, simples e de fácil adaptação, pois o painel de comando eletropneumático pode estar na base da estrutura do braço robótico ou adaptado em um pequeno painel existente por exemplo, do comando de esteiras e um ponto de alimentação de ar comprimido, comumente encontrado na indústria.

Com os dados colhidos nos testes e comparações com o ser humano e cobot compatível de mercado, é certo dizer que o braço robótico pneumático selecionador encontra seu caminho no mercado e com isso na indústria, por oferecer um custo benefício interessante, devido ao baixo investimento e a grande necessidade da indústria brasileira em melhorar sua performance e qualidade para competir com as multinacionais.

Em conclusão, o braço robótico pneumático pode contribuir para automação industrial, pois sua precisão, alinhada à facilidade de instalação e adaptação oferece uma solução acessível e de alto desempenho para pequenas e médias empresas, além disso representa um potencial de otimização, devido sua capacidade de realizar tarefas repetitivas de forma precisa e ágil, reduzindo tempo de produção da linha.

Para indústria brasileira, este protótipo pode ser um primeiro passo em direção a obtenção de uma vantagem competitiva, possibilitando que estas se posicionem de forma mais sólida diante da concorrência, abrindo assim caminho para Indústria 4.0, ao se integrar com sistemas de automação, bem como abrindo espaço para colaboração mais estreita entre seres humanos e robôs, onde cada um pode desempenhar suas habilidades específicas, resultando em uma força de trabalho mais eficiente e produtiva.

4.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com a finalização do projeto, é possível visualizar alguns trabalhos que podem complementar e melhorar o projeto:

- Um novo protótipo robótico, com a utilização cilindros pneumáticos e/ou hidráulicos de dupla ação para uma melhor precisão nos movimentos e maior robustez e manipulação de peças de pesos maiores.
- Desenvolver uma interface mais amigável.
- Desenvolver a construção de um robô manipulador tático, construindo uma base móvel, tipo esteira, para operações de exploração, reconhecimento e desarmamento de bombas.

5. REFERÊNCIAS

About Stäubli Group. Disponível em: <<https://www.staubli.com/br/en/corp.html>>. Acesso em: 21 maio 2023.

Abreu N.L. Disciplina: Robótica Aula 02: Conceitos Básicos - PDF Free Download. Disponível em: <<https://docplayer.com.br/72109776-Disciplina-robotica-aula-02-conceitos-basicos.html>>. Acesso em: 21 maio 2023.

ASSOBRAV.VW converterá Wolfsburg na maior fábrica de carros elétricos do mundo. Disponível em: <https://www.assobrav.com.br/noticias/noticias-importadas/vw-convertera-wolfsburg-na-maior-fabrica-de-carros-eletricos-do-mundo/>. Acesso em: 6 maio 2023.

Automação pneumática industrial. Disponível em: <<https://www.mtibrasil.com.br/>>. Acesso em: 21 maio 2023.

Bremen - Importadora de Equipamentos para Lubrificação. Disponível em: <<http://www.bremenimportadora.com.br/>>. Acesso em: 21 maio 2023.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA. Indústria 4.0 no Brasil: desafios e oportunidades na visão dos líderes empresariais. Brasília: CNI, 2020.

PEIXOTO, A. J. Internet das Coisas na Manufatura Industrial: uma ferramenta da Indústria 4.0 para interação dos processos – Rede RS Indústria 4.0. Disponível em: <<https://redeindustria40.com.br/internet-das-coisas-na-manufatura-industrial-uma-ferramenta-da-industria-4-0-para-interacao-dos-processos/>>. Acesso em: 21 maio 2023.

ER10-3-900 - Robô articulado by EFORT Intelligent Equipment Co., Ltd | DirectIndustry. Disponível em: <<https://www.directindustry.com/pt/prod/efort-intelligent-equipment-co-ltd/product-224567-2510793.html>>. Acesso em: 17 jun 2023.

FÁCIL, P. Parafuso Fácil: 1º E-commerce Especializado em Fixadores. Disponível em: <<https://www.parafusofacil.com.br/>>. Acesso em: 21 maio 2023.

Federação Internacional de Robótica. Relatório Executivo - World Robotics Industrial Robots 2021 [PDF]. Disponível em: <https://ifr.org/img/worldrobotics/Executive_Summary_WR_Industrial_Robots_2021.pdf>. Acesso em: 21 maio 2023.

Ferramentas manuais e ferramentas elétricas Pires Martins. Disponível em: <https://www.piresmartins.com.br/?utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_campaign=branding&gclid=CjwKCAjwgqejBhBAEiwAuWHioPtpTJ_m7eUoGpqPrCreLi-ttYgdle-5eUFarMrulwMajouCx5w50RoC3WQQAvD_BwE>. Acesso em: 21 maio 2023.

FortG Ferramentas. Disponível em: <<https://fortg.com.br/>>. Acesso em: 21 maio 2023.

GMBH, R. B. Ferramentas elétricas Bosch | Bosch Professional. Disponível em: <<https://www.bosch-professional.com/br/pt/>>. Acesso em: 21 maio 2023.

Industrial Intelligence 4.0_beyond automation. Disponível em: <<https://www.kuka.com/>>. Acesso em: 21 maio 2023.

LOPES, A. C. A. et al. Industry 4.0: a bibliometric study and systematic literature review. *International Journal of Production Research*, v. 56, n. 1-2, p. 849-876, 2018.

MARCONI, Marina de Andrade; LAKATOS, Eva Maria. *Fundamentos de metodologia científica*. 7. ed. São Paulo: Atlas, 2017.

MANTOVANI, Suely Cunha Amaro; OLIVEIRA, Rodrigo A. Nunes de. (2020). *Apostila: Tópicos Especiais em Engenharia Elétrica I: Introdução à Robótica*. São Paulo: Unesp.

OLIVEIRA, M. S. et al. A review of the impacts of the fourth industrial revolution in manufacturing industries. *International Journal of Production Research*, v. 58, n. 3, p. 691-710, 2020.

PEREIRA, Gustavo P. et al. Internet das Coisas: uma revisão sistemática da literatura. *Revista Produção Online*, v. 18, n. 4, p. 1189-1216, 2018.

PINTO, Rodrigo C.; SOUSA, Marcelo L.; MARTINS, Francisco R. An Industry 4.0 Maturity Model for Small and Medium-sized Enterprises. *International Journal of Production Research*, v. 57, n. 7, p. 2179-2194, 2019.

Poletto Metalúrgica. Disponível em:
<<https://www.polettometalurgica.com.br/produtos/mancais>>. Acesso em: 21 maio. 2023.

Saraiva J.P.L., Maranhão J.R.T. e Listo T.L.A. Sistema de controle de braço mecânico automatizado | Trabalhos feitos. Disponível em:
<<https://www.trabalhosfeitos.com/ensaios/Sistema-De-Controle-De-Bra%C3%A7o-Mec%C3%A2nico/86847.html>>. Acesso em: 21 maio 2023.

Schneider Electric Brasil | Especialista global em gerenciamento de energia e automação. Disponível em: <<https://www.se.com/br/pt/>>. Acesso em: 21 maio 2023.

SCHWAB, K. A quarta revolução industrial. São Paulo: Edipro, 2016.

Sensores de proximidade indutivos | SICK. Disponível em:
<https://www.sick.com/br/pt/sensores-de-proximidade-indutivos/c/g253054?q=:Def_Type:ProductFamily>. Acesso em: 21 maio 2023.

SIEMBRA, J. A. Automação Industrial: Internet das Coisas aplicada à Indústria. São Paulo: Novatec Editora, 2018.

SOARES, H. et al. SIMULADOR DE CINEMÁTICA DIRETA DE UM ROBÔ DIDÁTICO (ROBIX) EM AMBIENTE LABVIEW. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<http://congressos.ifal.edu.br/index.php/connepi/CONNEPI2010/paper/viewFile/898/621>>. Acesso em: 21 maio 2023.

Usiminas - Líder no Mercado de Aços Planos no Brasil. Disponível em: <<https://www.usiminas.com/>>. Acesso em: 21 maio 2023.

PERASSO, V. **O que é a 4ª revolução industrial - e como ela deve afetar nossas vidas.** Disponível em: <<https://www.bbc.com/portuguese/geral-37658309>>.

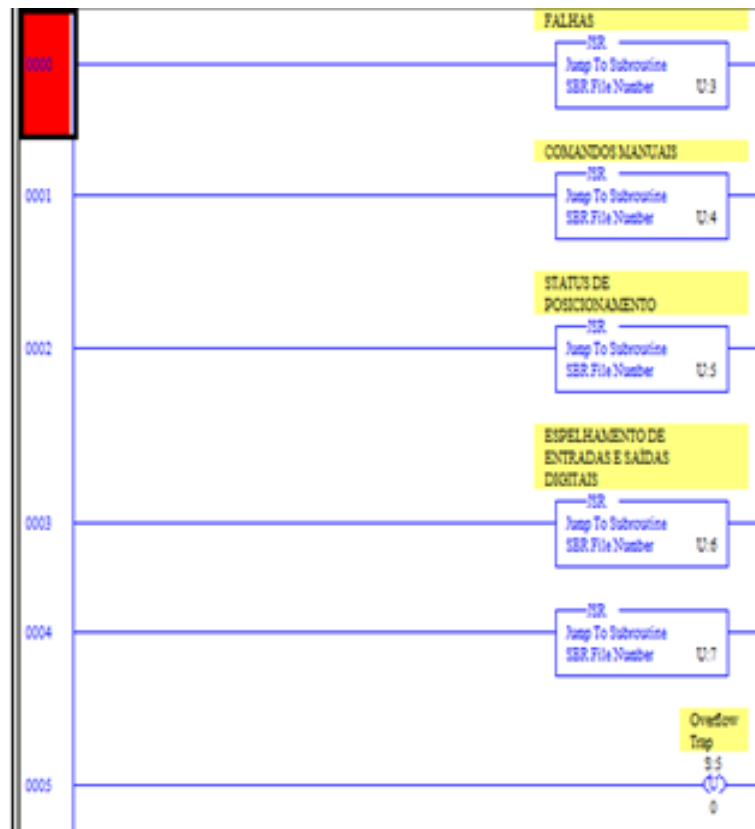
FONTES, S. G. **Automação e robotização de uma célula de produção de rotores de motores elétricos.** [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/171499/PFC-20152-GuilhermeFontes.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 2 jul. 2023.

APÊNDICE A: CÓDIGO FONTE

A estrutura das rotinas de lógicas segue o padrão descrito a seguir:

- Principal: Camada das rotinas secundárias, comandos e configurações iniciais do sistema.

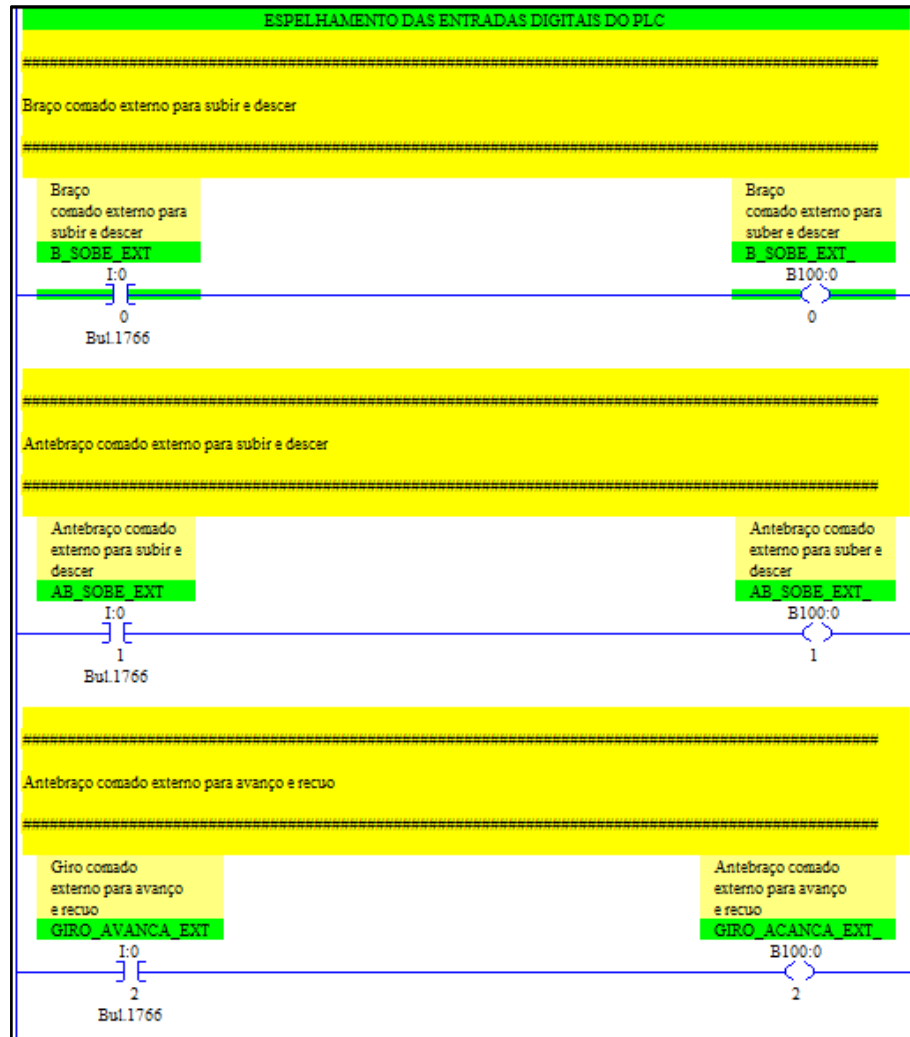
Figura 73: Código fonte – Rotina Principal



Fonte: Elaborada pelos Autores.

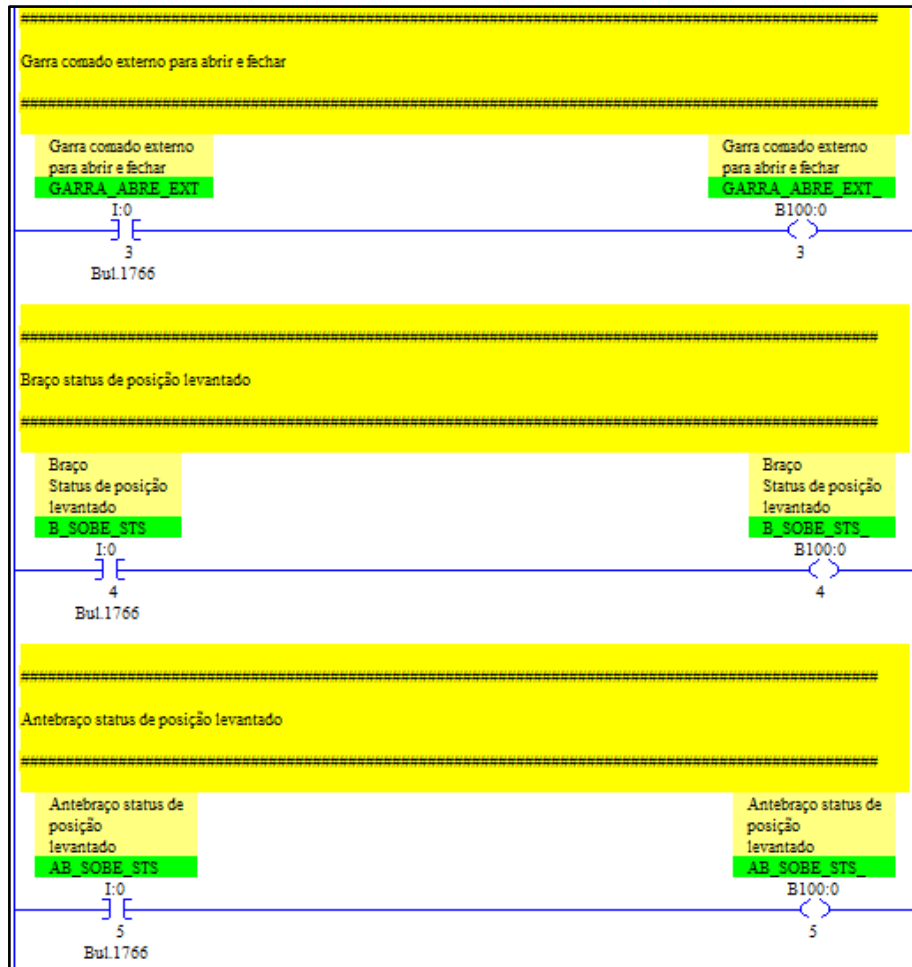
- Espelhamento: interface de comunicação entre microcontrolador e módulos internos de entrada e saída de informações digitais (zaro lógico com 0Vcc ou um lógico como 24Vcc), onde são realizada a leitura das entradas digitais (sensores e botões) e escrita nas saídas digitais (válvulas eletropneumáticas).

Figura 74: Código fonte – Rotina de Espelhamento de I/Os.



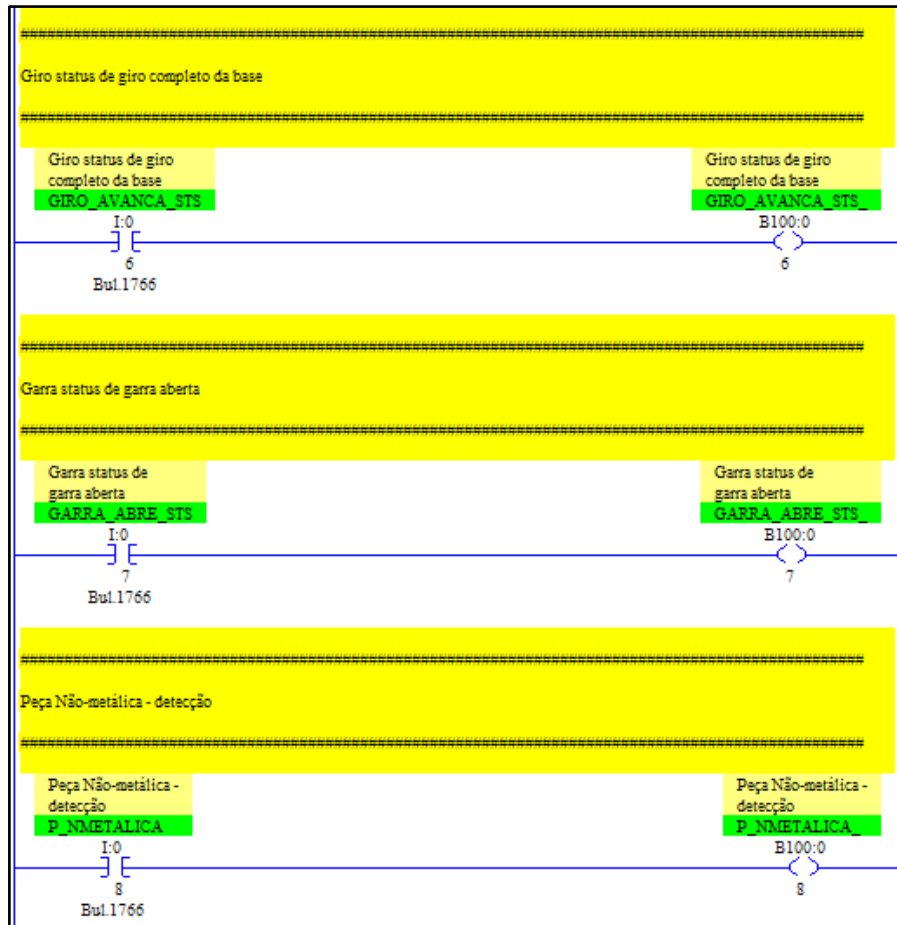
Fonte: Elaborada pelos Autores.

Figura 75: Código fonte – Rotina de Espelhamento de I/Os.



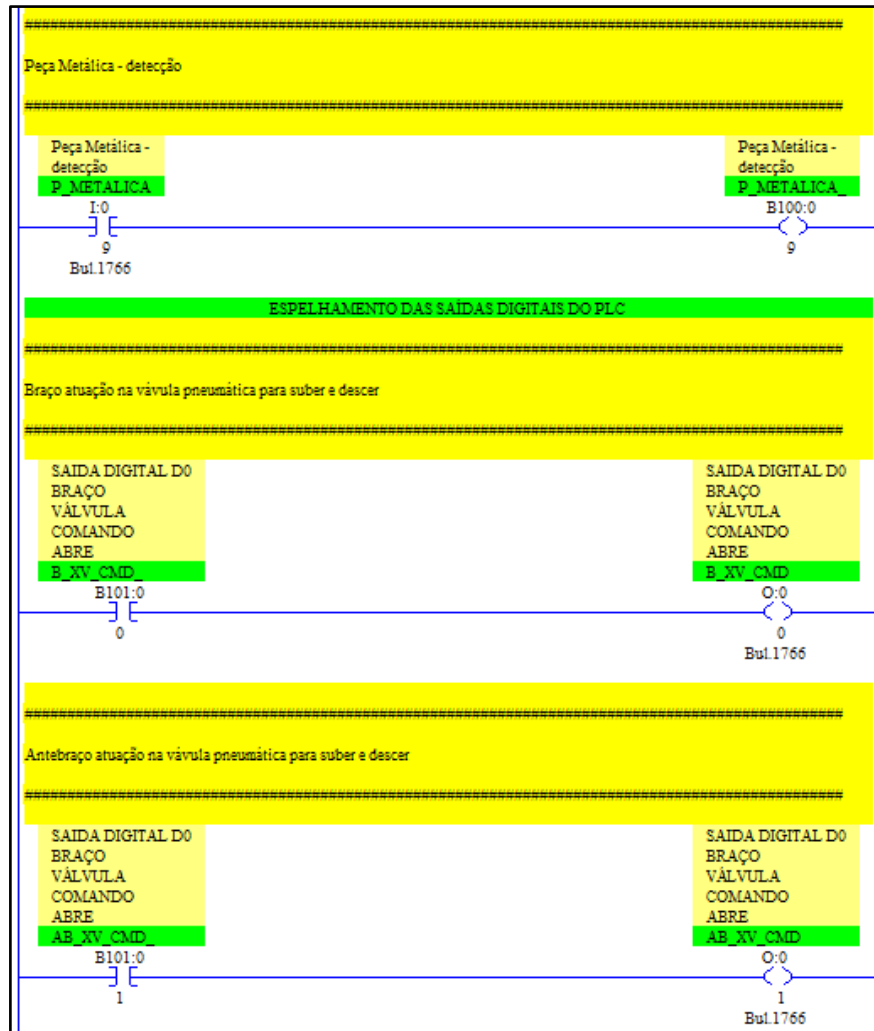
Fonte: Elaborada pelos Autores.

Figura 76: Código fonte – Rotina de Espelhamento de I/Os.



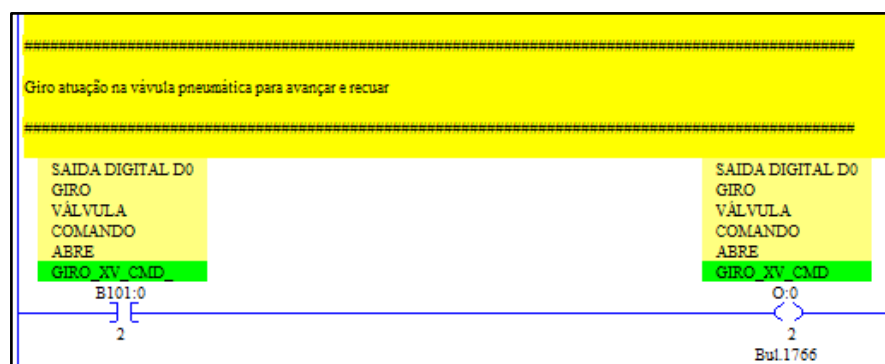
Fonte: Elaborada pelos Autores.

Figura 77: Código fonte – Rotina de Espelhamento de I/Os.



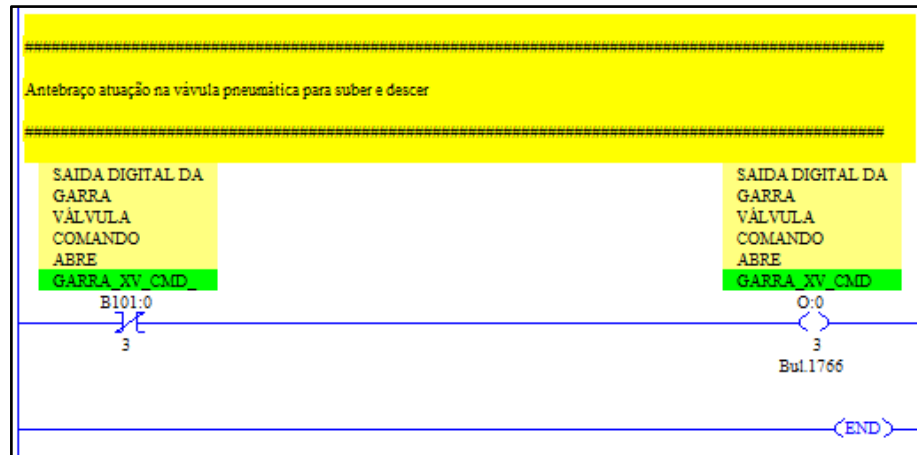
Fonte: Elaborada pelos Autores.

Figura 78: Código fonte – Rotina de Espelhamento de I/Os.



Fonte: Elaborada pelos Autores.

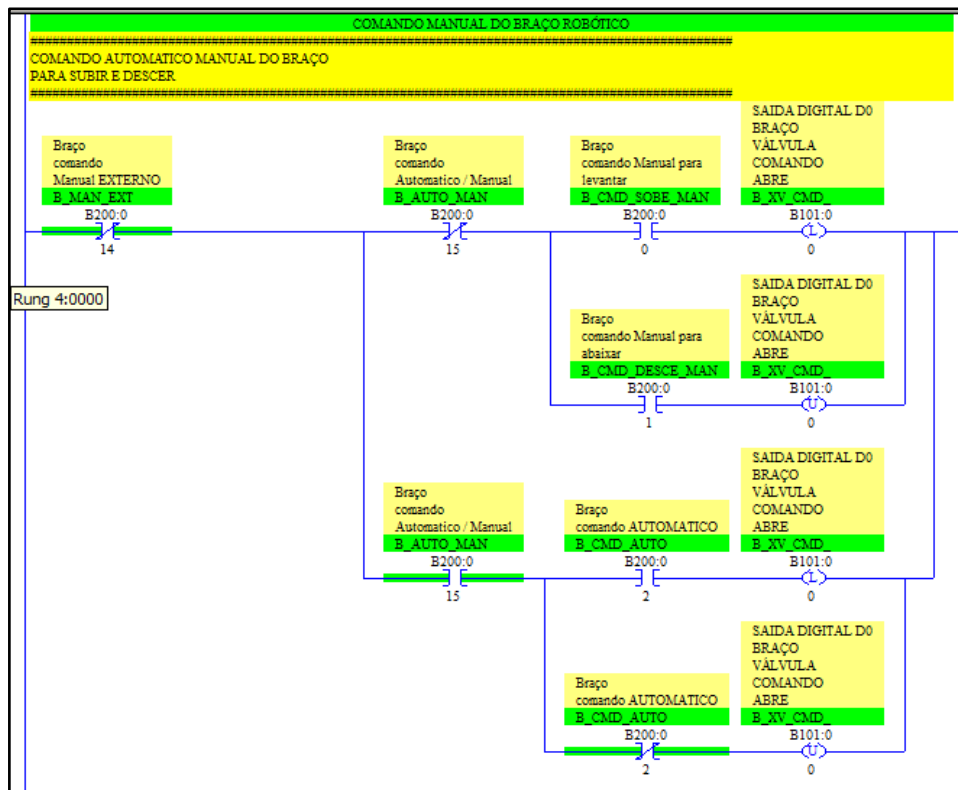
Figura 79: Código fonte – Rotina de Espelhamento de I/Os.



Fonte: Elaborada pelos Autores.

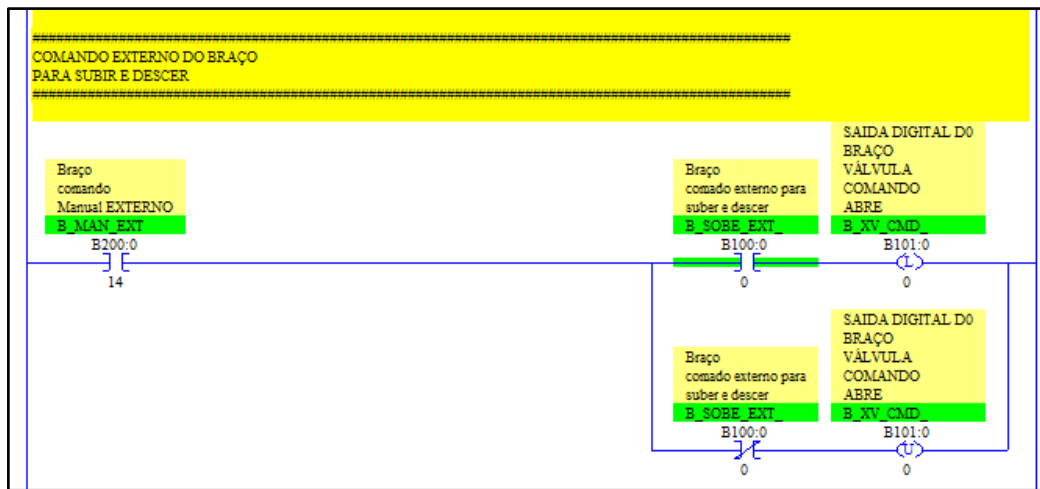
Acionamento manual: comandos vindos dos botões físicos do painel de comando manual local e dos computadores com os Supervisórios (interfaces de comando e supervisão), que farão o acionamento manual de cada elo do braço robótico.

Figura 80: Código fonte – Rotina de Acionamento Manual .



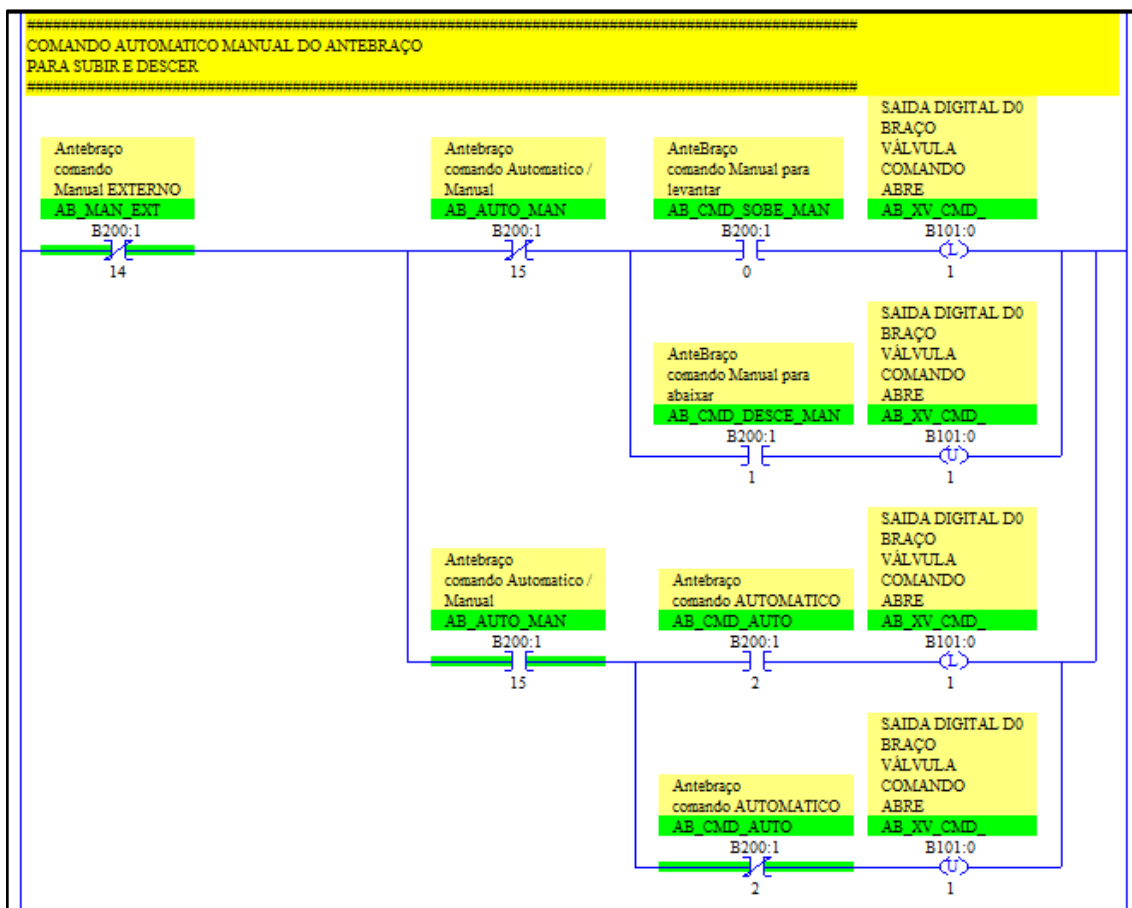
Fonte: Elaborada pelos Autores.

Figura 81: Código fonte – Rotina de Acionamento Manual .



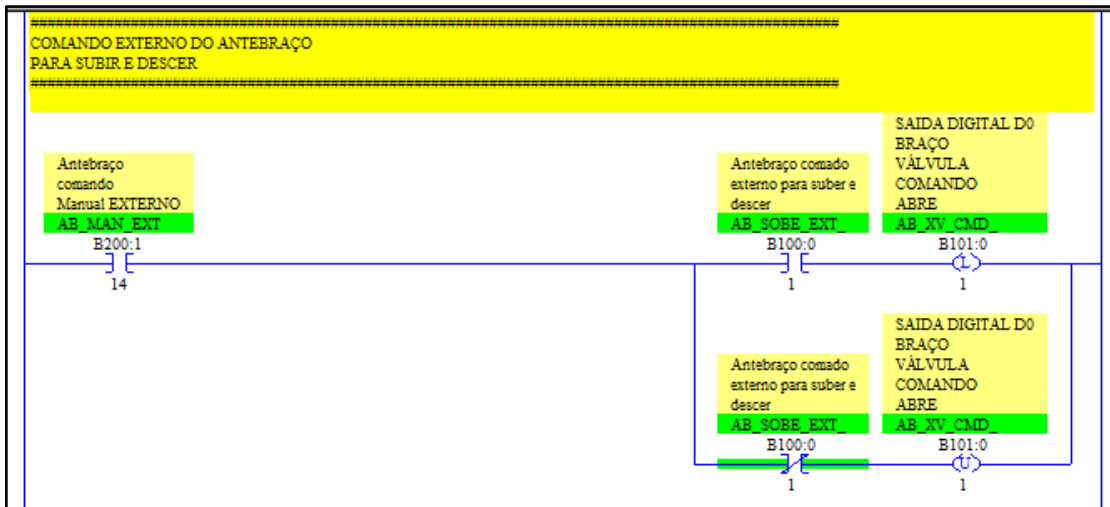
Fonte: Elaborada pelos Autores.

Figura 82: Código fonte – Rotina de Acionamento Manual.



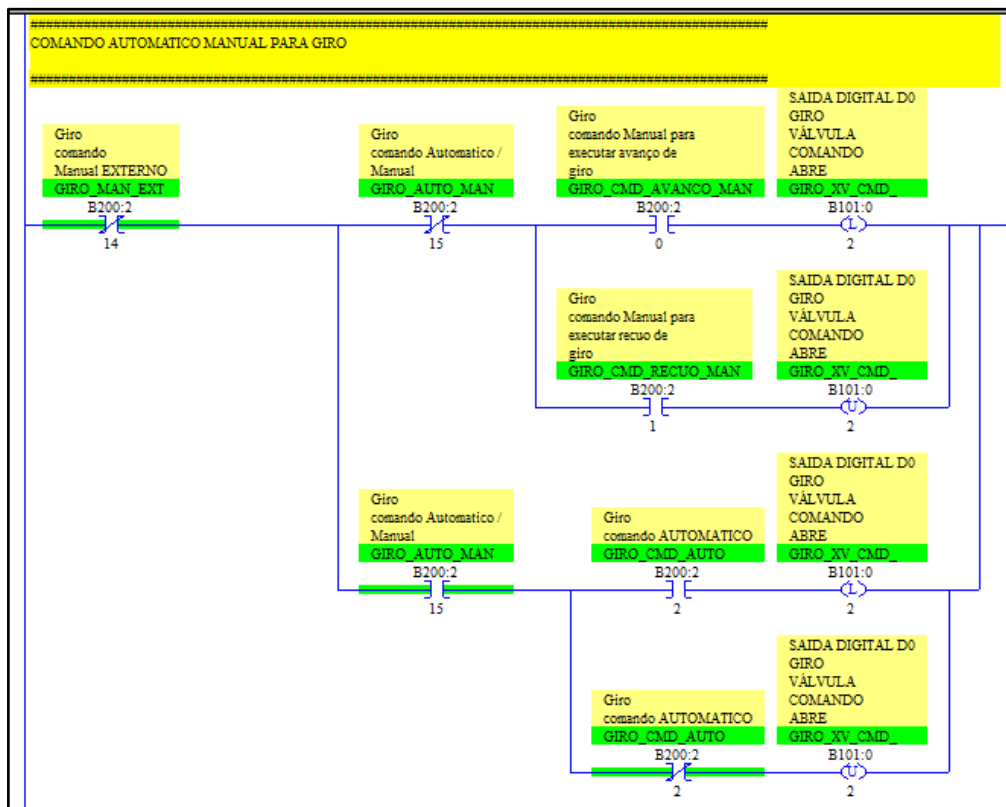
Fonte: Elaborada pelos Autores.

Figura 83: Código fonte – Rotina de Acionamento Manual .



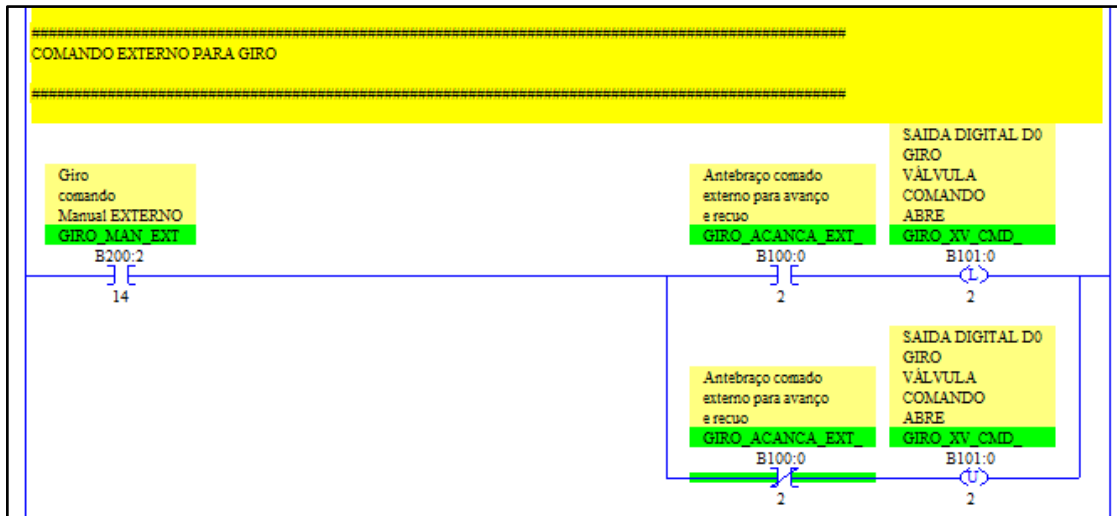
Fonte: Elaborada pelos Autores.

Figura 84: Código fonte – Rotina de Acionamento Manual .



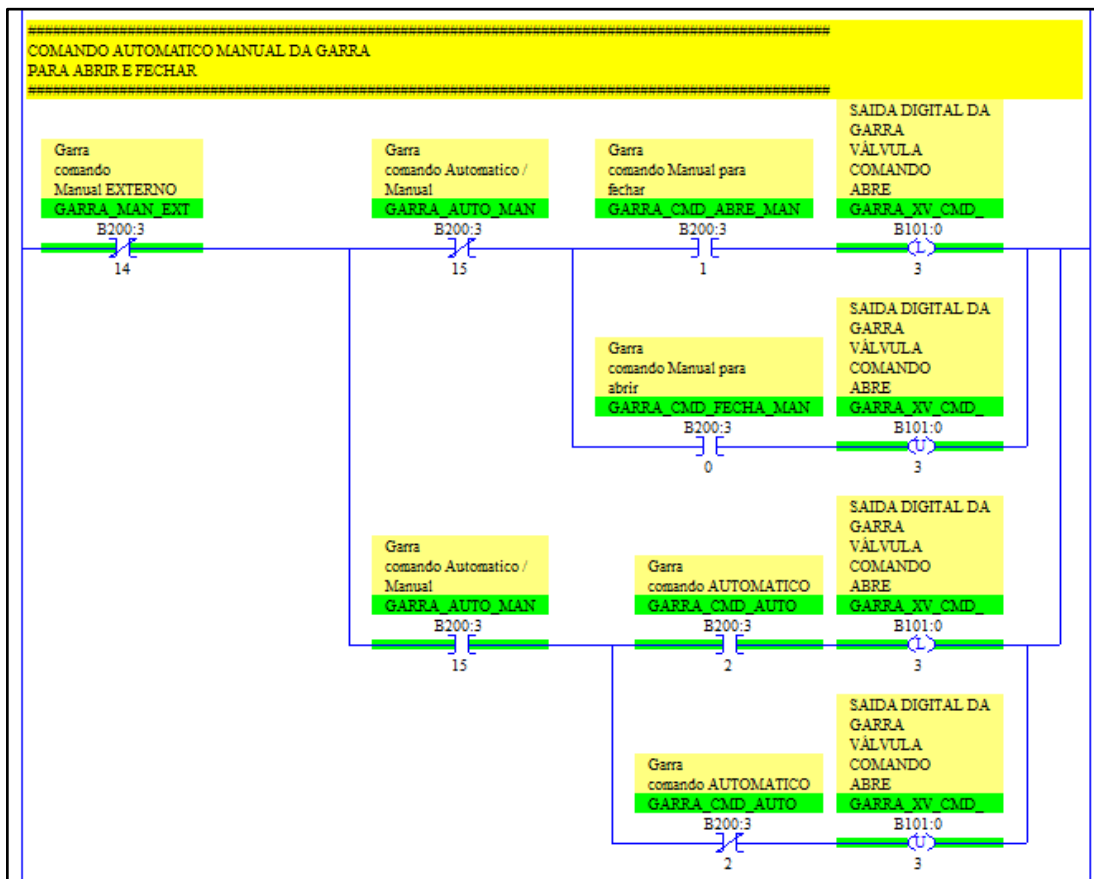
Fonte: Elaborada pelos Autores.

Figura 85: Código fonte – Rotina de Acionamento Manual.



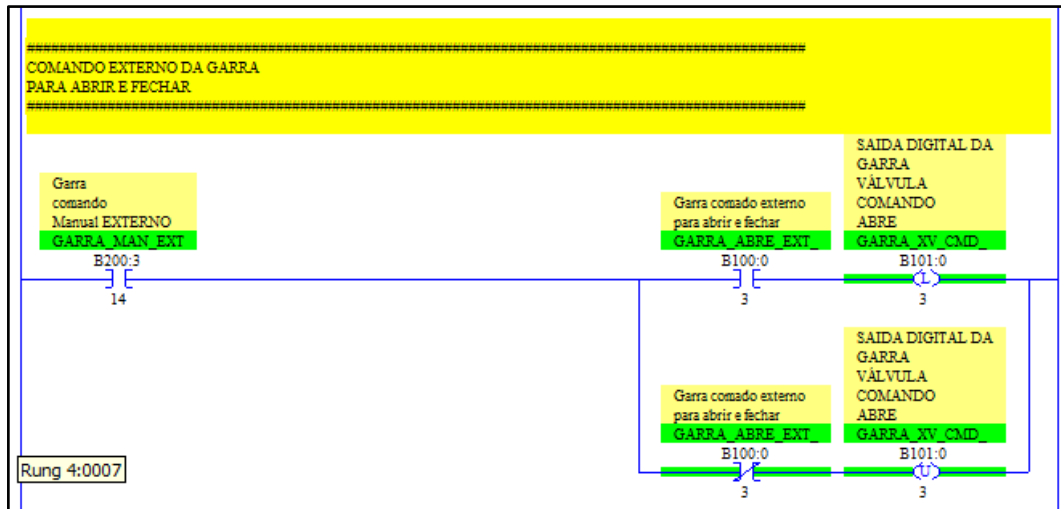
Fonte: Elaborada pelos Autores.

Figura 86: Código fonte – Rotina de Acionamento Manual .



Fonte: Elaborada pelos Autores.

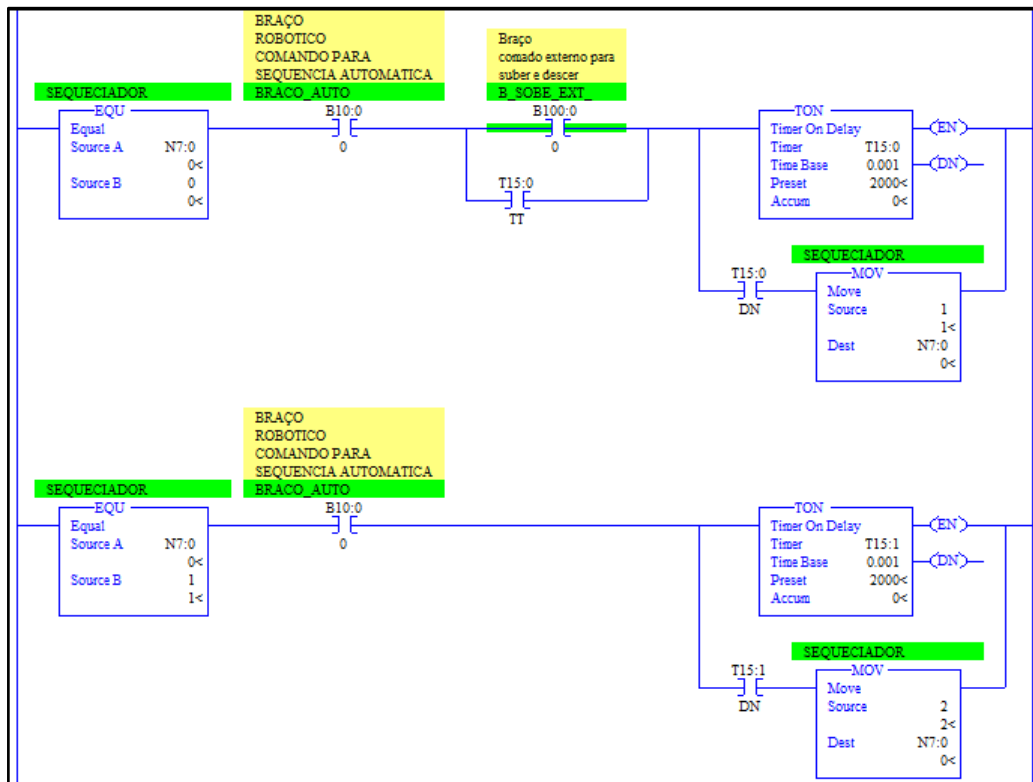
Figura 87: Código fonte – Rotina de Acionamento Manual .



Fonte: Elaborada pelos Autores.

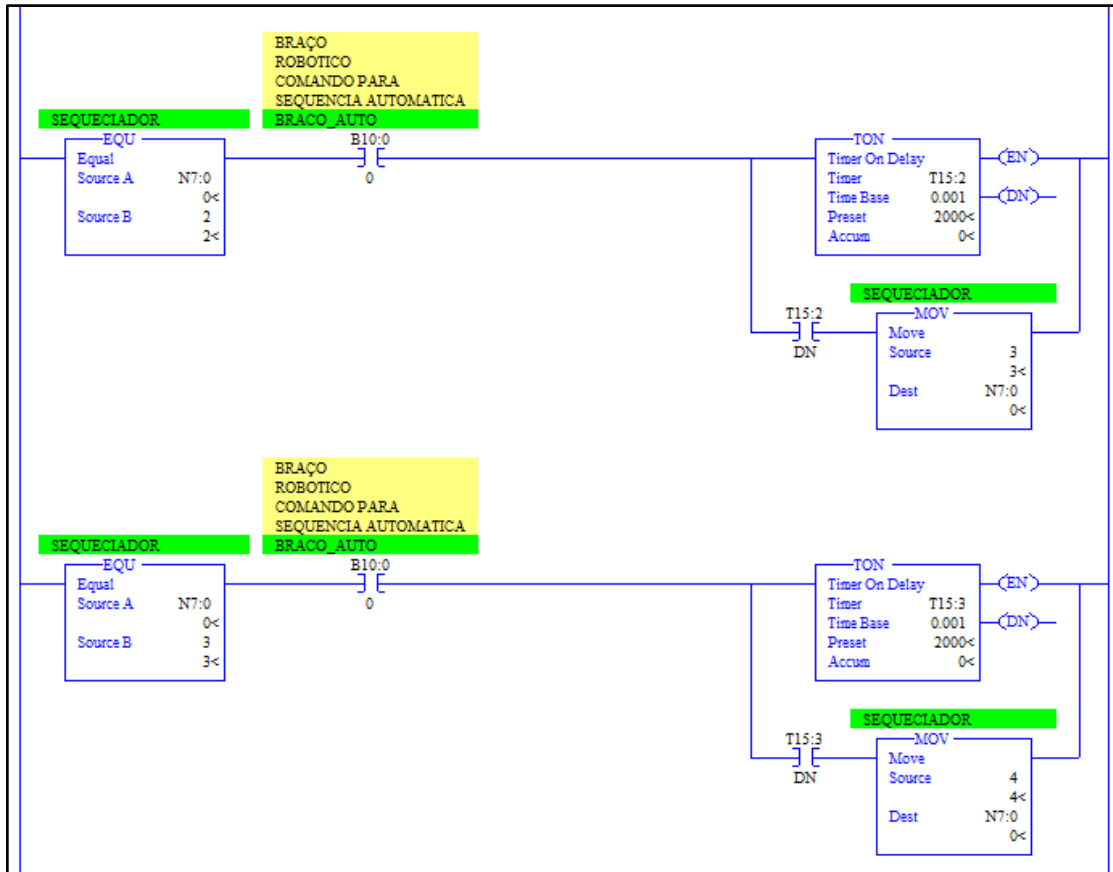
- Acionamento automático: sequenciamento dos movimentos automáticos realizados pelo braço robotico, a partir de comando vindo do Supervisório ou da chave física do comando local.

Figura 88: Código fonte – Rotina de Acionamento Automático .



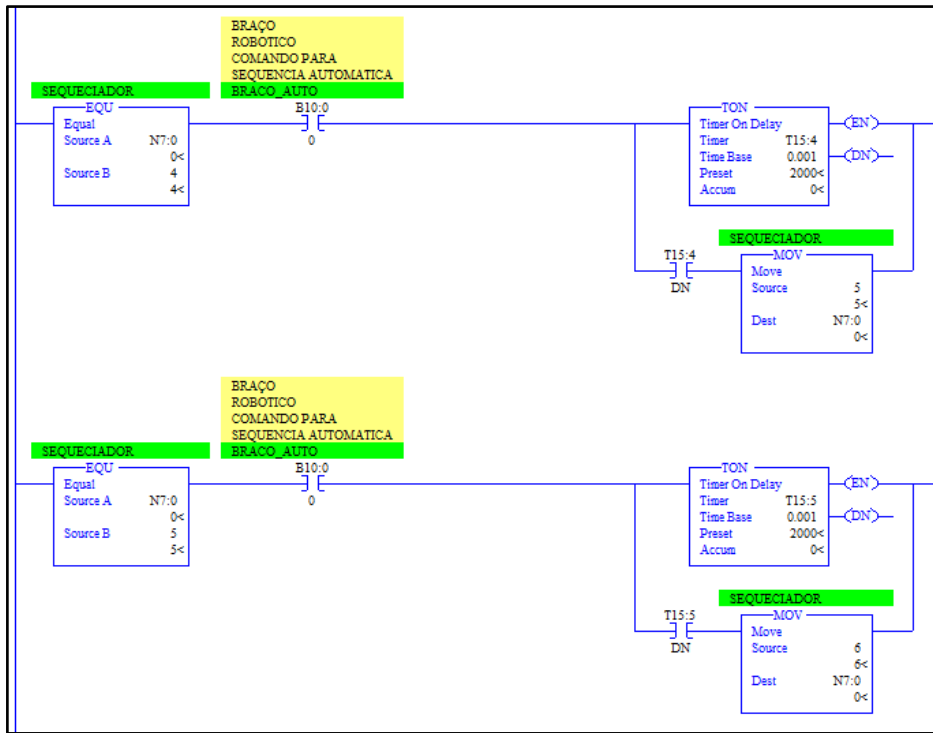
Fonte: Elaborada pelos Autores.

Figura 89: Código fonte – Rotina de Acionamento Automático .



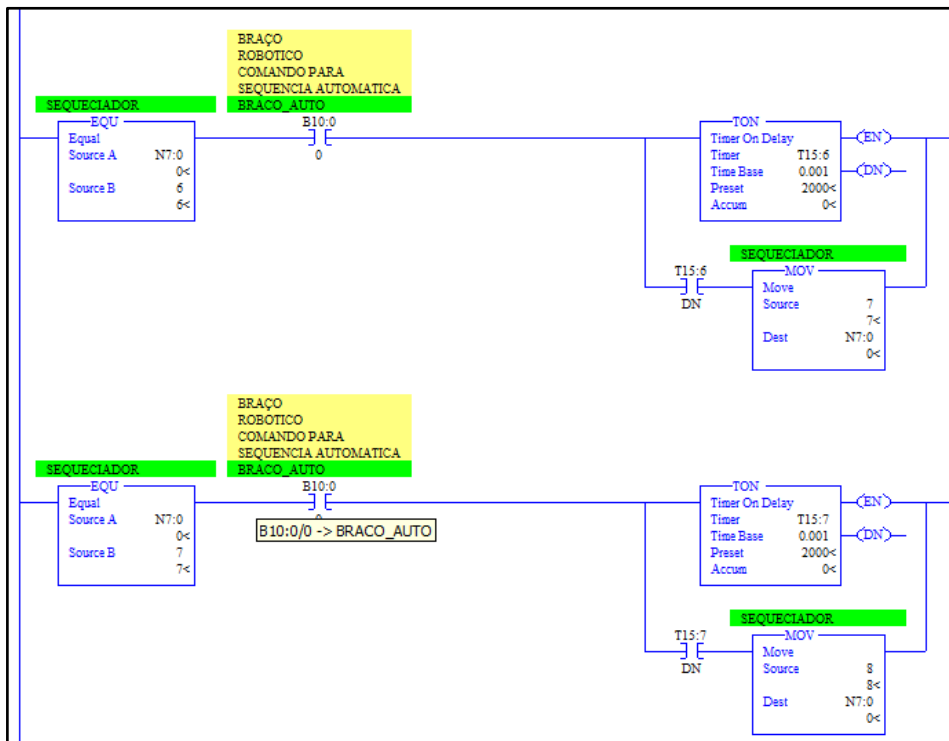
Fonte: Elaborada pelos Autores.

Figura 90: Código fonte – Rotina de Acionamento Automático.



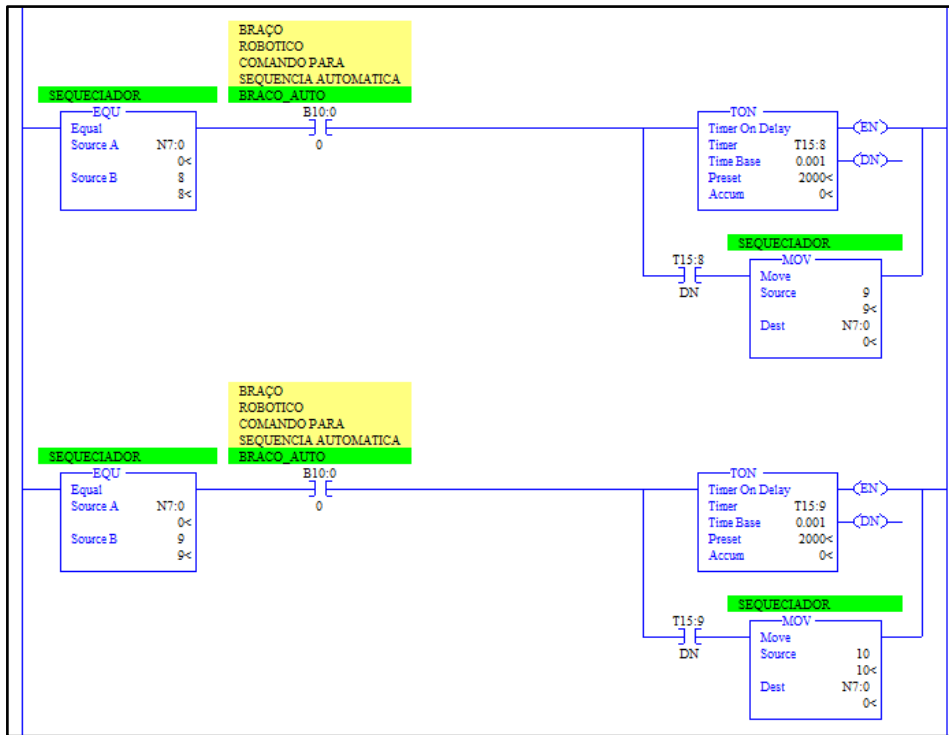
Fonte: Elaborada pelos Autores.

Figura 91: Código fonte – Rotina de Acionamento Automático.



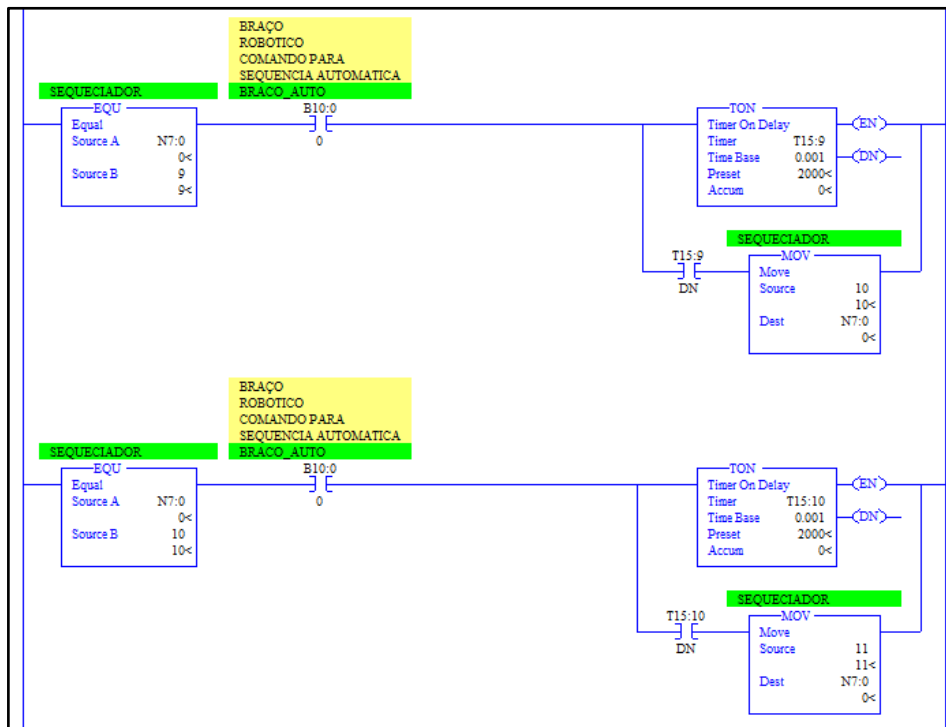
Fonte: Elaborada pelos Autores.

Figura 92: Código fonte – Rotina de Acionamento Automático.



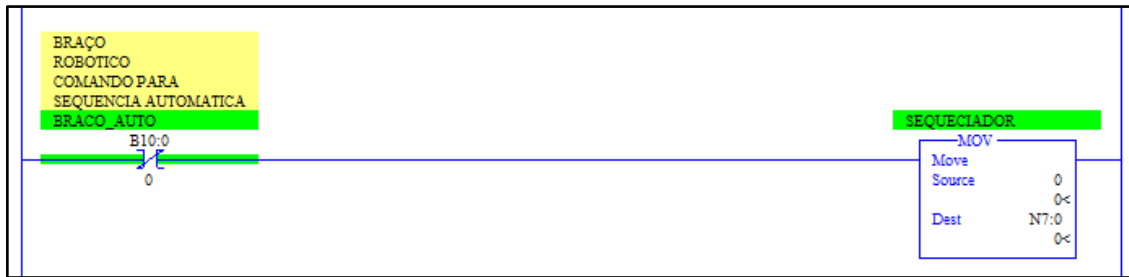
Fonte: Elaborada pelos Autores.

Figura 93: Código fonte – Rotina de Acionamento Automático.



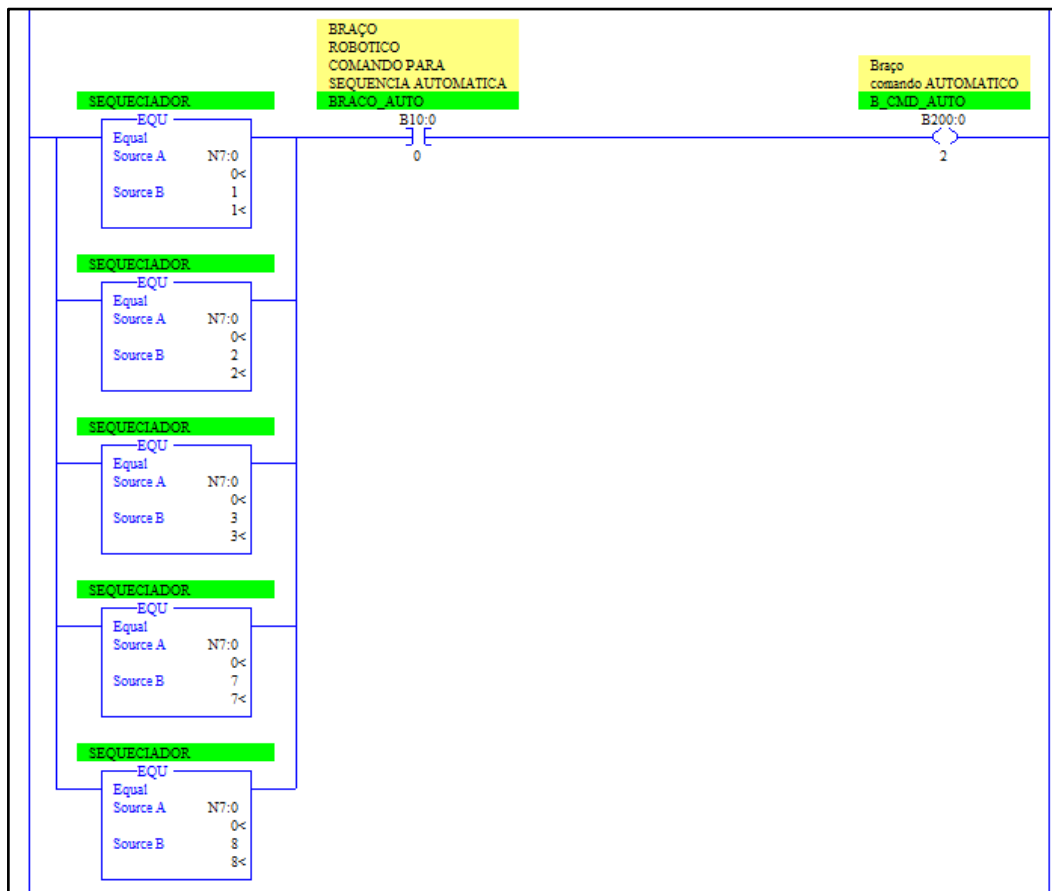
Fonte: Elaborada pelos Autores.

Figura 94: Código fonte – Rotina de Acionamento Automático.



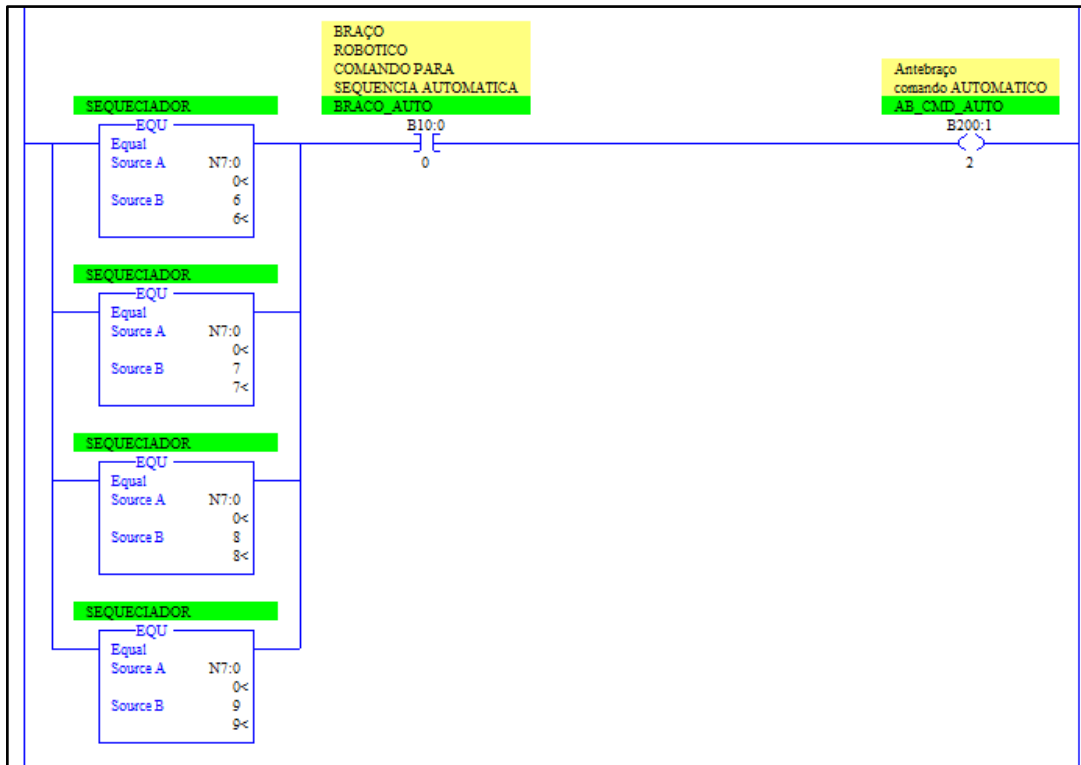
Fonte: Elaborada pelos Autores.

Figura 95: Código fonte – Rotina de Acionamento Automático .



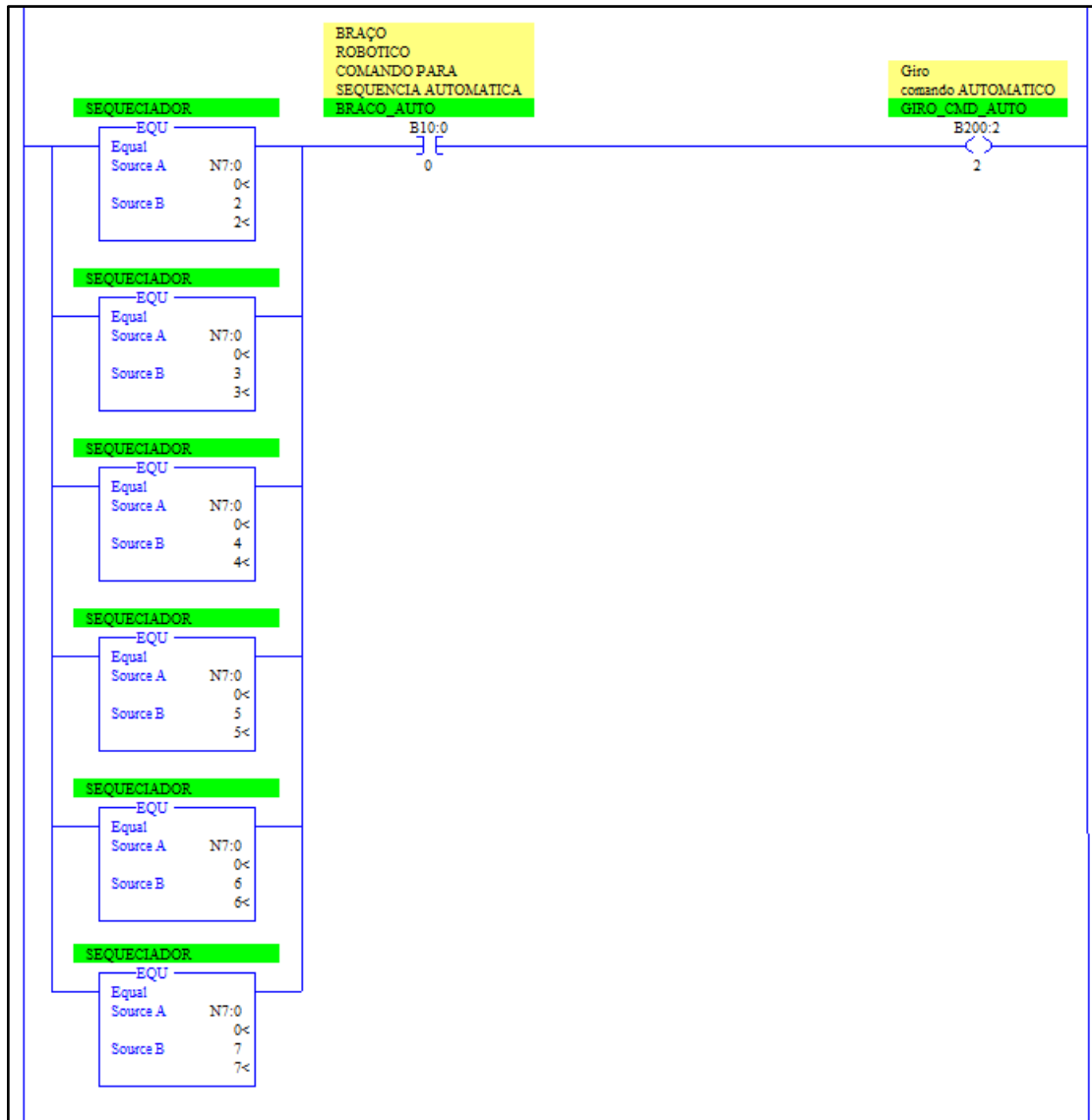
Fonte: Elaborada pelos Autores.

Figura 96: Código fonte – Rotina de Acionamento Automático .



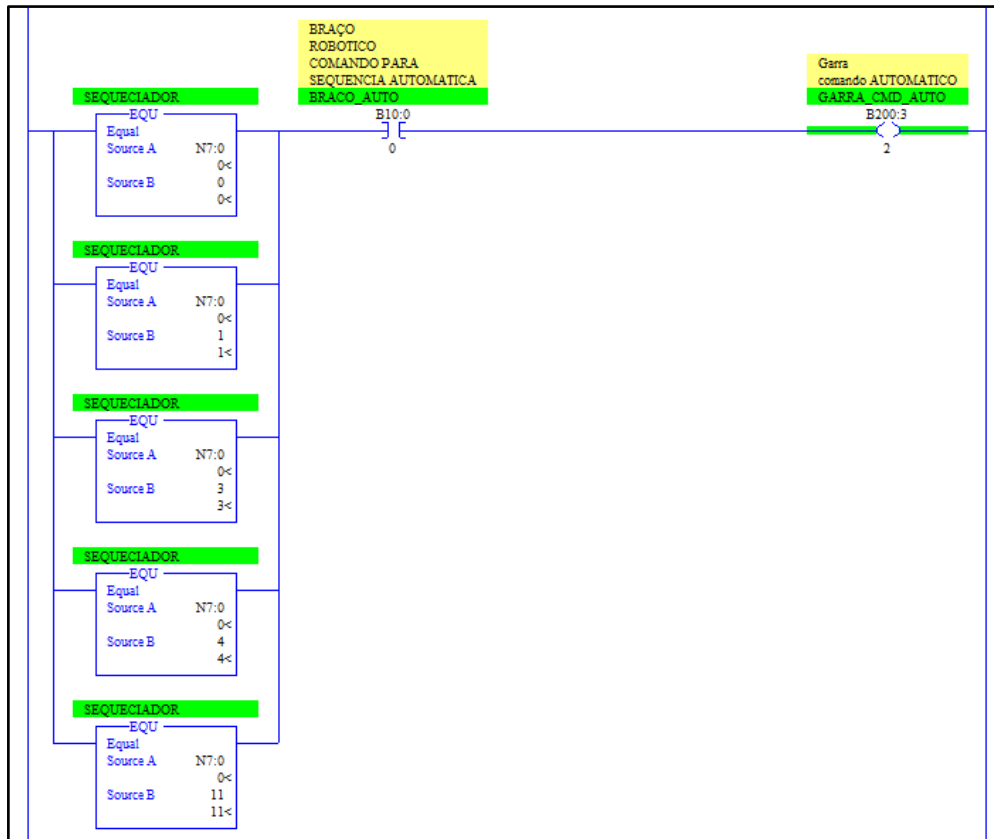
Fonte: Elaborada pelos Autores.

Figura 97: Código fonte – Rotina de Acionamento Automático.



Fonte: Elaborada pelos Autores.

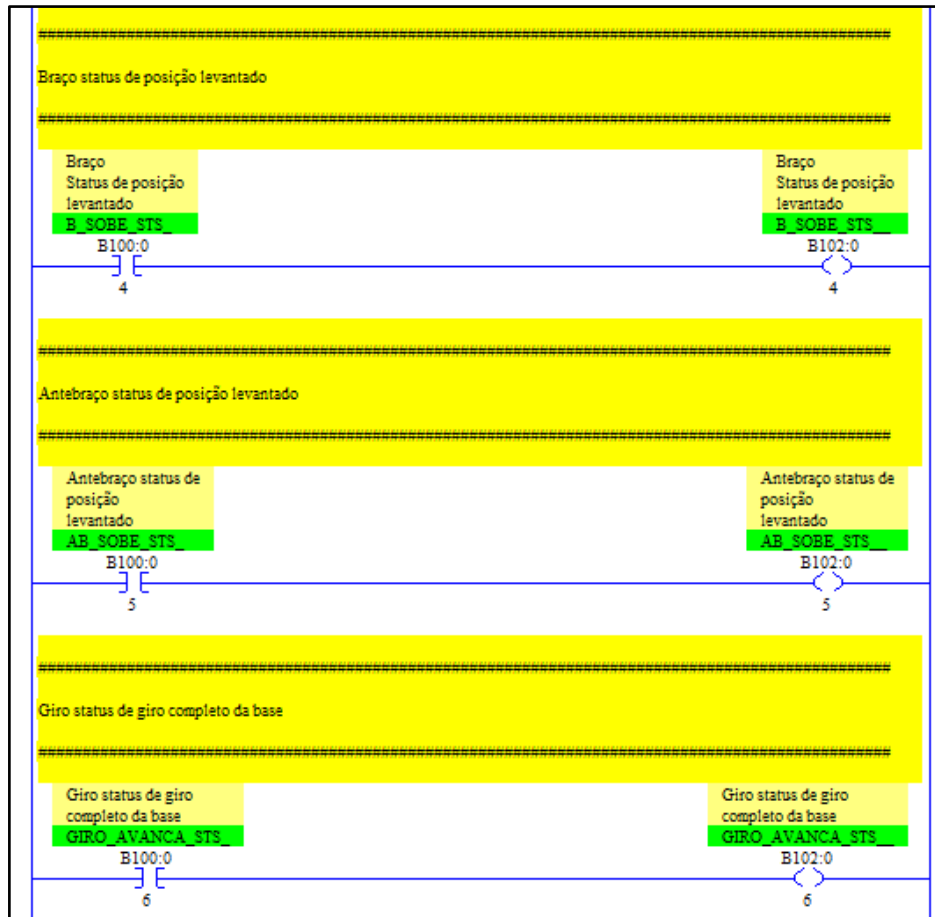
Figura 98: Código fonte – Rotina de Acionamento Automático .



Fonte: Elaborada pelos Autores.

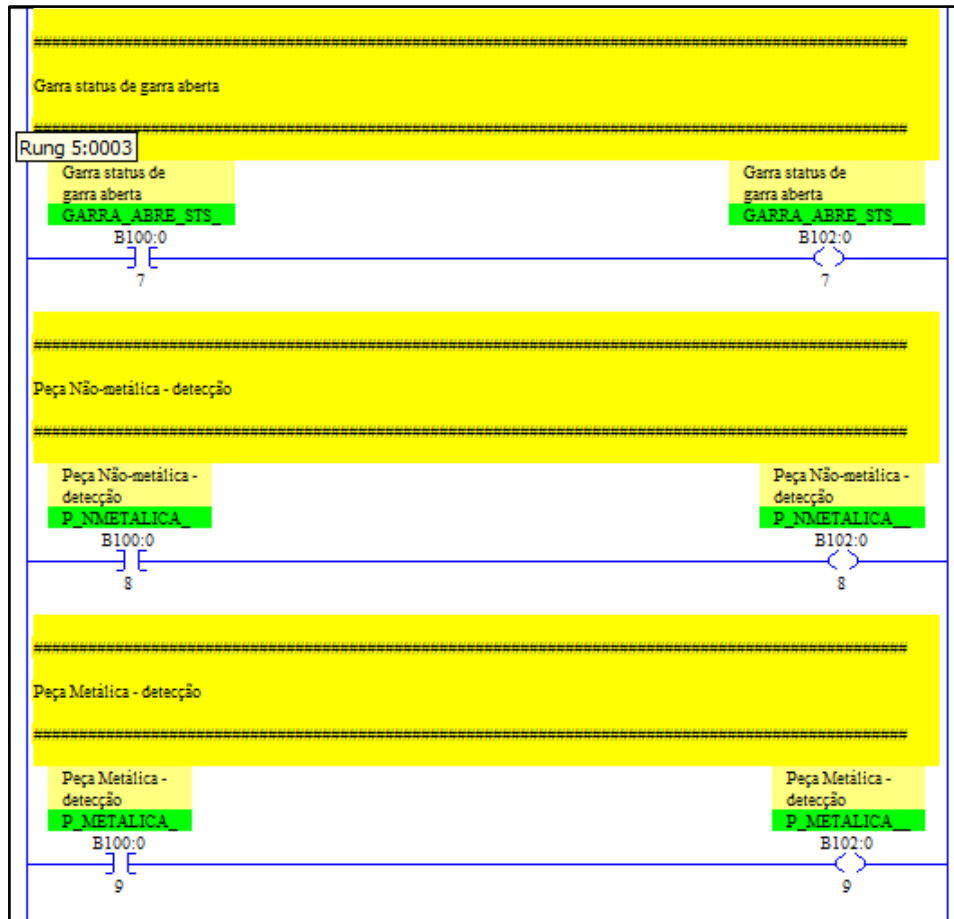
- Status: monitoramento dos status de posição dos cilindros pneumáticos, do eixo e do próprio braço robótico, através das informações dos sensores de posição e de identificação de peças.

Figura 99: Código fonte – Rotina de Status do Braço.



Fonte: Elaborada pelos Autores.

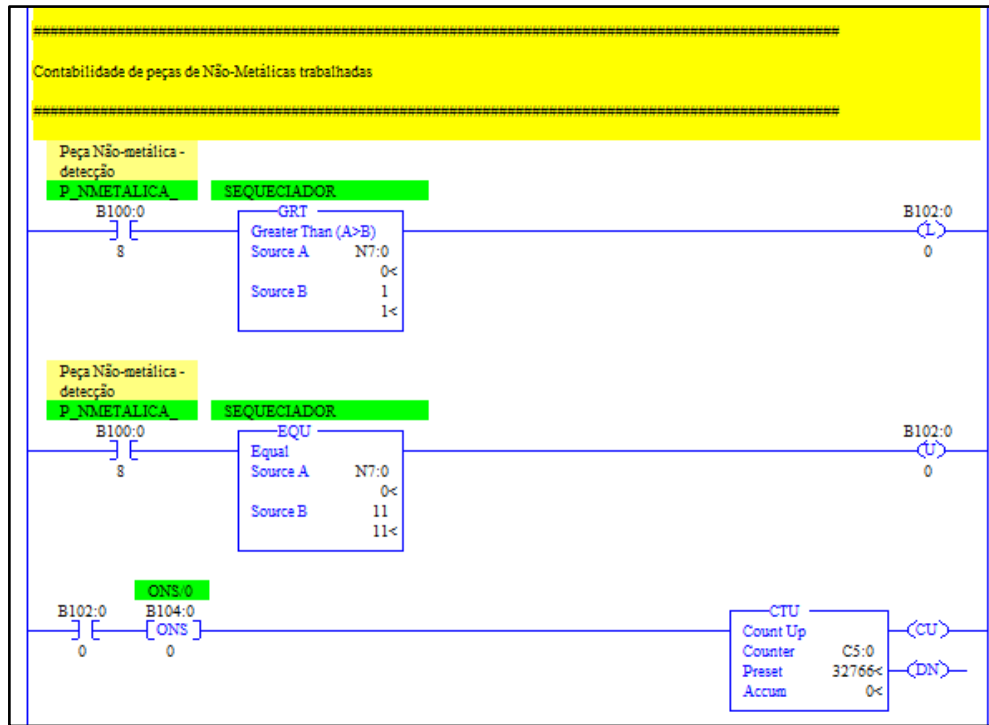
Figura 100: Código fonte – Rotina de Status do Braço.



Fonte: Elaborada pelos Autores.

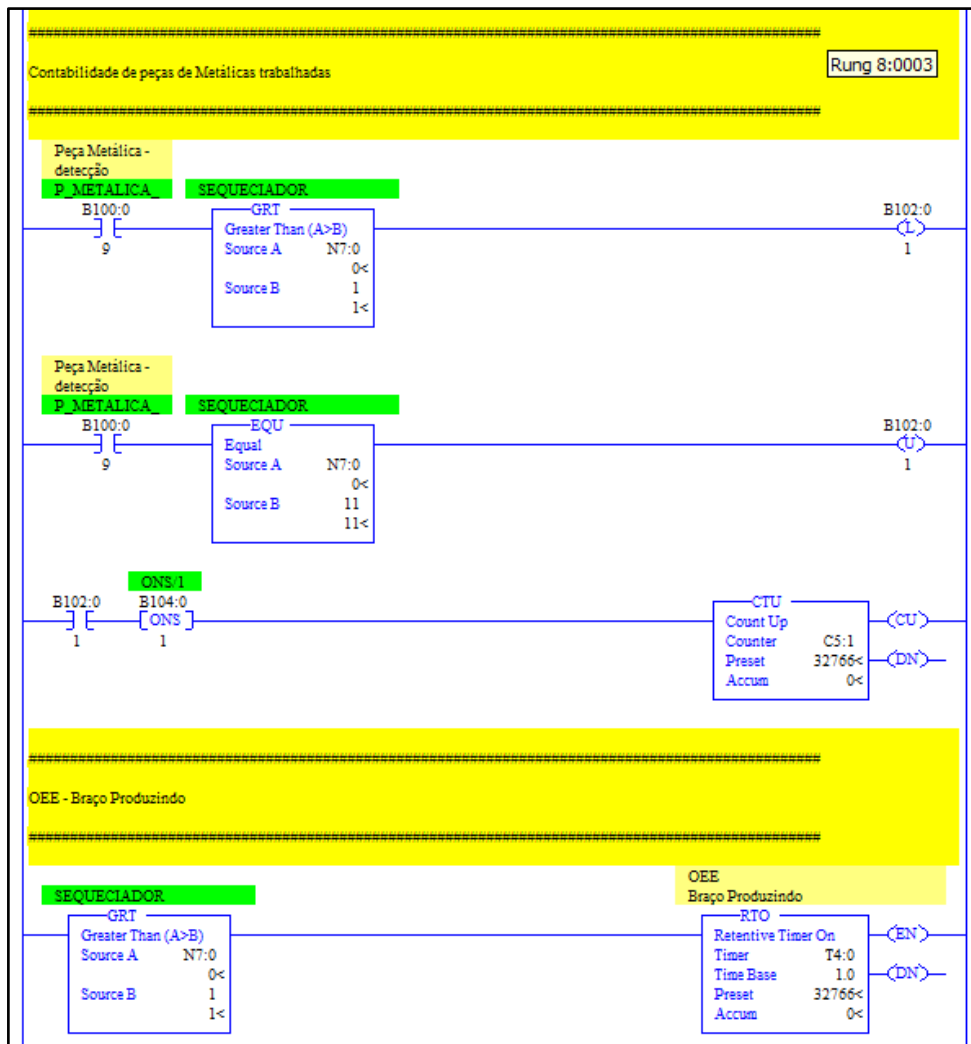
- Produtividade e OEE: monitoramento, calculos estatístico e análise da quantidade e de metas das peças tratadas, e de tempo de máquina (trabalhando, parada e quebrada/manutenção).

Figura 101: Código fonte – Rotina de OEE – Contabilidade de peças Não-Metálicas trabalhadas .



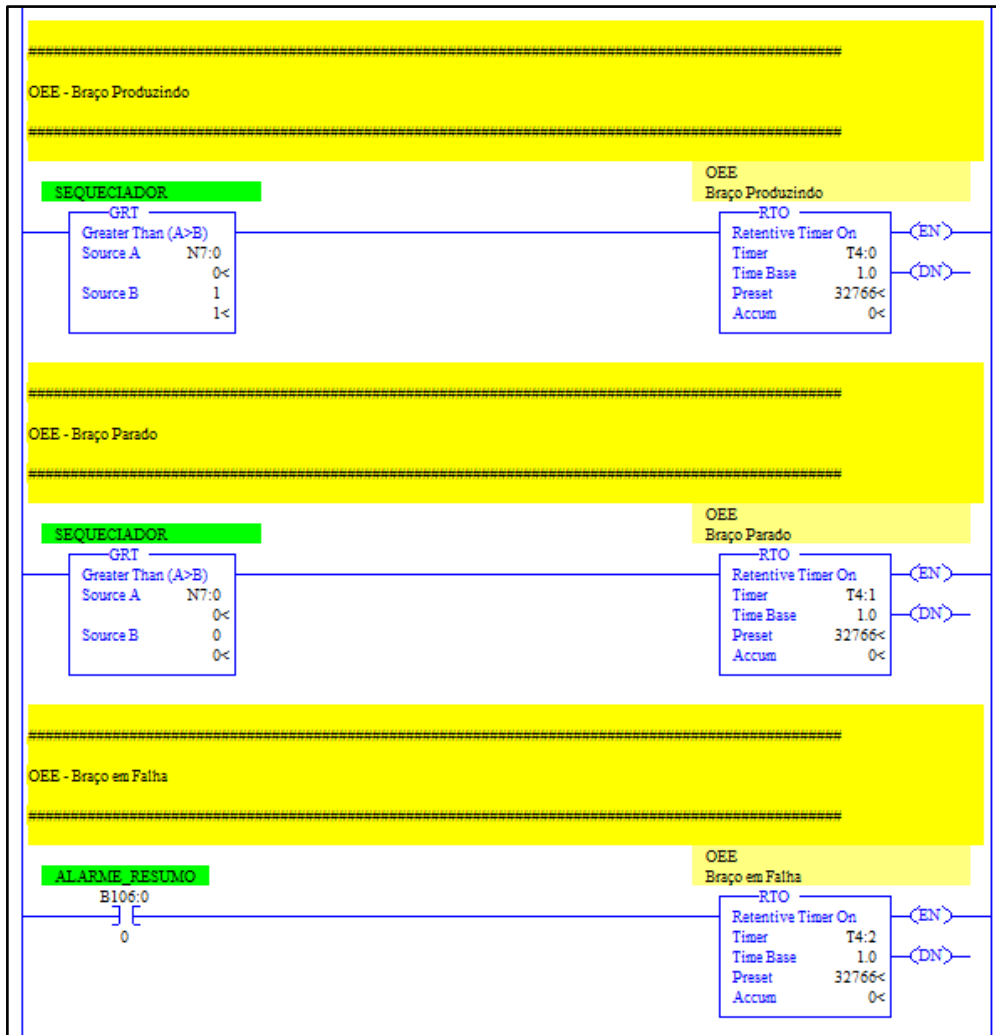
Fonte: Elaborada pelos Autores.

Figura 102: Código fonte – Rotina de OEE – Contabilidade de peças Metálicas trabalhadas.



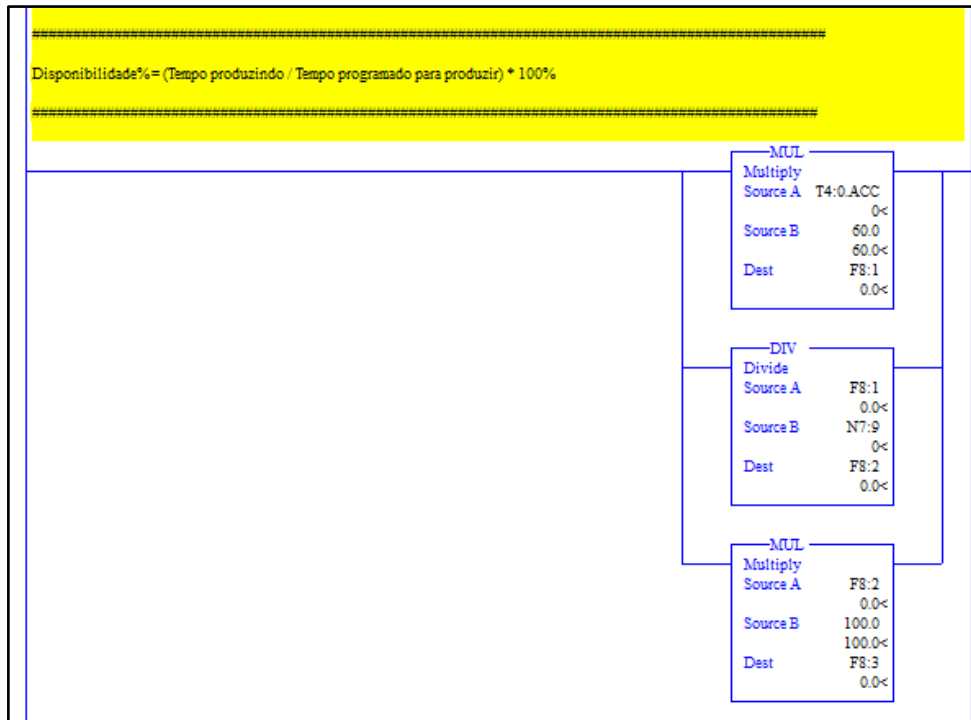
Fonte: Elaborada pelos Autores.

Figura 103: Código fonte – Rotina de OEE – Braço produzindo, parado e falha .



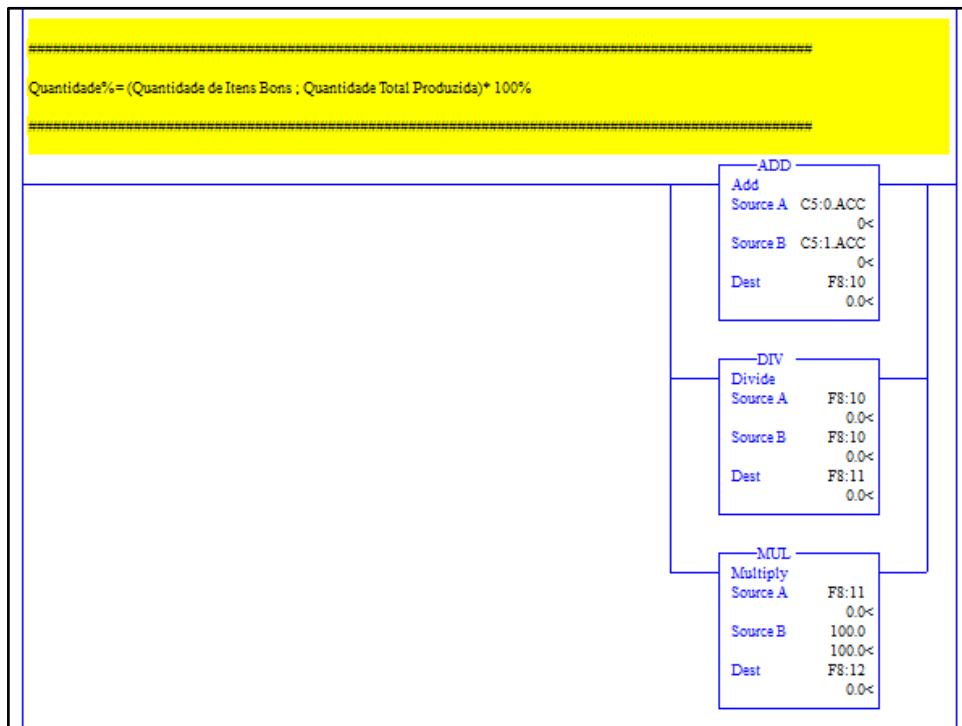
Fonte: Elaborada pelos Autores.

Figura 104: Código fonte – Rotina de OEE – Calculo da disponibilidade.



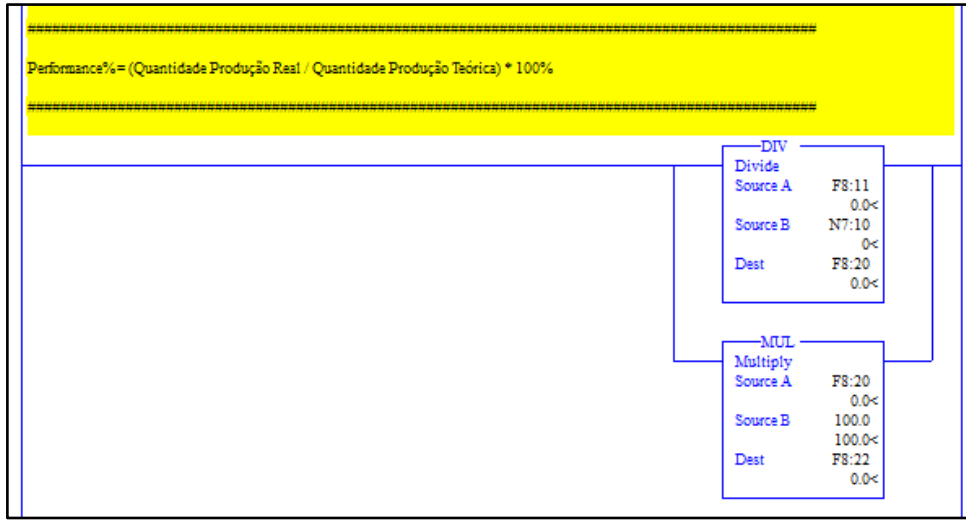
Fonte: Elaborada pelos Autores.

Figura 105: Código fonte – Rotina de OEE – Calculo da Quantidade.



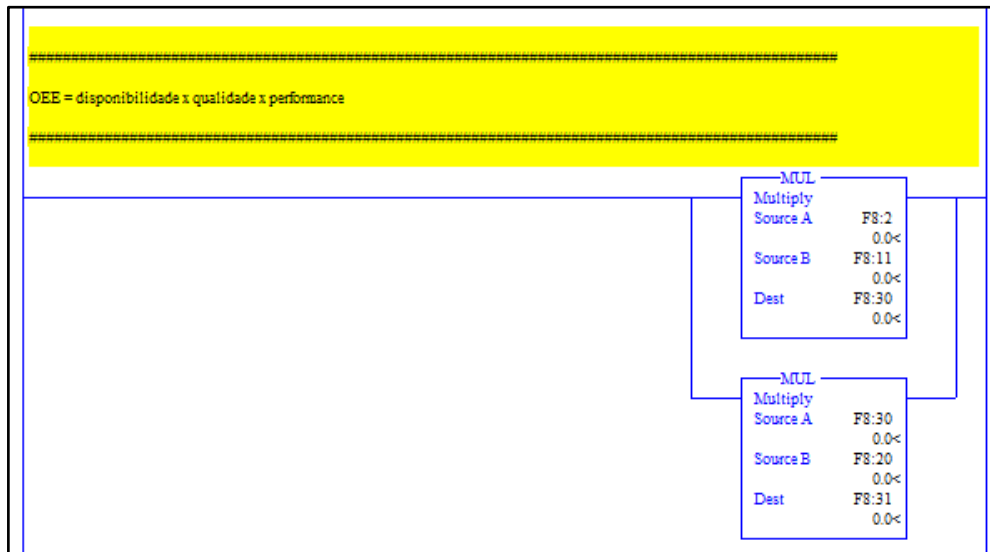
Fonte: Elaborada pelos Autores.

Figura 106: Código fonte – Rotina de OEE – Calculo da Performance.



Fonte: Elaborada pelos Autores.

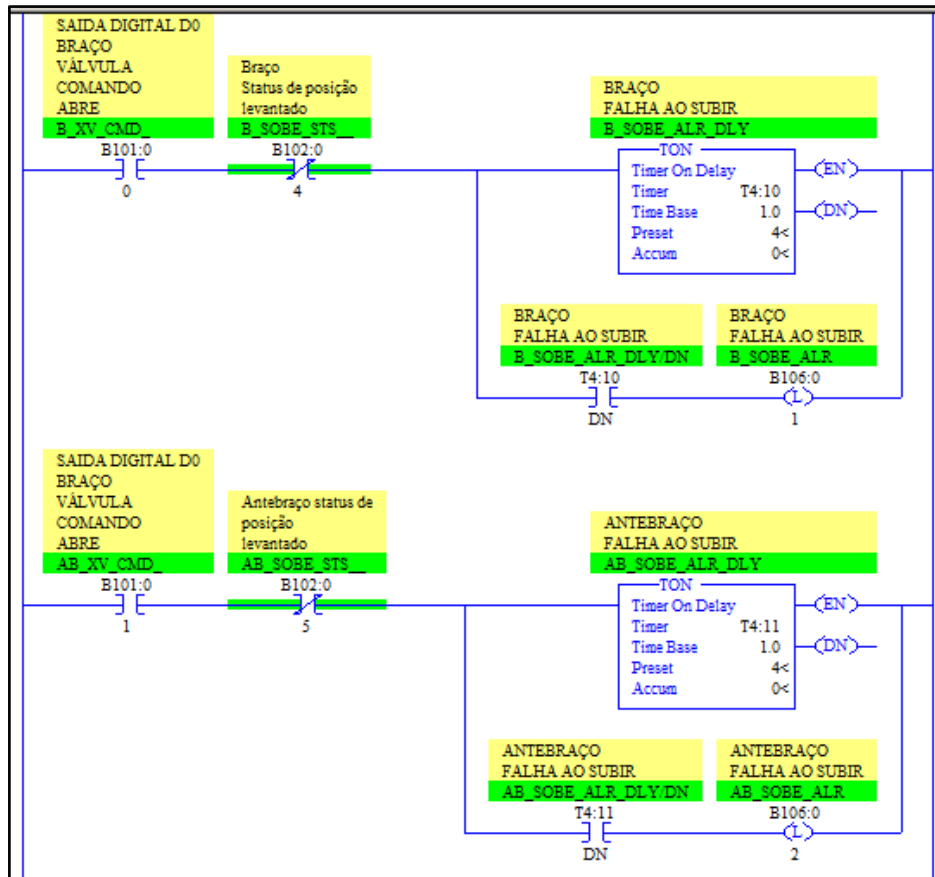
Figura 107: Código fonte – Rotina de OEE – Calculo do OEE.



Fonte: Elaborada pelos Autores.

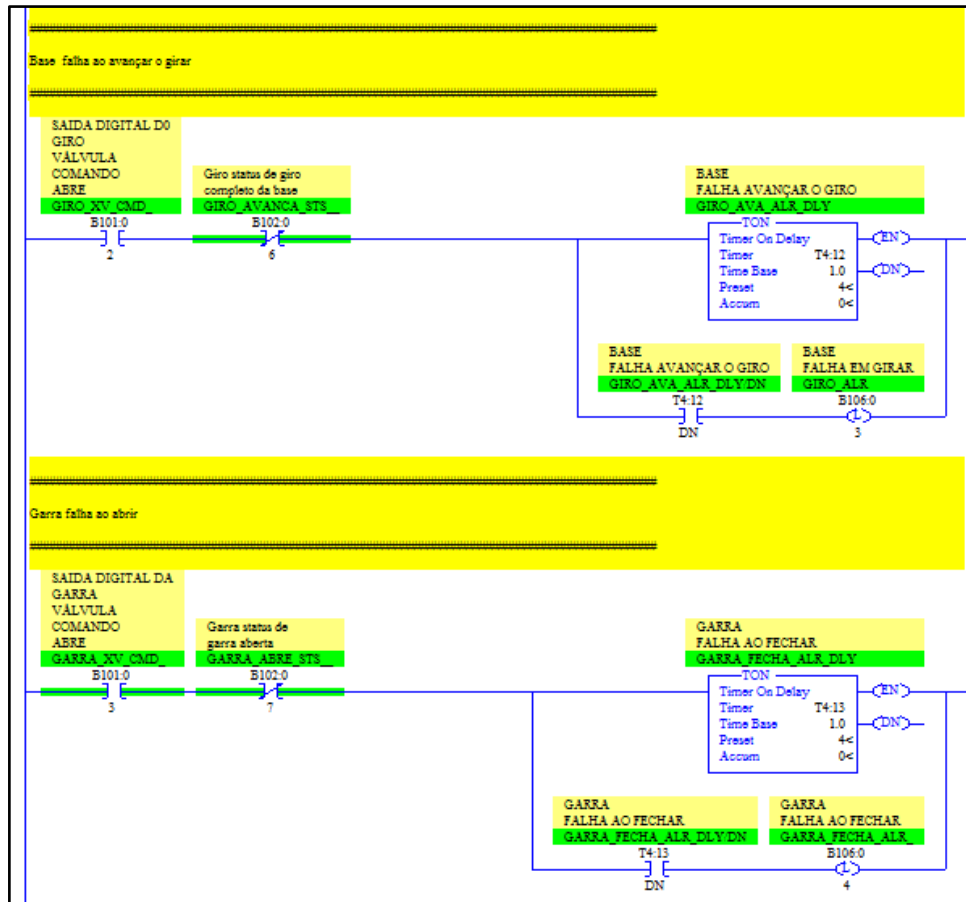
- Alarme: monitoramento e tratamento das falhas do braço, considerando o tempo ideal de movimentação, de reconhecimento de peças e entrega.

Figura 108: Código fonte – Rotina de Alarme de subida do Braço e Antebraço.



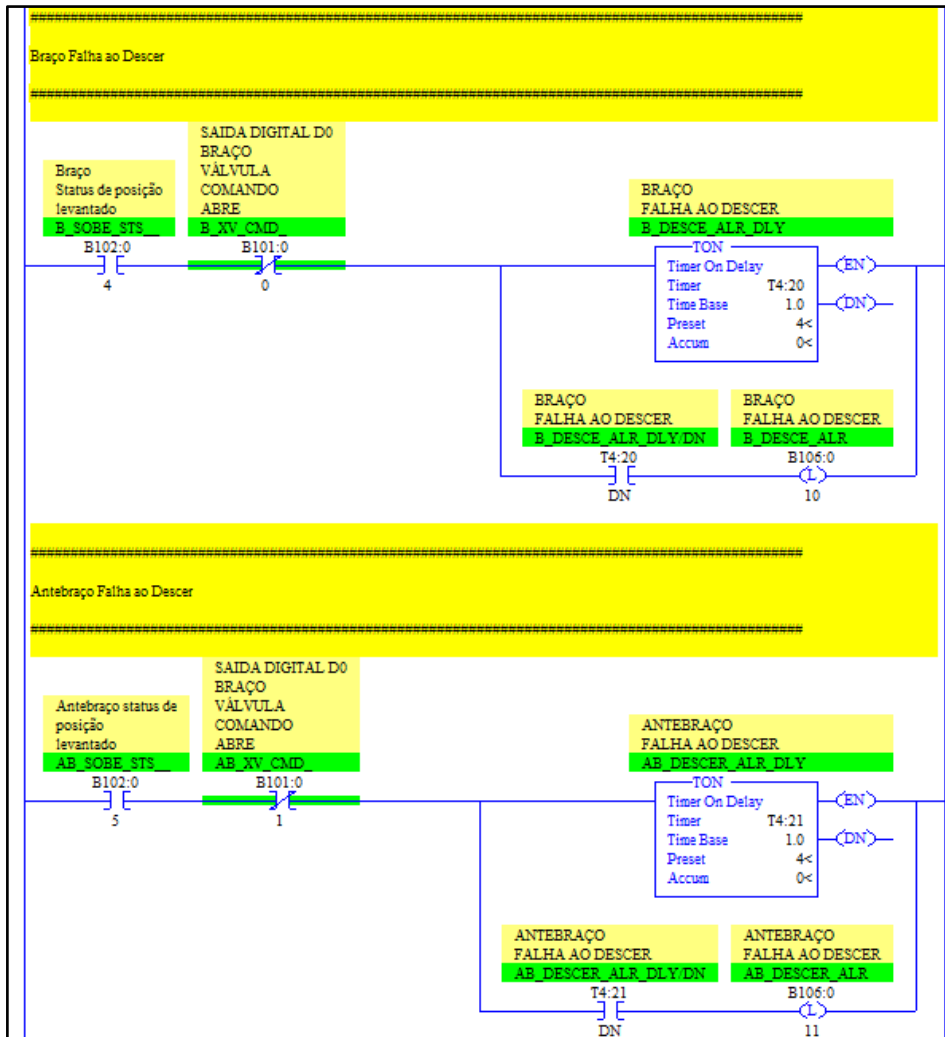
Fonte: Elaborada pelos Autores.

Figura 109: Código fonte – Rotina de Alarme de avanço de giro da base e abertura da garra.



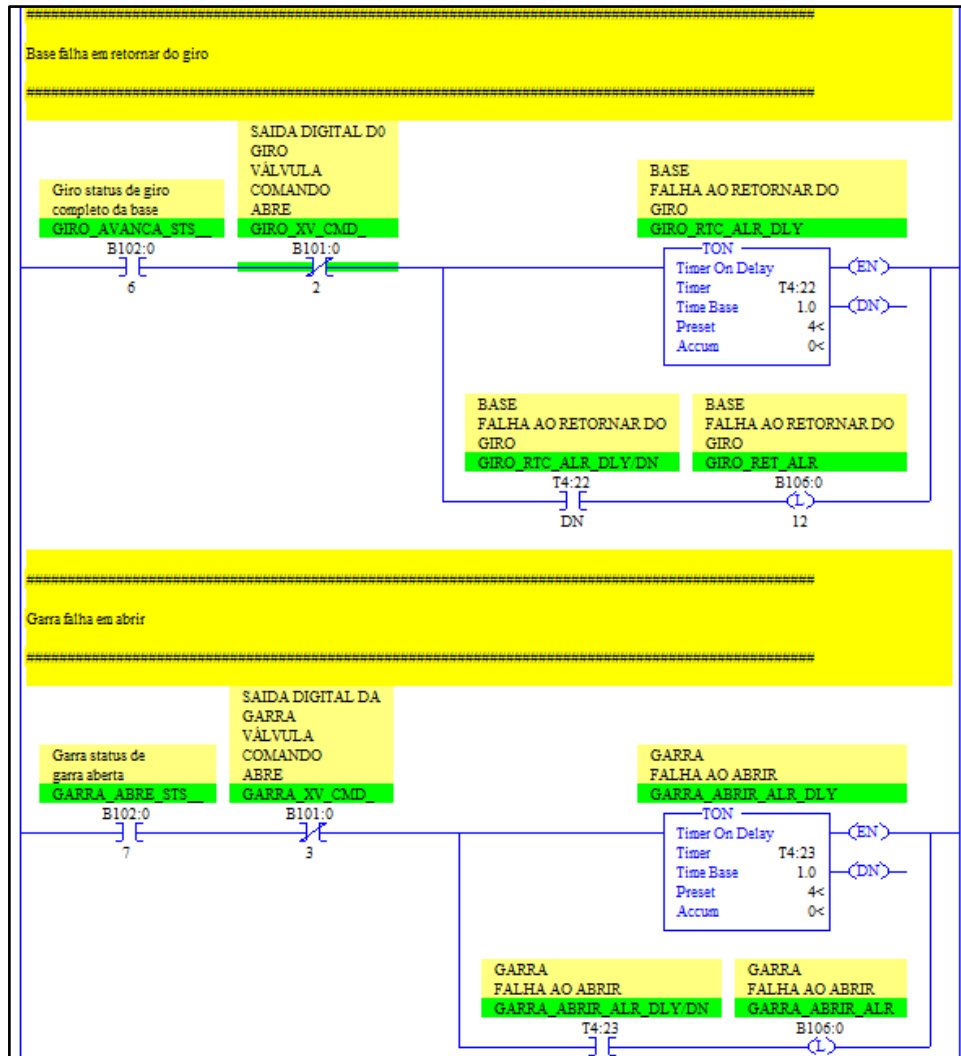
Fonte: Elaborada pelos Autores.

Figura 110: Código fonte – Rotina de Alarme de descida do Braço e Antebraço.



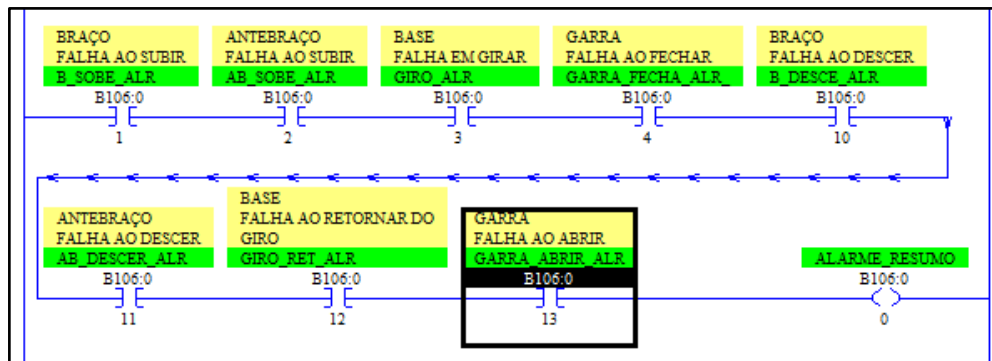
Fonte: Elaborada pelos Autores.

Figura 111: Código fonte – Rotina de Alarme de retorno de giro da base e fechamento da garra.



Fonte: Elaborada pelos Autores.

Figura 112: Código fonte – Resumo de Alarmes .

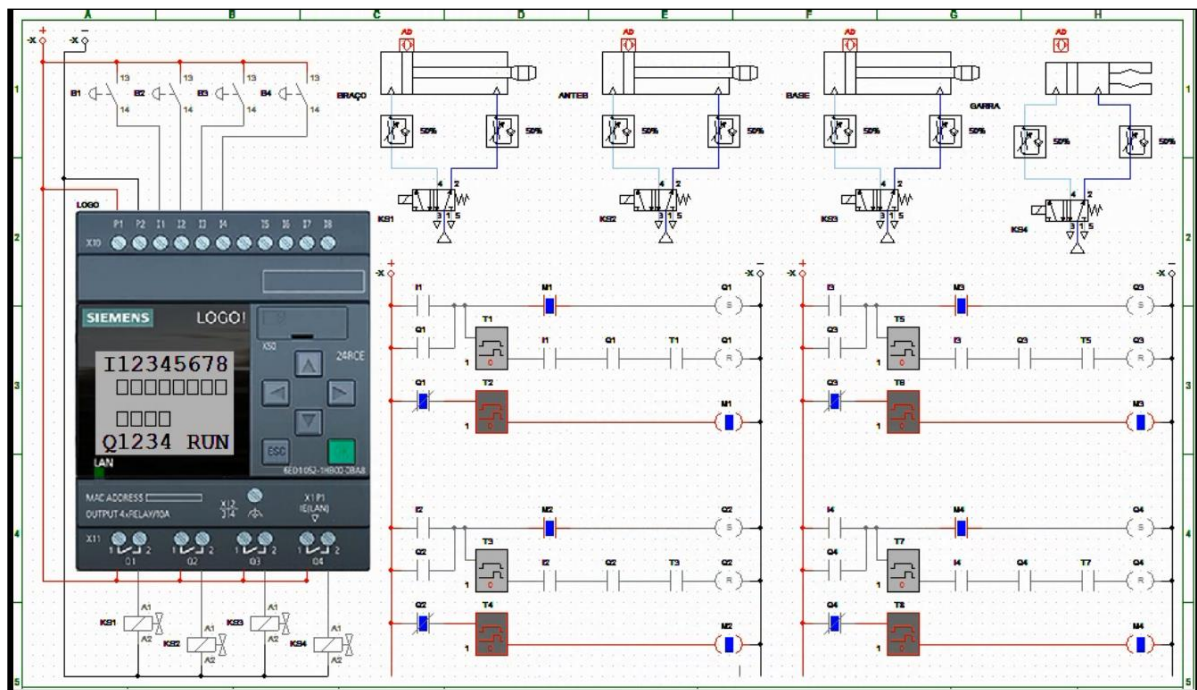


Fonte: Elaborada pelos Autores.

APÊNDICE B: SEQUÊNCIA DE SIMULAÇÃO

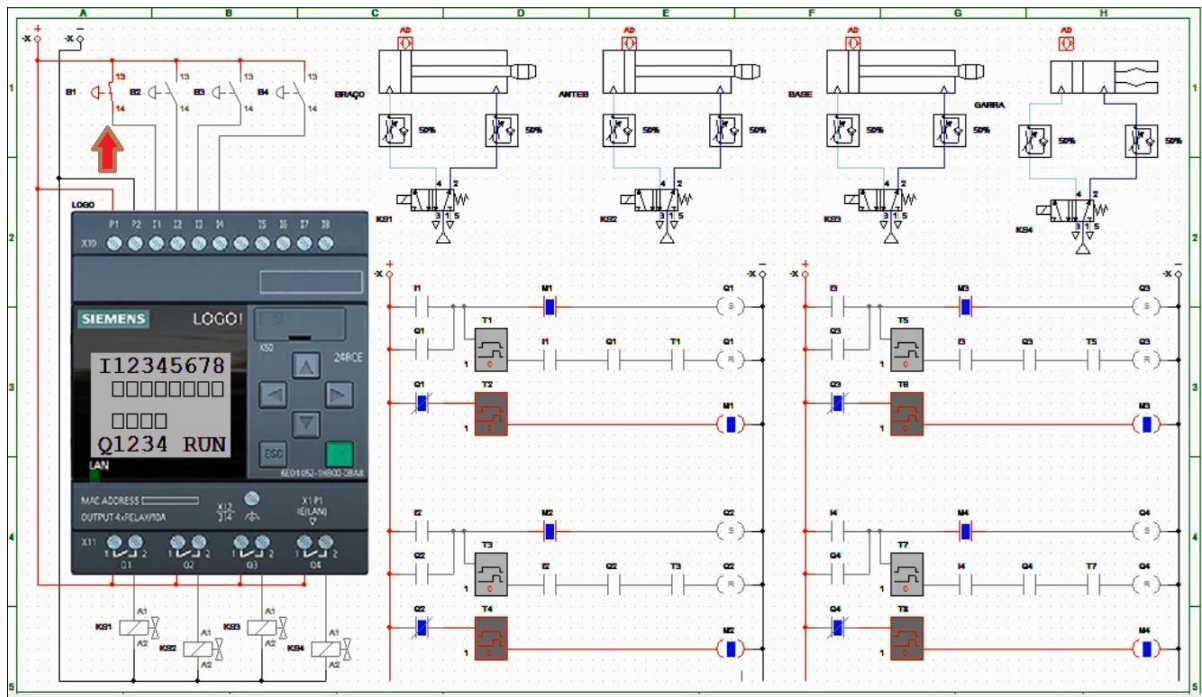
Simulação do circuito elétrico, eletropneumático e código fonte com o uso do CADe_SIMU 4.0, onde é demonstrado em detalhes os comandos vindos das chaves físicas, a execução da lógica de programação em linguagem Ladder, a energização das solenoides dos cilindros pneumáticos, os cilindros em movimento de avanço e recuo, atuando os sensores de status dessa movimentação e a reação da lógica de programação com esse retorno dos sensores.

Figura 113: Simulação do circuito elétrico, eletropneumático e lógica do PLC no CADe_Simu.



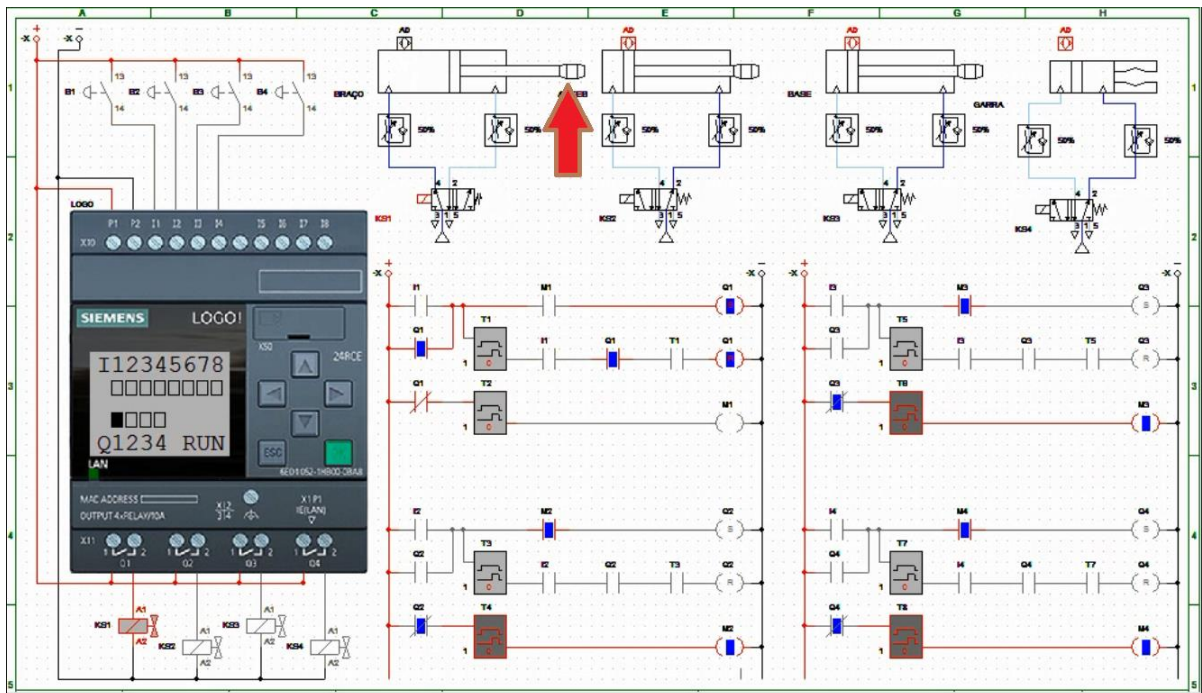
Fonte: Elaborada pelos Autores.

Figura 114: Simulação do acionamento do comando manual para subir o braço.



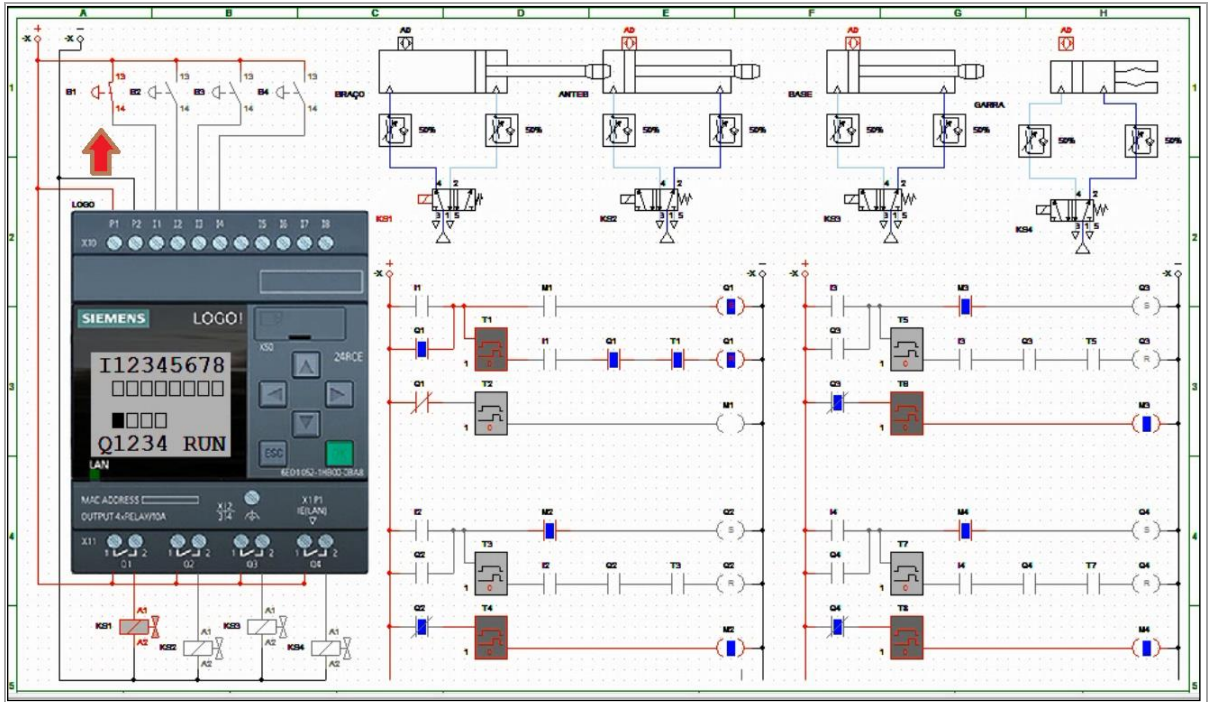
Fonte: Elaborada pelos Autores.

Figura 115: Simulação da atuação do comando eletropneumático para subir o braço.



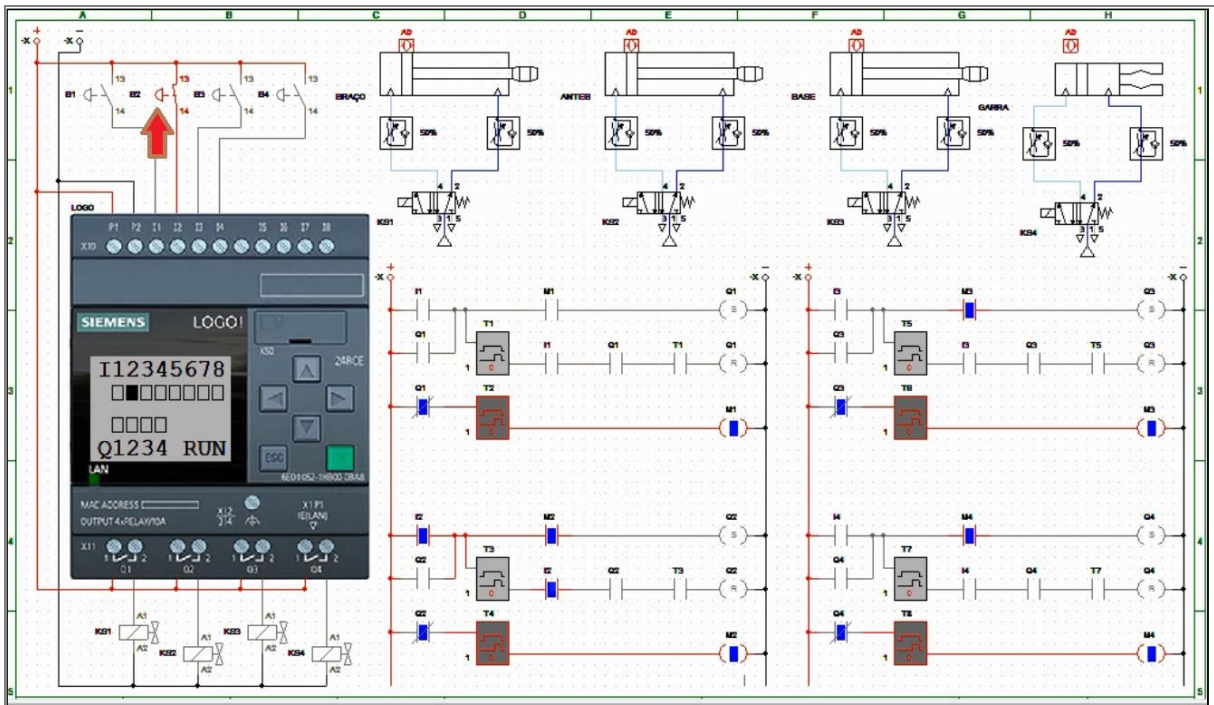
Fonte: Elaborada pelos Autores.

Figura 116: Simulação do acionamento do comando manual para descer o braço.



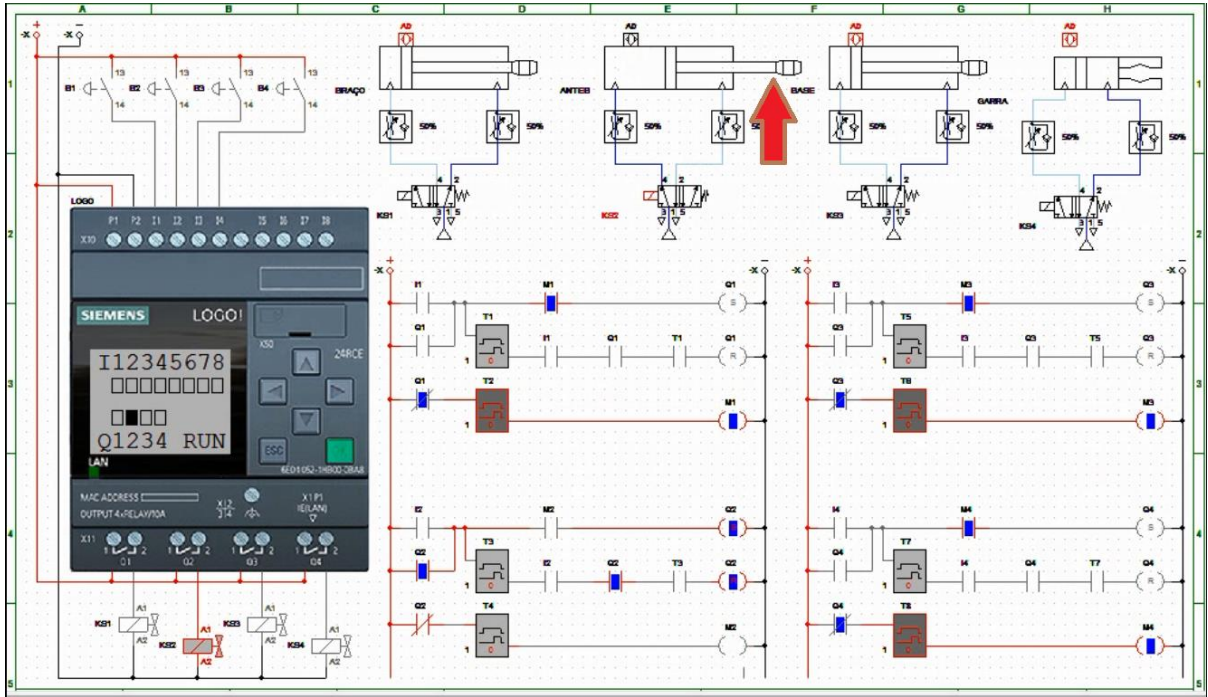
Fonte: Elaborada pelos Autores.

Figura 117: Simulação do acionamento do comando manual para subir o antebraço.



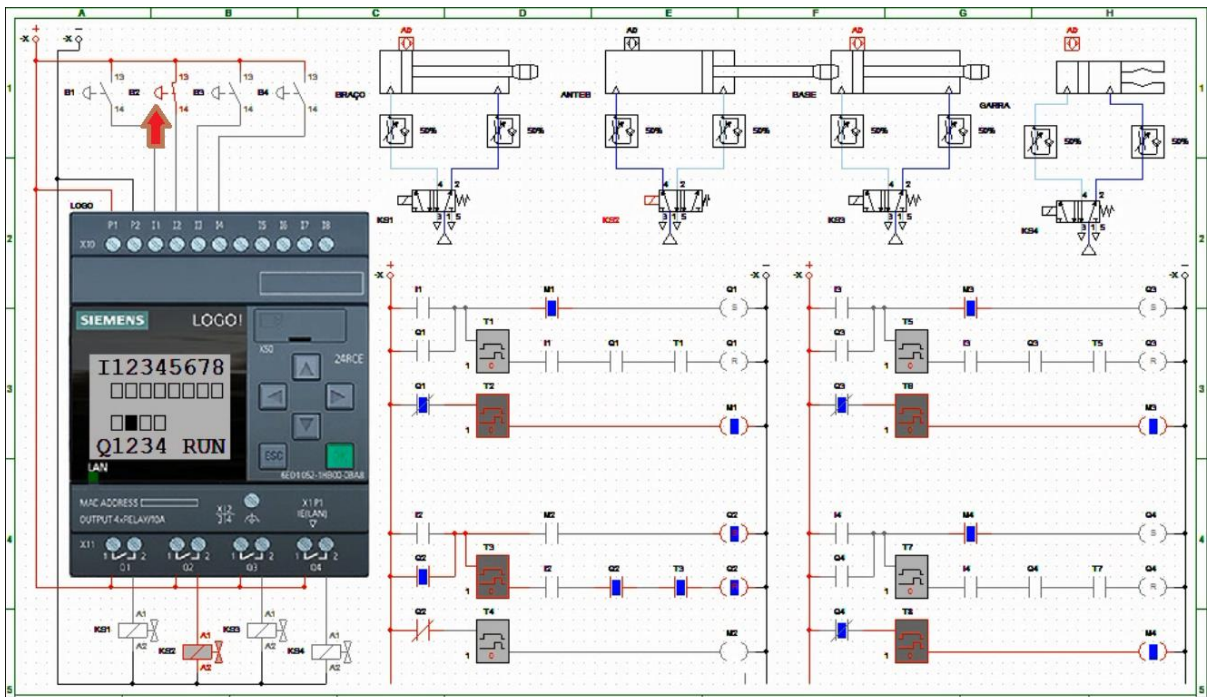
Fonte: Elaborada pelos Autores.

Figura 118: Simulação da atuação do comando eletropneumático para subir o antebraço.



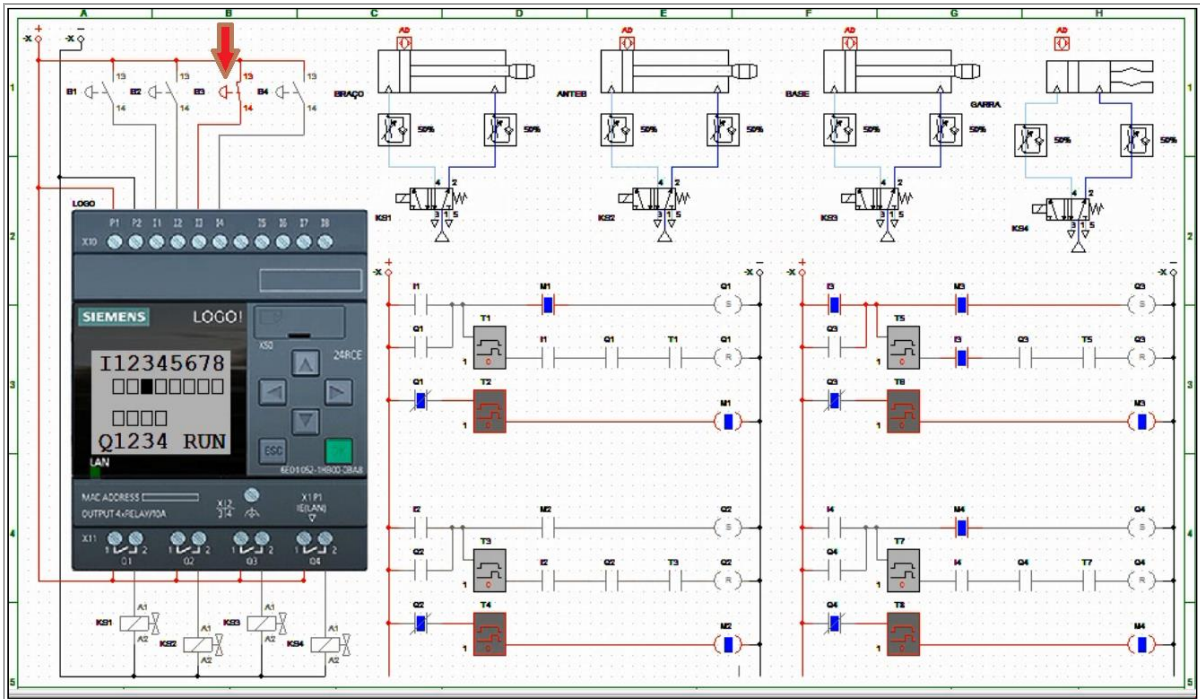
Fonte: Elaborada pelos Autores.

Figura 119: Simulação do acionamento do comando manual para descer o antebraço.



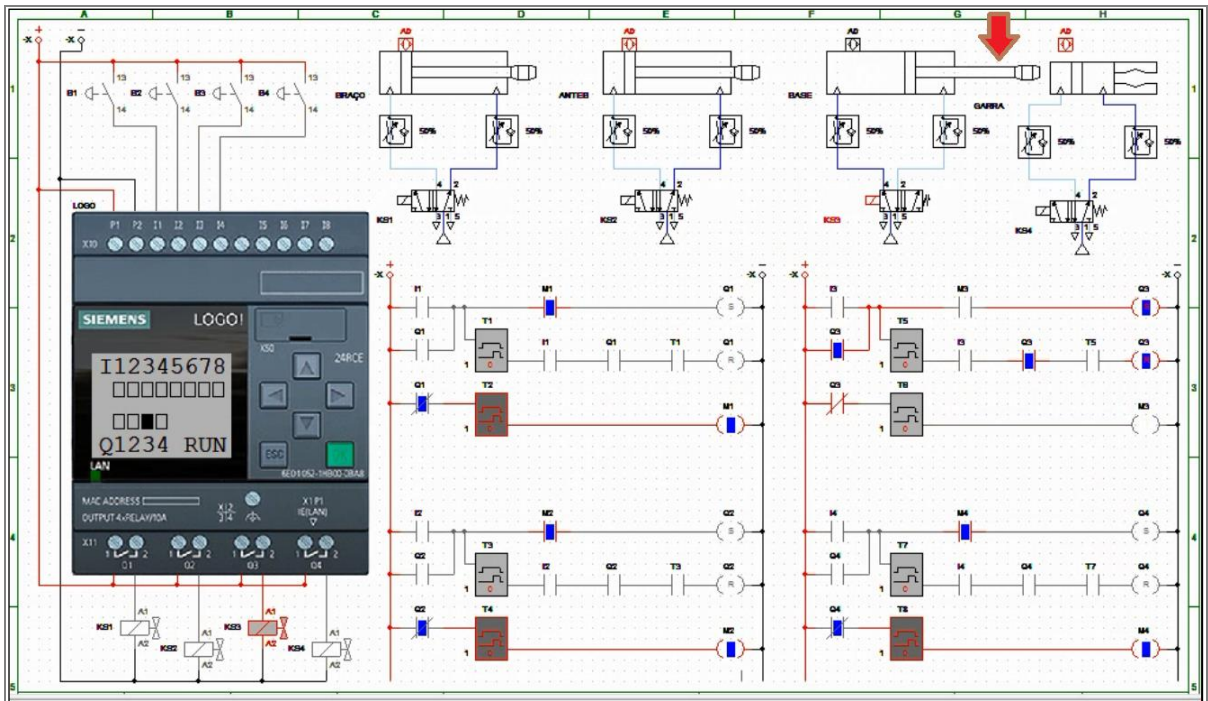
Fonte: Elaborada pelos Autores.

Figura 120: Simulação do acionamento do comando manual para movimento em sentido horário da base.



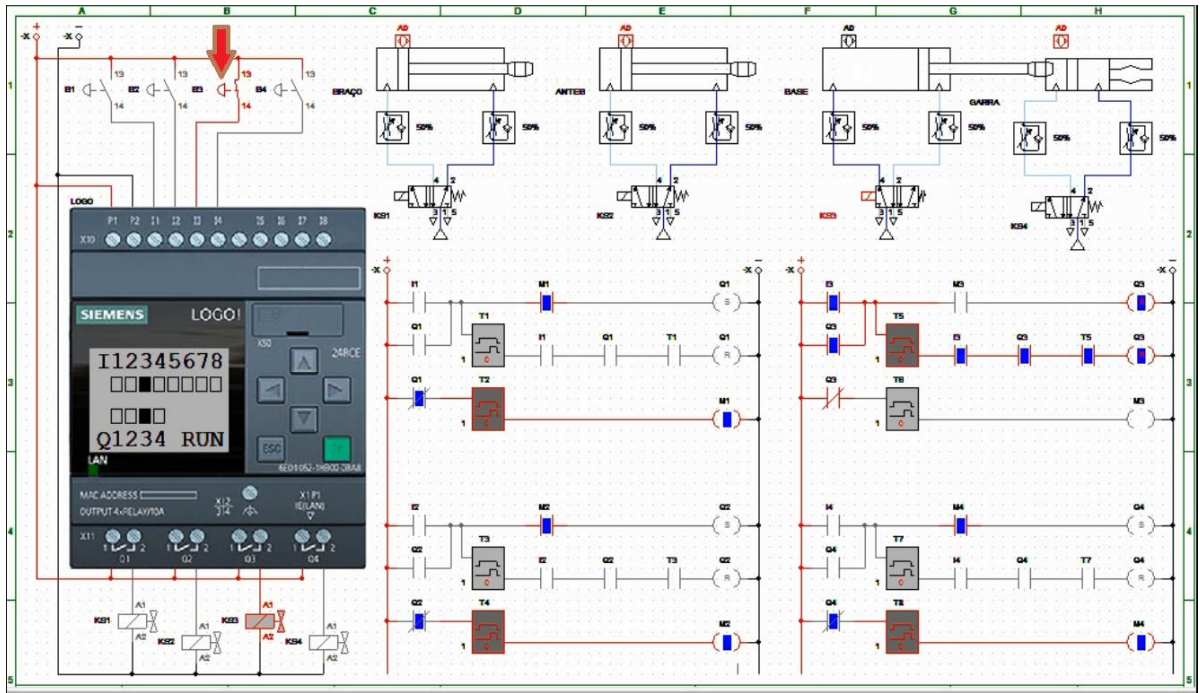
Fonte: Elaborada pelos Autores.

Figura 121: Simulação da atuação do comando eletropneumático para movimento em sentido horário da base.



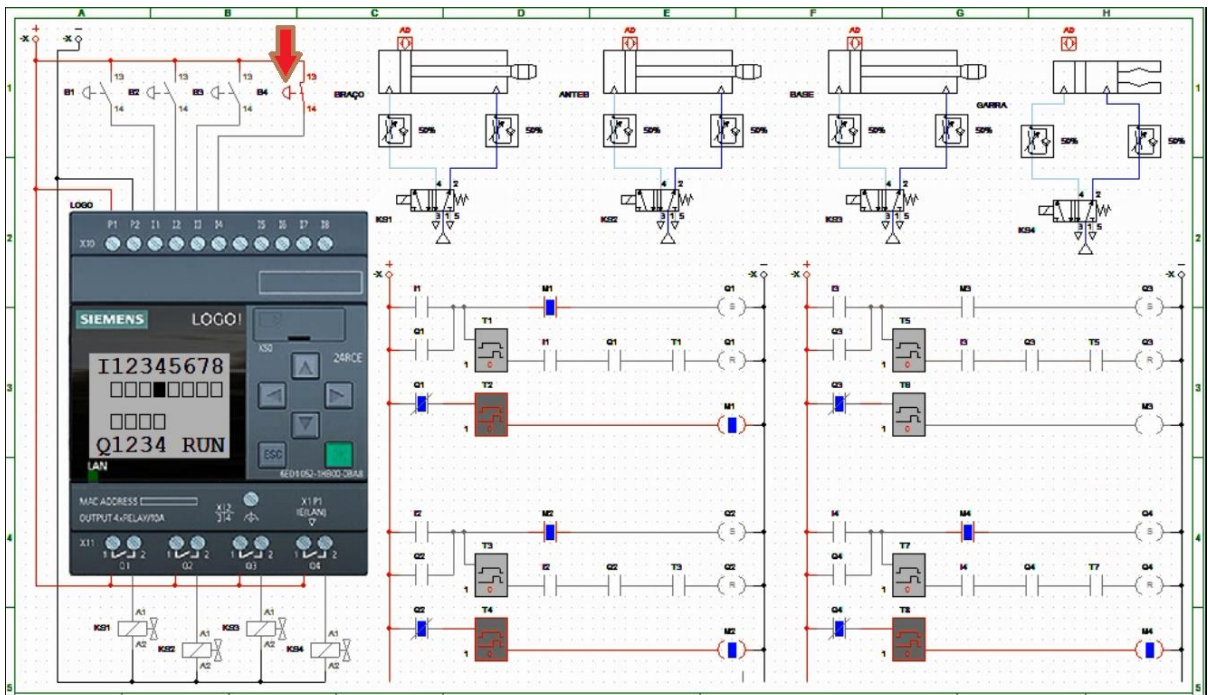
Fonte: Elaborada pelos Autores.

Figura 122: Simulação do acionamento do comando manual para movimento em sentido anti-horário da base.



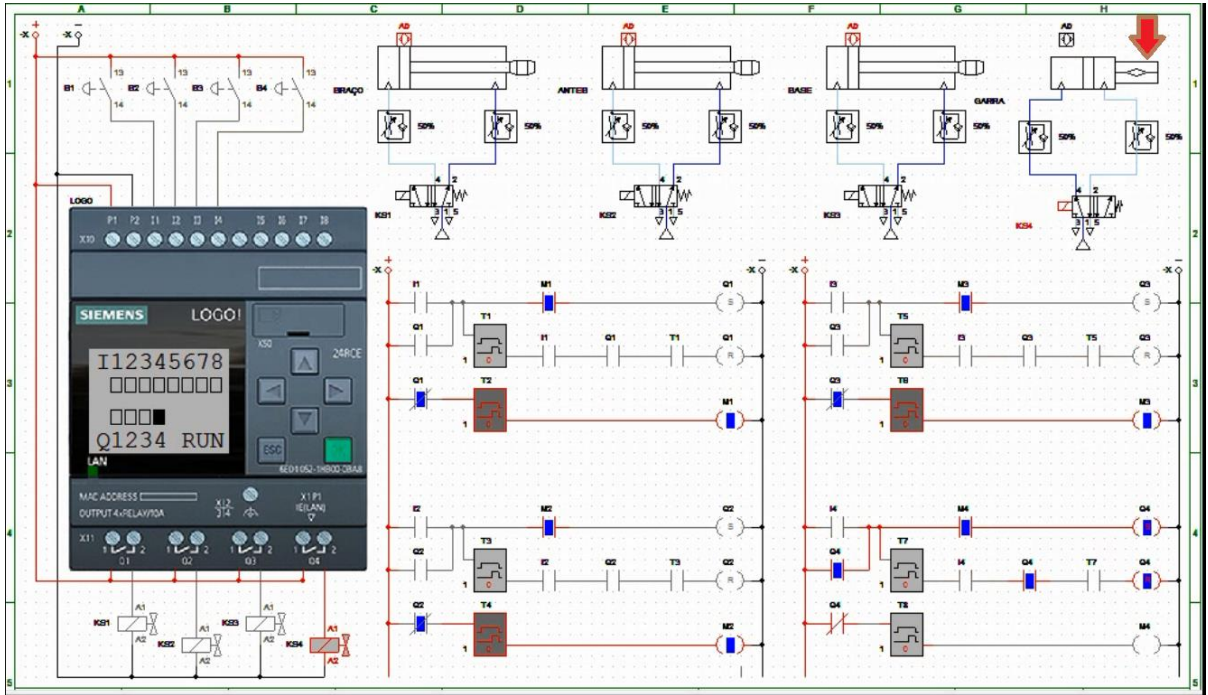
Fonte: Elaborada pelos Autores.

Figura 123: Simulação do acionamento do comando manual para abertura da garra.



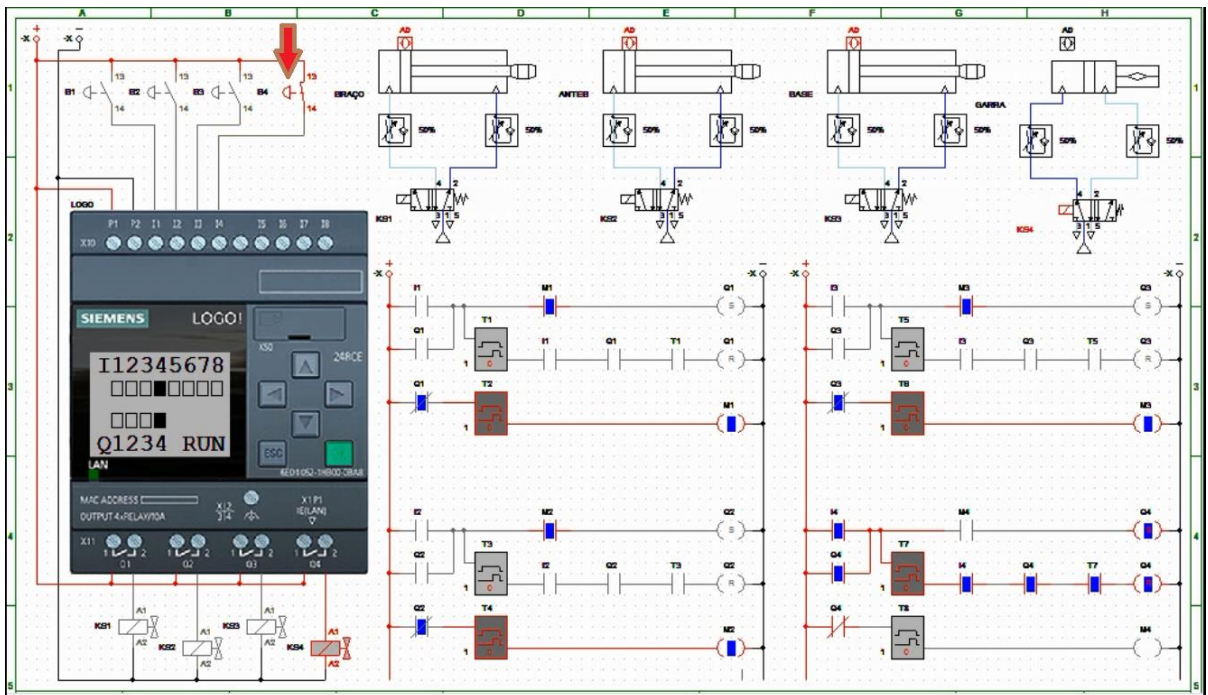
Fonte: Elaborada pelos Autores.

Figura 124: Simulação da atuação do comando eletropneumático para abertura da garra.



Fonte: Elaborada pelos Autores.

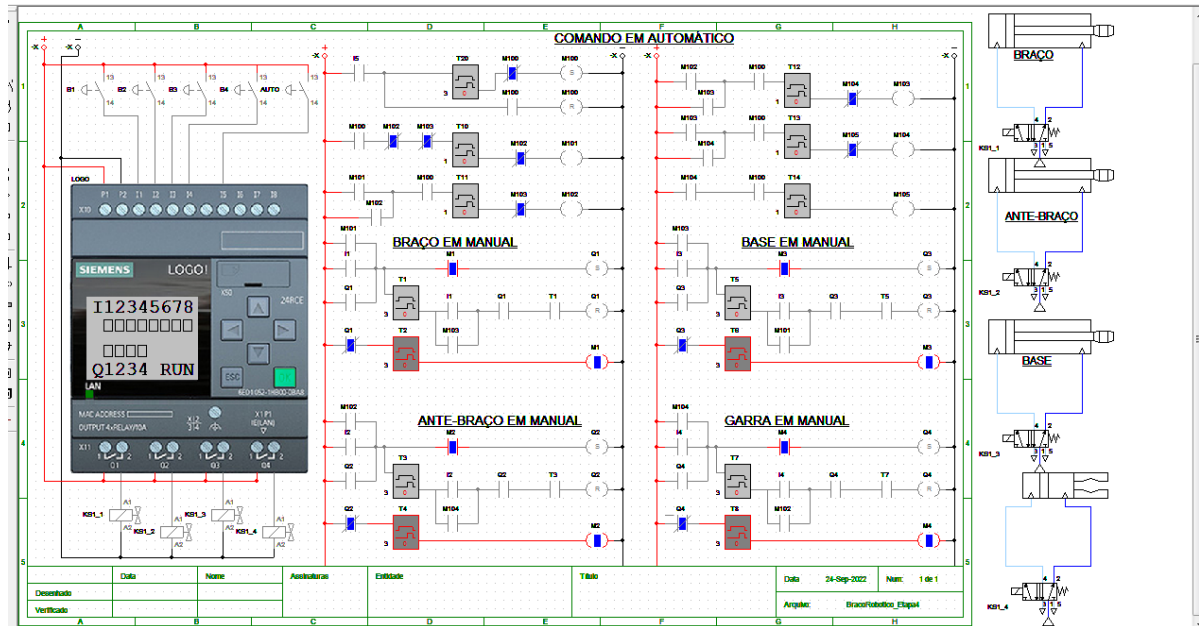
Figura 125: Simulação do acionamento do comando manual para fechamento da garra.



Fonte: Elaborada pelos Autores.

A simulação inicial do funcionamento do braço em automático, onde o comando de partida é realizado por um botão (AUTO) que inicia a sequência de acionamento contínuo das válvulas eletro-pneumaticas em intervalos de tempo entre acionamentos:

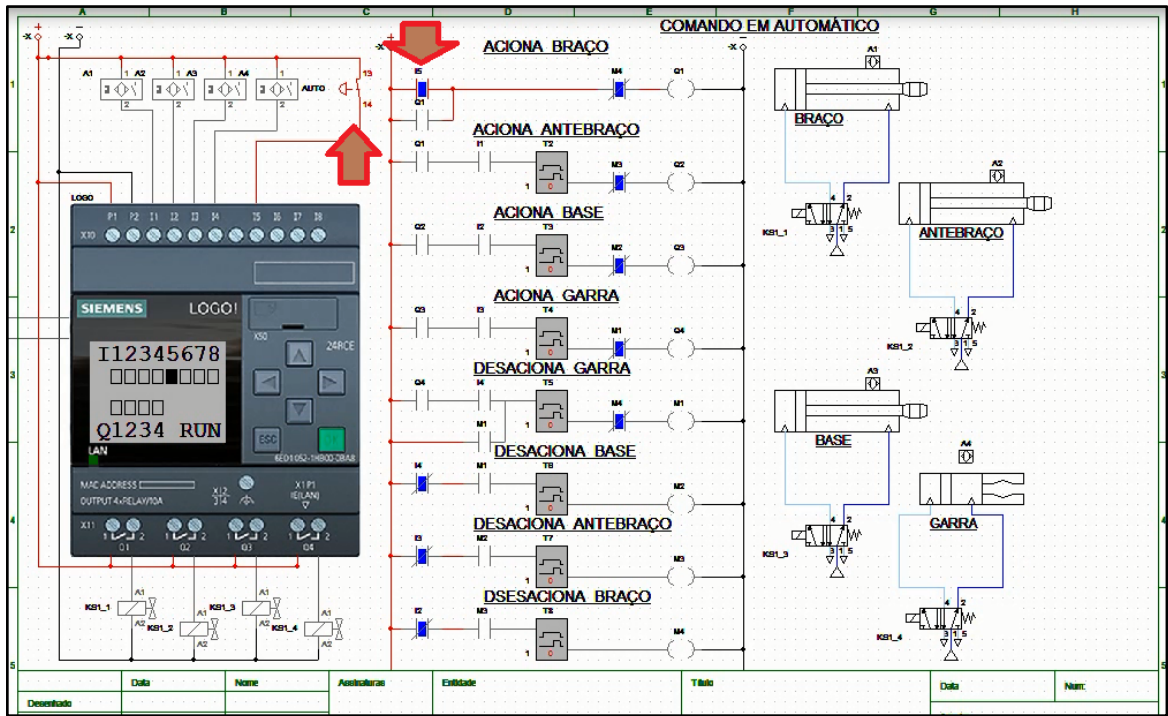
Figura 126: Circuito eletropneumático e lógica Auto/Manual do PLC no CAde_Simu.



Fonte: Elaborada pelos Autores.

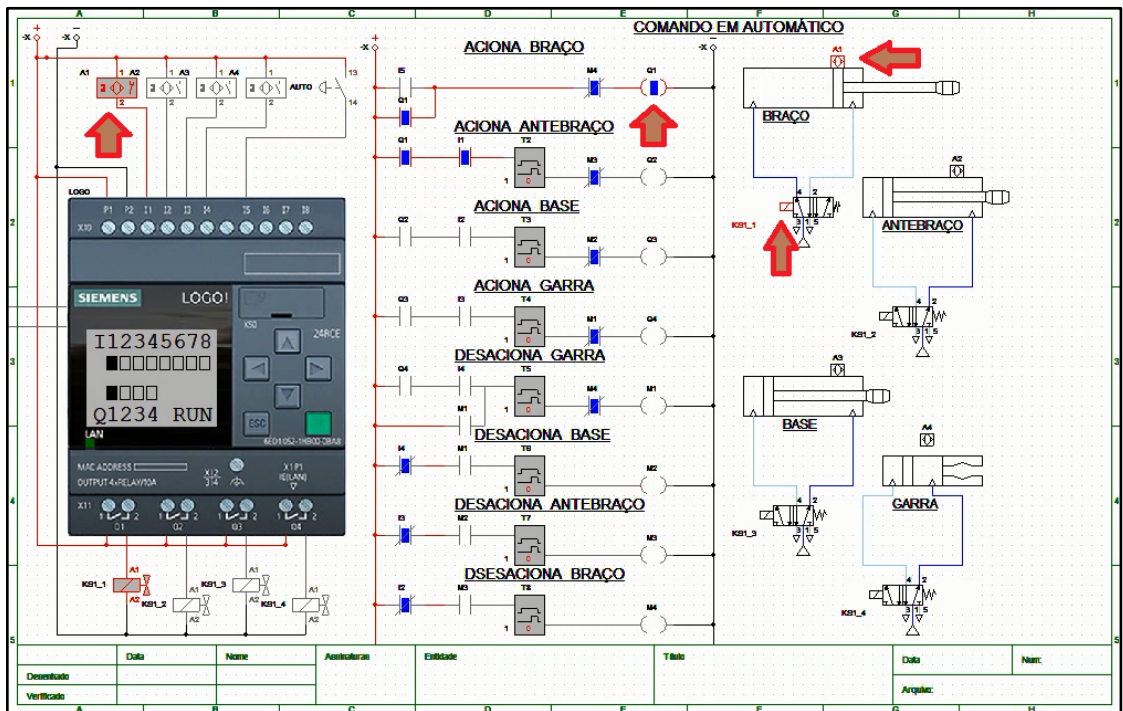
Em um segundo momento de simulação, foi desenvolvida uma lógica de programação onde são utilizados os sensores indutivos de posicionamento de avanço dos cilindros para início do avanço do próximo cilindro, com o acionamento da devida válvula eletropneumática:

Figura 127: Início da lógica automática por status de posição no CADe_Simu.



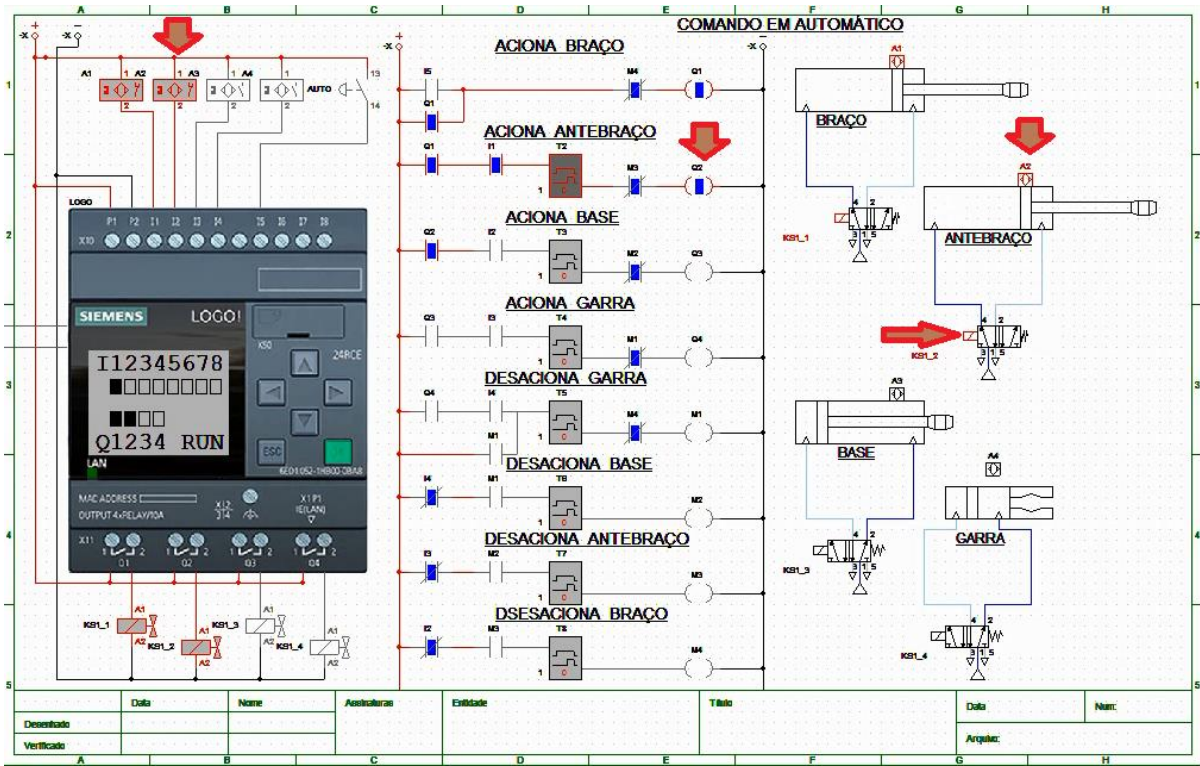
Fonte: Elaborada pelos Autores.

Figura 128: Avanço e status do braço; início do avanço do antebraço em automática por status de posição no CADe_Simu.



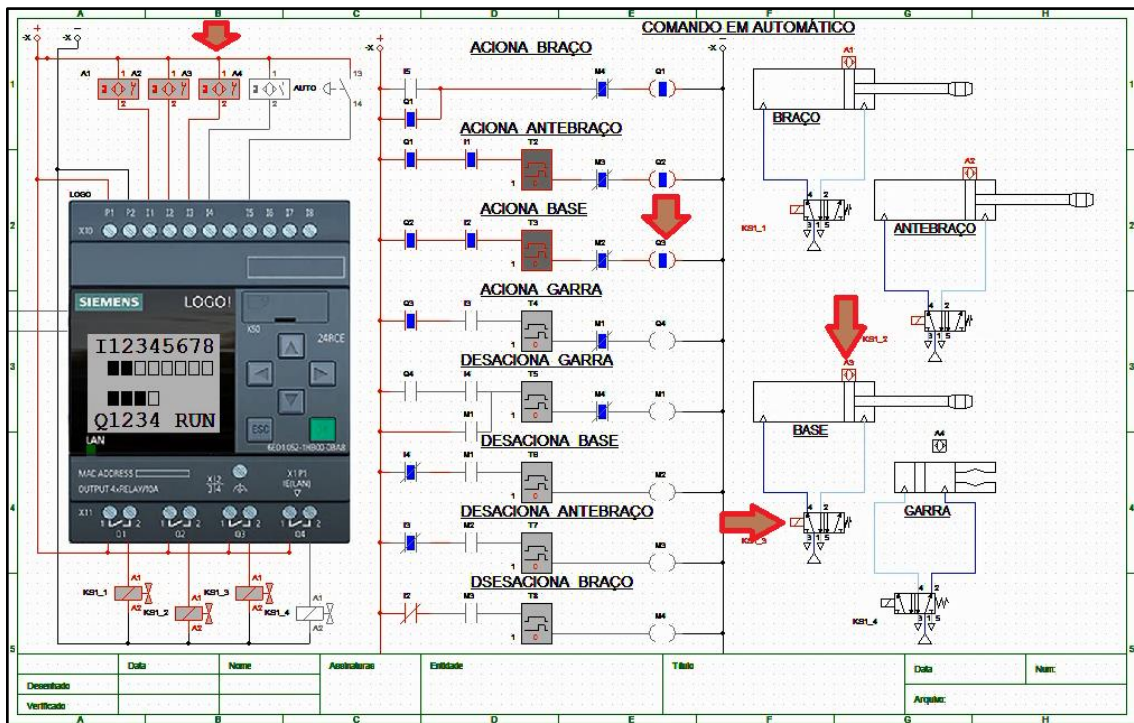
Fonte: Elaborada pelos Autores.

Figura 129: Avanço e status do antebraço; início do avanço da base em automática por status de posição no CADe_Simu.



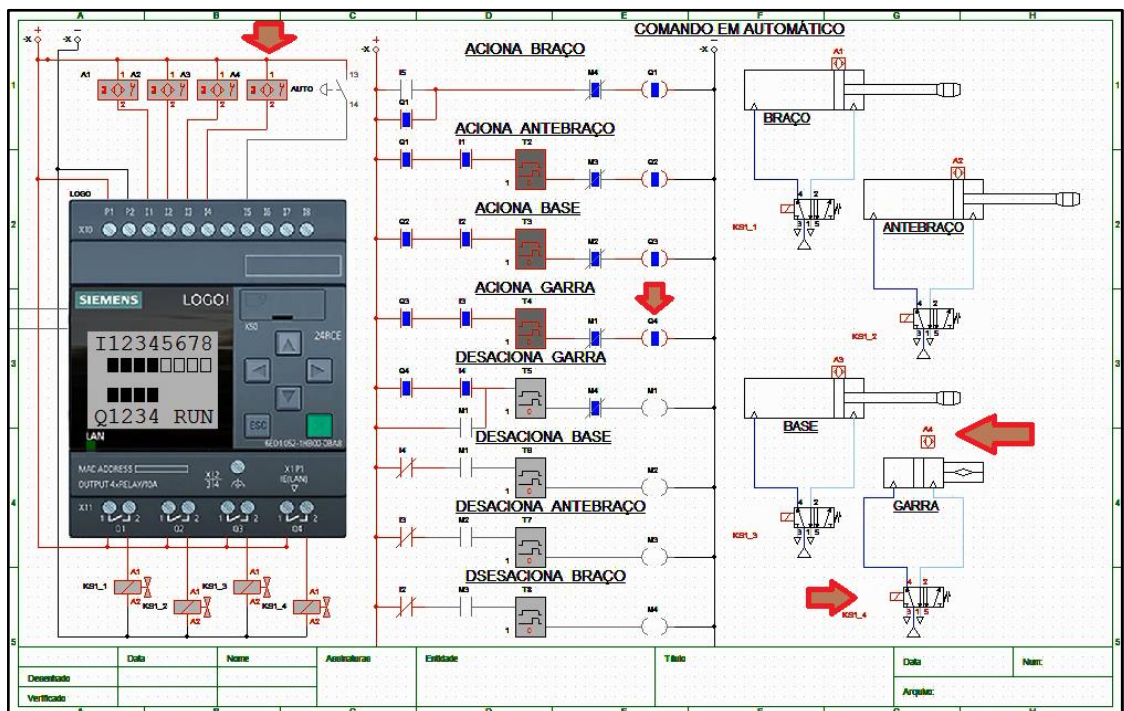
Fonte: Elaborada pelos Autores.

Figura 130: Avanço e status da base; início do avanço da garra em automática por status de posição no CADe_Simu.



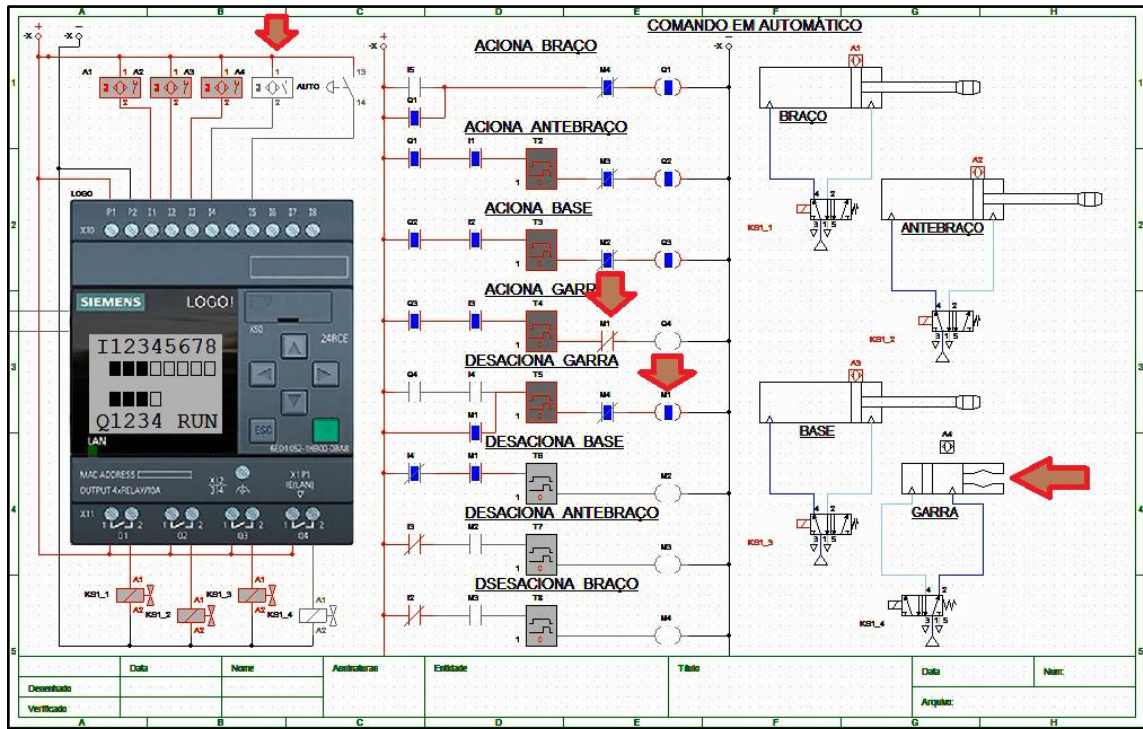
Fonte: Elaborada pelos Autores.

Figura 131: Recuo e status da garra; recuo da base em automática por status de posição no CADe_Simu.



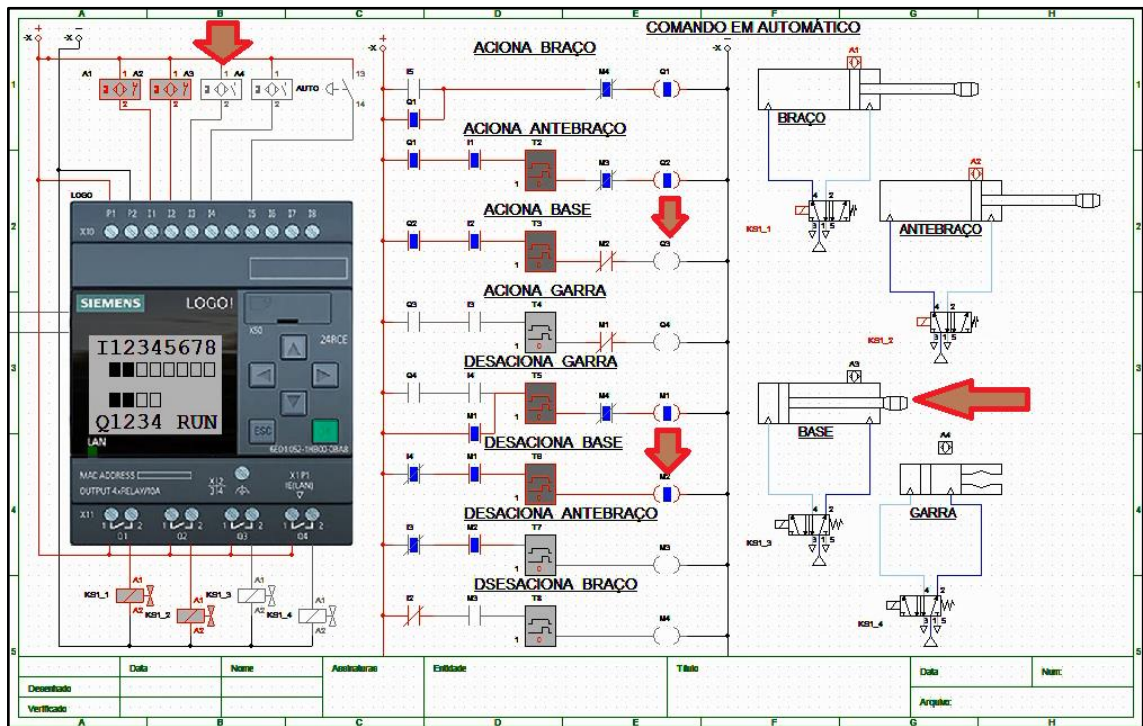
Fonte: Elaborada pelos Autores.

Figura 132: Recuo e status da base; recuo da garra em automática por status de posição no CADE_Simu.



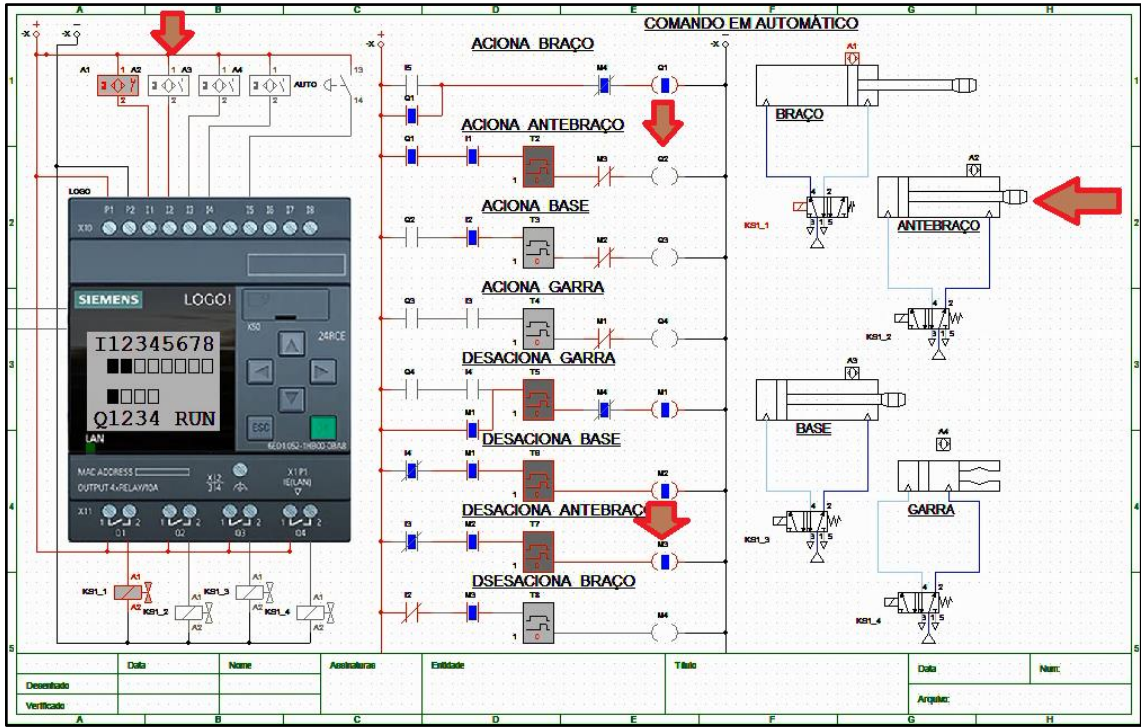
Fonte: Elaborada pelos Autores.

Figura 133: Recuo e status do antebraço; recuo do braço em automática por status de posição no CADE_Simu.



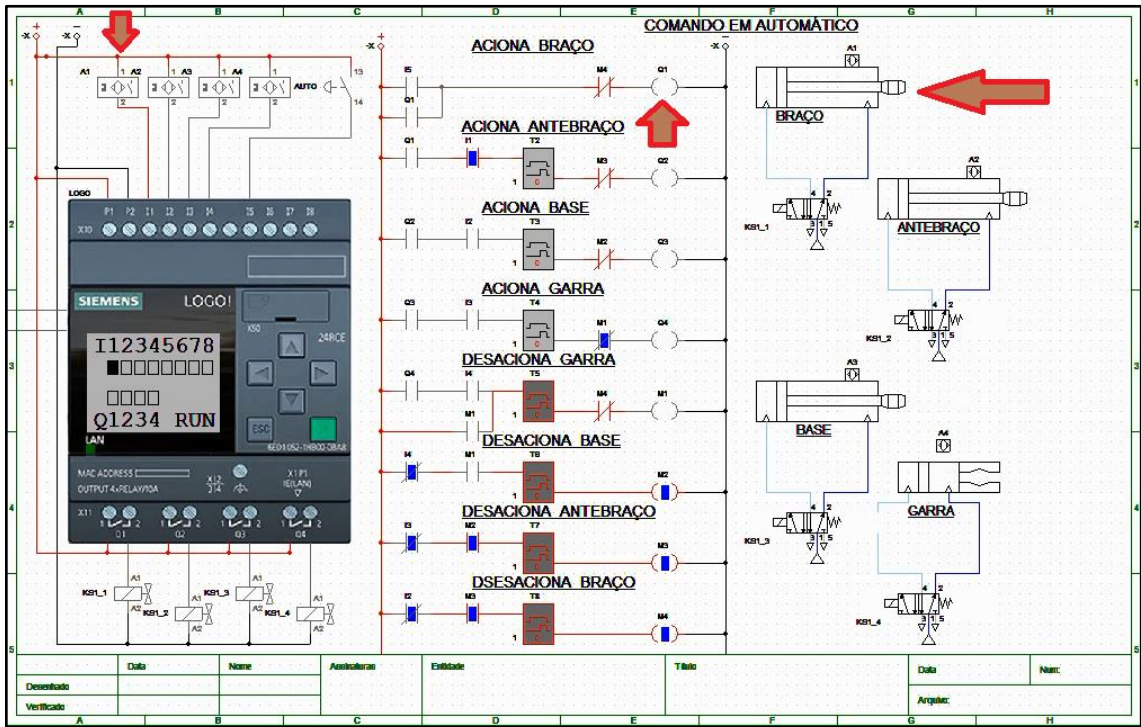
Fonte: Elaborada pelos Autores.

Figura 134: Recuo e status do braço e finalização da sequência automática por status de posição no CADe_Simu.



Fonte: Elaborada pelos Autores.

Figura 135: Fim da sequência automática, com o status do braço não avançado no CADe_Simu.



Fonte: Elaborada pelos Autores.