



Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas
Engenharia de Controle e Automação



Royner de Araujo Fernandes

Automatização do processo de revestimento interno de tubulação reta com poliuretano.

Ouro Preto
2026

Royner de Araujo Fernandes

Automatização do processo de revestimento interno de tubulação reta com poliuretano.

Trabalho apresentado ao Colegiado do Curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenheiro(a) de Controle e Automação.

Orientador: Profa. Dra. Karla Boaventura Pimenta Palmieri

Coorientador: Profa. Ma Regiane de Sousa e Silva Ramalho

Ouro Preto
2026



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
REITORIA
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CONTROLE E
AUTOMACAO



FOLHA DE APROVAÇÃO

Royner de Araújo Fernandes

Automatização do processo de revestimento interno de tubulação reta com poliuretano

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Controle e Automação

Aprovada em 10 de fevereiro de 2026

Membros da banca

Profa. Dra. Karla Boaventura Pimenta Palmieri - Orientadora (Universidade Federal de Ouro Preto)
Profa. M.Sc. Regiane de Sousa e Silva Ramalho - Coorientadora (Universidade Federal de Ouro Preto)
Profa. Dra. Luciana Gomes Castanheira - (Universidade Federal de Ouro Preto)
Técnico Administrativo M.Sc. Fernando dos Santos Alves Fernandes - (Universidade Federal de Ouro Preto)

Karla Boaventura Pimenta Palmieri, orientadora do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 24/02/2026



Documento assinado eletronicamente por **Regiane de Sousa e Silva Ramalho, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 25/02/2026, às 20:34, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1065134** e o código CRC **3E355095**.

Agradecimentos

Aos meus pais Honorino e Rosenilda, que sempre me incentivaram e proporcionaram a oportunidade de cursar uma universidade tão esplêndida. À minha esposa Sara, que me motivou e incentivou em todos os momentos difíceis.

Aos professores deste curso, que proporcionaram conhecimentos inenarráveis.

Agradeço ao técnico do laboratório, Fernando, pelo apoio fundamental na etapa de desenvolvimento do sistema supervisor, cuja experiência prática e dedicação foram essenciais para a conclusão deste trabalho.

E aos meus amigos e colegas que estudaram comigo, contribuindo de certa forma nesta caminhada.

A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu, mas pensar o que ninguém ainda pensou sobre aquilo que todo mundo vê.
— Arthur Schopenhauer.

Resumo

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma planta automatizada para o revestimento interno de tubulações em poliuretano (PU). As peças chegam previamente preparadas de outro setor, já jateadas, com o adesivo aplicado e com o flange de acoplamento e o dispositivo de deposição do PU devidamente instalados. A automação proposta inicia-se a partir do transporte das tubulações, abrangendo as etapas de acoplamento, injeção do poliuretano, centrifugação e cura térmica em estufa. A modelagem tridimensional, realizada no *software SolidWorks*, permitiu a visualização integral da planta, incluindo esteiras transportadoras, centrífuga, estufa e os mecanismos de acoplamento e posicionamento. Na programação em Ladder, foram desenvolvidas rotinas modulares responsáveis pelo controle de motores, sensores e atuadores, incorporando validações automáticas do diâmetro nominal e do comprimento das peças. O sistema supervisório, implementado na plataforma Elipse E3, proporcionou uma interface clara e funcional, com telas de cadastro, tabela de gerenciamento de peças, comandos de operação e mensagens dinâmicas para interação com o operador. Os resultados indicam que a integração entre a modelagem 3D, a programação em Ladder e o sistema supervisório possibilitou o desenvolvimento de um sistema de automação confiável, seguro e eficiente, capaz de monitorar e controlar as etapas automatizadas do processo de revestimento interno de tubulações em PU.

Palavras-chave: Automação industrial. Revestimento interno de tubulações. Poliuretano. Programação em Ladder. Sistema supervisório industrial. Modelagem 3D.

Abstract

This work presents the development of an automated plant for the internal coating of pipelines with polyurethane (PU). The components arrive previously prepared from another sector, already grit-blasted, with the adhesive applied, and with the coupling flange and the PU deposition device properly installed. The proposed automation starts from the transportation of the pipelines and covers the stages of coupling, polyurethane injection, centrifugation, and thermal curing in an oven. Three-dimensional modeling, carried out using the SolidWorks software, enabled a comprehensive visualization of the plant, including conveyor belts, the centrifuge, the oven, and the coupling and positioning mechanisms. In the Ladder programming, modular routines were developed to control motors, sensors, and actuators, incorporating automatic validation of the nominal diameter and the length of the components. The supervisory system, implemented on the Elipse E3 platform, provided a clear and functional interface, featuring registration screens, a component management table, operational commands, and dynamic messages for operator interaction. The results indicate that the integration of 3D modeling, Ladder programming, and the supervisory system enabled the development of a reliable, safe, and efficient automation system, capable of monitoring and controlling the automated stages of the internal polyurethane coating process of pipelines.

Key-words: Industrial automation. Internal pipe coating. Polyurethane. Ladder programming. Industrial supervisory system. 3D modeling.

Lista de figuras

Figura 1 – Jateamento.	30
Figura 2 – Granalha de aço.	30
Figura 3 – Máquina de injeção de PU.	32
Figura 4 – Vista Isométrica da planta.	34
Figura 5 – Acoplamento Oldham	35
Figura 6 – Carrinho fixo e móvel da centrífuga.	35
Figura 7 – Tubulação modelada.	36
Figura 8 – Flange 2 Acoplamento Oldham.	37
Figura 9 – Dispositivo que possibilita o derramamento do PU.	37
Figura 10 – Esteira 1.	38
Figura 11 – Tubulações na Esteira 1.	39
Figura 12 – Distância da tubulação até a borda da borracha da Esteira 1	39
Figura 13 – Inclinação da Esteira 1.	39
Figura 14 – Canais na borracha da Esteira 1.	39
Figura 15 – Proteção do lado oposto ao fluxo na Esteira 1.	40
Figura 16 – Proteção Lateral 1 da Esteira 1.	40
Figura 17 – Proteção Lateral 2 da Esteira 1.	40
Figura 18 – Esteira 2.	41
Figura 19 – Conexão entre as Esteiras 1 e 2.	41
Figura 20 – Conexão entre as Esteiras 2 e 3.	42
Figura 21 – Canais na esteira 2.	42
Figura 22 – Transição entre as esteiras 2 e 3.	43
Figura 23 – Posição do sensor entre as esteiras 1 e 2.	43
Figura 24 – Proteção Lateral Esteira 2.	43
Figura 25 – Proteção do lado oposto ao fluxo Esteira 2.	44
Figura 26 – Esteira 3.	44
Figura 27 – Posição do sensor na esteira 3.	45
Figura 28 – Pistões do sistema basculante Esteira 3 recolhidos.	45
Figura 29 – Pistões do sistema basculante Esteira 3 estendidos.	45
Figura 30 – Passagem da esteira 3 para a centrífuga	46
Figura 31 – Proteção lateral da Esteira 3.	46
Figura 32 – Proteção traseira da Esteira 3.	47
Figura 33 – Centrífuga	47
Figura 34 – Centrífuga aberta em direção à Esteira 3.	48
Figura 35 – Pistões do sistema basculante da Centrífuga.	51
Figura 36 – Centrífuga aberta em direção à Estufa.	52

Figura 37 – Posição dos mecanismos de abertura do lado da Estufa.	52
Figura 38 – Posição dos mecanismos de abertura do lado da Esteira.	52
Figura 39 – Mecanismo de abertura do lado da Estufa.	53
Figura 40 – Mecanismo de abertura do lado da Esteira.	53
Figura 41 – Pino de acoplamento da tampa do lado da Estufa.	54
Figura 42 – Pino de acoplamento da tampa do lado da Esteira.	54
Figura 43 – Acoplamento em U e haste principal do lado da Estufa.	55
Figura 44 – Acoplamento em U e eixo principal do lado da Esteira.	55
Figura 45 – Eixo da base que encaixa na haste principal.	56
Figura 46 – Posicionador.	56
Figura 47 – Pistões do sistema do posicionador.	57
Figura 48 – Posição dos sensores do posicionador.	57
Figura 49 – Posicionador no nível do sensor 1 para peças de DN 30 a 48.	58
Figura 50 – Posicionador no nível do sensor 2 para peças de DN 12 a 28.	58
Figura 51 – Posicionador no nível do sensor 3 para peças de DN 2 a 10.	58
Figura 52 – Direcionador.	59
Figura 53 – Resistências alocadas no posicionador.	59
Figura 54 – Resistências presas à parede da tampa.	60
Figura 55 – Resistências na base do trilho	60
Figura 56 – Haste de fixação do posicionador.	61
Figura 57 – Carrinhos internos da Centrífuga.	61
Figura 58 – Carrinho interno fixo da Centrífuga.	62
Figura 59 – Tubulação DN2 apoiada nos rolamentos menores.	62
Figura 60 – Tubulação DN12 apoiada nos rolamentos maiores.	62
Figura 61 – Tubulação DN30 apoiada nos rolamentos maiores.	63
Figura 62 – Carrinho interno móvel da Centrífuga.	63
Figura 63 – Posição do acionamento do carrinho móvel.	64
Figura 64 – Posição da coroa 2 do acionamento do carrinho móvel.	64
Figura 65 – Exemplo de tubulação na Centrífuga.	65
Figura 66 – Cortes para passagem dos elementos do acionamento.	65
Figura 67 – Conjunto do acionamento no sensor 1 para peças DN2 a 10	66
Figura 68 – Conjunto do acionamento no sensor 2 para peças DN12 a 28.	66
Figura 69 – Conjunto do acionamento no sensor 1 para peças DN30 a 48.	67
Figura 70 – Fixação dos sensores do conjunto do acionamento.	67
Figura 71 – Tubos estruturais do conjunto do acionamento	68
Figura 72 – Conjunto do acionamento na posição inicial.	68
Figura 73 – Conjunto do acionamento deslocando.	68
Figura 74 – Componentes de deslocamento do conjunto do acionamento.	69
Figura 75 – Tubulação pressionando sistema de acoplamento comprimindo a mola.	69

Figura 76 – Mola comprimida.	69
Figura 77 – Acoplamento realizado descomprimindo a mola.	70
Figura 78 – Mola descomprimida.	70
Figura 79 – Canal modificado do Flange 1.	71
Figura 80 – Detalhes do acoplamento no Flange 1.	71
Figura 81 – Estria modificada na Peça intermediária.	71
Figura 82 – Detalhes da peça intermediária.	72
Figura 83 – Encaixe entre Flange 1 e Peça intermediária.	72
Figura 84 – Peça intermediária encaixada no Flange 1.	72
Figura 85 – Acionamento hidráulico para inclinação da centrífuga em sua posição inicial.	75
Figura 86 – Acionamento hidráulico para inclinação da centrífuga acionado.	75
Figura 87 – Inclinação da Centrífuga.	75
Figura 88 – Área de acesso para injeção do PU.	76
Figura 89 – Estufa.	77
Figura 90 – Passagem de tubulação da Centrífuga para a Estufa.	77
Figura 91 – Acionamento de abertura da estufa para a centrífuga do lado 1.	78
Figura 92 – Acionamento de abertura da estufa para a centrífuga do lado 2.	78
Figura 93 – Inclinação da porta 1 da Estufa.	79
Figura 94 – Posição do sensor fim de curso inferior da porta 1 da Estufa.	79
Figura 95 – Posição do sensor fim de curso superior da porta 1 da Estufa.	80
Figura 96 – Porta 2 da estufa fechada.	80
Figura 97 – Porta 2 da Estufa aberta.	81
Figura 98 – Posição do sensor fim de curso superior porta 2 da Estufa.	81
Figura 99 – Saída da tubulação pela porta 2 da Estufa.	82
Figura 100 – Posição do sensor fim de curso inferior porta 2 da Estufa.	82
Figura 101 – Inclinação da Estufa em direção à saída.	83
Figura 102 – Abertura superior para manutenção.	83
Figura 103 – Sistema de aquecimento da estufa.	84
Figura 104 – Captadores e direcionadores do ar interno.	84
Figura 105 – Local das resistências para aquecimento da Estufa.	84
Figura 106 – Tipo de dados: DADOS_PECA.	86
Figura 107 – Controle de inserção e bloqueio de repetição na POU ADD_PECA.	86
Figura 108 – Validação inicial de comprimento e DN.	87
Figura 109 – Verificação dos limites superiores.	87
Figura 110 – Redes de mensagens de erro na POU ADD_PECA.	88
Figura 111 – Movimentação de dados e reset de variáveis na POU ADD_PECA.	88
Figura 112 – Limpesa de tela e incremento de peças.	89
Figura 113 – Condições para remoção de peças.	90

Figura 114 – Controle de QTD_PECAS e reset de variáveis da POU RMV_PECA.	90
Figura 115 – Limpeza da última posição da matriz Pecas.	91
Figura 116 – Validação de parâmetros da peça na POU TEST_START.	92
Figura 117 – Operações de Start e controle de mensagens na POU TEST_START.	92
Figura 118 – Controle de temperatura da Estufa.	93
Figura 119 – Configuração da entrada analógica AI0.	94
Figura 120 – Controle de temperatura da centrífuga.	95
Figura 121 – Configuração da entrada analógica AI1	95
Figura 122 – Controle de motores da POU CAR_INT.	96
Figura 123 – Cálculo do tempo de ativação dos motores.	97
Figura 124 – Finalização do movimento do carrinho móvel interno.	97
Figura 125 – Acionamento das bobinas conforme o DN na POU POSICI.	98
Figura 126 – Redes de acionamento e reset do motor.	99
Figura 127 – Rede de abaixamento do posicionador.	99
Figura 128 – Acionamento das bobinas conforme o DN na POU L_A_ACIONAM.	100
Figura 129 – Redes de acionamento e reset do motor.	101
Figura 130 – Rede de abaixamento do acionamento.	101
Figura 131 – Controle da esteira 1.	102
Figura 132 – Controle das esteiras 2 e 3.	103
Figura 133 – Condições para abertura da centrífuga.	104
Figura 134 – Abertura da centrífuga 1 temporizada.	105
Figura 135 – Fechamento da abertura 1 da centrífuga.	105
Figura 136 – Controle do basculamento da esteira 3.	106
Figura 137 – Controle de aproximação para acoplamento.	107
Figura 138 – Medidas de segurança e retorno do conjunto do acionamento.	108
Figura 139 – Inclinação da centrífuga.	109
Figura 140 – Nivelamento da centrífuga e continuação do processo.	109
Figura 141 – Controle do motor de revestimento.	111
Figura 142 – Abertura da porta 1 da estufa.	112
Figura 143 – Fechamento da porta 1 da estufa.	112
Figura 144 – Abertura e fechamento 2 da centrífuga.	113
Figura 145 – Controle de início automático.	114
Figura 146 – Reorganização da matriz Pecas.	115
Figura 147 – Verificação e reinício do processo.	116
Figura 148 – Controle de peças na estufa e atualização de tempo de cura.	117
Figura 149 – Controle de tempos de cura.	118
Figura 150 – Abertura da porta 2 da estufa.	118
Figura 151 – Reorganização do vetor Tempos.	119
Figura 152 – Fechamento da porta 2 da estufa.	120

Figura 153 – Mensagens de emergência e ausência de peças.	121
Figura 154 – Mensagens de validação e verificação.	122
Figura 155 – Mensagens de processo e controle automático.	123
Figura 156 – Configurações gerais da porta COM1 no MasterTool.	124
Figura 157 – Configuração do driver Modbus RTU no E3 Studio.	125
Figura 158 – Lista de variáveis configuradas no E3 Studio respeitando o limite de 20 tags.	125
Figura 159 – Quadro inicial do supervisório com cabeçalho, tabela de peças e tela inicial.	126
Figura 160 – Tela inicial do supervisório com cabeçalho, tabela de peças e botão de navegação.	127
Figura 161 – Botão de transição da tela inicial para o menu principal.	128
Figura 162 – Menu principal do supervisório com cabeçalho, tabela de peças e botão de navegação.	129
Figura 163 – Configuração do botão START endereçado em %MX0.2.	129
Figura 164 – Orientações operacionais no menu principal.	130
Figura 165 – Tela de cadastro e remoção de peças com cabeçalho, tabela fixa e botões de navegação.	131
Figura 166 – Propriedades dos campos de entrada DN e Comprimento vinculados ao driver Modbus.	132
Figura 167 – Botões de ação para inserir e remover peças, com lógica de pulso via driver Modbus.	132
Figura 168 – Orientações operacionais exibidas na tela de cadastro.	133
Figura 169 – Mensagem de emergência exibida no supervisório.	134
Figura 170 – Mensagem de erro de comprimento inválido.	134
Figura 171 – Mensagem de erro de DN inválido.	135
Figura 172 – Mensagem de erro de DN e comprimento inválidos.	135
Figura 173 – Cadastro de valores aceitáveis no supervisório.	136
Figura 174 – Mensagem após remoção da última peça cadastrada.	136
Figura 175 – Mensagem de confirmação de peça entrando no processo.	137
Figura 176 – Mensagem de parada do início automático.	137
Figura 177 – Mensagem de retomada do início automático.	138
Figura 178 – Alerta de temperatura da centrífuga acima do limite.	138
Figura 179 – Alerta de temperatura da estufa acima do limite.	139
Figura 180 – Mensagem de verificação de acoplamento.	139
Figura 181 – Mensagem de verificação de temperatura e inserção de PU.	140
Figura 182 – Script do evento mensagem_dinamica.	141
Figura 183 – Script do evento OnStartRunning.	142

Lista de tabelas

Tabela 1 – Mercado mundial de PU (%) em 2001 e 2010.	25
Tabela 2 – Relação produto - temperatura para formação do polímero.	31

Lista de abreviaturas e siglas

PU	Poliuretano.
DN	Diâmetro Nominal.
KTL	Kathodische Tauchlackierung (revestimento por imersão catódica).
MEK	Metiletilcetona.
MOCA	4,4 -Metileno-bis (2-cloroanilina).
R.E.	Equivalente de reação (Reaction Equivalent).
RPM	Rotações por minuto.
POU	Unidade de Organização de Programa (Program Organization Unit)
3D	Tridimensional.
s.d.	Sem data.
v/v	Volume por volume.
cv	Cavalo-vapor.
CLP	Controlador Lógico Programável (Programmable Logic Controller)

Lista de símbolos

mm	Milímetro.
μm	Micrômetro.
m	Metro.
cm^3	Centímetro cúbico.
$^{\circ}\text{C}$	Grau Celsius.
h	Hora.
min	Minuto.
s	Segundo.
m/s	Metro por segundo.
m/s^2	Metro por segundo ao quadrado.
rad/s	Radianos por segundo.
Pa·s	Pascal-segundo.
cP	Centipoise.
g	Aceleração da gravidade.
ΔL	Variação de comprimento.
D	Diâmetro.
R	Raio.
r	Raio.
L	Comprimento.
C	Circunferência.
t	Tempo.
v	Velocidade linear.
ω	Velocidade angular.
π	Constante matemática pi.

μ	Viscosidade dinâmica.
μ_{ref}	Viscosidade de referência.
a_c	Aceleração centrífuga.

Sumário

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	Justificativas e Relevância	19
1.2	Materiais e Métodos	19
1.3	Objetivos	20
1.4	Metodologia	21
1.4.1	Levantamento do Processo de Fabricação	21
1.4.2	Modelagem 3D	21
1.4.3	Programação do CLP	22
1.4.4	Supervisório	22
1.4.5	Integração e Validação	22
1.5	Organização e estrutura	23
2	REVISÃO DE LITERATURA	24
2.1	Automação Industrial	24
2.2	Tecnologias Aplicadas em Automação	24
2.3	Modelagem 3D na Indústria	24
2.4	Materiais de Revestimento na Indústria	25
2.5	Validação de Código em Ambientes Simulados	25
2.6	Segurança Ocupacional na Automação	26
2.7	Processo de fabricação PU	26
2.8	Sistemas supervisórios e monitoramento em plantas automatizadas	27
3	DESENVOLVIMENTO	29
3.1	Processo de fabricação utilizado	29
3.1.1	Preparação da superfície	29
3.1.2	Preparação e aplicação do adesivo	30
3.1.3	Preparação do polímero	31
3.1.4	Fundição	32
3.2	Modelagem 3D	33
3.2.1	Tubulações	35
3.2.2	Esteira 1	38
3.2.3	Esteira 2	41
3.2.4	Esteira 3	44
3.2.5	Centrifuga	47
3.2.6	Estufa	76
3.3	Programação em Ladder	85

3.3.1	POU ADD_PECA	85
3.3.2	POU RMV_PECA	89
3.3.3	POU TEST_START	91
3.3.4	POU TEMP_ESTUF	93
3.3.5	POU TEMP_CENTR	94
3.3.6	POU CAR_INT	95
3.3.7	POU POSICI	97
3.3.8	POU L_A_ACIONAM	99
3.3.9	POU ACESTEIRA1	101
3.3.10	POU ACESTEIRA2_3	102
3.3.11	POU AB_1_CENTR	103
3.3.12	POU L_ESTEIRA3	105
3.3.13	POU CAR_EIXO	106
3.3.14	POU LEV_INJE	108
3.3.15	POU AC_REV	110
3.3.16	POU AB_1_ESTF	111
3.3.17	POU AB_2_CENTR	112
3.3.18	POU FIM_INIC_PECA	113
3.3.19	POU AB_2_ESTF	116
3.3.20	POU ALARMES	120
3.4	Supervísório	123
3.4.1	Comunicação entre MasterTool e E3 Studio	123
3.4.2	Criação do quadro principal do supervísório	126
3.4.3	Menu Principal do Supervísório	128
3.4.4	Tela de Cadastro e Remoção de Peças	130
3.4.5	Mensagens e Alertas do Supervísório	133
4	RESULTADOS	143
4.1	Resultados da Modelagem 3D	143
4.2	Resultados da Programação em Ladder	143
4.3	Resultados do Supervísório	144
4.4	Integração do Sistema	144
4.5	Síntese dos Resultados	145
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	146
	Referências	148

1 Introdução

O setor de mineração cresceu 6% no primeiro semestre de 2023 em comparação ao mesmo período de 2022, registrando um faturamento de R\$ 120 bilhões. Os dados foram apresentados na quarta-feira (19/07/2023) pelo presidente do Instituto Brasileiro de Mineração (Ibram), Raul Jungmann [Corrêa \(2023\)](#). Esse crescimento indica a presença de instalações maiores, com um volume de minério elevado e uma maior demanda por equipamentos duradouros.

Neste contexto, há um aumento na procura por empresas que produzam equipamentos confiáveis, ou seja, mais resistentes à corrosão, ao desgaste por abrasão e com um tempo de fornecimento ou fabricação reduzido. A melhoria da confiabilidade dos equipamentos ocorre devido à análise e minimização das falhas que podem ocorrer durante o processo [Fogliatto \(2009, p. 288\)](#).

Entre os objetivos que a automação industrial busca trazer ao ambiente operacional, podem ser citados: melhorar as condições de trabalho dos colaboradores por meio do aumento da segurança e da eliminação de atividades perigosas, simplificar a manutenção e a operação de forma que os trabalhadores possam manipular os processos de produção sem grandes dificuldades, aumentar a produtividade das empresas elevando o número de itens produzidos por hora, sem gerar custos adicionais e tampouco comprometer a qualidade, realizar operações que antes seriam impossíveis de controlar manual ou intelectualmente [SESIRS \(2018\)](#). Isso possibilita atender às demandas do setor minerário de maneira ágil, inovadora, criando equipamentos e plantas automatizadas para reduzir a exposição dos trabalhadores a produtos químicos e equipamentos mecânicos perigosos.

A síntese do poliuretano (PU) foi descoberta na Alemanha em 1930 por Otto Bayer. Desde então, devido à sua versatilidade, esse material tem conquistado um amplo destaque no segmento de materiais orgânicos. Além disso, é empregado como biomaterial em implantes, na engenharia de materiais e na indústria de revestimentos [Trovati et al. \(2010\)](#). O revestimento em poliuretano é recomendado para fluidos com uma velocidade máxima de 5 metros por segundo e assegura um desempenho eficaz com materiais de granulometria inferior a 6 mm [TUBULAÇÃO... \(s.d.\)](#). Esses produtos apresentam propriedades distintas que dependem dos reagentes e da formulação da dispersão aquosa, incluindo excelente resistência mecânica, resistência à corrosão, flexibilidade, rigidez, dureza, além de durabilidade e resistência a produtos químicos e solventes [Gonçalves \(2013\)](#).

Atualmente, o processo de revestimento de um tubo com PU é realizado de duas maneiras mais comuns. Na primeira abordagem, uma matriz é posicionada dentro da tubulação, e o PU é derramado entre a matriz e a parede interna do tubo. Na segunda

abordagem, o PU é derramado diretamente dentro do tubo, vedando ambas as extremidades, e o tubo é colocado em uma centrífuga para que o polímero adira uniformemente à parede interna. Diante do exposto, compreende-se que a automação desse processo reduz os riscos aos quais os colaboradores estão expostos ao lidar com tubos e equipamentos pesados, bem como ao entrar em contato com produtos químicos utilizados no processo.

Neste trabalho, o termo automatização é utilizado para enfatizar o processo de desenvolvimento e implementação da automação industrial proposta.

1.1 Justificativas e Relevância

Segundo [Ribeiro e Neto \(2021\)](#), a automação de uma fábrica têxtil no município de Jaguaruana-CE resultou em um aumento de 300% na produção diária.

Em outro estudo, [Santos Arevalo \(2022\)](#) demonstra que a automação de um processo de balanceamento manual, onde o operador anteriormente tinha que pegar celulares passando em uma esteira na Indústria do Polo Industrial de Manaus, resultou em um aumento de 102% na produção total.

Em uma indústria moveleira no Sul do Brasil, [Brambatti et al. \(2022\)](#) afirmam um crescimento notável em diversos aspectos ao longo de 5 anos. O faturamento bruto aumentou expressivos 450%, enquanto o número de funcionários cresceu de 350 para 490 no mesmo período. Além disso, a área fabril construída triplicou. O custo médio dos produtos foi reduzido em aproximadamente 12,5% nos últimos 5 anos, principalmente devido à otimização das compras e ao aumento da produtividade resultante da automação.

A utilização de sistemas automatizados e robotizados acelera a execução da obra, diminui desperdícios por meio da automação eficiente dos recursos, e minimiza acidentes de trabalho, contribuindo para a redução de riscos ambientais [Gabriel, Amaral e Campos \(2018\)](#).

1.2 Materiais e Métodos

Este trabalho se propõe a apresentar por meio de simulações e demonstrações 3D, a automação de uma linha de revestimento interno de tubulação em PU, fazendo o máximo da programação na linguagem Ladder utilizada em Controladores Lógicos Programáveis (CLPs), recorrendo a outras linguagens apenas para aquilo que exceder as limitações da linguagem Ladder.

- O primeiro passo consiste em realizar o planejamento detalhado da linha de produção, com a assistência do *software* de desenho 3D SolidWorks, desenvolvido pela *Dassault Systèmes* e disponível em seu *site* oficial <https://www.solidworks.com>, tanto nas

versões profissional e estudantil quanto em uma versão de teste gratuito *online*. Nessa etapa inicial, é elaborado o *layout* completo da linha de revestimento, definindo-se com precisão a posição e a interação entre cada equipamento, incluindo esteiras transportadoras, centrífugas, estufas para o processo de cura térmica, sensores de detecção e diversos atuadores. Como resultado, obtém-se a modelagem tridimensional de toda a planta industrial, servindo como referência visual e estrutural para as etapas subsequentes;

- Com a modelagem da planta devidamente concluída, inicia-se a fase de programação, sincronização e validação lógica de todos os dispositivos envolvidos no processo. Essa etapa é realizada com o auxílio do *software* MasterTool IEC, da *Altus*, em sua versão 1.11 — ferramenta amplamente utilizada e ensinada nas disciplinas CAT175 – Informática Industrial, ministrada pela professora Karla Boaventura Pimenta Palmieri, e CAT601 – Projeto de Automação, ministrada pela professora Luciana Gomes Castanheira. Aqui, busca-se assegurar uma integração plena entre sensores, atuadores, controladores e sistemas auxiliares, estruturando uma lógica Ladder robusta e garantindo que todas as operações ocorram de maneira coordenada, confiável e eficiente;
- Por fim, dá-se início à criação do sistema supervisório responsável por proporcionar aos operadores uma interface clara, intuitiva e segura para conduzir a planta automatizada. Essa etapa é realizada utilizando o *software* Elipse E3 Studio, da *Elipse Software*, também abordado nas disciplinas CAT175 e CAT601. Durante o desenvolvimento do supervisório, são projetadas telas funcionais com comandos simples e autoexplicativos, acompanhadas de elementos gráficos representativos dos equipamentos, além de caixas de texto destinadas à exibição de mensagens de erro, alertas operacionais e instruções. Esse conjunto visa facilitar significativamente a supervisão, a operação e o diagnóstico da planta industrial, contribuindo para maior segurança e eficiência do processo.

1.3 Objetivos

Geral

Desenvolvimento de um projeto de automatização para controle de uma linha de revestimento de tubulações em PU, abrangendo diferentes comprimentos e diâmetros.

Específicos

- Desenvolver um modelamento 3D da planta a ser automatizada;

- Realizar o levantamento dos equipamentos a serem utilizados;
- Elaborar um programa em Ladder capaz de controlar todos os motores, sensores e atuadores necessários;
- Desenvolver um sistema supervisório que garanta a troca bidirecional de dados essenciais ao funcionamento do processo, permita o disparo de comandos operacionais básicos e apresente mensagens de erro e alerta para assistência à operação e manutenção.

1.4 Metodologia

A metodologia adotada neste trabalho foi estruturada para garantir o desenvolvimento, implementação e validação da planta de revestimento de tubulação. O processo metodológico integrou aspectos de fabricação, modelagem tridimensional, programação em Ladder e desenvolvimento de supervisório, assegurando que todas as etapas do revestimento fossem contempladas de forma integrada.

1.4.1 Levantamento do Processo de Fabricação

O primeiro passo consistiu em compreender o processo de revestimento com poliuretano (PU), por meio de pesquisa em catálogos técnicos e experiência prática. Foram definidos requisitos como:

- Preparação da superfície (limpeza, jateamento e tratamento químico/mecânico);
- Aplicação do adesivo em camadas controladas, com intervalos de secagem;
- Preparação do polímero, respeitando temperaturas específicas e tempo de *pot life*;
- Fundição e cura em centrífuga e estufa, garantindo aderência e propriedades finais do material.

1.4.2 Modelagem 3D

A modelagem tridimensional, realizada no *SolidWorks*, permitiu visualizar a planta completa e identificar limitações físicas. Os principais resultados foram:

- Definição da estufa com capacidade para até 16 peças ou 13.320 mm de comprimento;
- Desenvolvimento de três esteiras com funções distintas (alimentação, condução e basculamento);

- Concepção da centrífuga com abertura bilateral e mecanismos de acoplamento do tipo Oldham;
- Modelagem das tubulações e flanges conforme normas industriais, assegurando compatibilidade com padrões consolidados.

1.4.3 Programação do CLP

Na etapa de programação do CLP (Controlador Lógico Programável) , foram criadas rotinas para controlar cada parte do processo:

- Criação de tipos de dados específicos para DN (diâmetro nominal) e comprimento;
- Desenvolvimento de aproximadamente 20 POUs (*Program Organization Units*), cada uma responsável por uma função distinta;
- Uso de variáveis auxiliares e globais para integração entre rotinas;
- Implementação de regras de validação que impediram o cadastro de peças fora dos limites técnicos;
- Comunicação eficiente com o supervisório por meio de alocações de memória flexíveis.

1.4.4 Supervisório

O sistema supervisório, desenvolvido na plataforma Elipse E3, foi responsável pela interface homem-máquina. Os principais elementos implementados foram:

- Tela de cadastro de peças e tabela para acompanhamento;
- Menu inicial com botões de controle (START, STOP, PLAY);
- Mensagens dinâmicas exibidas por meio de scripts (`mensagem_dinamica` e `OnStartRunning`);
- Alertas críticos de sobretemperatura e acionamento do botão de emergência.

1.4.5 Integração e Validação

Após o desenvolvimento das etapas, o sistema foi integrado e submetido a testes em ambiente simulado. A validação contemplou:

- Cadastro e remoção de peças com base em regras de DN e comprimento;
- Transporte seguro pelas esteiras até a centrífuga e estufa;
- Confirmações manuais de acoplamento e temperatura;

- Exibição correta de mensagens dinâmicas e alertas críticos;
- Resposta imediata ao acionamento do botão de emergência.

A metodologia aplicada foi estruturada com o objetivo de garantir segurança, confiabilidade e eficiência ao sistema, visando atingir os objetivos propostos para o desenvolvimento da planta automatizada de revestimento de tubulações.

1.5 Organização e estrutura

As próximas seções do trabalho estão estruturadas da seguinte forma: no Capítulo 2, apresenta-se uma revisão de literatura relacionada ao tema, abordando aspectos como Automação Industrial, Tecnologias Aplicadas em Automação, Modelagem 3D na Indústria, Materiais de Revestimento na Indústria, Exemplos de Automação na Indústria, Validação de Código em Ambientes Simulados, Inovações em Automação Industrial, Segurança Ocupacional na Automação, Sustentabilidade na Automação, e Desafios e Soluções na Automação de Linhas de Produção.

No Capítulo 3, concentram-se as etapas do desenvolvimento do trabalho, destacando-se escolhas realizadas, obstáculos enfrentados e demonstrações relevantes. Por fim, o Capítulo 4 apresenta os resultados obtidos ao longo do desenvolvimento e execução do trabalho. Essa estrutura visa proporcionar uma compreensão clara e organizada do conteúdo abordado.

2 Revisão de literatura

2.1 Automação Industrial

Um Controlador Lógico Programável (CLP) é uma forma especial de controlador baseado em microprocessador que utiliza uma memória programável para armazenar instruções e implementar funções como lógica, sequenciamento, temporização, contagem e aritmética, com o propósito de controlar máquinas e processos. Os CLPs são projetados para serem operados por colaboradores com conhecimento talvez limitado em computadores e linguagens de computação [Bolton \(2006b\)](#). Através da sua capacidade de armazenamento de instruções programáveis e sua operação simplificada, os CLPs representam uma solução indispensável na automação industrial, permitindo o controle eficaz de máquinas e processos por operadores com diversos níveis de habilidade em computação.

2.2 Tecnologias Aplicadas em Automação

A tecnologia pode ser ampliada com base em princípios científicos teóricos (tácitos) e práticos (explícitos). Esses princípios podem ser usados para desenvolver habilidades, possibilitando a criação de novos produtos e serviços, além de melhorar os sistemas de produção e entrega ao consumidor em geral. Normalmente, observa-se a implementação de tecnologias desenvolvidas a partir de princípios científicos, com o uso de ferramentas, processos e técnicas, com o objetivo de melhorar o dia a dia da sociedade. A aplicação da tecnologia se manifesta em produtos e serviços com recursos cada vez mais avançados. No entanto, a tecnologia também é impactante na identificação de oportunidades e na resolução de problemas ou erros nos serviços ([AKABANE, 2020](#)). A interação entre os princípios científicos e práticos na ampliação da tecnologia impulsiona a inovação e a sustentabilidade em diversas áreas, contribuindo para a evolução contínua da sociedade.

2.3 Modelagem 3D na Indústria

Desde o início dos tempos, o homem tem usado, basicamente, duas maneiras de representar suas ideias acerca de um objeto de forma que sejam compreendidas por outras pessoas: através de esculturas (fabricando modelos físicos em três dimensões) ou através de desenhos (representando em perspectiva ou vistas ortogonais), sendo que o processo de codificação e decodificação de desenhos 2D é possível de erros, tanto por parte de quem gera o código quanto por parte de quem o interpreta [Ponticelli e Suski \(2010\)](#). A modelagem 3D, ao proporcionar representações virtuais detalhadas e precisas de objetos, supera as

limitações dos desenhos 2D, facilitando a comunicação e compreensão de conceitos e ideias complexas.

2.4 Materiais de Revestimento na Indústria

A utilização do Poliuretano (PU) como revestimento ocupa o terceiro lugar no mercado mundial, conforme a Tabela 1. O mercado de PU, iniciado nos anos 1930, experimentou um crescimento significativo, passando de 10 milhões de toneladas em 2000 para um consumo mundial estimado em 13,6 milhões de toneladas em 2005, com projeção de atingir 16 milhões de toneladas em 2010. Entre 2000 e 2005, a taxa média global anual de crescimento foi de 6,7%, prevendo-se uma desaceleração para 4,2% entre 2005 e 2010. Atualmente, os PU's representam aproximadamente 5% do mercado global de plásticos, demonstrando sua versatilidade como um dos produtos mais empregados pela indústria. Os principais centros consumidores estão na América do Norte, Europa e Ásia. O crescimento global, em grande parte impulsionado pelas economias asiáticas, contrasta com as maiores margens de lucro observadas nos mercados tradicionais da Europa e América do Norte, onde as excelentes propriedades de desempenho dos PU's têm sido exploradas em novas aplicações nos setores médico, automotivo e de construção. (VILAR, 2010). A contínua expansão e inovação no mercado de poliuretanos refletem não apenas a sua versatilidade e adaptação a novas demandas industriais, mas também o seu papel fundamental na condução de avanços tecnológicos e na busca por soluções cada vez mais eficientes e sustentáveis.

Produto / Aplicação	2001	2010
Colchões & Estofados	32	26
Calçados	6	6
Elastômeros & RIM	6	7
Espumas Moldadas	15	17
Revestimentos, Adesivos & Selantes	18	19
Construção	17	24
Equipamentos (isolamento térmico)	6	5

Tabela 1 – Mercado mundial de PU (%) em 2001 e 2010.

2.5 Validação de Código em Ambientes Simulados

Desenvolver programas é uma tarefa complexa que demanda conhecimento técnico, organização, atenção, criatividade e comunicação eficaz. É previsível que, em alguns momentos do desenvolvimento, em meio às milhares de linhas de código, alguns desses requisitos possam falhar, porém, é imprevisível quando isso ocorrerá. Portanto, é essencial que exista uma maneira fácil e ágil de executar todos os testes a qualquer momento, o

que é viabilizado por meio de testes automatizados. A automação dos testes proporciona segurança à equipe para realizar alterações no código, seja por manutenção, refatoração ou inclusão de novas funcionalidades. Além disso, representar casos de teste por meio de programas permite a criação de testes mais elaborados e complexos, que podem ser repetidos inúmeras vezes e a qualquer momento. Como resultado, o tempo gasto na verificação do sistema aumenta, enquanto o tempo dedicado à identificação e correção de erros diminui, uma vez que estes tendem a ser descobertos mais cedo. À medida que o sistema cresce, os detalhes de implementação podem ser esquecidos pelos programadores ao longo do tempo, tornando a depuração mais trabalhosa quanto mais tarde um erro é descoberto (BERNARDO; KON, 2008). Portanto, a integração de testes automatizados em ambientes simulados torna-se fundamental para garantir a robustez e eficácia do código desenvolvido, permitindo uma validação precisa e contínua das funcionalidades do sistema em um contexto simulado antes da implantação em ambiente de produção.

2.6 Segurança Ocupacional na Automação

Segundo Figueredo (2015), a proposta METARAP – Metodologia de Uso de Automação para Redução de Acidentes Portuários – analisou a relação entre ocorrências de acidentes e processos de movimentação portuária envolvendo os principais tipos de cargas, como grânéis sólidos, grânéis líquidos, contêineres e carga geral.

Para quantificar os resultados e permitir uma discussão sustentada, foram utilizados dados das atividades dos Trabalhadores Portuários Avulsos (TPAs) no Porto de Santos, no período de 2009 a 2014, totalizando mais de 30 milhões de horas-homem de trabalho.

Com base na análise dos acidentes registrados, observou-se uma redução de 53,97% na taxa de frequência e de 39,45% na taxa de gravidade, calculadas por milhão de horas de exposição ao risco.

Os resultados obtidos destacam a eficácia das estratégias de automação na redução significativa das taxas de frequência e gravidade de acidentes portuários. Essa abordagem, baseada em dados concretos das atividades dos Trabalhadores Portuários Casuais, evidencia o potencial da automação para melhorar substancialmente a segurança ocupacional nos ambientes portuários, contribuindo para um ambiente de trabalho mais seguro e produtivo.

2.7 Processo de fabricação PU

Nos PUs moldados, normalmente as matérias-primas são formuladas em sistemas de dois componentes, fornecidos pelos fabricantes: o componente isocianato (A) pode ser Difenilmetano diisocianato (MDI) puro, MDI modificado, MDI polimérico, Tolueno diisocianato (TDI) puro, TDI modificado ou ainda, prepolímeros de MDI, como no caso

dos calçados, o componente polioliol (B) pode conter uma mistura de polióis, extensores ou reticuladores, agente de expansão, catalisadores, surfactantes, corantes, retardante de chama, agentes antienvelhecimento, e, em alguns casos, desmoldante interno.

Os estágios do processamento dos PUs moldados normalmente são:

1. Pré-condicionamento dos dois componentes líquidos, isto é, ajuste da temperatura, remoção do ar ou gás dissolvido e ajuste do nível do gás nucleante;
2. Dosagem dos componentes nas proporções desejadas através de bombas dosadoras;
3. Mistura, das quantidades dosadas dos componentes, em uma cabeça misturadora para formar a mistura reagente;
4. Distribuição ou injeção da mistura reagente num molde preparado e condicionado termicamente, através de entrada desenhada para prevenir turbulência e evitar a retenção de ar;
5. Um período de tempo para permitir a polimerização da mistura reagente e cura suficientemente para permitir a desmoldagem;
6. Desmoldagem da peça acabada;
7. Acabamento se necessário.

O processamento dos PUs moldados é descontínuo e são utilizadas máquinas injetoras. Nelas, as matérias-primas são homogeneizadas por recirculação, misturadas em um cabeçote, e distribuídas em moldes abertos ou injetadas em moldes fechados onde a reação ocorre. Neste momento os reagentes e aditivos, utilizados nos sistemas desempenham seu papel, promovendo a estabilidade da mistura reagente e o balanço adequado entre as diferentes reações e, no caso de materiais celulares a espuma expande na cavidade preenchendo-a, resultando em alta qualidade dos produtos finais. Como a moldagem é uma operação em batelada, os equipamentos comerciais operam intermitentemente. Válvulas são projetadas para que as matérias-primas recirculem entre as injeções, de forma que a mistura esteja homogênea quando vertida no molde. A quantidade de reagentes deve ser cuidadosamente dosada para prover a massa necessária antes da espumação no molde (VILAR, 2010).

2.8 Sistemas supervisórios e monitoramento em plantas automatizadas

Em sistemas de automação industrial, os sistemas supervisórios desempenham um papel fundamental na interface entre o operador e o processo produtivo, permitindo

o monitoramento em tempo real, a operação segura dos equipamentos e a visualização das variáveis críticas do sistema. Esses sistemas atuam como uma camada superior da automação, integrando informações provenientes de controladores programáveis e disponibilizando-as de forma clara e organizada para tomada de decisão [Bolton \(2006a\)](#).

Além do monitoramento, os sistemas supervisórios possibilitam o envio de comandos ao processo, o gerenciamento de alarmes e a sinalização de falhas operacionais, contribuindo para o aumento da segurança, da confiabilidade e da eficiência do sistema como um todo. A utilização de interfaces homem-máquina (IHM) bem projetadas reduz a probabilidade de erros operacionais e facilita a identificação de condições anormais durante a operação da planta [Silveira e Santos \(2015\)](#).

Nesse contexto, a adoção de um sistema supervisório mostra-se especialmente relevante em plantas automatizadas que envolvem movimentação de cargas, acionamentos eletromecânicos e processos térmicos, como no revestimento interno de tubulações com poliuretano. A supervisão adequada permite acompanhar o estado do processo, validar intertravamentos, registrar eventos e fornecer informações essenciais para a operação e a manutenção do sistema.

3 Desenvolvimento

3.1 Processo de fabricação utilizado

Com base em uma pesquisa minuciosa nos catálogos das principais empresas fornecedoras de matérias-primas para a produção de poliuretano, tais como a renomada [CHEMITAC...](#) (s.d.) e a inovadora [LANXESS...](#) (s.d.), aliada à experiência direta do autor nesta área, reconhece-se que o processo de revestimento pode variar consideravelmente de uma empresa para outra, bem como em função do tipo específico de polímero empregado. Dessa forma, o trabalho desenvolvido concentra-se na automatização das etapas compreendidas entre a movimentação das tubulações já preparadas, o processo de centrifugação e a cura térmica, não abrangendo as fases anteriores de preparação da superfície e aplicação do adesivo, as quais são apresentadas apenas para fins de contextualização e compreensão global do processo.

3.1.1 Preparação da superfície

Segundo o catálogo da [CHEMITAC...](#) (s.d.), a preparação da superfície compreende duas etapas:

1. Limpeza - A limpeza tem como objetivo remover completamente óleos, graxa e sujeira e pode ser feita com solvente ou por meio de banho alcalino. Os solventes ou produtos alcalinos devem ser mantidos livres de contaminação e substituídos quando necessário.
2. Tratamento da superfície - Para obter um bom resultado de adesão, a superfície deve receber tratamento mecânico ou químico antes da aplicação do adesivo.
 - Tratamento químico - Fosfatização, anodização e tratamento KTL (banho catiônico) são os métodos mais utilizados para metal;
 - Tratamento mecânico - Recomenda-se jatear a superfície (como exemplificado na Figura 1) até que esta atinja a rugosidade de 15 μm (Rz). A granalha (demonstrada na Figura 2) deve ser mantida livre de contaminação e substituída quando necessário. Os resíduos do jateamento devem ser removidos e o tempo decorrido entre o jateamento e a aplicação do adesivo deve ser o mínimo possível para evitar a oxidação da peça.



Figura 1 – Processo de jateamento.

Fonte: <https://www.lojawltintas.com.br>

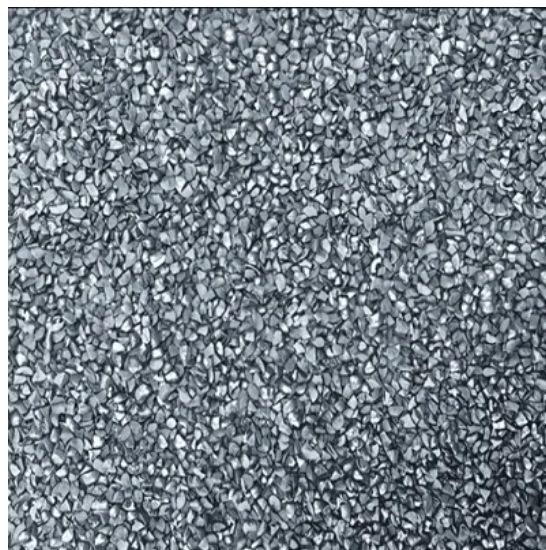


Figura 2 – Granalha de aço G40.

Fonte: <https://www.lojawltintas.com.br>

Recomenda-se, segundo profissionais da área, que a limpeza seja realizada imediatamente após o tratamento mecânico, caso este seja o método de preparação de superfície adotado pela empresa. No contexto específico deste trabalho, as tubulações de aço chegam de outro setor prontas para receber o revestimento, ou seja, previamente jateadas e limpas, tendo cumprido um período de espera de aproximadamente 30 minutos, necessário para garantir a completa evaporação de qualquer resíduo de solvente ou agente alcalino que possa interferir no processo de revestimento. Além disso, cada tubulação passa por um procedimento de sopro com ar limpo em seu interior, assegurando a remoção total de partículas remanescentes de granalha ou de fragmentos metálicos, deixando-a completamente preparada para a etapa de aplicação do adesivo.

3.1.2 Preparação e aplicação do adesivo

Segundo o catálogo da [CHEMITAC...](#) (s.d.), a preparação e aplicação do adesivo ocorrem seguindo as etapas descritas a seguir:

1. Agitação - O produto deve ser agitado antes do uso para a sua homogeneização.
2. Diluição - A diluição deve ser feita com Metiletilcetona (MEK) ou Propileno glicol metil éter. A porcentagem de diluição depende do tipo de aplicação:
 - Imersão - 20-50% v/v;
 - Pincel/Rolinho - 10-20% v/v;
 - *Spray* - 50-100% v/v.

3. Camada de aplicação - O filme resultante da aplicação do adesivo assumirá uma cor característica do tipo de adesivo escolhido e deve ter entre 15 e 25 μm ;
4. Secagem - O tempo médio de secagem é de 30 a 45 minutos à temperatura ambiente. Se houver necessidade de reduzir o tempo de secagem, recomenda-se o uso de ar forçado a 70°C por 15 minutos no máximo. Não utiliza-se nesta etapa temperaturas mais altas para que não ocorra a pré-cura do adesivo. Quando o filme estiver totalmente seco, a peça está pronta para a vulcanização. Os valores referentes ao tempo de secagem e à espessura da camada são apenas uma referência. Eles podem variar conforme o processamento;
5. Armazenamento das peças - As peças adesivadas podem ser armazenadas por até 30 dias em ambiente seco e livre de contaminação.

Neste trabalho, considera-se que as peças já terão recebido previamente a aplicação do adesivo em outro setor, utilizando o método de aplicação por rolinho a 15%. Esse procedimento consiste em duas demãos por tubo, respeitando um intervalo médio de 15 minutos entre as aplicações para garantir a uniformidade da camada. Após a conclusão das demãos, as peças passam por um período de secagem de aproximadamente 45 minutos, assegurando que o adesivo esteja em condições ideais para a etapa subsequente de revestimento.

3.1.3 Preparação do polímero

Segundo o catálogo da [LANXESS...](#) (s.d.) há 2 produtos a serem combinados em temperaturas corretas para formar o polímero, conforme tabela a seguir:

Item	Produto	Temperatura
Pré-polímero	Depende do polímero a ser formado	70°C
Curativo	MOCA, 95% R.E.	110-115°C

Tabela 2 – Relação produto - temperatura para formação do polímero.

Durante a mistura, é possível incorporar o pigmento na cor desejada para modificar a característica visual transparente do PU. Após essa etapa, inicia-se o "*pot life*" do produto, que varia conforme o tipo de polímero desejado. Dentro desse período, é crucial realizar a desaeração, removendo ao máximo as bolhas de ar geradas na mistura, a fim de assegurar a qualidade do produto final. Somente após esse processo é que se procede com o despejo do PU no molde, tubulação ou peça a ser revestida, garantindo assim a obtenção de resultados ótimos e livres de imperfeições.

Atualmente, há uma variedade de equipamentos disponíveis para otimizar o processo, incluindo sistemas de armazenamento com controle preciso de temperatura, misturadores que mantêm a temperatura adequada, dispositivos de desaeração equipados com geradores

de vácuo e injetoras. Dentro dessa categoria, existem modelos avançados que não apenas armazenam o material, mas também realizam a dosagem, mistura e desaeração de acordo com as configurações estabelecidas em sua interface, oferecendo uma solução completa e integrada como os modelos da *BOBO Machine* (ver exemplo na Figura 3) que podem ser verificados e adquiridos pelo seu *site* oficial <https://www.bobomachine.com>.



Figura 3 – Máquina de injeção de PU CZ-1800.

Fonte: <https://www.bobomachine.com>

No âmbito deste projeto, será empregada uma injetora de última geração, responsável por conduzir de maneira integral todas as etapas mencionadas anteriormente. Como matéria-prima primordial, optou-se pelo pré-polímero VIBRATHANE® B 602, fabricado pela renomada empresa LANXESS... (s.d.), que possui um "*pot life*" de 14 minutos, garantindo assim a qualidade e eficiência do processo.

3.1.4 Fundição

Conforme as especificações detalhadas no catálogo fornecido pela LANXESS... (s.d.), é imprescindível que, além de estar devidamente preparado, o molde, tubulação ou peça a ser revestida seja mantido a uma temperatura precisa de 100°C antes da aplicação do PU. É essencial observar que o tempo de desmolde nominal é de 60 minutos, seguido por um período de cura prolongado de 16 horas a 100°C. Esse procedimento prolongado é crucial para assegurar que as propriedades específicas descritas no catálogo sejam completamente alcançadas, garantindo a qualidade e a eficácia do produto final.

No decorrer deste projeto, a tubulação a ser revestida será submetida a um processo meticuloso. Inicialmente, será movida e direcionada por esteiras até ser colocada em uma centrífuga aquecida, visando alcançar a temperatura ideal. Após a aplicação do poliuretano (PU), a tubulação continuará sendo girada e aquecida a 100°C, empregando a força centrífuga para assegurar a aderência do material à parede do tubo até atingir o tempo de desmolde nominal. Em seguida, será transferido para uma estufa, onde permanecerá por 16 horas, mantendo-se na mesma temperatura, a fim de completar o processo de cura total.

3.2 Modelagem 3D

A etapa de modelagem tridimensional desempenhou um papel fundamental no desenvolvimento deste projeto, pois permitiu a visualização completa da planta automatizada antes da fase de programação (ver Figura 4). Para essa finalidade, utilizou-se o *software* SolidWorks, no qual foi desenvolvida toda a estrutura física do sistema, tomando como referência os conceitos funcionais dos equipamentos necessários ao processo.

As geometrias de componentes como motores, modelos de esteiras, pistões hidráulicos, coroas e aquecedores da centrífuga foram obtidas a partir de bibliotecas técnicas disponibilizadas no GRABCAD, por meio de seu *site* oficial <https://grabcad.com/library/tag/library>, sendo posteriormente adaptadas às necessidades do projeto.

A centrífuga, por exemplo, foi concebida considerando os requisitos de articulação para a entrada e saída das tubulações, bem como a necessidade de um sistema de acionamento capaz de garantir a rotação adequada das peças durante o processo de revestimento. Além disso, foi modelada uma estufa de grandes dimensões, projetada para comportar até 16 peças simultaneamente ou até o limite de preenchimento de seu comprimento interno.

A modelagem incluiu ainda três esteiras com funções distintas: uma esteira principal para posicionamento inicial das peças, uma esteira intermediária destinada ao fluxo unitário e uma terceira esteira responsável por realizar o movimento de basculamento da tubulação para inserção na centrífuga e posterior transferência para a estufa. Além desses elementos, foram desenvolvidas estruturas de apoio, motores, bases para sensores e as próprias tubulações, embora sensores e cabos de aço não tenham sido modelados. Além disso, foi considerado que os motores possuem freios que os mantêm parados até o seu acionamento, com exceção do motor que rotaciona a peça para o revestimento na centrífuga, pois esse movimento não precisa ser interrompido imediatamente, e do motor que movimenta o conjunto do acionamento, uma vez que este é parado mecanicamente pela própria tubulação no interior da centrífuga. Esses motores são elétricos, equipados com freios eletromagnéticos que liberam quando energizados e acionam quando desenergizados.

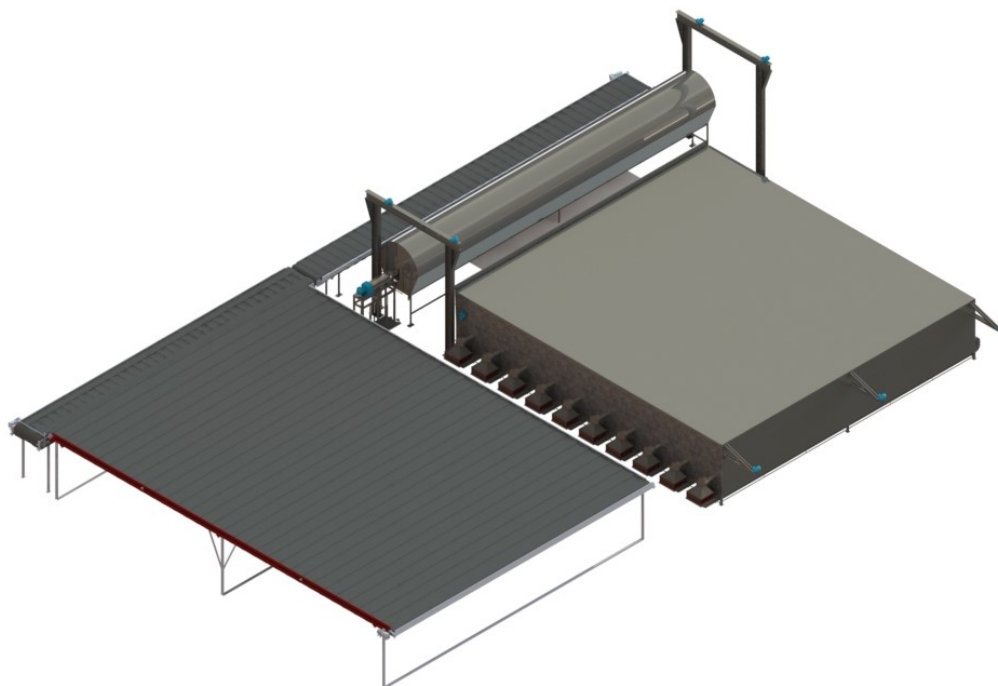


Figura 4 – Vista Isométrica da planta.

Fonte: Autor.

Durante esse processo, algumas dificuldades foram encontradas, especialmente na definição de um mecanismo que permitisse o acoplamento e desacoplamento eficiente da tubulação. Após análises e testes conceituais, optou-se pelo uso de um acoplamento *Oldham*, que atendeu às necessidades de transmissão de movimento entre dois eixos deslocados entre si, sendo composto por dois flanges (cada flange contém um canal para se acoplar à terceira parte) e uma peça intermediária que se movimenta para compensar a diferença de alinhamento entre os eixos (ver Figura 5). Outro desafio relevante foi o desenvolvimento de um apoio capaz de sustentar tubulações desde DN 2 até DN 48 dentro da centrífuga, o que resultou na adoção de dois conjuntos de rolamentos: um mais próximo e menor para diâmetros reduzidos e outro mais espaçado e maior para tubulações de maior porte (ver Figura 6). De modo geral, a modelagem apresentou alto nível de detalhamento e teve como principal objetivo estudar o posicionamento dos componentes e compreender a dinâmica operacional da planta, fornecendo imagens fundamentais para embasar a etapa de programação do sistema.

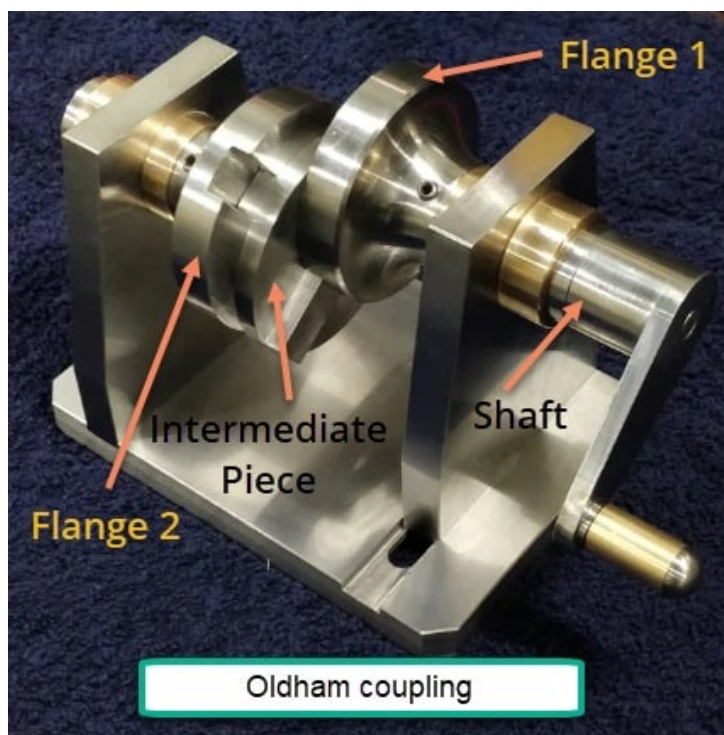


Figura 5 – Acoplamento Oldham.
 Fonte: <https://www.bobomachine.com>

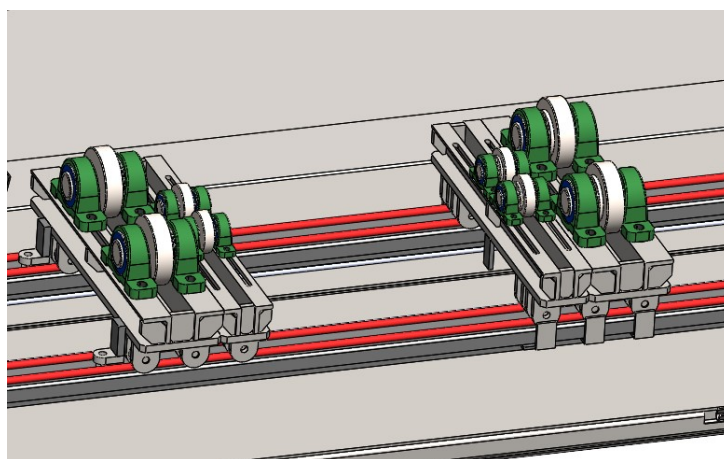


Figura 6 – Carrinho fixo e móvel da centrífuga..
 Fonte: Autor

3.2.1 Tubulações

A modelagem das tubulações utilizadas neste projeto foi desenvolvida com base em padrões industriais consolidados, de modo a garantir coerência dimensional e compatibilidade com aplicações reais. Para a geometria dos tubos, foram adotados os padrões de tubulação dos catálogos da PIPE... (s.d.), os quais serviram como referência para diâmetros

nominais e espessuras de parede, assegurando que os modelos representassem, de forma fiel, componentes comumente empregados na indústria.

Os flanges das tubulações foram modelados a partir de dimensões disponibilizadas no site da [FLANGES...](#) (s.d.), que reúne diversos padrões normativos amplamente utilizados, como da *American Water Works Association (AWWA)*, *American National Standards Institute (ANSI)*, entre outros (ver exemplo de tubulação modelada na Figura 7). A utilização dessas referências permitiu a correta representação das características geométricas dos flanges, incluindo diâmetros, furações e espessuras, possibilitando a compatibilidade entre as tubulações e os sistemas de acoplamento previstos no processo.

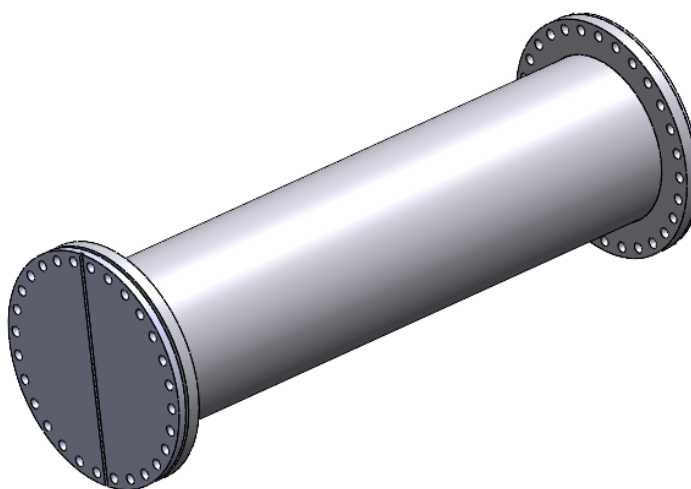


Figura 7 – Exemplo de Tubulação modelada.
Fonte: Autor.

Em um dos lados de cada tubulação foi acoplado um dos flanges do acoplamento do tipo Oldham, o Flange 2 é indicado na Figura 5, agora modelado acoplado à tubulação, conforme demonstrado na Figura 8. As outras duas partes do acoplamento estão juntos ao eixo de acionamento. Esse elemento é fundamental para viabilizar a transmissão de movimento de forma eficiente, mesmo na presença de desalinhamentos entre o eixo de acionamento e a peça. Os parafusos não foram modelados a fim de deixar o modelamento mais leve.

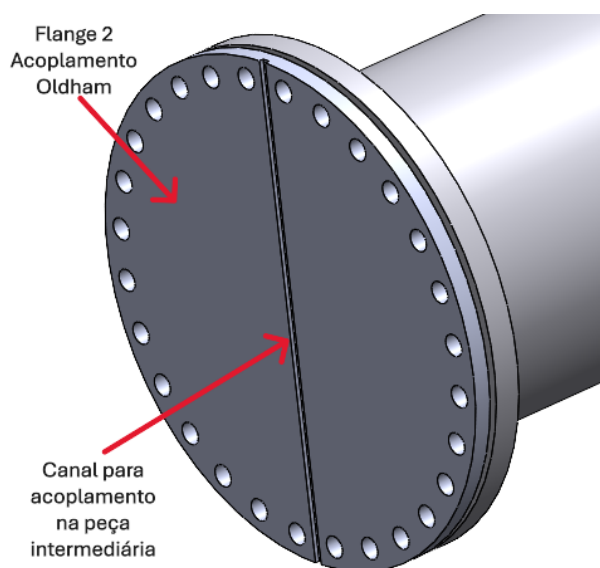


Figura 8 – Flange 2 Acoplamento Oldham.
Fonte: Autor.

No lado oposto da tubulação, foi modelado um dispositivo específico contendo um furo central, cuja função é permitir a deposição do PU líquido no interior do tubo sem que derrame posteriormente durante a etapa de revestimento (ver Figura 9). Esse componente foi concebido de forma a facilitar a introdução do material, garantindo que o PU seja distribuído adequadamente antes do processo de rotação, contribuindo para a uniformidade do revestimento interno.

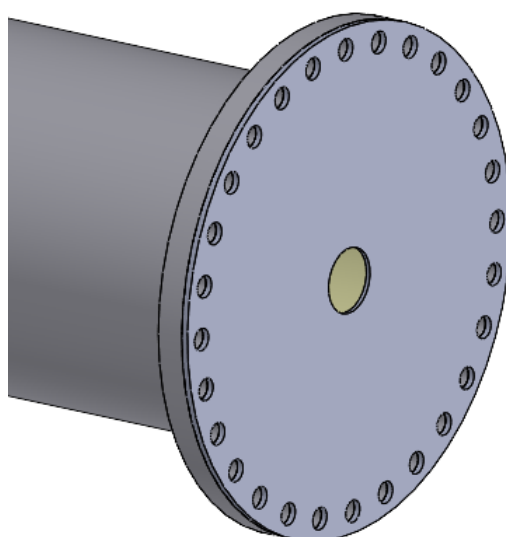


Figura 9 – Dispositivo que possibilita o derramamento do PU.
Fonte: Autor.

A modelagem também considerou a limitação física da estufa principal, que possui

aproximadamente 13.320 mm de comprimento por 12.700 mm de largura. Dessa forma, o comprimento máximo das tubulações foi fixado em 12.000 mm, preservando uma faixa interna livre para possíveis manutenções ou movimentações adicionais.

3.2.2 Esteira 1

A esteira 1 (ver Figura 10) foi modelada como o ponto inicial do processo de produção, sendo o local onde o operador deposita as tubulações antes de entrarem na linha automatizada. Para essa etapa, considerou-se que o operador pode utilizar diferentes mecanismos de elevação e movimentação, como ponte rolante, pórtico, empilhadeira do tipo *Hyster* ou equipamentos similares, garantindo flexibilidade operacional no posicionamento das peças.

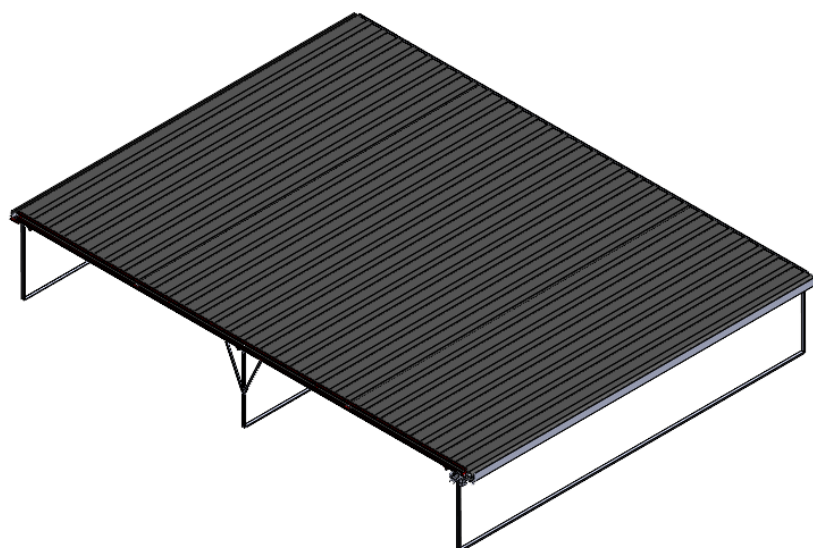


Figura 10 – Esteira 1.

Fonte: Autor.

Para padronizar a orientação das tubulações, definiu-se que o lado destinado ao acoplamento (Flange 2) deve sempre estar voltado para a borda da esteira pintada em vermelho (ver Figura 11). Além disso, as peças devem ser alinhadas a aproximadamente 100 mm da borda da superfície de borracha, permitindo um posicionamento previsível no fluxo subsequente (Figura 12).

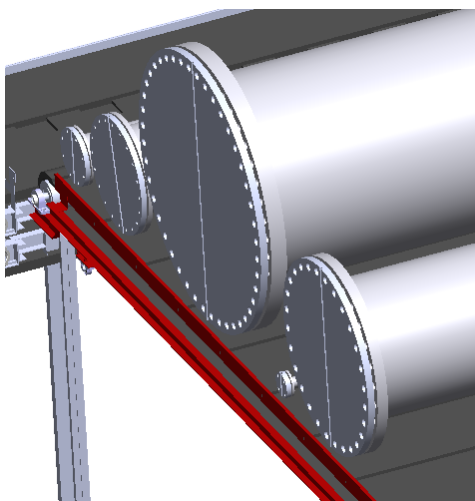


Figura 11 – Orientação das tubulações na Esteira 1.

Fonte: Autor.

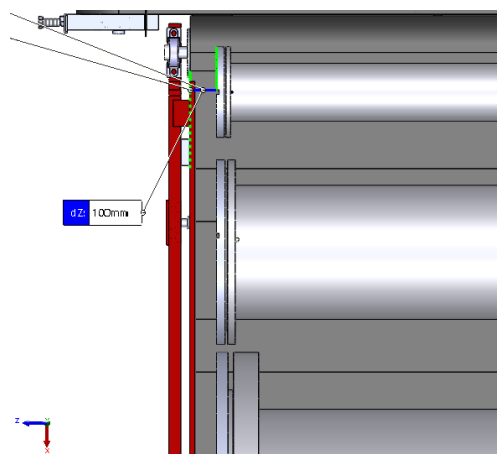


Figura 12 – Distância da tubulação até a borda da borracha da Esteira 1.

Fonte: Autor.

A superfície de borracha apresenta canais perpendiculares ao sentido de rolagem, garantindo que as peças permaneçam estáticas enquanto o sistema está parado. A esteira também possui uma inclinação de aproximadamente 32 mm entre seus lados, favorecendo o direcionamento natural da peça em direção à esteira 2 (ver Figura 13). Essa inclinação contribui para a estabilidade dos tubos, mantendo a tubulação apoiada em um dos lados dos canais (conforme ilustrado na Figura 14), reduzindo o risco de movimentações indesejadas, além de facilitar a rolagem para a esteira 2.

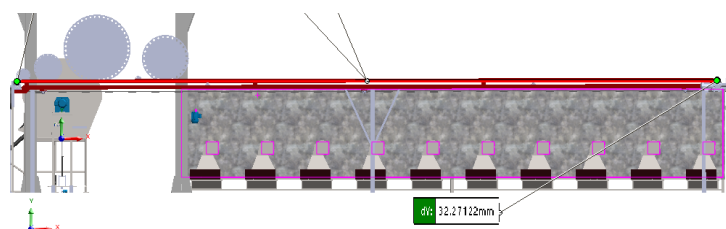


Figura 13 – Inclinação da Esteira 1 em direção a Esteira 2.

Fonte: Autor.

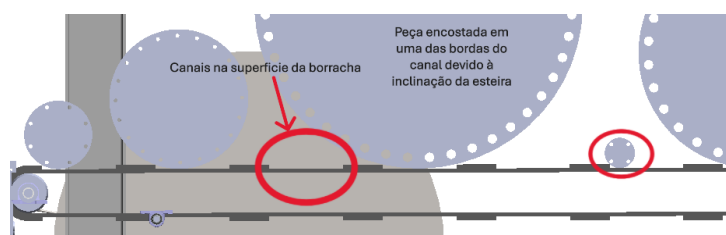


Figura 14 – Canais na borracha da Esteira 1.

Fonte: Autor.

Nas laterais e no lado oposto ao fluxo foram modeladas chapas de contenção, atuando como barreiras físicas que impedem a queda ou deslocamentos laterais (Figuras 15, 16 e 17). Embora, na prática, tais chapas atuem como um sistema de segurança complementar, já que as peças são posicionadas afastadas das bordas e a inclinação direciona naturalmente para o lado correto, sua inclusão no modelo 3D garante maior fidelidade à estrutura real.

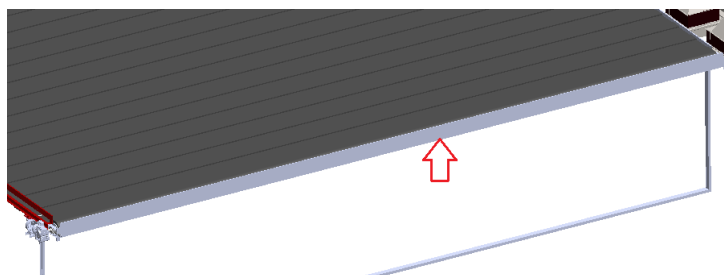


Figura 15 – Proteção do lado oposto ao fluxo na Esteira 1.
Fonte: Autor.

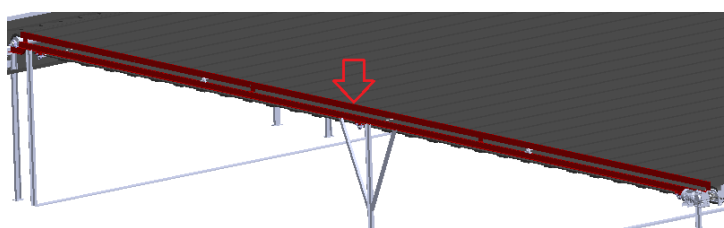


Figura 16 – Proteção Lateral 1 da Esteira 1.
Fonte: Autor.

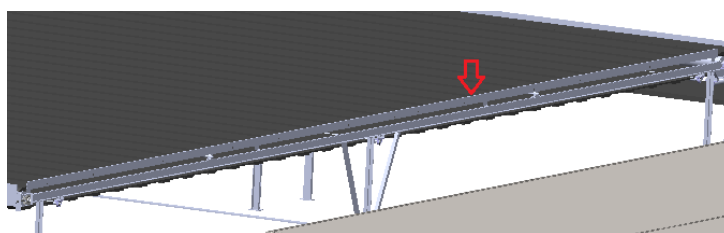


Figura 17 – Proteção Lateral 1 da Esteira 1.
Fonte: Autor.

Além disso, a capacidade de peças simultâneas na esteira 1 está diretamente relacionada ao diâmetro dos flanges: por exemplo, uma tubulação DN48, com cerca de 1.600 mm de diâmetro do flange, permite alocação máxima de oito unidades, já que $\frac{13320}{1600} \approx 8,3$. Contudo, nada impede que novas peças sejam posicionadas após parte do material já ter avançado para a estufa, considerando que a primeira peça libera espaço após cerca de 16 horas de cura.

3.2.3 Esteira 2

A esteira 2 (ver Figura 18) foi modelada para receber a peça proveniente da esteira 1 e conduzi-la em direção à esteira 3, sendo cerca de 143 mm mais baixa que a esteira 1 (Figura 19 onde os dois pontos verdes são os pontos de comparação dimensional) e cerca de 180 mm mais alta que a esteira 3 (Figura 20 onde os dois pontos verdes são os pontos de comparação dimensional).

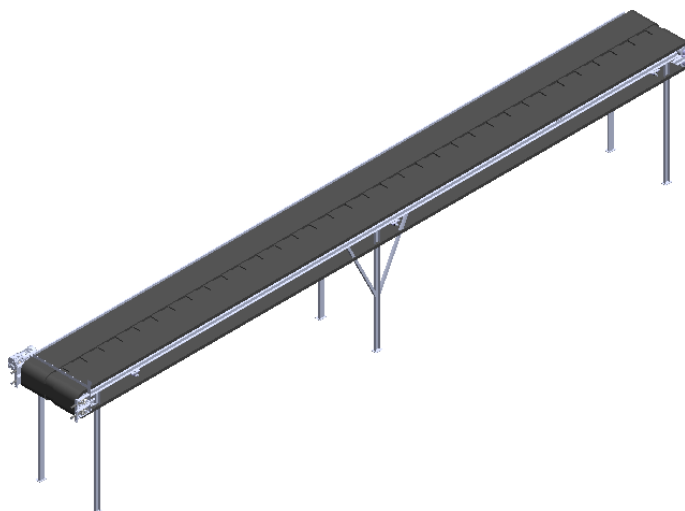


Figura 18 – Esteira 2.

Fonte: Autor.

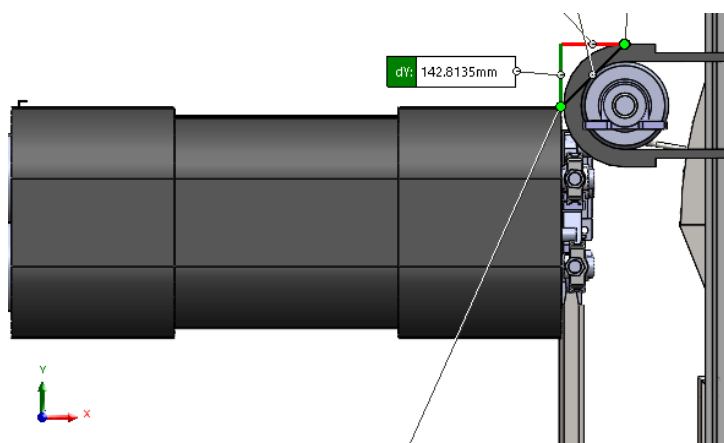


Figura 19 – Conexão entre as Esteiras 1 e 2.

Fonte: Autor.

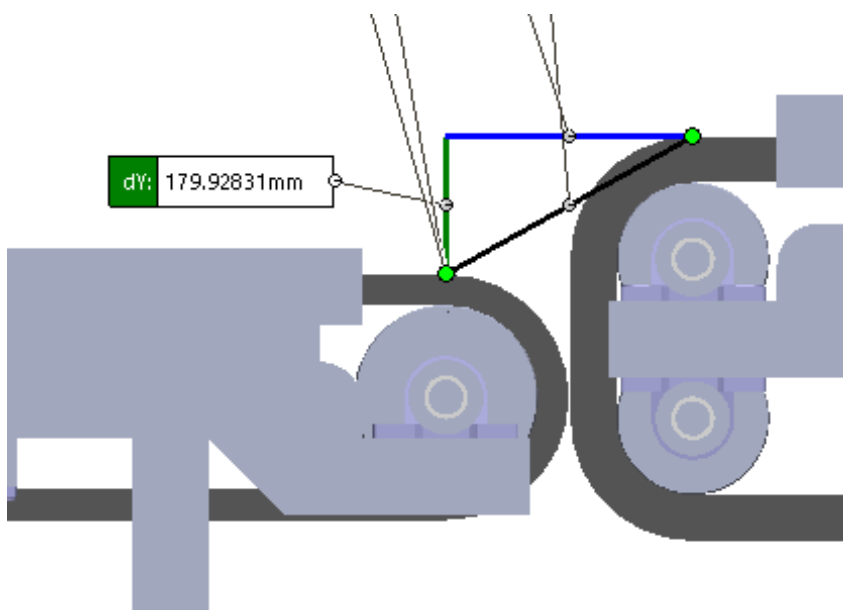


Figura 20 – Conexão entre Esteira 2 e 3.
Fonte: Autor.

Sua superfície contém um canal central no mesmo sentido de giro da esteira com outros canais em seu interior no sentido perpendicular ao sentido do giro da esteira, cuja função é garantir que a tubulação permaneça centralizada e estável ao longo do percurso (ver Figura 21), além de facilitar a transição suave entre a esteira 2 e 3 pois quando os flanges da tubulação entrarem no espaço entre uma esteira e outra, os canais da esteira 2 vão empurrar o segundo flange em direção a esteira 3 (Figura 22).

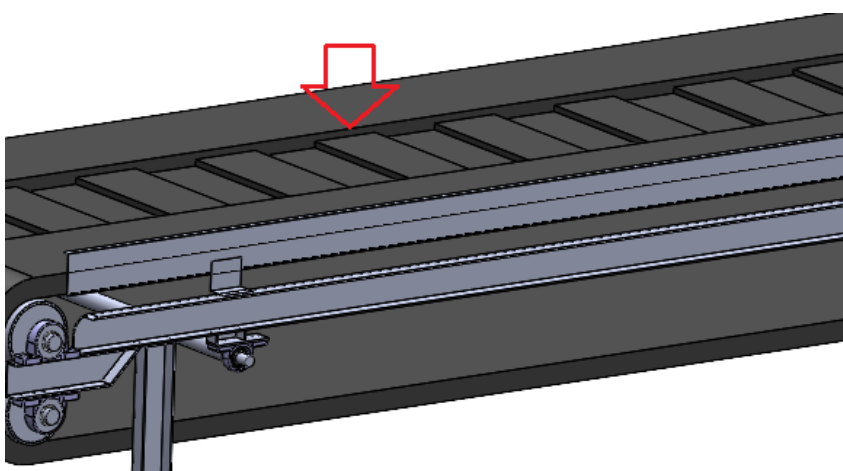


Figura 21 – Canais na superfície da borracha da esteira 2.
Fonte: Autor.

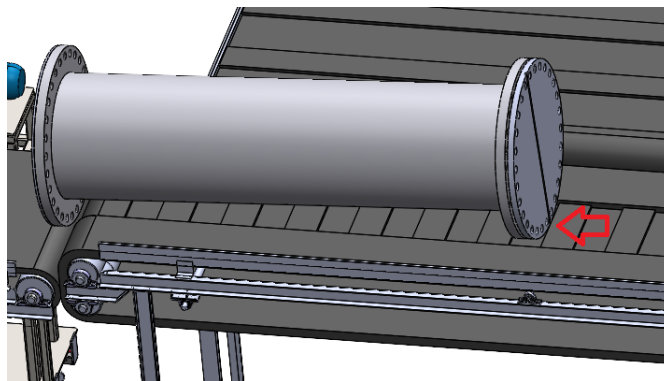


Figura 22 – Transição entre as esteiras 2 e 3.
Fonte: Autor.

Na estrutura da esteira foi reservado um espaço para instalação de um sensor indutivo (ver Figura 23), responsável por detectar a chegada da peça. Embora o sensor físico não tenha sido modelado, seu posicionamento e base foram previstos, assegurando compatibilidade com o sistema de automação.

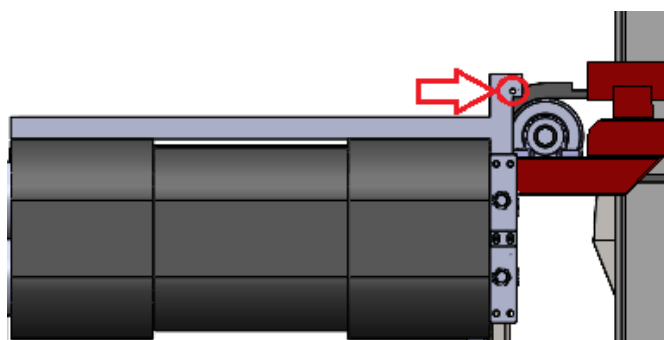


Figura 23 – Posição do sensor entre as esteiras 1 e 2.
Fonte: Autor.

As chapas de contenção foram incluídas em todos os lados, exceto nas duas aberturas funcionais: o lado por onde a peça chega da esteira 1 e o lado por onde segue para a esteira 3 (Figuras 24 e 25). Essa configuração mantém a peça guiada com segurança, ao mesmo tempo em que preserva a fluidez do processo.

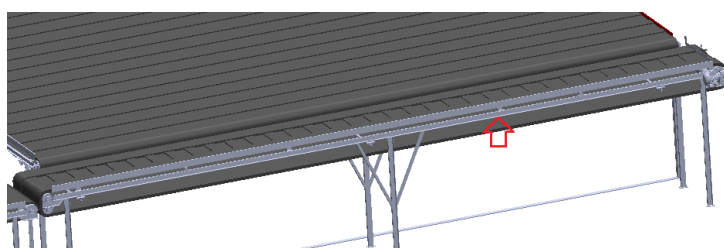


Figura 24 – Proteção Lateral Esteira 2.
Fonte: Autor.

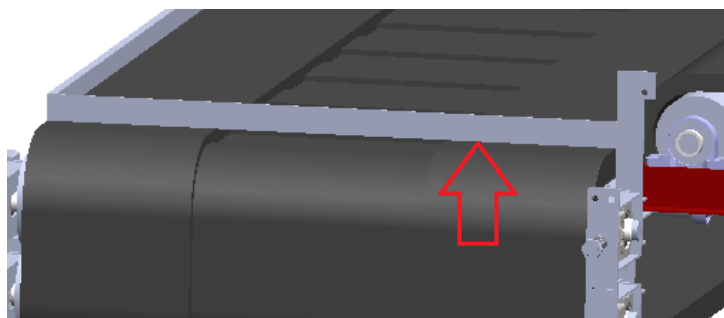


Figura 25 – Proteção Frontal Esteira 2.
Fonte: Autor.

3.2.4 Esteira 3

A esteira 3 (ver Figura 26) é o último estágio de transporte antes da entrada da tubulação na centrífuga. Diferentemente das esteiras 1 e 2, ela não possui canais. A ausência do canal se justifica pela necessidade de permitir o giro livre da peça ao entrar na centrífuga, evitando interferências mecânicas durante o processo de posicionamento interno.

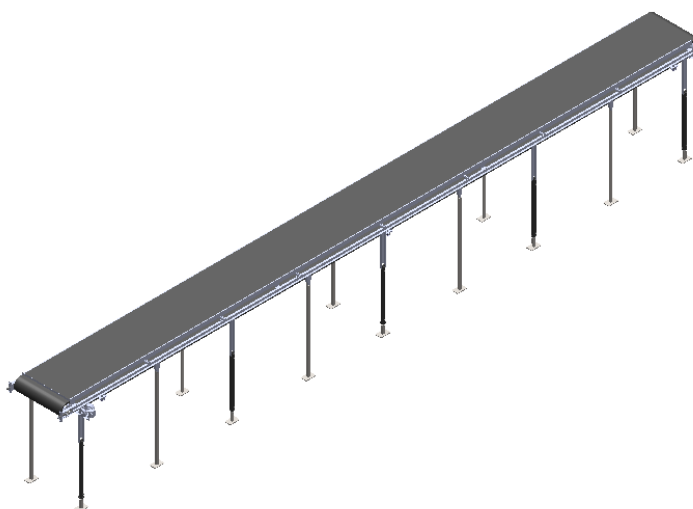


Figura 26 – Esteira 3.
Fonte: Autor.

A modelagem também inclui um espaço destinado ao sensor fotoelétrico responsável por indicar o posicionamento final da peça, alinhado diretamente com o sistema de acoplamento presente na centrífuga (ver Figura 27). Esse alinhamento permite que o tubo permaneça no ponto exato antes do basculamento.

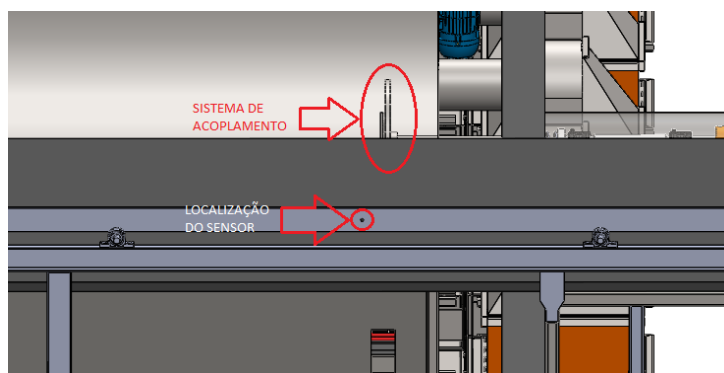


Figura 27 – Posição do sensor presente na Esteira 3.
Fonte: Autor.

O aspecto mais característico da esteira 3 é sua estrutura basculável. Para representar esse mecanismo, foram modelados cinco pistões hidráulicos, cada um com sua base fixada ao piso e um eixo independente conectado à estrutura inferior da esteira (Figuras 28 e 29).

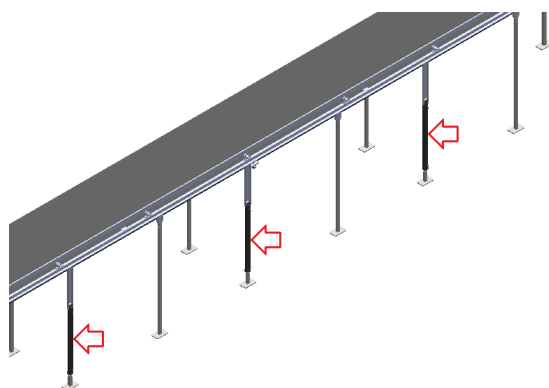


Figura 28 – Pistões do sistema basculante Esteira 3 recolhidos.
Fonte: Autor.

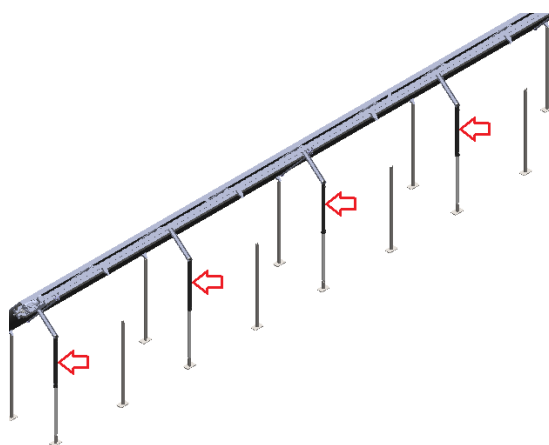


Figura 29 – Pistões do sistema basculante Esteira 3 estendidos.
Fonte: Autor.

Todos os pistões atuam simultaneamente, garantindo que o movimento de basculamento seja uniforme e suficientemente robusto para conduzir a peça com segurança para o interior da centrífuga (ver Figura 30), porém este movimento só pode ser feito se a centrífuga estiver aberta em direção à esteira 3 e após o sensor da mesma indicar que a peça está corretamente posicionada.

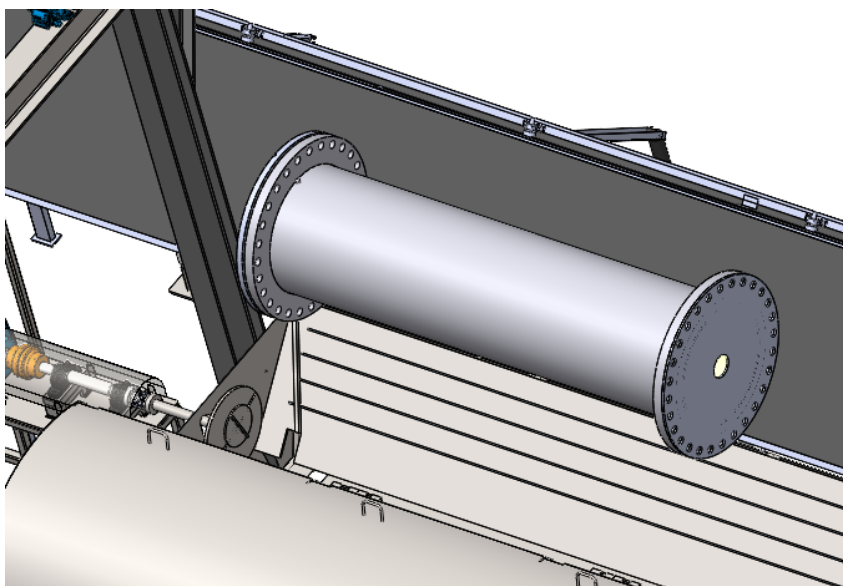


Figura 30 – Passagem da esteira 3 para a centrífuga

As chapas de contenção estão presentes apenas nos lados necessários para evitar quedas e deslizamentos: o lado oposto ao ponto de chegada da peça e o lado onde se encontram os acionamentos hidráulicos (Figuras 31 e 32). O lado voltado para a centrífuga permanece aberto para permitir o basculamento adequado.

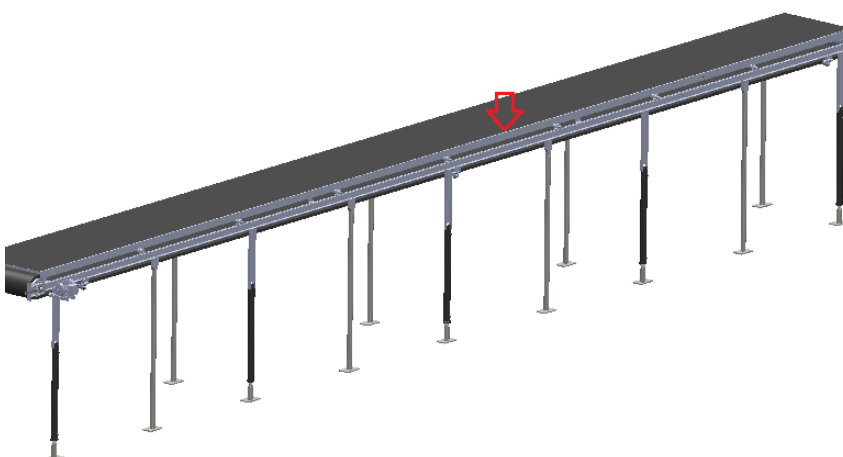


Figura 31 – Proteção lateral da Esteira 3.
Fonte: Autor.

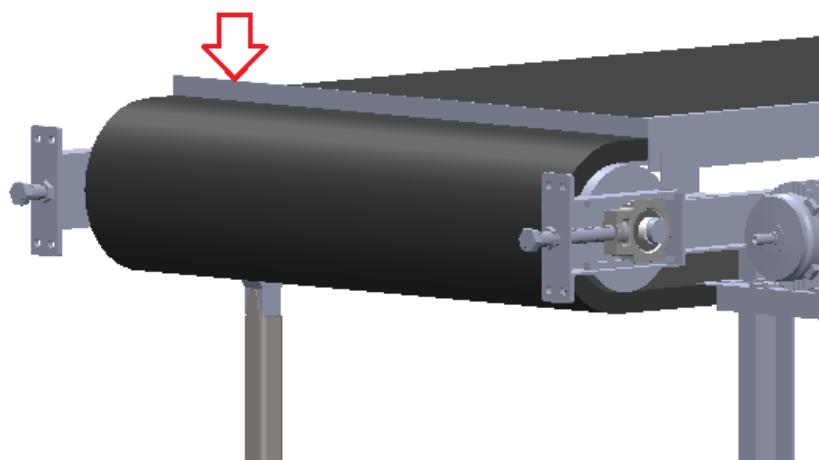


Figura 32 – Proteção traseira da Esteira 3.
Fonte: Autor.

3.2.5 Centrífuga

A centrífuga (ver Figura 33) foi concebida com abertura bilateral, permitindo acesso tanto pelo lado da esteira 3 (para alimentação da tubulação) quanto pelo lado da estufa (para descarregamento).

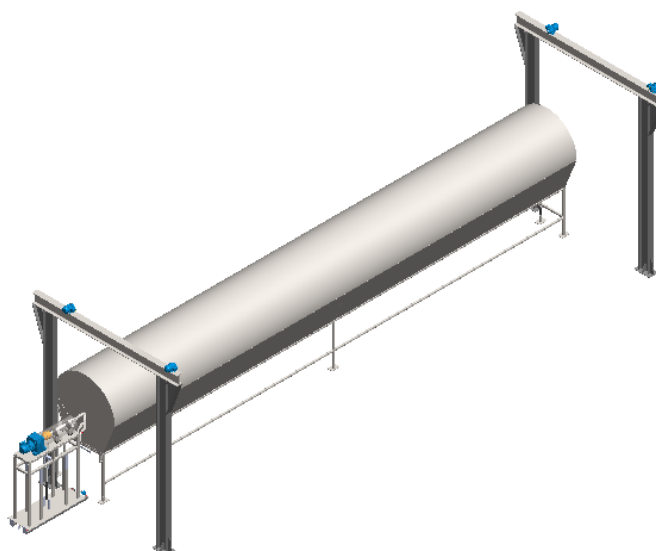


Figura 33 – Centrífuga.
Fonte: Autor.

A abertura no sentido da esteira 3 demonstrada pela Figura 34 é acionada por um conjunto de quatro motores elétricos, dispostos em dois pares com configurações distintas de trabalho: os Motores 1 e 2 atuam estendendo o cabo, movendo-o de 3.170

mm (milímetros) até 4.300,52 mm. Os Motores 3 e 4 atuam no sentido oposto, puxando o cabo de 5.088,99 mm até 3.086,79 mm, porém esta abertura só poderá ser feita se a temperatura interna da estufa estiver de a 100°C para aumentar a eficiência em fazer com que a tubulação atinja essa temperatura conforme o especificado na subseção 3.1.4.

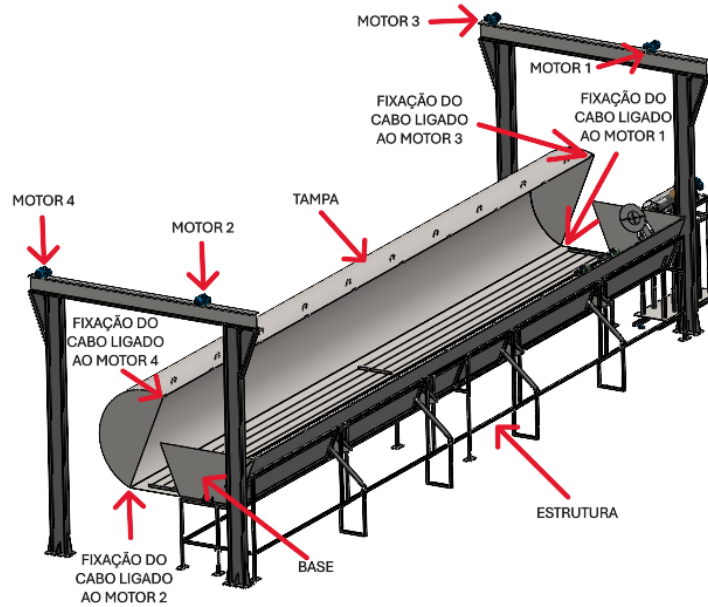


Figura 34 – Abertura da centrífuga em direção à Esteira 3.
Fonte: Autor.

Para esta etapa, foram definidos alguns dados comerciais de componentes reais para que os cálculos fossem realizados com parâmetros verdadeiros e representativos do processo. Os quatro motores tem potência de 3 cv(cavalos-vapor), os cabos de aço utilizados possuem diâmetro de 10 mm, enquanto as polias adotadas apresentam diâmetro de 125 mm, de modo a permitir a sincronização dos movimentos dos dois pares para que completem o percurso no mesmo tempo. Para essas definições, foram feitos os seguintes cálculos:

1. Deslocamento dos cabos ou variação do comprimento (ΔL):

Fórmula:

$$\Delta L = \text{medida final} - \text{medida inicial} \quad (3.1)$$

- Motores 1 e 2: de 3170 mm para 4300,52 mm:

$$\Delta L_{1e2} = 4300,52 - 3170 = 1130,52 \text{ mm} = \frac{1130,52}{1000} = 1,13052 \text{ m} \quad (3.2)$$

$$\Delta L_{1e2} = 1,13052 \text{ m}$$

- Motores 3 e 4: de 5088,99 mm para 3086,79 mm:

$$\Delta L_{3e4} = 5088,99 - 3086,79 = 2002,20 \text{ mm} = \frac{2002,20}{1000} = 2,0022 \text{ m} \quad (3.3)$$

$$\Delta L_{3e4} = 2,0022 \text{ m}$$

2. Polia:

- Diâmetro da polia (mm para m):

$$D = 125 \text{ mm} = \frac{125}{1000} = 0,125 \text{ m}$$

$$D = 0,125 \text{ m} \quad (3.4)$$

- Raio:

Fórmula:

$$r = \frac{D}{2} \quad (3.5)$$

Cálculo:

$$r = \frac{D}{2} = \frac{0,125}{2} = 0,0625 \text{ m}$$

$$r = 0,0625 \text{ m} \quad (3.6)$$

- Circunferência da polia ou comprimento de cabo por volta (C).

Fórmula:

$$C = \pi \cdot D \quad (3.7)$$

Cálculo (usando pi (π) $\approx 3,14159$):

$$C = \pi \times 0,125 = 3,14159 \times 0,125 = 0,39270 \text{ m}$$

$$C = 0,39270 \text{ m} \quad (3.8)$$

3. Número de voltas ou revoluções (revs) necessárias para cada motor.

- Fórmula:

$$\text{revs} = \frac{\Delta L}{C} \quad (3.9)$$

- Motores 1 e 2:

$$\text{revs}_{1e2} = \frac{\Delta L_1}{C} = \frac{1,13052}{0,39270} = 2,87885 \text{ voltas} \quad (3.10)$$

- Motores 3 e 4:

$$\text{revs}_{3e4} = \frac{\Delta L_2}{C} = \frac{2,00220}{0,39270} = 5,09856 \text{ voltas} \quad (3.11)$$

4. Tempo comum (t) necessário para os motores 3 e 4.

- Fórmula:

$$t = \frac{\Delta L_{3e4}}{v_{3e4}} \quad (3.12)$$

Para esta etapa, assume-se uma velocidade linear (v_{3e4}) baixa e segura para esses motores, uma vez que eles movimentam um comprimento maior de cabo. Dessa forma, adota-se uma condição operacional que prioriza a segurança no enrolamento

e desenrolamento do cabo, bem como a sincronização dos movimentos, resultando na seguinte relação:

$$v_{3e4} = 0,03 \text{ m/s} \quad (3.13)$$

$$t = \frac{\Delta L_{3e4}}{v_{3e4}} = \frac{2,00220}{0,03} = 66,74 \text{ s} \quad (3.14)$$

$$t = 66,74 \text{ s}$$

5. Velocidade linear dos Motores 1 e 2 (para terminar no mesmo tempo).

- Fórmula:

$$t = \frac{\Delta L_{1e2}}{v_{1e2}} \quad (3.15)$$

Calculo:

$$v_{1e2} = \frac{\Delta L_{1e2}}{t} = \frac{1,13052}{66,74} = 0,01694 \text{ m/s} \quad (3.16)$$

$$v_{1e2} = 0,01694 \text{ m/s}$$

6. Velocidade angular (rad/s) das polias.

- Relação entre velocidade linear e angular:

$$v = \omega \cdot r \quad (3.17)$$

- Isolando a velocidade angular, obtém-se a seguinte fórmula:

$$\omega = \frac{v}{r} \quad (3.18)$$

- Motores 1 e 2:

Raio da polia = $r = 0,0625m$

$$\omega_{1e2} = \frac{v_{1e2}}{r} = \frac{0,01694}{0,06250} = 0,27103 \text{ rad/s} \quad (3.19)$$

$$\omega_{1e2} = 0,27103 \text{ rad/s}$$

- Motores 3 e 4:

Raio da polia = $r = 0,0625m$

$$\omega_{3e4} = \frac{v_{3e4}}{r} = \frac{0,03000}{0,06250} = 0,48000 \text{ rad/s} \quad (3.20)$$

$$\omega_{3e4} = 0,48000 \text{ rad/s}$$

7. Converter velocidade angular (rad/s) para rotações por minuto (RPM).

- Fórmula:

$$\text{rpm} = \frac{\omega}{2\pi} \cdot 60 \quad (3.21)$$

- Motor 1 e 2:

$$\text{rpm}_{1e2} = \frac{0,27103}{6,28318} \cdot 60 = 2,58811 \text{ rpm} \quad (3.22)$$

$$\text{rpm}_{1e2} = 2,58811 \text{ rpm}$$

- Motor 3 e 4:

$$\text{rpm}_{2e3} = \frac{0,48000}{6,28318} \cdot 60 = 4,58366 \text{ rpm} \quad (3.23)$$

$$\text{rpm}_{2e3} = 4,58366 \text{ rpm}$$

Desta forma, utilizando motores de 3 cv com redutores aliados a inversores de frequência para que o ajuste fino alcance 2,58811 rpm nos motores 1 e 2, e 4,58366 rpm nos motores 3 e 4, torna-se possível efetuar a abertura da centrífuga para o lado da esteira 3 em $t = 66,74$ s.

A segunda forma de abertura, voltada para a estufa, é realizada por quatro acionamentos hidráulicos que promovem o basculamento da tampa no sentido da estufa (ver Figura 35), enquanto os motores elétricos permanecem estacionários com freios acionados. Nesse movimento de basculamento, os cabos dos motores 1 e 2 atuam como um pêndulo auxiliar efetuando a abertura para o lado da estufa junto ao acionamento hidráulico (ver Figura 36), enquanto os cabos do segundo par se flexionam sem transmitir trabalho ativo. Porém esta abertura só pode ser realizada se a estufa estiver aberta para o lado da centrífuga para que a peça possa sair da centrífuga e entrar na estufa.

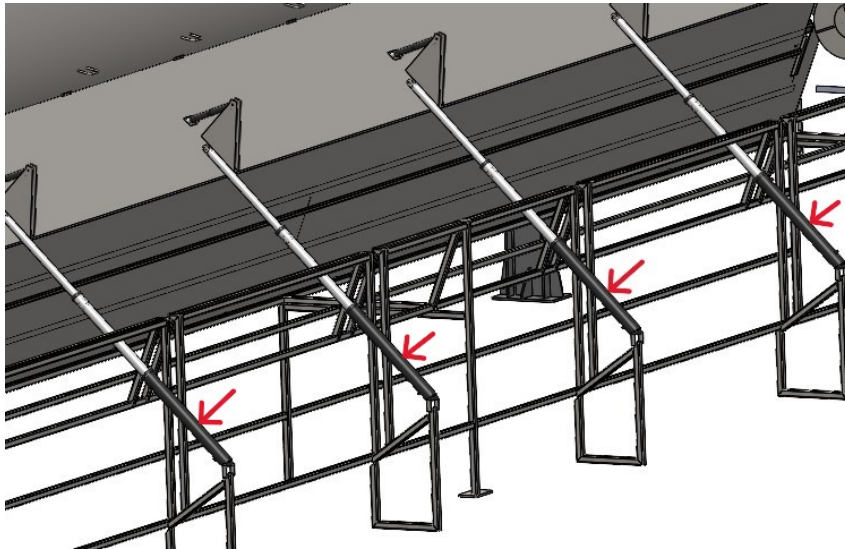


Figura 35 – Pistões do sistema basculante da Centrífuga.

Fonte: Autor.

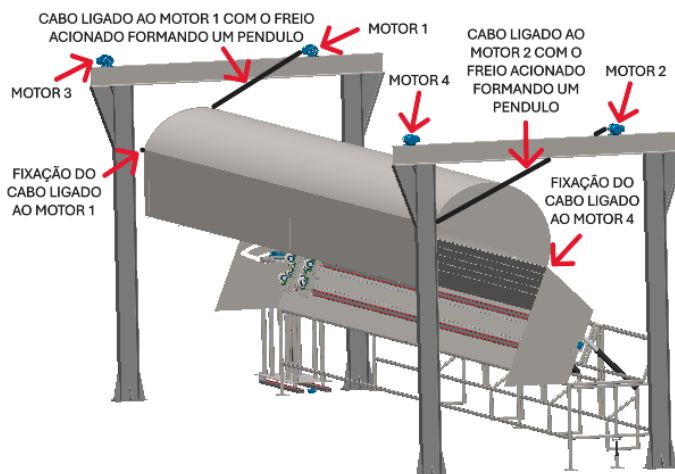


Figura 36 – Abertura da centrífuga em direção à Estufa.
Fonte: Autor.

Para possibilitar a abertura bilateral da centrífuga, foram projetados mecanismos de abertura em ambos os lados do equipamento, tanto no lado da esteira quanto no lado da estufa, distribuídos ao longo de todo o seu comprimento. Esses mecanismos permitem a abertura controlada da centrífuga conforme a etapa do processo, conforme ilustrado nas Figuras 37, 38, 39 e 40.

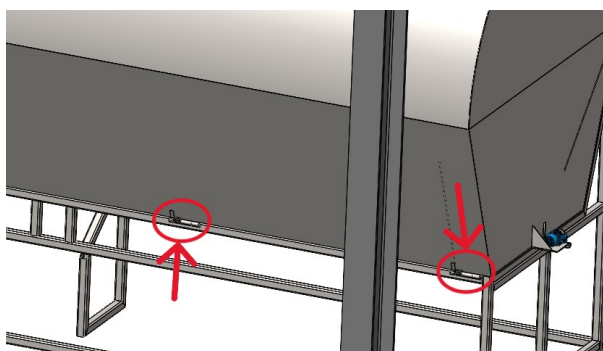


Figura 37 – Posição dos mecanismos de abertura do lado da Estufa.
Fonte: Autor.

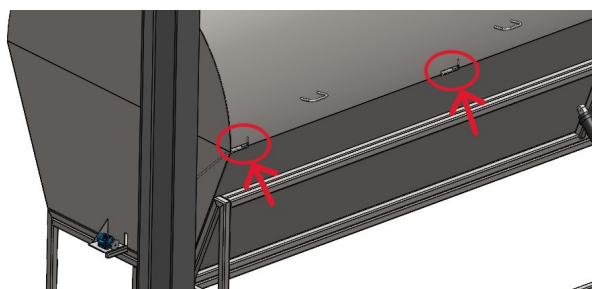


Figura 38 – Posição dos mecanismos de abertura do lado da Esteira.
Fonte: Autor.

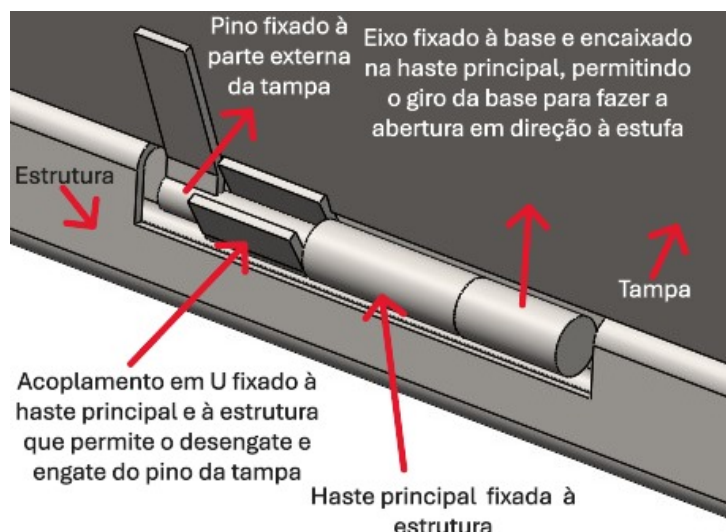


Figura 39 – Mecanismo de abertura do lado da Estufa.

Fonte: Autor.

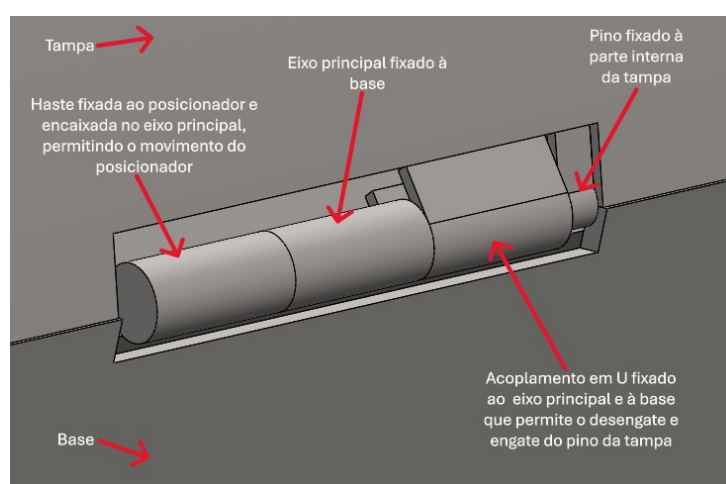


Figura 40 – Mecanismo de abertura do lado da Esteira.

Fonte: Autor.

O encaixe da tampa da centrífuga na base e na estrutura é realizado por meio de pinos, os quais são alojados em acoplamentos em formato de U, com diâmetro de abertura e angulação específicos em ambos os lados do conjunto. Esse sistema de acoplamento, apresentado nas Figuras 41, 42, 43 e 44, permite o desencaixe localizado quando a tampa é puxada ou empurrada para um dos lados, viabilizando a abertura no lado oposto.

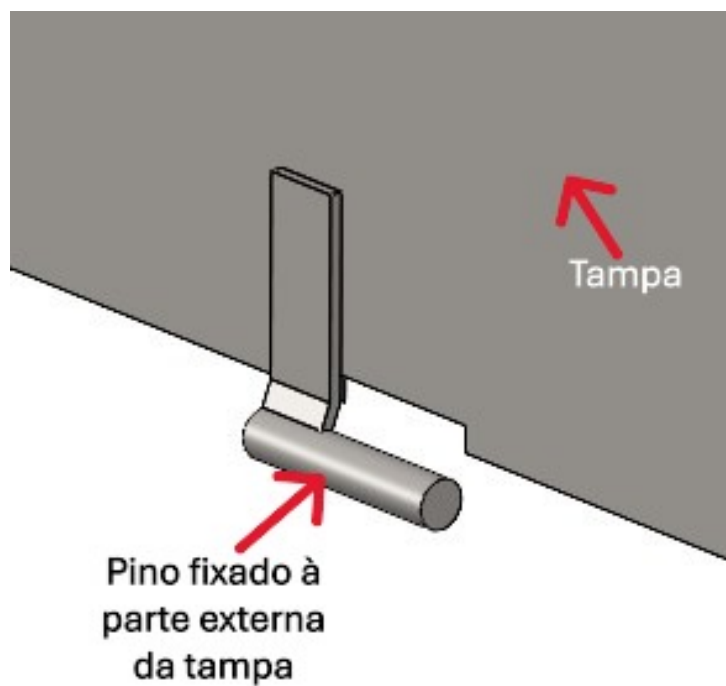


Figura 41 – Pino de acoplamento da tampa do lado da Estufa.
Fonte: Autor.

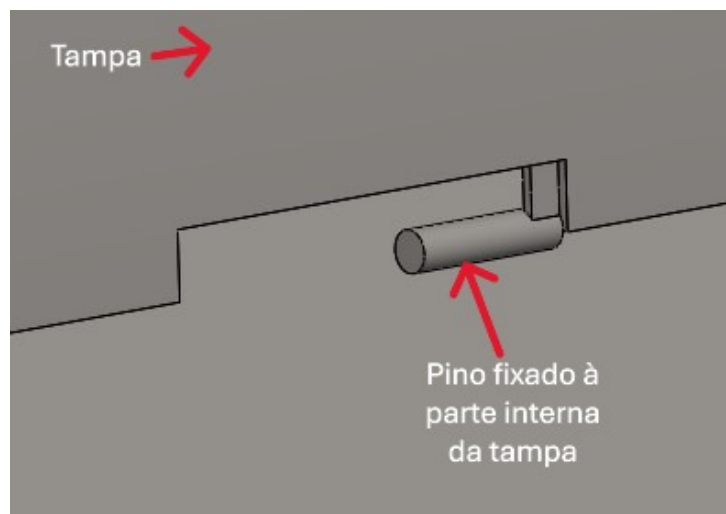


Figura 42 – Pino de acoplamento da tampa do lado da Esteira.
Fonte: Autor.

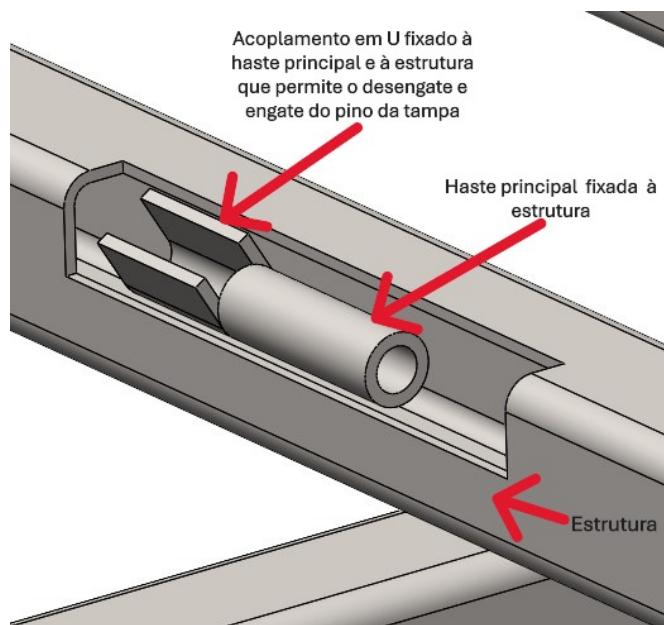


Figura 43 – Acoplamento em U e haste principal do lado da Estufa.
Fonte: Autor.

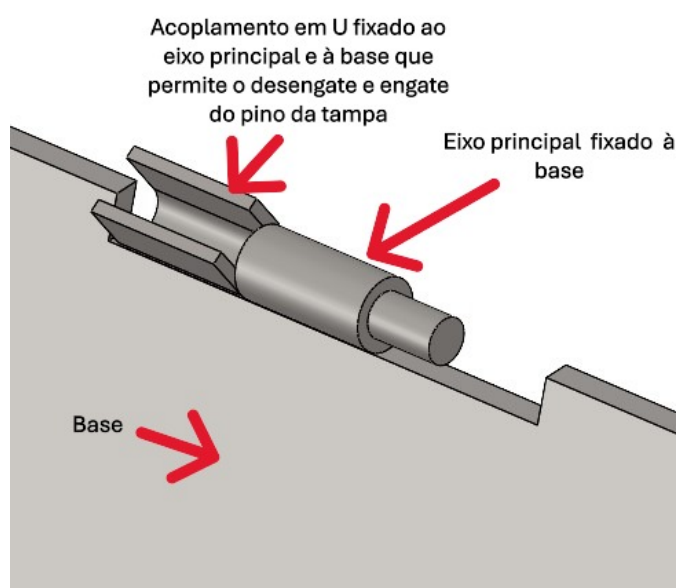


Figura 44 – Acoplamento em U e eixo principal do lado da Esteira.
Fonte: Autor.

A base da centrífuga utiliza um sistema de acoplamento por eixo, fixado à base conforme mostrado na Figura 45, conectado a uma haste principal que contém um furo passante. Esse furo, evidenciado na Figura 43, possibilita o movimento de giro da haste quando a centrífuga é aberta em direção ao lado da estufa, garantindo a liberdade de movimento necessária ao mecanismo.

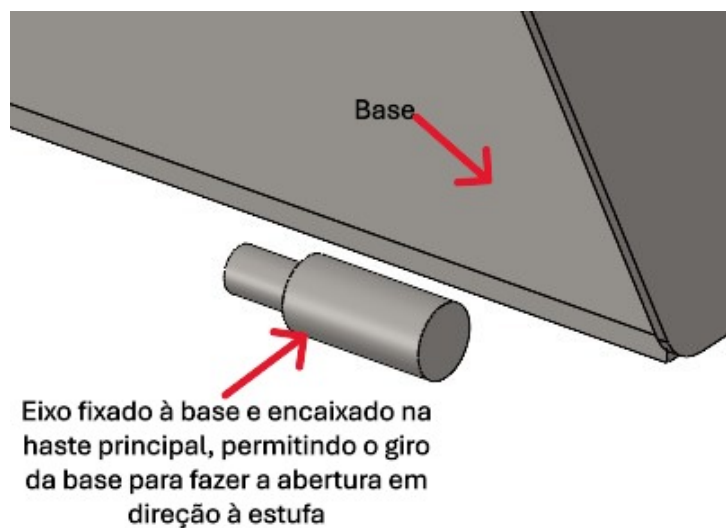


Figura 45 – Eixo da base que encaixa na haste principal.
Fonte: Autor.

Internamente, a centrífuga inclui uma chapa chamada de posicionador (ver Figura 46) acionada por quatro atuadores hidráulicos (ver Figura 47), cuja função é suportar e direcionar a peça até os rolamentos para o início do revestimento.

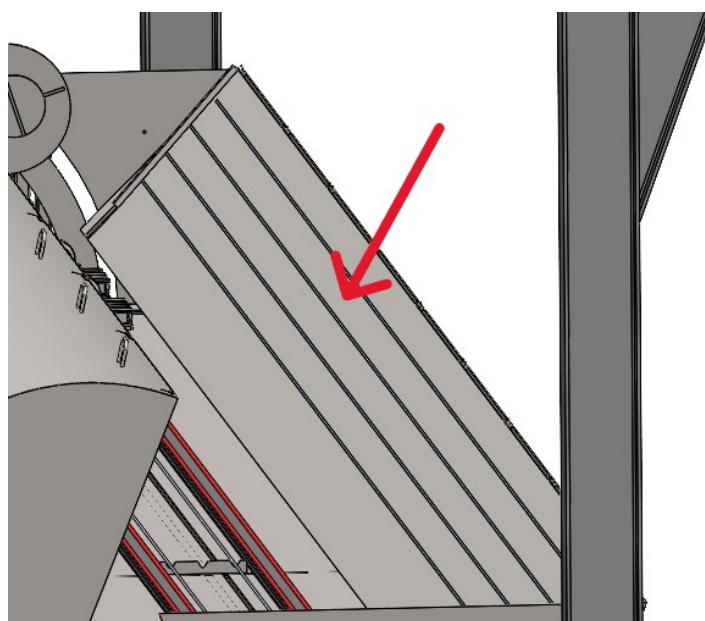


Figura 46 – Posicionador.
Fonte: Autor.

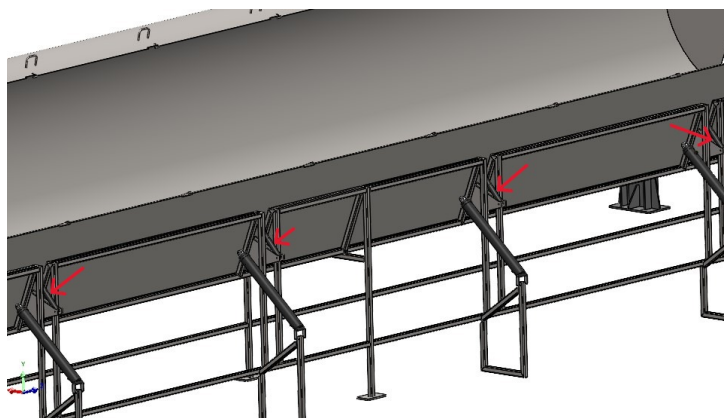


Figura 47 – Pistões do sistema do posicionador.

Fonte: Autor.

O posicionador possui três níveis ajustáveis de altura, projetados para acomodar variações de DN das tubulações. A estrutura contém lugares para três sensores que verificarão cada nível no momento da implementação do sistema de controle (ver Figura 48), tendo o sensor 1 destinado a peças do dn 30 ao 48 (ver Figura 49), o sensor 2 destinado a peças do dn 12 ao 28 (ver Figura 50) e o sensor 3 destinado a peças do DN 2 ao 10 (ver Figura 51), retornando a sua posição inicial que é encostado à parede da base com 0° de inclinação sempre que a peça já estiver posicionada.

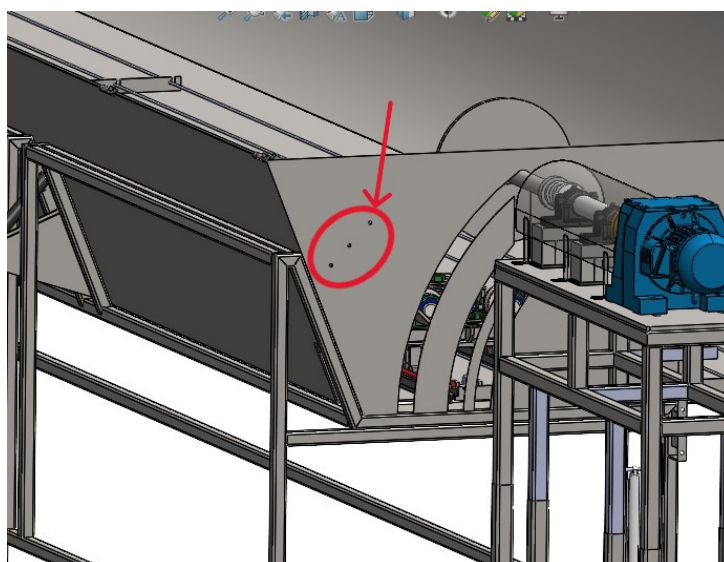


Figura 48 – Posição dos sensores do posicionador.

Fonte: Autor.

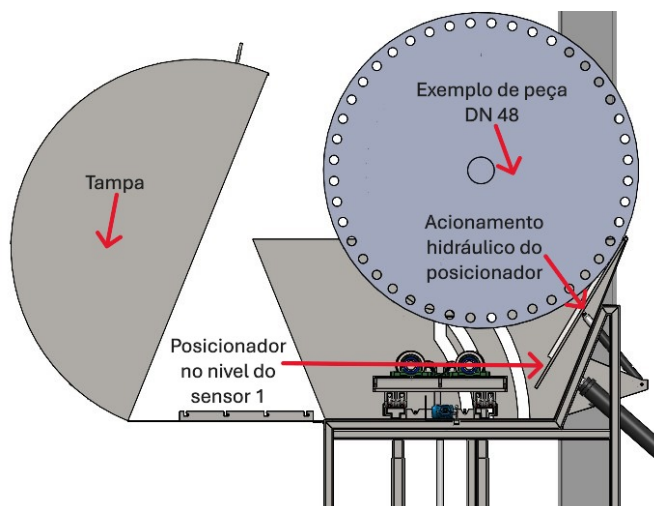


Figura 49 – Posicionador no nível do sensor 1 para peças de DN 30 a 48.
Fonte: Autor.

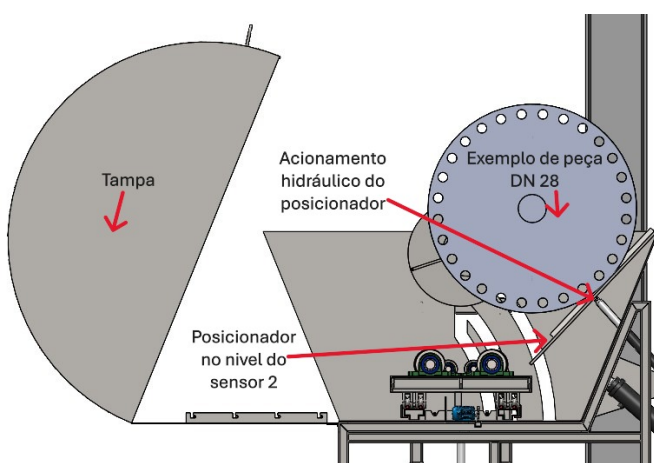


Figura 50 – Posicionador no nível do sensor 2 para peças de DN 12 a 28.
Fonte: Autor.

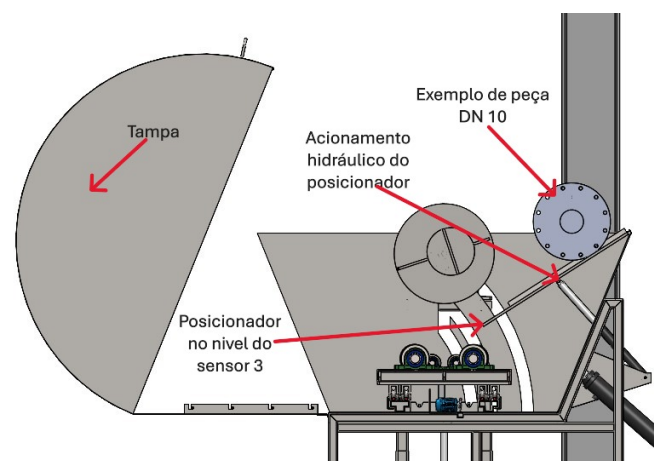


Figura 51 – Posicionador no nível do sensor 3 para peças de DN 2 a 10.
Fonte: Autor.

O posicionador também contém um direcionador por precaução para garantir que a peça chegue na posição correta ao interior da centrífuga, embora o sensor na esteira 3 já seja responsável por isso, este aspecto físico é apenas um método de segurança e precaução (ver Figura 52).

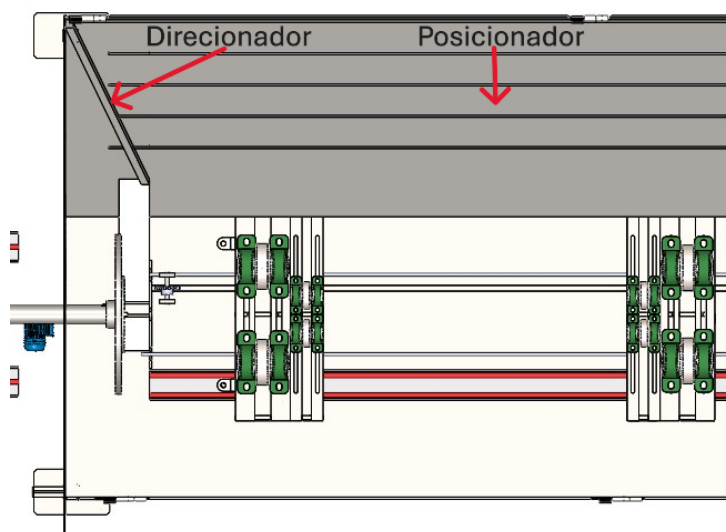


Figura 52 – Direcionador.

Fonte: Autor.

Quatro ranhuras atravessam essa chapa, nas quais estão alojadas quatro das dez resistências elétricas responsáveis pelo aquecimento da câmara de centrífuga (ver Figura 53), outras quatro resistências ficam instaladas na parede oposta ao posicionador que pertence à tampa (ver Figura 54) e as demais duas resistências ficam na base dos trilhos internos em baixo da peça (ver Figura 55).

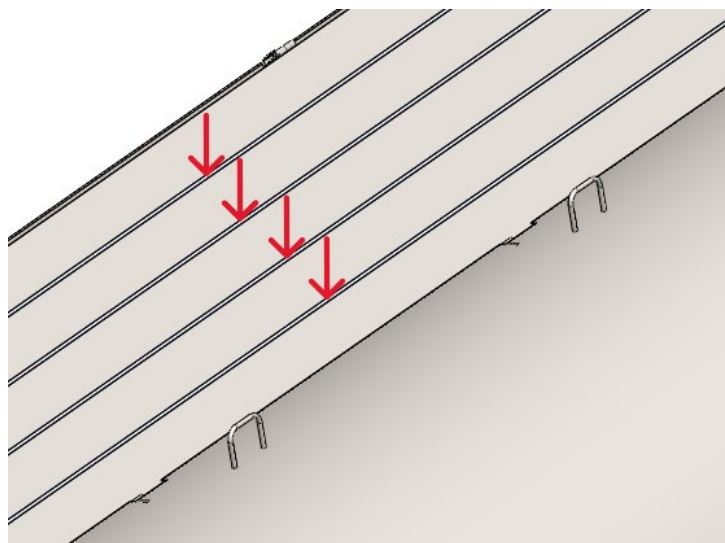


Figura 53 – Resistências alocadas no posicionador.

Fonte: Autor.

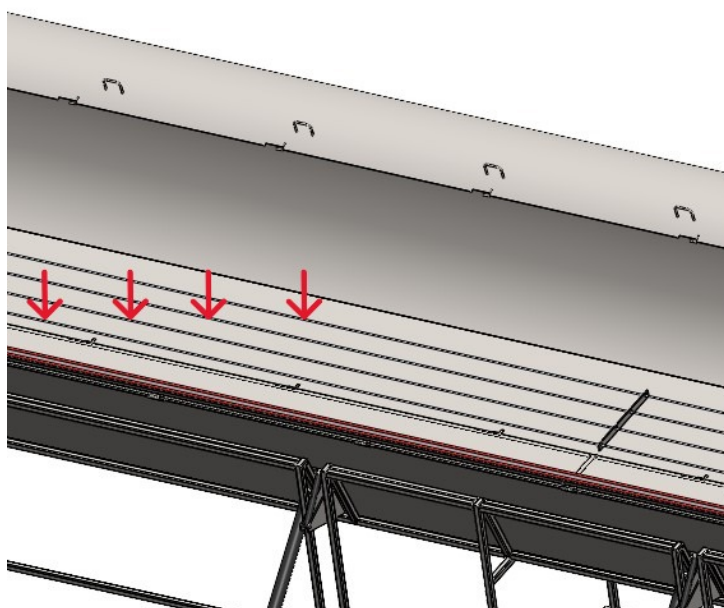


Figura 54 – Resistências presas à parede da tampa.
Fonte: Autor.

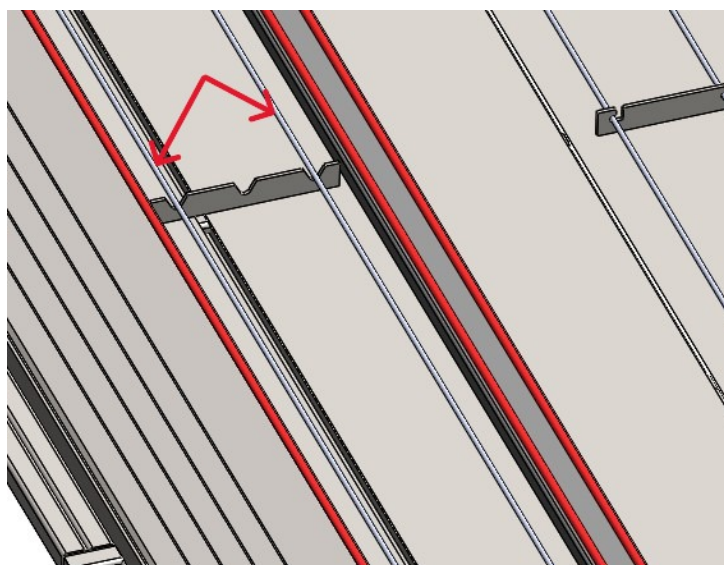


Figura 55 – Resistências na base do trilho.
Fonte: Autor.

O posicionador é acoplado à base por meio de uma haste com um furo (ver Figura 56) que encaixa no eixo principal permitindo seu movimento conforme demonstrado na Figura 40.

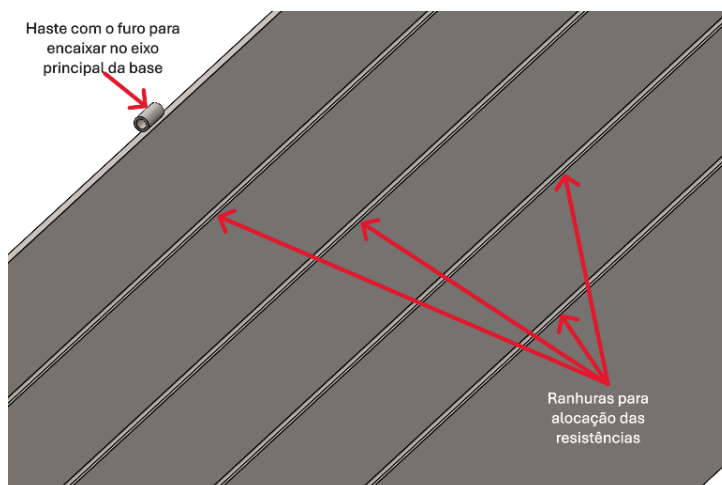


Figura 56 – Haste de fixação do posicionador.

Fonte: Autor.

A peça é apoiada entre dois conjuntos de carrinhos com rolamentos, conforme ilustrado na Figura 57. O primeiro conjunto corresponde a um carrinho fixo, responsável pelo apoio do lado do acionamento da tubulação durante o processo. Esse carrinho contém dois pares de rolamentos: um par de diâmetros menores, destinado ao suporte de tubulações de menor porte, e um par de diâmetros maiores, projetado para peças de maior seção (ver Figuras 58, 59, 60 e 61).

O segundo conjunto consiste em um carrinho móvel interno, com configuração estrutural semelhante à do carrinho fixo, porém não parafusado ao trilho. Esse carrinho possui um ponto específico para a fixação de uma corrente, responsável pelo seu deslocamento conforme o comprimento da peça, além de um sistema de fixação em forma de garra, cuja função é impedir a queda do conjunto durante a abertura da centrífuga em direção à estufa (ver Figura 62).

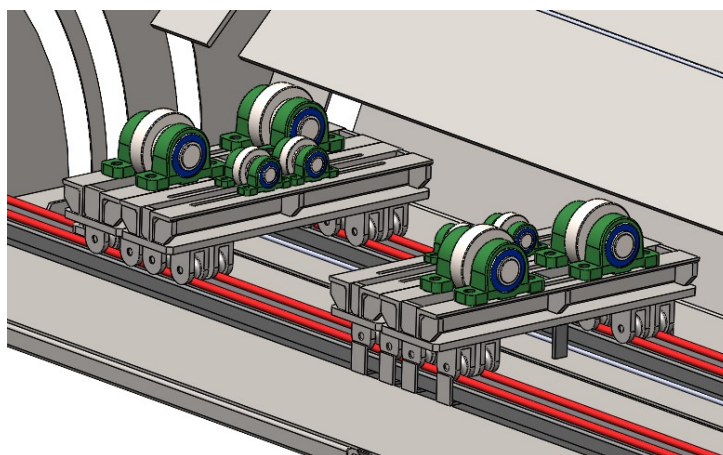


Figura 57 – Carrinhos internos da Centrífuga.

Fonte: Autor.

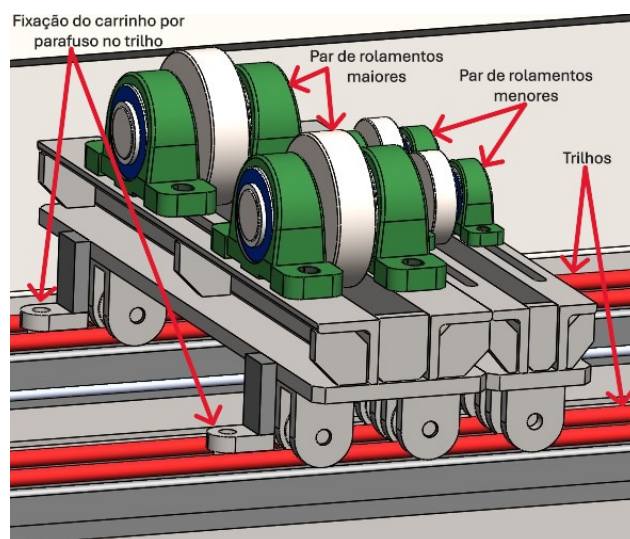


Figura 58 – Carrinho interno fixo da Centrífuga.
Fonte: Autor.

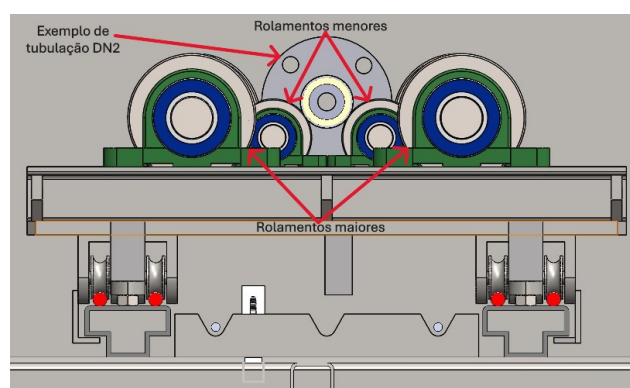


Figura 59 – Tubulação DN2 apoiada nos rolamentos menores.
Fonte: Autor.

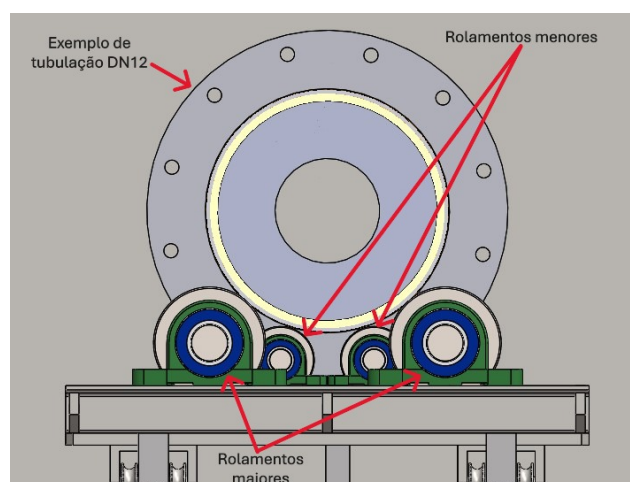


Figura 60 – Tubulação DN12 apoiada nos rolamentos maiores.
Fonte: Autor.

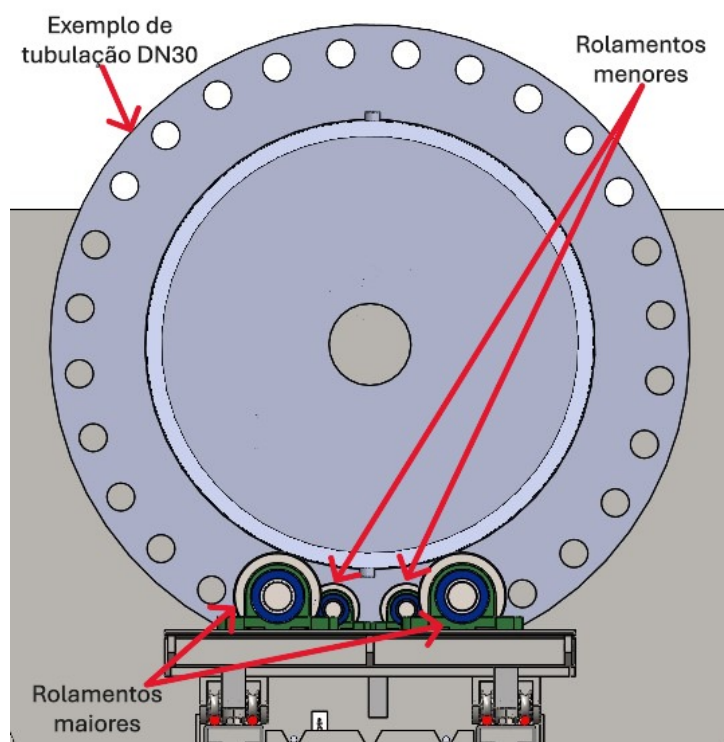


Figura 61 – Tubulação DN30 apoiada nos rolamentos maiores.
Fonte: Autor.

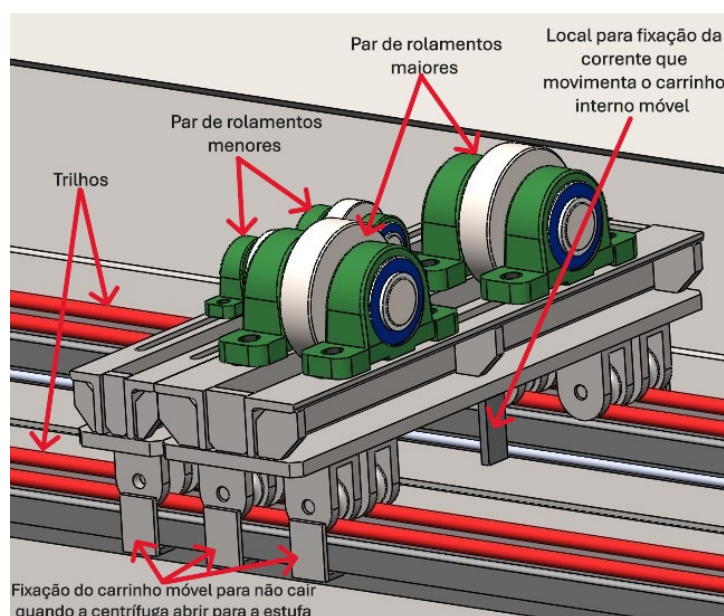


Figura 62 – Carrinho interno móvel da Centrífuga.
Fonte: Autor.

O carrinho móvel interno é deslocado por uma corrente conduzida por um motor acoplado à própria centrífuga através de um trilho (ver Figuras 63 e 64), e seu posicionamento é regulado conforme o comprimento da peça, permitindo apoiar a peça em dois pontos relativamente distantes para promover melhor estabilidade no giro (ver Figura 65).

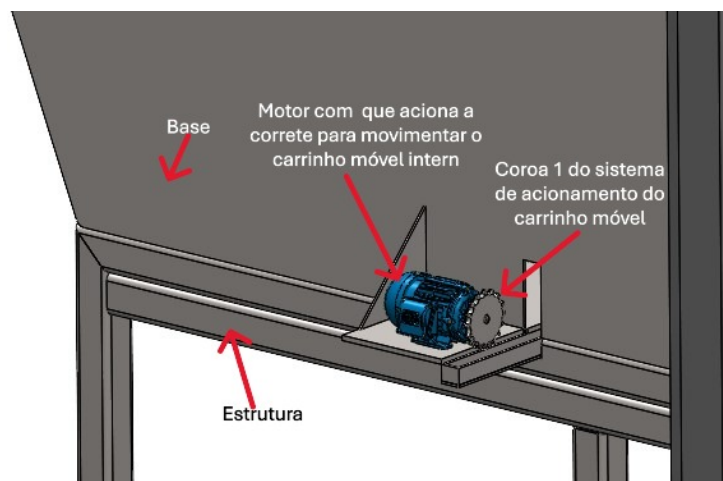


Figura 63 – Posição do acionamento do carrinho móvel.
Fonte: Autor.

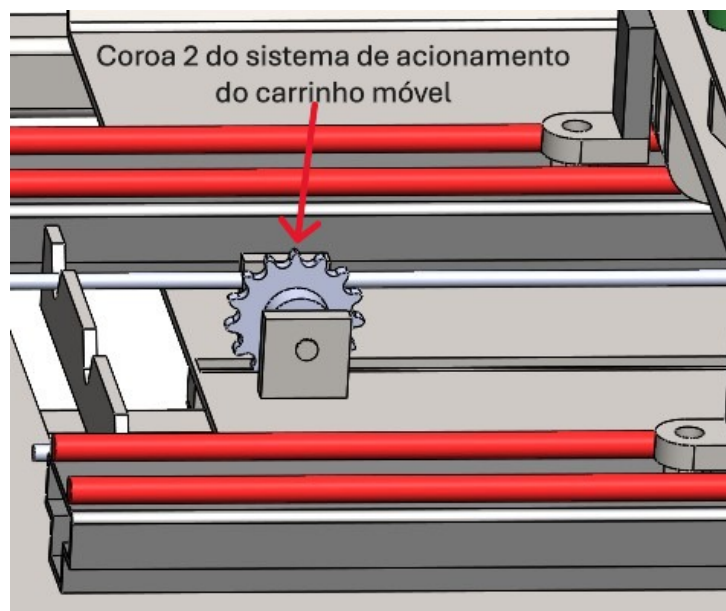


Figura 64 – Posição da coroa 2 do acionamento do carrinho móvel.
Fonte: Autor.

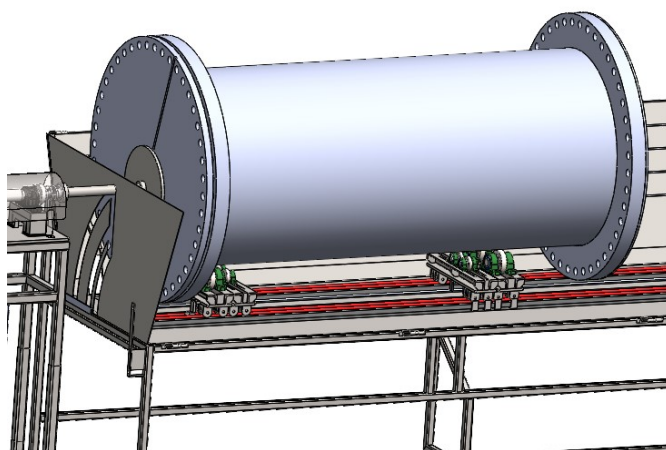


Figura 65 – Exemplo de tubulação na Centrífuga.

O movimento do carrinho móvel interno depende do comprimento da peça porém pelo tamanho dos carrinhos foi definido que as peças deveriam ser maiores ou iguais a 1000 mm e não maiores que 12000 mm, pelos padrões de tubulações fornecidas no mercado sendo que quando a peça tem o comprimento de até 1000 mm o carrinho móvel interno não será movimentado, e a partir disto, a cada 100 mm o motor ficará ligado por 1 s com a proporção de 100 mm/s para manter as proporcionalidades dos apoios, porém este ajuste deve ser feito antes mesmo que a centrífuga se abra para receber a peça.

Do ponto de vista estrutural, a centrífuga apresenta cortes nas chapas do lado dos acionamentos permitindo que as unidades motrizes permaneçam fixas ao piso mesmo quando a carcaça bascula, preservando conexões e fixações (ver Figura 66).

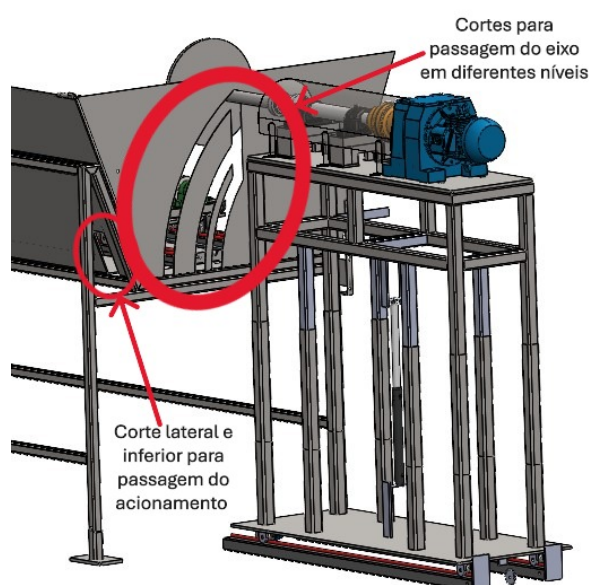


Figura 66 – Cortes para passagem dos elementos do acionamento.
Fonte: Autor.

O conjunto de acionamento é um elemento complexo anexado à centrífuga: sua altura varia conforme o DN da peça através de um pistão hidráulico com três posições (cada posição monitorada por um sensor correspondente) porém a configuração é o inverso do posicionador tendo o sensor 1 destinado a peças do DN 2 ao 10 (ver Figura 67), o sensor 2 destinado a peças do dn 12 ao 28 (ver Figura 68) e o sensor 3 destinado a peças do DN 30 ao 48 (ver Figura 69), tendo uma fixação na estrutura da centrífuga para 3 sensores óticos para controlar estas alturas (ver Figura 70). Os apoios estruturais contém tubulações de diferentes dimensões, permitindo que uma deslize para dentro da outra estabilizando a parte superior que sobe e desce (ver Figura 71).

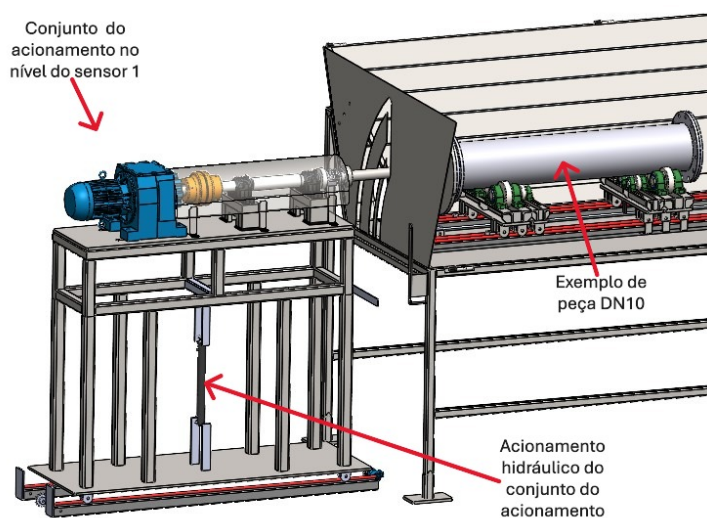


Figura 67 – Conjunto do acionamento no sensor 1 para peças DN2 a 10.
Fonte: Autor.

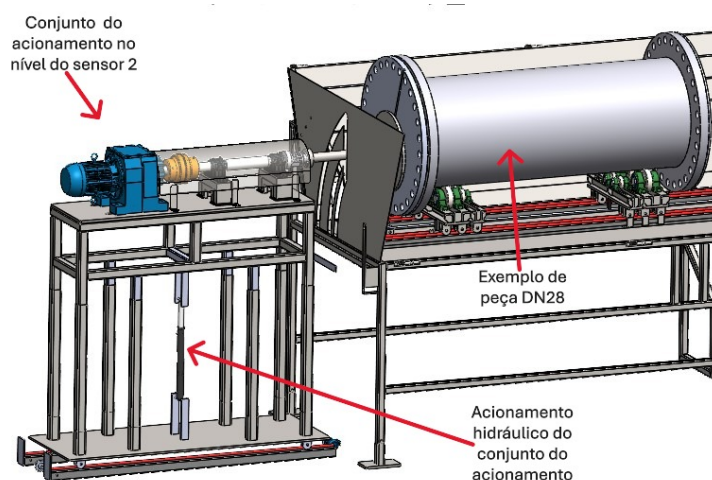


Figura 68 – Conjunto do acionamento no sensor 1 para peças DN12 a 28.
Fonte: Autor.

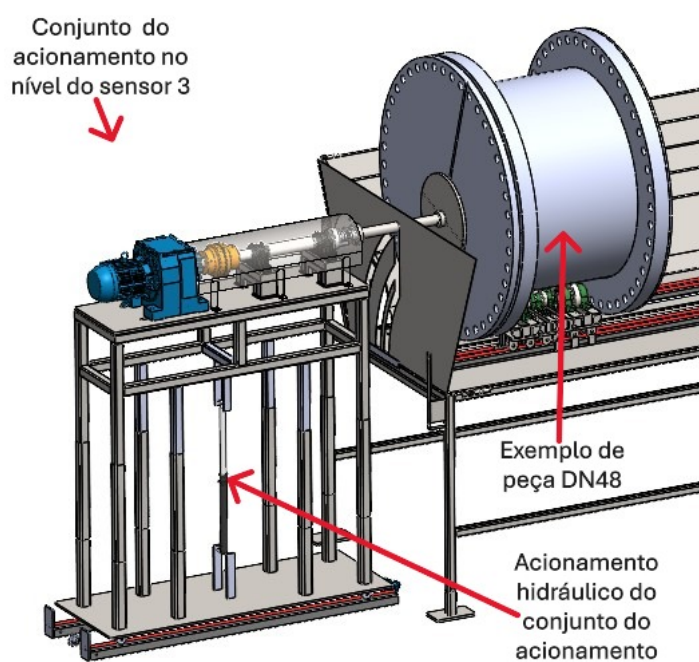


Figura 69 – Conjunto do acionamento no sensor 1 para peças DN30 a 48.
Fonte: Autor.



Figura 70 – Fixação dos sensores do conjunto do acionamento.
Fonte: Autor.

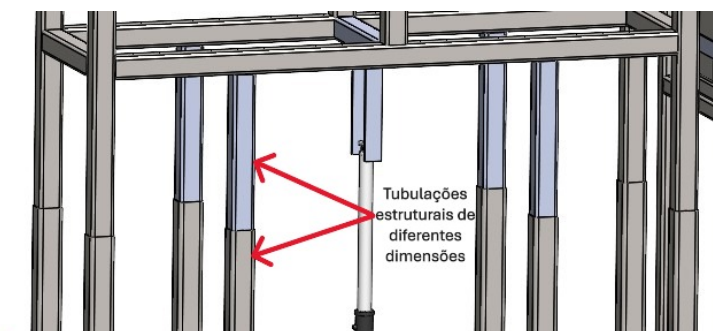


Figura 71 – Tubos estruturais do conjunto do acionamento.

Fonte: Autor.

A variação na altura é de extrema importância devido às diferenças nos diâmetros dos flanges das tubulações, pois, sem essa flexibilidade, haveria a necessidade de modificar os próprios flanges. À medida que o diâmetro do flange aumenta, o centro geométrico da peça se eleva, o que resulta em um maior deslocamento em relação ao eixo de rotação. Dessa forma, o ajuste de altura permite diminuir essa grande variação, aumentando a estabilidade e impedindo que saia das limitações geométricas do próprio acoplamento, porém assim como o carrinho, este ajuste deve ser feito antes mesmo que a centrífuga se abra para receber a peça.

Após a peça entrar na centrífuga, o acionamento é deslocado longitudinalmente através de um tilho sendo puxado por uma corrente acionada por um motor fixado ao piso (ver Figuras 72, 73 e 74) até que a peça intermediária do acoplamento encoste na tubulação, comprimindo uma mola e acionando um sensor de fim de curso (ver Figuras 75 e 76).

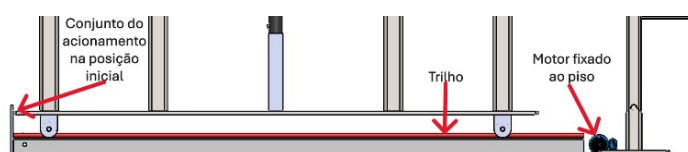


Figura 72 – Conjunto do acionamento na posição inicial.

Fonte: Autor.

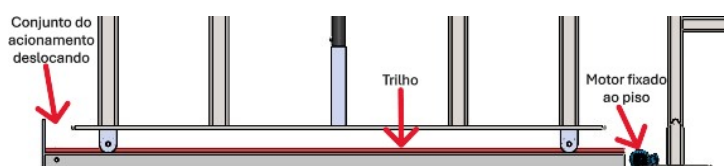


Figura 73 – Conjunto do acionamento deslocando.

Fonte: Autor.

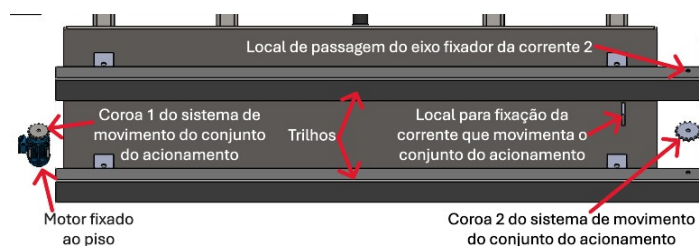


Figura 74 – Componentes de deslocamento do conjunto do acionamento.
Fonte: Autor.

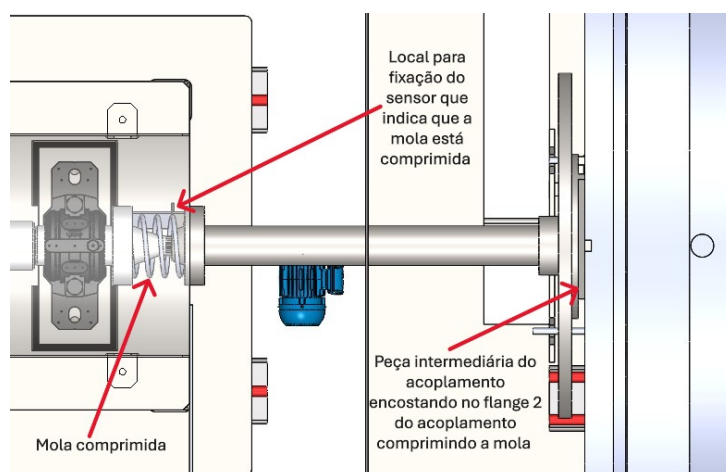


Figura 75 – Tubulação pressionando sistema de acoplamento comprimindo a mola.
Fonte: Autor.

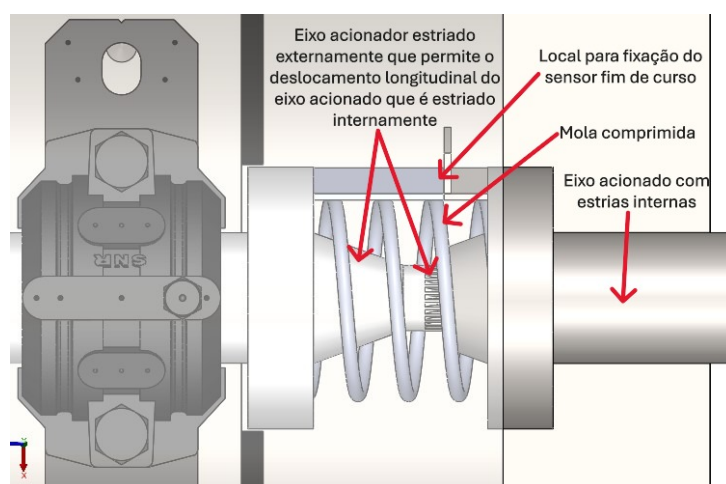


Figura 76 – Mola comprimida.
Fonte: Autor.

Em seguida, um motor de gira o eixo, quando o ressalto da peça intermediária do acoplamento se alinha com a estria do flange 2 do acoplamento que está anexada ao flange da peça, o ressalto entra na estria, a mola se descomprime e o fim de curso é liberado (ver Figuras 77 e 78), indicando que o acoplamento mecânico foi efetuado com sucesso.

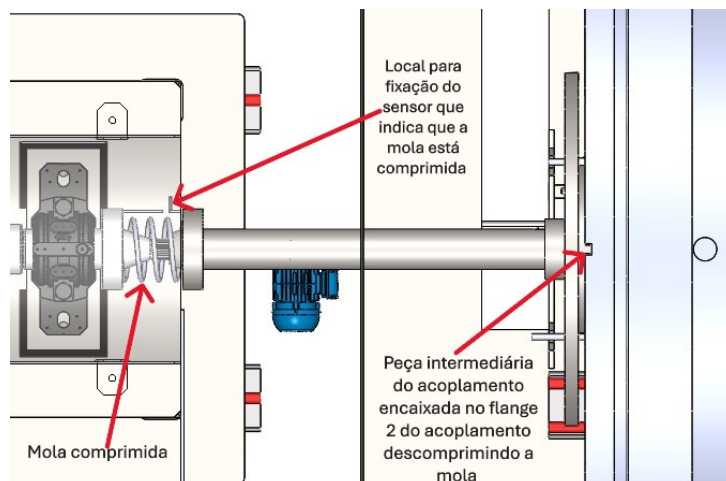


Figura 77 – Acoplamento realizado descomprimindo a mola.
Fonte: Autor.

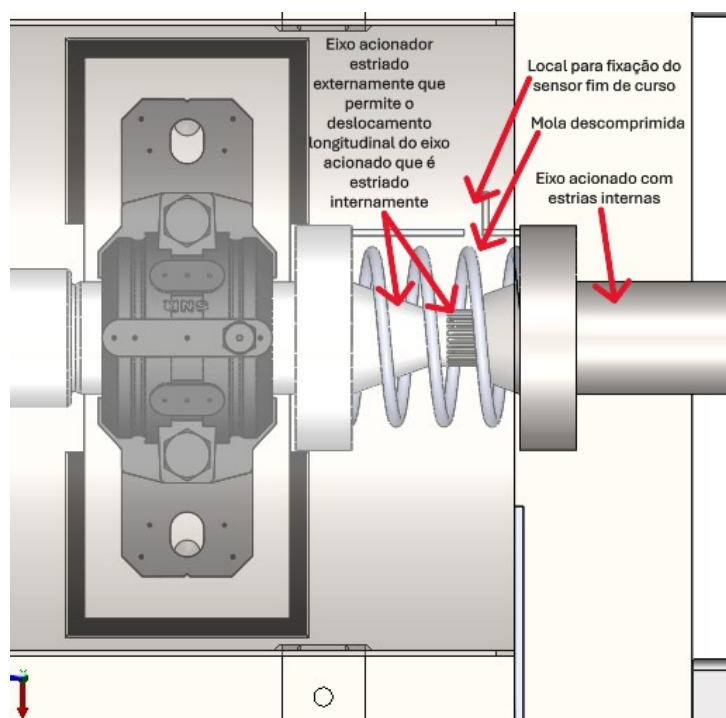


Figura 78 – Mola descomprimida.
Fonte: Autor.

O mesmo mecanismo fará o giro da peça para o revestimento no momento correto, neste trabalho, foram feitas algumas modificações no Flange 1 e na peça intermediária do acoplamento, para que as duas não se soltem, o canal existente no Flange 1 foi modificado para que tenha um ângulo (ver Figuras 79 e 80), este mesmo ângulo foi feito na estria da peça intermediária (ver Figuras 81 e 82) para que se encaixem perfeitamente (ver Figura 83), as extremidades do canal do flange 1 foram fechadas, de um lado pela própria

geometria e do outro por uma peça parafusada, facilitando manutenções futuras (ver Figura 84)

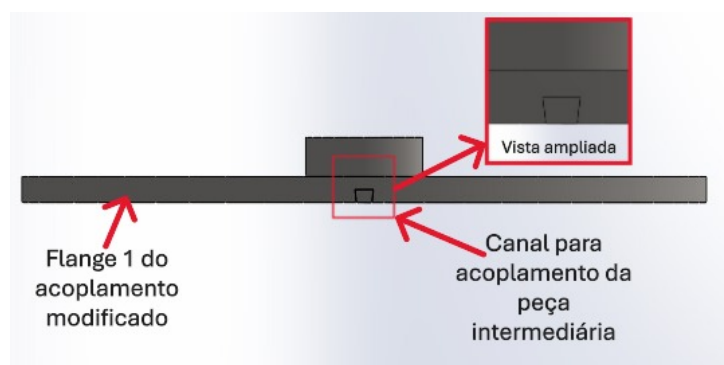


Figura 79 – Canal modificado do Flange 1.
Fonte: Autor.

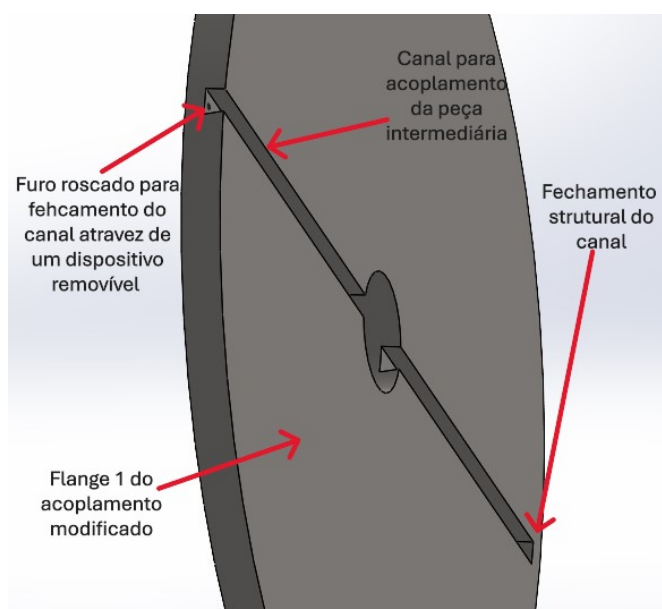


Figura 80 – Detalhes do acoplamento no Flange 1.
Fonte: Autor.

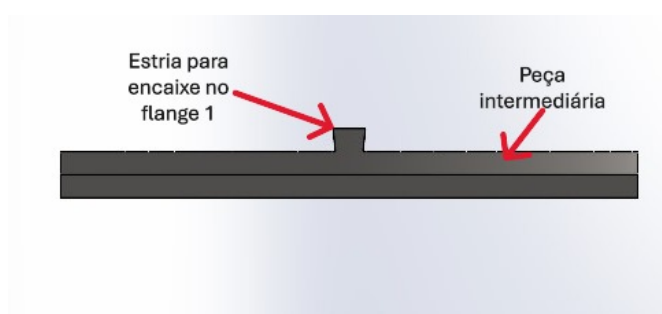


Figura 81 – Estria modificada na Peça intermediária.
Fonte: Autor.



Figura 82 – Detalhes da peça intermediária.
Fonte: Autor.

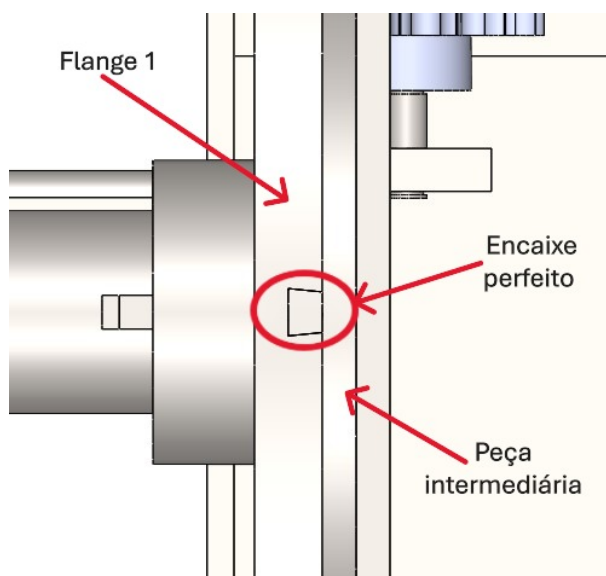


Figura 83 – Encaixe entre Flange 1 e Peça intermediária.

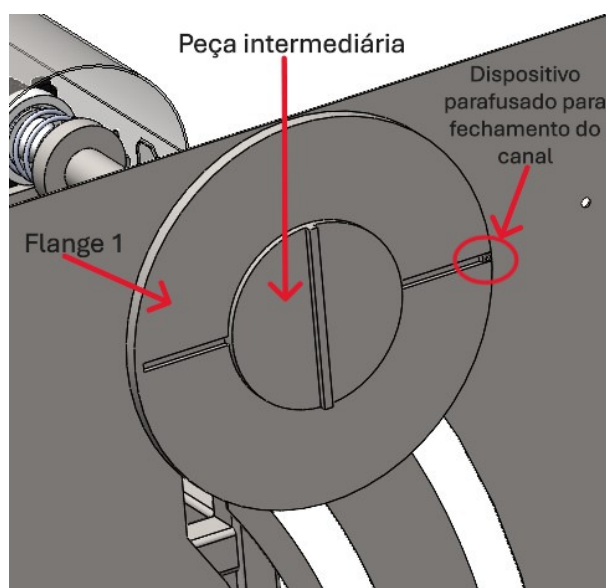


Figura 84 – Peça intermediária encaixada no Flange 1.
Fonte: Autor.

Para que o revestimento ocorra de forma uniforme e sem a ocorrência de falhas significativas, o motor deve girar a peça a uma velocidade suficientemente elevada, de modo que a aceleração centrífuga aplicada ao material seja várias vezes superior à aceleração da gravidade. Dessa forma, a força centrífuga é capaz de manter o poliuretano (PU) aderido de maneira contínua às paredes internas do tubo até que seja atingido o tempo de desmolde, conforme discutido na subseção 3.1.4, para isso, a velocidade foi estimada por:

1. Dados considerados:

- Diâmetro interno da tubulação $D = 1200,2 \text{ mm} = 1,2002 \text{ m}$;
- Raio interno $R = \frac{D}{2} = \frac{1,2002}{2} = 0,6001 \text{ m}$;
- Comprimento $L = 12,000 \text{ mm} = 12 \text{ m}$;
- A viscosidade dinâmica do pré polímero (μ_{ref}) segundo o catálogo da LANXESS... (s.d.) é de 650 Centipoise (cP ou) 0,65 Pascal-segundo Pa·s porém, para fins de superdimensionamento do sistema, adota-se um valor superior, considerando a viscosidade do material pronto para utilização (μ) sendo igual a 750 cP ou 0,75 Pa·s;
- Como não há dados específicos para o polímero escolhido, foi considerado que 40 vezes a força da gravidade (40g) seria suficientemente grande para manter o material pressionado contra a parede interna do tubo já que para promover o empilhamento de partículas de sílica monodispersa e a ordem dos cristais coloidais formados é necessário 18g (CHEN; HUANG, 2021) sendo que a sílica tem a densidade de $2,2 \text{ g/cm}^3$ (AWANO, 2012) que é superior a do poliuretano ($1,04 \text{ g/cm}^3$) conforme o catálogo da LANXESS... (s.d.) porém neste trabalho há uma grande quantidade de poliuretano a ser moldada em uma área extensa justificando o uso de um valor maior;
- Gravidade (g) = $9,81 \text{ m/s}^2$.

2. Calculos:

- Aceleração centrífuga necessária (a_c):

Formula:

$$a_c = \omega^2 \cdot R \quad (3.24)$$

Onde:

ω = velocidade angular (rad/s);

R = raio (m);

$$a_c = 40 \cdot 9,81 = 392,4 \text{ m/s}^2$$

- Cálculo da velocidade angular (isolando ω):

Formula:

$$\omega = \sqrt{\frac{a_c}{R}} \quad (3.25)$$

Calculo:

$$\begin{aligned}\omega &= \sqrt{\frac{392,4}{0,6001}} \\ \omega &= \sqrt{653,84} \\ \omega &= 25,57 \text{ rad/s}\end{aligned}\tag{3.26}$$

- Conversão para RPM:

Formula:

$$\text{RPM} = \frac{\omega \cdot 60}{2\pi}\tag{3.27}$$

Calculo:

$$\begin{aligned}\text{RPM} &= \frac{25,57 \cdot 60}{2 \cdot 3,14159} \\ \text{RPM} &= \frac{1534,20}{6,28318} \\ \text{RPM} &= 244,18 \text{ RPM}\end{aligned}\tag{3.28}$$

- Ajuste pela viscosidade do material:

Formula:

$$\text{RPM}_{\text{corrigido}} = \text{RPM} \cdot \sqrt{\frac{\mu}{\mu_{\text{ref}}}}\tag{3.29}$$

Calculo:

$$\begin{aligned}\text{RPM}_{\text{corrigido}} &= 244,18 \cdot \sqrt{\frac{0,75}{0,65}} \\ \text{RPM}_{\text{corrigido}} &= 244,18 \cdot \sqrt{1,15385} \\ \text{RPM}_{\text{corrigido}} &= 244,18 \cdot 1,074 \\ \text{RPM}_{\text{corrigido}} &= 262,25 \text{ RPM}\end{aligned}\tag{3.30}$$

Dessa forma, o valor obtido é arredondado para 265 RPM.

Além dos sistemas já descritos, a centrífuga conta com um pistão hidráulico responsável por inclinar o conjunto como um todo (ver Figuras 85, 86 e 87).

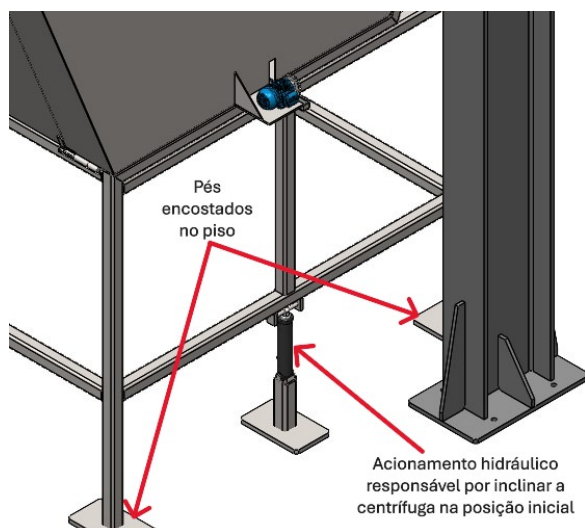


Figura 85 – Acionamento hidráulico para inclinação da centrífuga em sua posição inicial.
Fonte: Autor.

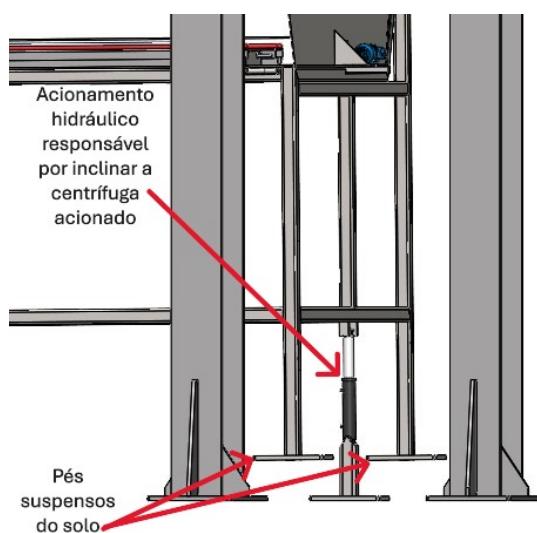


Figura 86 – Acionamento hidráulico para inclinação da centrífuga acionado.
Fonte: Autor.

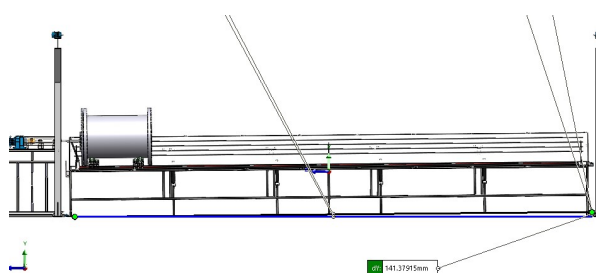


Figura 87 – Acionamento hidráulico para inclinação da centrífuga acionado.
Fonte: Autor.

Esse movimento de inclinação tem como finalidade facilitar a etapa de injeção do poliuretano, permitindo que o operador acione a injetora e realize a deposição do PU no interior da tubulação de forma segura e controlada, garantindo que o PU chegue a todo o comprimento da tubulação (ver Figura 88).

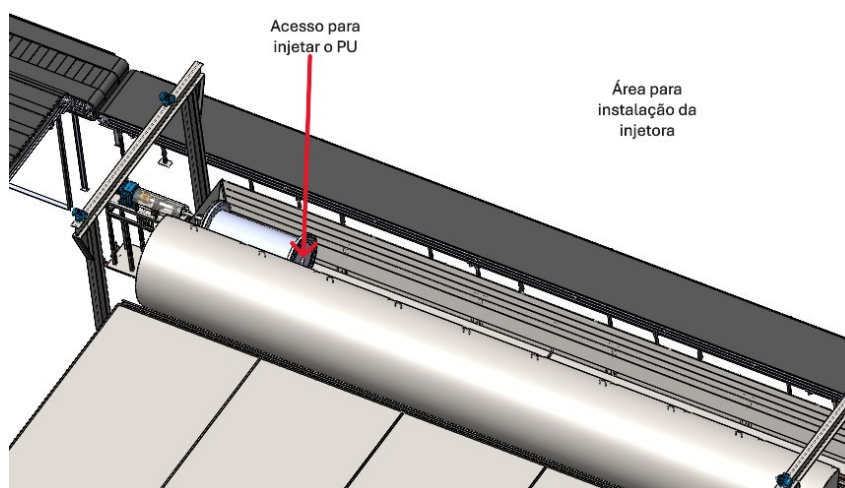


Figura 88 – Área de acesso para injeção do PU.
Fonte: Autor.

Projeto pensado para que se use uma injetora moderna que tenha uma espécie de braço para conseguir injetar a uma certa distância e articulável para alcançar diversos diâmetros e comprimentos de tubulações.

3.2.6 Estufa

A estufa (ver Figura 89) é o equipamento responsável pela etapa de cura do poliuretano e constitui um dos elementos centrais do processo produtivo, uma vez que garante que o revestimento atinja suas propriedades finais. Este trabalho levou em consideração não apenas as condições térmicas necessárias para a cura adequada do material, mas também aspectos operacionais, de segurança e de manutenção, permitindo diferentes modos de acesso e movimentação das tubulações ao longo do processo. A geometria, os acionamentos e os sistemas de controle foram concebidos de forma a possibilitar a operação contínua da planta, com múltiplas peças em cura simultaneamente.

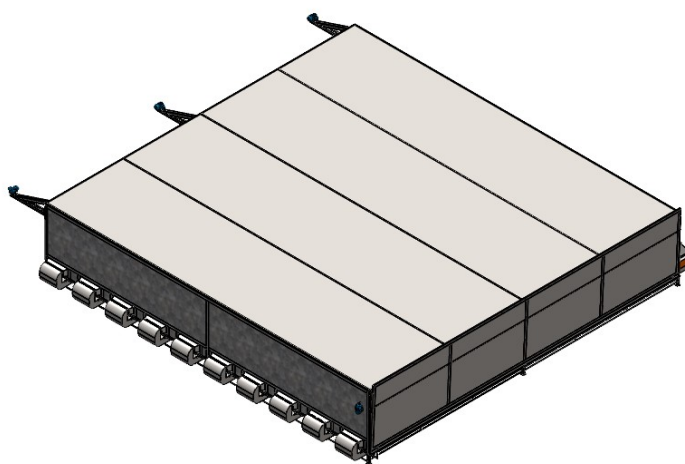


Figura 89 – Estufa.
Fonte: Autor.

A primeira forma de abertura da estufa ocorre no lado voltado para a centrífuga e tem como finalidade permitir a entrada das tubulações recém-revestidas (ver Figura 90).

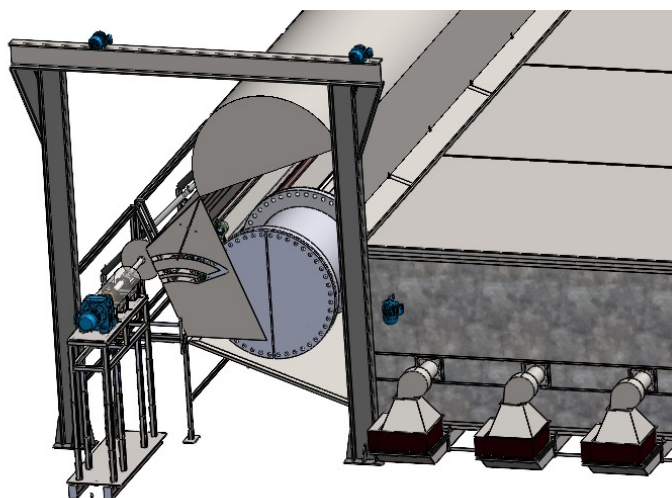


Figura 90 – Passagem de tubulação da Centrífuga para a Estufa.
Fonte: Autor.

Essa abertura é realizada por meio de dois motores elétricos, posicionados um em cada lateral da estufa, que atuam no desenrolamento de cabos de aço que passam por dentro da estrutura e são conectados à porta (ver Figuras 91 e 92).

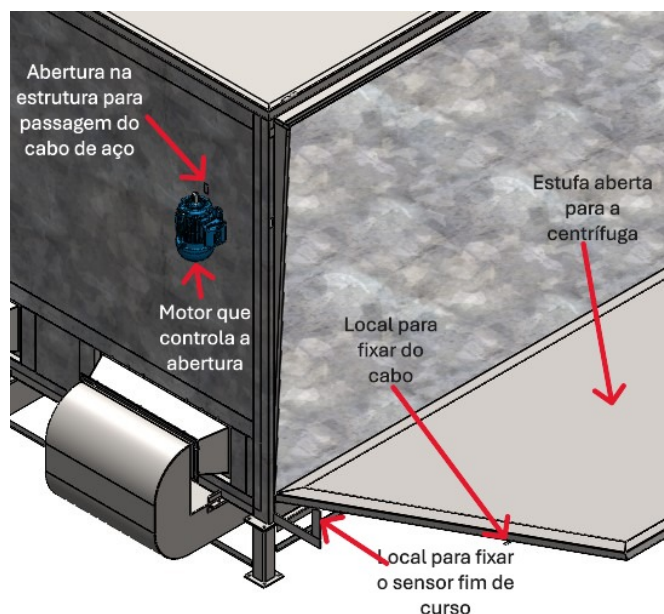


Figura 91 – Acionamento de abertura da estufa para a centrífuga do lado 1.
Fonte: Autor.

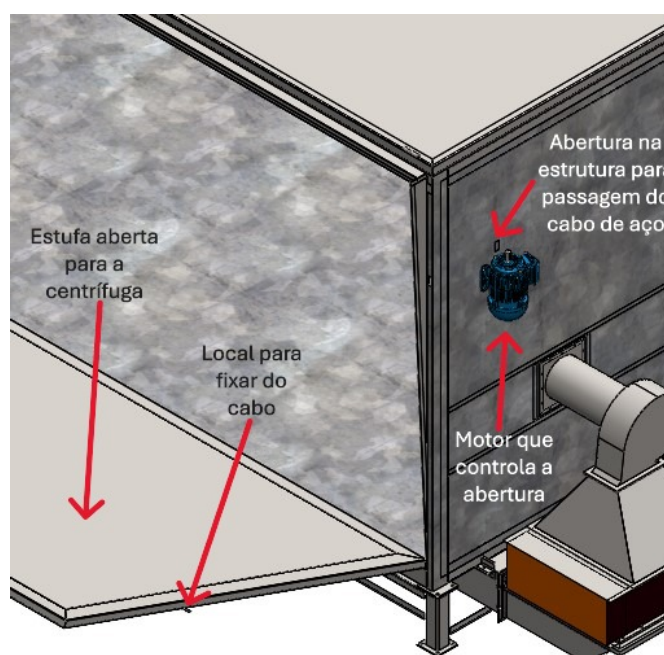


Figura 92 – Acionamento de abertura da estufa para a centrífuga do lado 2.
Fonte: Autor.

A porta denominada porta 1 apresenta uma leve inclinação em sua estrutura, de modo que a própria ação da gravidade contribui para o seu movimento de abertura (ver Figura 93), exigindo dos motores apenas o controle do desenrolamento dos cabos até que o sistema atinja o sensor de fim de curso inferior (ver Figura 94).

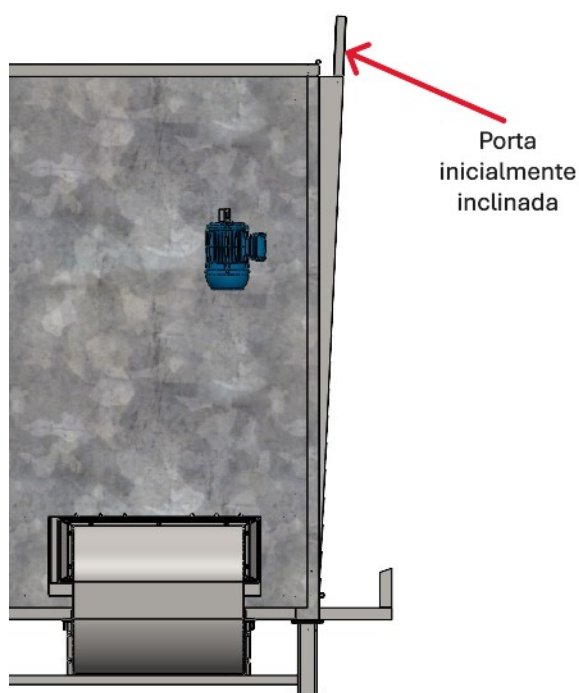


Figura 93 – Inclinação da porta 1 da Estufa.
Fonte: Autor.

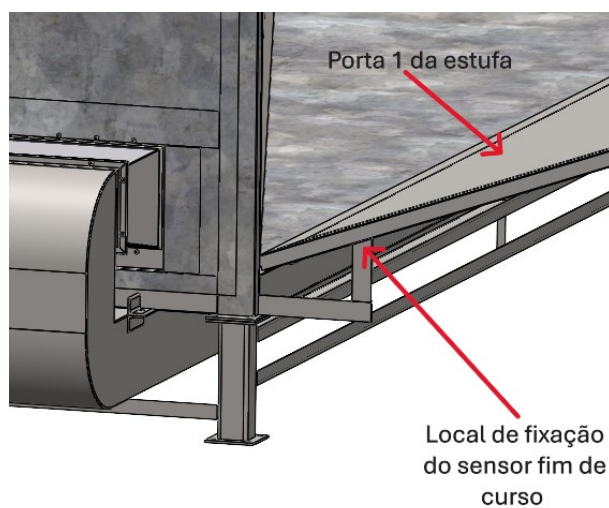


Figura 94 – Posição do sensor fim de curso inferior da porta 1 da Estufa.
Fonte: Autor.

Para o fechamento, o sentido de rotação dos motores é invertido, enrolando novamente os cabos e conduzindo a porta até o fim de curso superior (ver Figura 95), assegurando o correto enclausuramento da estufa antes do início ou da continuidade do processo de cura.

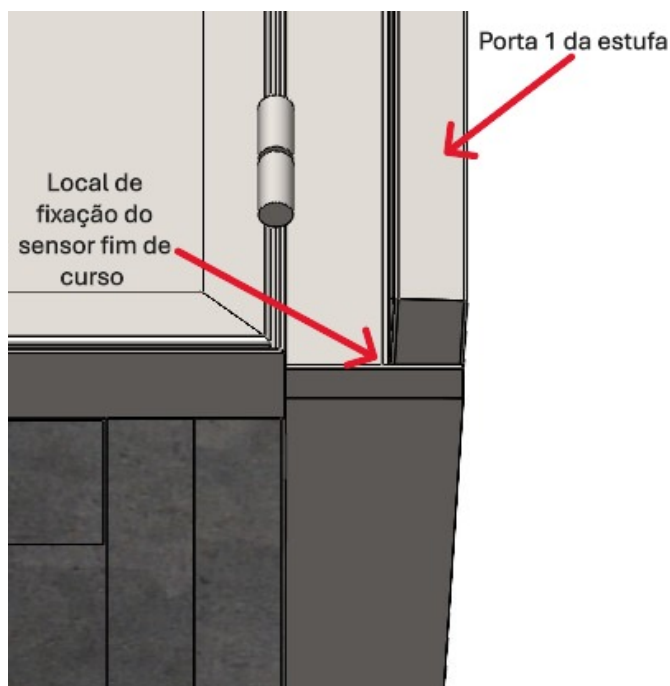


Figura 95 – Posição do sensor fim de curso superior da porta 1 da Estufa.
Fonte: Autor.

A segunda forma de abertura destina-se à saída das tubulações após o término do tempo de cura. Nesse caso, a abertura ocorre no lado oposto ao de entrada e é realizada por três motores elétricos, responsáveis por enrolar os cabos de aço e elevar a porta de saída, denominada porta 2 (ver Figuras 96 e 97) até que toque o fim de curso superior (ver Figura 98) ou a peça saia da estufa. Esse sistema foi projetado para permitir a liberação controlada das peças, evitando interferências no fluxo do processo.

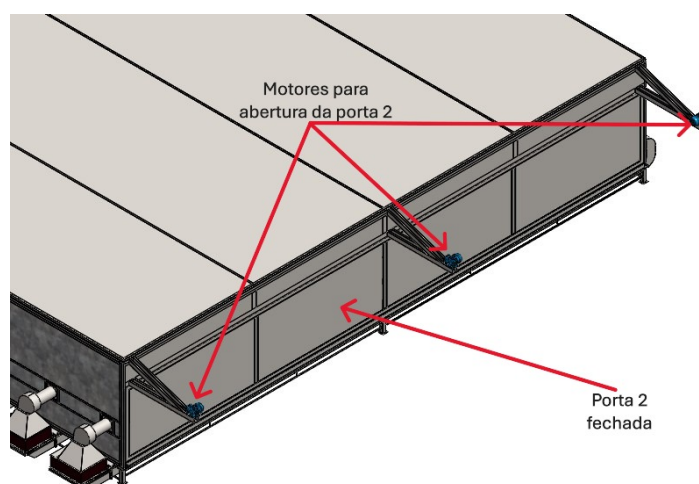


Figura 96 – Porta 2 da estufa fechada.
Fonte: Autor.

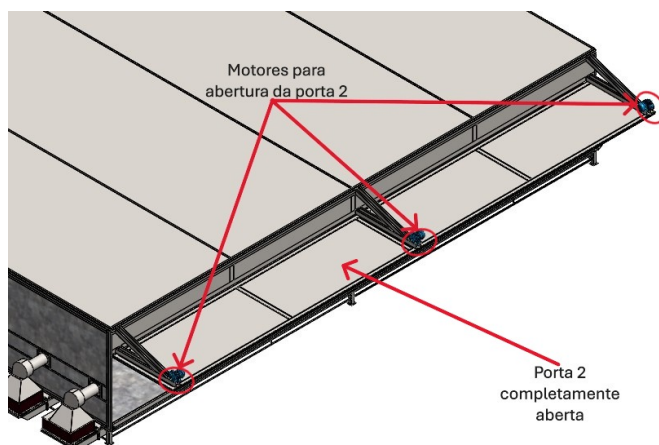


Figura 97 – Porta 2 da Estufa aberta.
Fonte: Autor.

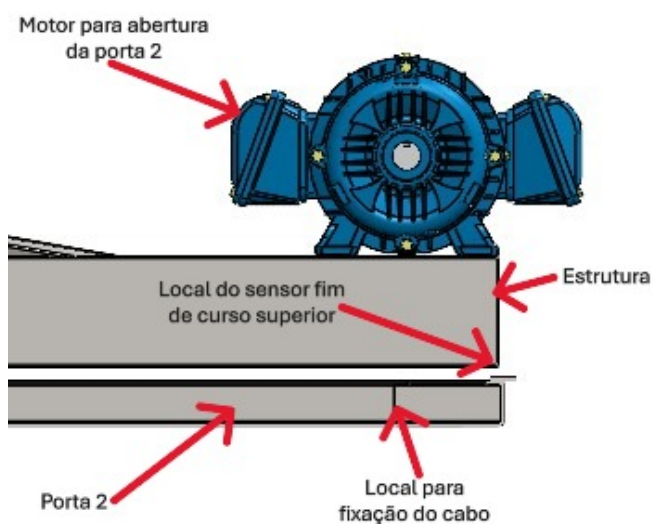


Figura 98 – Posição do sensor Fim de curso superior porta 2 da Estufa.
Fonte: Autor.

Assim que uma tubulação ultrapassa o sensor óptico na saída (ver Figura 99), os motores começam a girar no sentido oposto até que a porta encoste no fim de curso inferior (ver Figura 100), impedindo que duas peças sejam liberadas simultaneamente, o que poderia atrapalhar à operação.

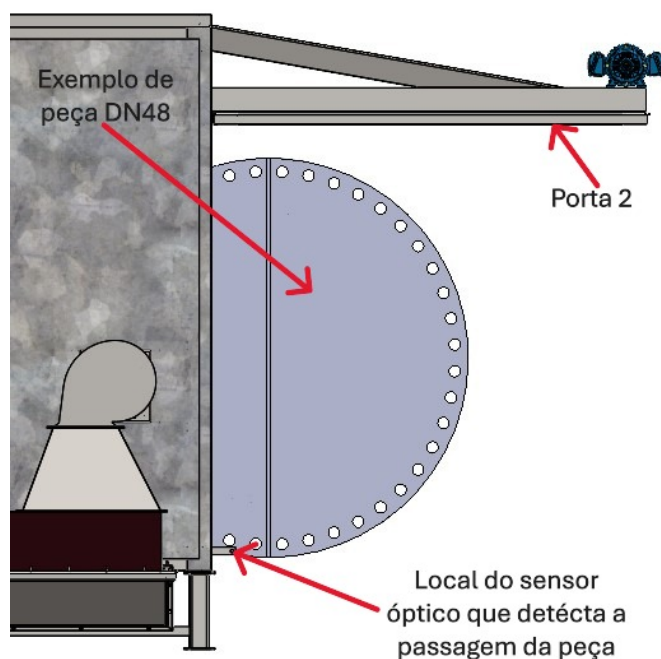


Figura 99 – Saída da tubulação pela porta 2 da Estufa.
Fonte: Autor.

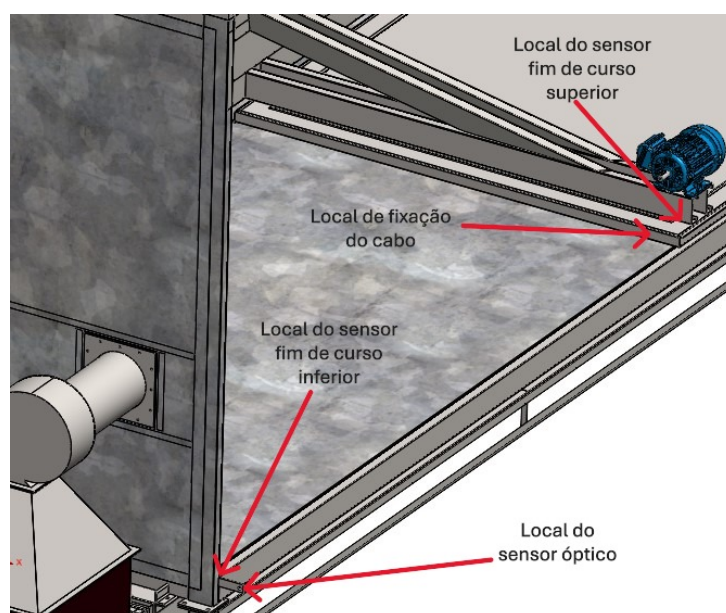


Figura 100 – Posição do sensor fim de curso inferior porta 2 da Estufa.
Fonte: Autor.

A estufa apresenta ainda uma leve inclinação longitudinal, de aproximadamente 10 mm entre uma extremidade e outra, cuja finalidade é induzir uma tendência natural de deslocamento das tubulações em direção à porta de saída (ver Figura 101). Essa inclinação contribui para que, no momento da abertura, a peça tenda a se mover espontaneamente para fora da estufa, reduzindo a necessidade de sistemas adicionais de transporte interno.

Entretanto, esse processo deve ser acompanhado por um operador, uma vez que diferenças significativas de diâmetro ou massa entre peças consecutivas podem resultar em tempos distintos de deslocamento, criando a possibilidade de saída simultânea de mais de uma tubulação caso a porta permaneça aberta por tempo excessivo, caso isso aconteça o operador deve garantir que apenas uma peça saia da estufa por vez.

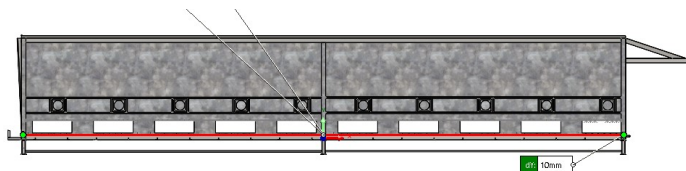


Figura 101 – Inclinação da Estufa em direção à saída.

Fonte: Autor.

A velocidade desta abertura não foi calculada pois essa parte do sistema precisaria de uma calibração em função da inclinação da estufa, que também pode ser alterada conforme as demandas da planta.

A terceira forma de abertura da estufa é superior e foi prevista exclusivamente para fins de manutenção. Essa abertura permite o acesso completo ao interior da estufa para inspeção, limpeza ou substituição de componentes, como resistências e dutos de circulação de ar. A movimentação dessa abertura superior pode ser realizada com o auxílio de uma ponte rolante ou equipamento equivalente, não sendo utilizada durante a operação normal do processo produtivo, mas desempenhando papel fundamental na manutenção preventiva e corretiva do sistema (ver Figura 102).

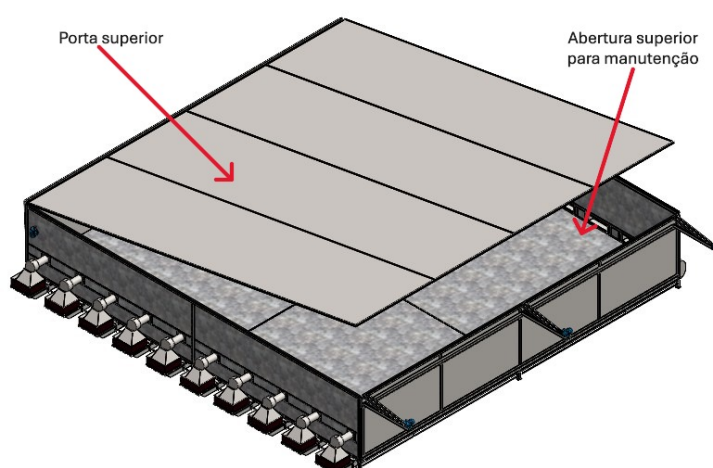


Figura 102 – Abertura superior para manutenção.

Fonte: Autor.

O aquecimento da estufa é realizado por meio de um sistema de ar forçado distribuído ao longo de toda a sua extensão. Ao todo, a estufa conta com dez conjuntos

de aquecimento, os quais captam o ar do próprio ambiente interno, conduzem esse ar através de resistências elétricas responsáveis pela elevação da temperatura e, em seguida, o recirculam para o interior da estufa, porém foram omitidos os motores com objetivo de tornar o modelamento mais leve (ver Figuras 103, 104 e 105). Esse sistema de recirculação promove uma distribuição mais homogênea da temperatura, reduzindo gradientes térmicos e assegurando que todas as tubulações em processo de cura sejam submetidas a condições semelhantes.



Figura 103 – Sistema de aquecimento da estufa.

Fonte: Autor.

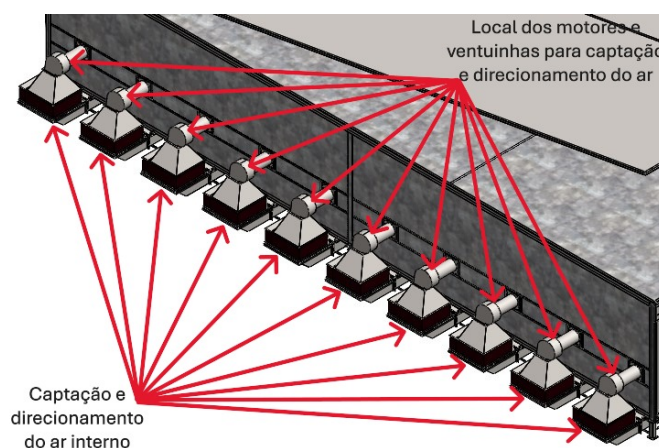


Figura 104 – Captadores e direcionadores do ar interno.

Fonte: Autor.

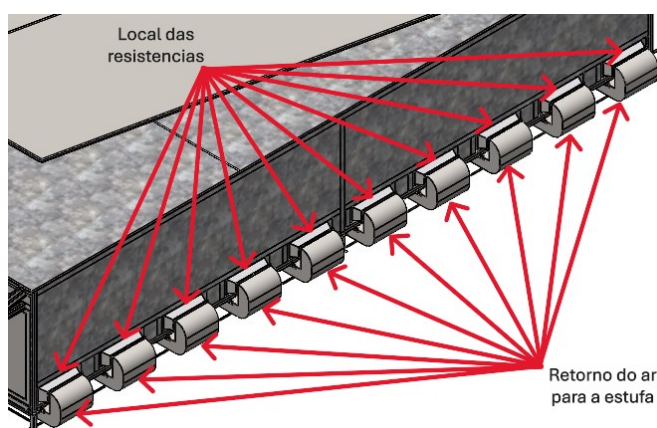


Figura 105 – Local das resistências para aquecimento da Estufa.

Fonte: Autor.

A temperatura de operação da estufa é mantida em torno de 100 °C, valor considerado adequado para a cura completa do poliuretano utilizado neste projeto segundo o catalogo da [LANXESS...](#) (s.d.). O controle dessa temperatura é essencial para garantir que o revestimento atinja suas propriedades mecânicas e químicas finais, evitando defeitos como cura incompleta, tensões internas ou degradação do material. Dessa forma, a estufa não apenas complementa o processo iniciado na centrífuga, mas atua como elemento determinante para a qualidade final do revestimento aplicado às tubulações.

3.3 Programação em Ladder

A programação em *Ladder* desenvolvida neste projeto tem como objetivo controlar de forma sequencial e segura todas as etapas do processo de revestimento, cura e movimentação das peças. Cada POU (*Program Organization Unit*) foi estruturada para desempenhar uma função específica dentro do ciclo, desde o cadastro e validação dos dados das peças até o acionamento dos motores, sensores e temporizadores que garantem o funcionamento correto da centrífuga e da estufa. Essa organização modular permite que o sistema seja facilmente compreendido, mantido e expandido, já que cada POU concentra a lógica de uma etapa do processo. Nas subseções seguintes, são detalhadas todas as POUs implementadas, apresentando suas redes de programação, variáveis locais (usadas dentro da própria POU) e variáveis globais (usadas em mais de uma POU) utilizadas além da função desempenhada dentro do ciclo produtivo.

3.3.1 POU ADD_PECA

A POU **ADD_PECA** é responsável por validar os dados inseridos pelo operador (comprimento e diâmetro nominal da peça), verificar se estão dentro dos limites estabelecidos e, caso estejam corretos, adicionar a peça na matriz **Pecas**. Caso os valores sejam inválidos, mensagens de erro são enviadas ao supervisor por meio da POU **ALARMES**.

As variáveis auxiliares (**Aux**, **Aux2** até **Aux10**) desempenham papel fundamental na coordenação das condições de validação, mensagens de erro e movimentação dos dados entre as variáveis **PecasAux** que é do tipo **DADOS_PECA** e a matriz **Pecas** que é do mesmo tipo (ver Figura 106). Além disso, o temporizador **TIN** garante que o botão de adição não seja acionado indevidamente durante o tempo de comunicação entre supervisor e CLP.

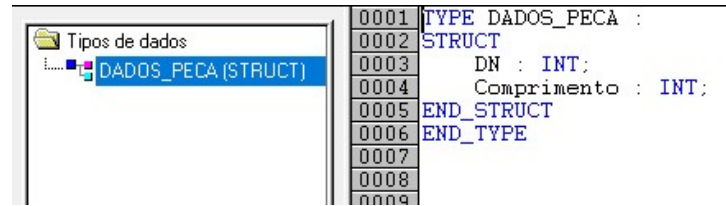


Figura 106 – Tipo de dados: DADOS_PECA.
Fonte: Autor.

Dessa forma as principais funcionalidades implementadas nessa POU são apresentadas a seguir:

- Validação do comprimento da peça;
- Validação do diâmetro nominal (DN);
- Controle de mensagens de erro e sucesso;
- Incremento da variável QTD_PECAS e movimentação dos dados para a matriz Pecas.

Na Figura 107, observam-se as duas primeiras redes da POU ADD_PECA. A primeira rede é responsável por resetar as variáveis auxiliares, acionar **InserirAx** quando o operador pressiona o botão **Inserir**, (garantindo que qualquer teste anterior seja descartado e que uma nova validação seja iniciada) e setar **ACTIN**. A segunda rede mostra a lógica do temporizador **TIN**, que é acionado pela bobina **ACTIN**. Esse temporizador possui um tempo de 100 ms e sua função é impedir que o botão de inserir seja acionado novamente dentro desse intervalo, evitando inconsistências devido ao atraso de comunicação entre supervisor e CLP. Ao término do tempo configurado, a bobina **ACTIN** é resetada automaticamente.

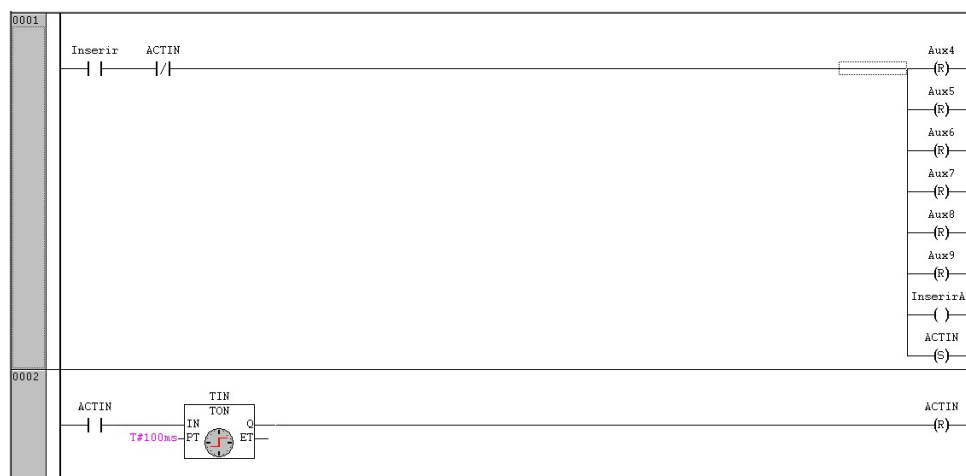


Figura 107 – Controle de inserção e bloqueio de repetição na POU ADD_PECA.
Fonte: Autor.

A Figura 108 apresenta a rede de validação inicial, onde os valores inseridos são comparados com os limites mínimos. Caso o comprimento seja maior ou igual a 500 mm, a bobina Aux4 é acionada, caso contrário, Aux6 é setada. De forma análoga, se o DN for maior ou igual a 2, Aux5 é acionada, caso contrário, Aux7 é setada.

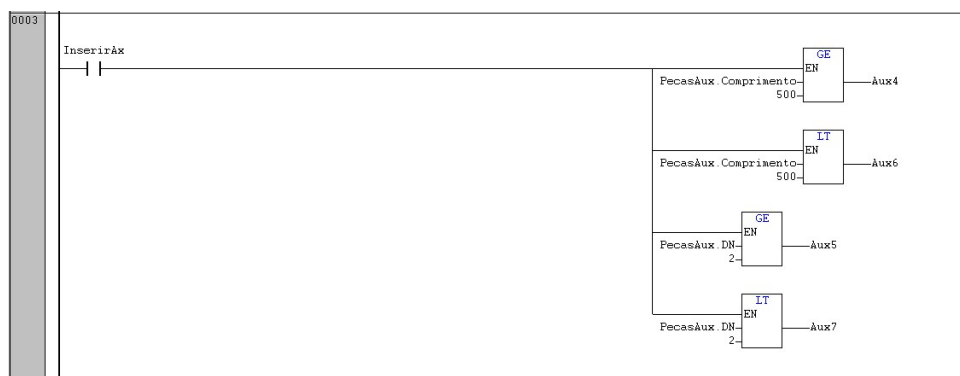


Figura 108 – Validação inicial de comprimento e DN.

Fonte: Autor.

Na Figura 109, observa-se a verificação dos limites superiores. Se o comprimento for menor ou igual a 12000 mm, Aux8 é acionada, caso contrário, Aux6 indica erro. Para o DN, se o valor for menor ou igual a 48, Aux9 é acionada, caso contrário, Aux7 indica erro.



Figura 109 – Verificação dos limites superiores.

Fonte: Autor.

A Figura 110 mostra as redes responsáveis por acionar as mensagens de erro através da POU ALARMES. Quando Aux6 e Aux7 estão acionadas simultaneamente, a bobina VLRSI é ativada, indicando que tanto o comprimento quanto o DN são inválidos, juntamente com a bobina Aux10 que impede a mudança para outra mensagem de erro até que seja inserido um novo valor. Se apenas Aux6 estiver acionada, a bobina CMPI indica erro de comprimento, se apenas Aux7 estiver acionada, a bobina DNI indica erro de DN.

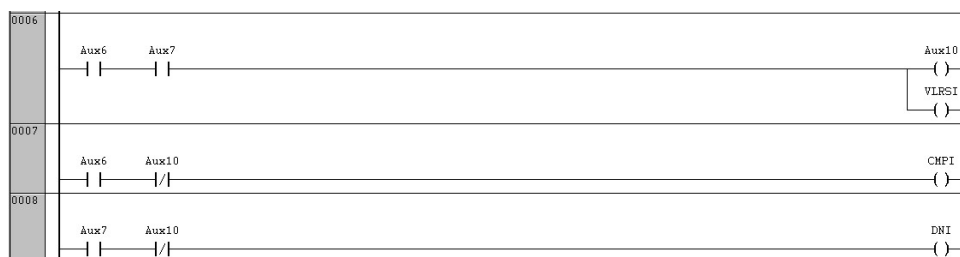


Figura 110 – Redes de mensagens de erro na POU ADD_PECA.
Fonte: Autor.

Na Figura 111, observa-se a lógica de movimentação dos dados. Quando Aux8 e Aux9 estão acionadas simultaneamente, além de acionar a bobina VLRSOK, indicando que os valores estão corretos, ocorre o *reset* de Aux4, Aux5, Aux6 e Aux7, evitando que mensagens de erro permaneçam ativas após a validação. Nesse mesmo instante, a bobina Aux2 é setada, garantindo que os valores de `PecasAux.Comprimento` e `PecasAux.DN` sejam movidos para a matriz `Pecas[QTD_PECAS]`. Assim, o sistema registra a peça corretamente e prepara o ambiente para a próxima inserção.

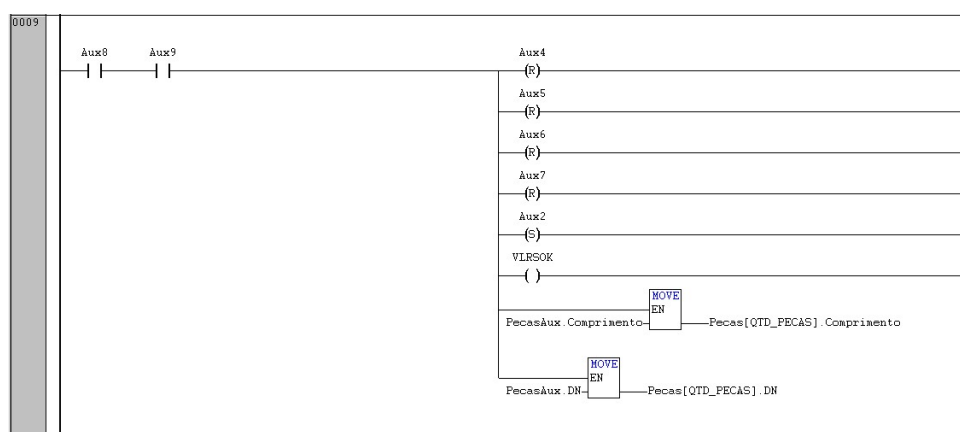


Figura 111 – Movimentação de dados e reset de variáveis na POU ADD_PECA.
Fonte: Autor.

Na Figura 112, observam-se as redes 0010 e 0011 da POU ADD_PECA. A rede 0010 é responsável por garantir que, quando Aux2 está acionada, os valores de `PecasAux.Comprimento` e `PecasAux.DN` sejam resetados para zero. Isso é feito através da movimentação do valor armazenado em Aux para essas variáveis, assegurando que após a inserção correta de uma peça, os campos na interface do operador sejam limpos e preparados para uma nova entrada. Além disso, o acionamento de Aux3 indica que os valores válidos já foram inseridos no sistema. A rede 0011, por sua vez, é responsável pelo incremento da variável QTD_PECAS. Quando Aux3 está acionada e as bobinas Aux8, Aux9 e Aux2 são ressetadas, a instrução ADD soma 1 ao valor atual de QTD_PECAS, registrando que uma nova peça foi adicionada ao

sistema. Essa lógica garante que o contador de peças cadastradas seja atualizado apenas quando todos os parâmetros foram validados corretamente.

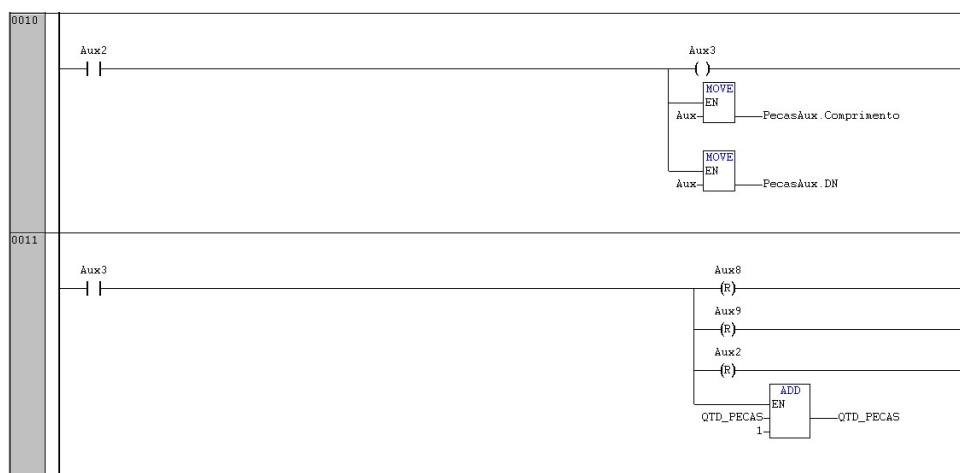


Figura 112 – Limpeza de tela e incremento de peças.

Fonte: Autor.

3.3.2 POU RMV_PECA

A POU RMV_PECA é responsável pela remoção da última peça cadastrada no sistema. Sua lógica garante que apenas peças ainda não inseridas no processo possam ser removidas, protegendo a integridade do ciclo produtivo. Além disso, o programa atualiza a variável QTD_PECAS e limpa a última posição da matriz Pecas, substituindo os valores por zero.

As variáveis auxiliares (Aux1, Aux2, Aux3, Aux4, ACTRMV) coordenam as condições de remoção, enquanto o temporizador TRMV impede acionamentos repetidos do botão **Remove** em intervalos inferiores a 100 ms.

Dessa forma, a POU RMV_PECA desempenha as seguintes funções principais dentro do sistema de controle:

- Controle da remoção de peças cadastradas;
- Proteção contra remoção da peça em processo;
- Atualização da variável QTD_PECAS;
- Limpeza da última posição da matriz Pecas.

Na Figura 113, observam-se as quatro primeiras redes da POU RMV_PECA. A rede 0001 verifica se o operador acionou o botão **Remove**, se existem peças cadastradas ($QTD_PECAS > 1$) e se a bobina Aux3 não está ativa. Nessas condições, além de acionar Aux1, também é setada a bobina ACTRMV, que inicia o controle do temporizador. A rede

0002 mostra a lógica do temporizador TRMV, que é acionado por ACTRMV. Esse temporizador possui um tempo de 100 ms e sua função é impedir que o botão **Remove** seja acionado novamente dentro desse intervalo, evitando duplicidade de comandos causada pelo atraso de comunicação entre supervisor e CLP. Ao término do tempo configurado, a bobina ACTRMV é automaticamente resetada, liberando o sistema para um novo acionamento seguro. A rede 0003 aciona Aux3 quando o processo já foi iniciado (**Start** ativo), impedindo a remoção da peça em execução. A rede 0004 garante que, se **Start** for ativado, apenas peças adicionais ($QTD_PECAS > 2$) possam ser removidas acionando Aux1.

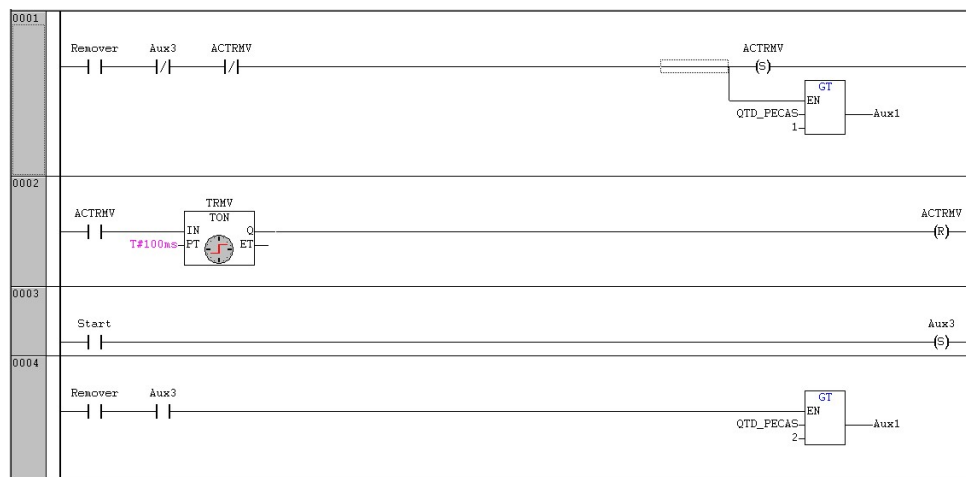


Figura 113 – Condições para remoção de peças.

Fonte: Autor.

Na Figura 114, observam-se as redes 0005 a 0007. A rede 0005 compara se $QTD_PECAS = 1$, acionando **Aux4**, que reseta **Aux3**. A rede 0006 mostra o *reset* de **Aux3** quando **Aux4** está ativo. A rede 0007 é ativada quando **Aux1** é ativado, sendo responsável por realizar a subtração de 1 em **QTD_PECAS**, atualizando a posição disponível na matriz, além de setar **Aux2** para iniciar a limpeza da última posição, **Aux1** é resetado automaticamente.



Figura 114 – Controle de QTD_PECAS e reset de variáveis da POU RMV_PECA.

Fonte: Autor.

Na Figura 115, observa-se a rede 0008, responsável pela limpeza da última posição da matriz *Pecas*. Quando *Aux2* é acionado, os valores de comprimento e DN da última peça são substituídos por zero, garantindo que a posição seja liberada para futuras inserções. Após a operação, *Aux2* é resetado automaticamente.



Figura 115 – Limpeza da última posição da matriz *Pecas*.
Fonte: Autor.

3.3.3 POU TEST_START

A POU *TEST_START* é responsável por validar se o processo pode ser iniciado, conforme os valores da primeira posição da matriz *Pecas*. Essa lógica é acionada pelo botão *AuxStart* pressionado pelo operador ou pela POU *FIM_INIC_PECA*, caso haja outra peça aguardando para ser revestida. O programa verifica se os parâmetros de comprimento e diâmetro nominal (DN) são válidos, aciona o *Start* quando apropriado e gera mensagens de erro quando não há peças cadastradas.

Dessa forma, a POU *TEST_START* desempenha as seguintes funções principais:

- Teste de comprimento e DN da peça;
- Acionamento do *Start* quando os valores são válidos;
- Bloqueio de acionamentos repetidos com *VSTART*;
- Mensagem de erro quando não há peça cadastrada.

Na Figura 116, observa-se a rede 0001, responsável por realizar os testes iniciais. Quando o operador aciona *AuxStart* ou quando *Aux1Start* é acionado na POU *FIM_INIC_PECA*, são verificadas as condições da primeira peça na matriz: se o comprimento for maior ou igual a 1000, aciona-se *Aux1*, se o DN for maior ou igual a 2, aciona-se *Aux2*. Caso ambos sejam válidos, *Aux3* é acionado, indicando que há peça disponível para revestimento. Se o comprimento ou DN forem iguais a zero, são acionadas *Aux4* e *Aux5*, respectivamente. Quando ambas estão ativas, *Aux6* é acionado, indicando ausência de peças cadastradas. Porém isto ocorre apenas se *VSTART* ainda não estiver acionado pelo início do processo na POU *ACESTEIRA1*, impedindo que *Start* seja acionado novamente até o fim do processo na POU *FIM_INIC_PECA*.

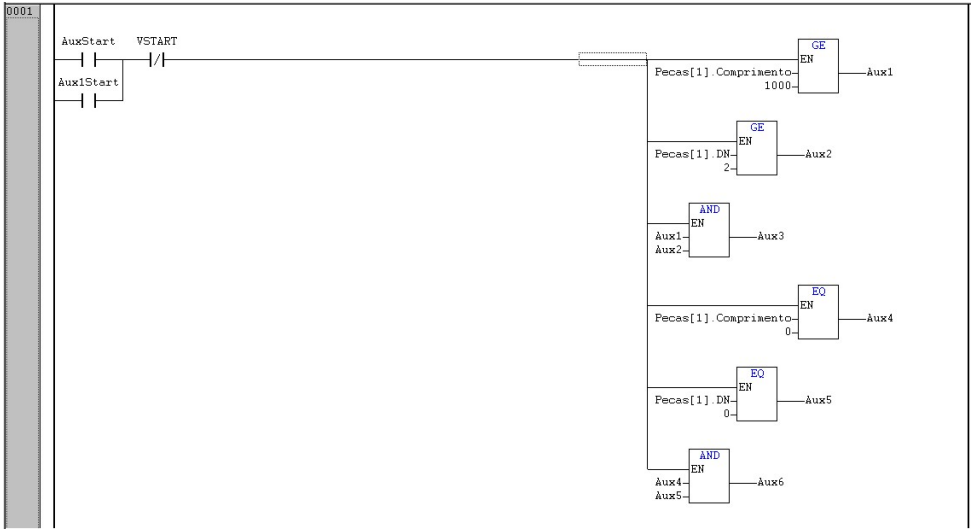


Figura 116 – Validação de parâmetros da peça na POU TEST_START.
Fonte: Autor.

Na Figura 117, observam-se as redes 0002, 0003 e 0004 da POU TEST_START. A rede 0002 mostra que, quando **Aux3** é acionado, a bobina **Start** é ativada, iniciando o processo. Nesse momento, as bobinas **Aux1**, **Aux2** e **Aux3** são resetadas, garantindo que a validação seja realizada apenas uma vez por ciclo. A rede 0003 complementa essa lógica, acionando a bobina **STOK** quando **Start** está ativo, indicando ao supervisor que o processo foi iniciado. Por fim, a rede 0004 mostra que, quando **Aux6** é acionado, a bobina **ADPC** é ativada, enviando uma mensagem de erro ao supervisor e indicando que não há peças cadastradas. Nesse mesmo instante, as bobinas **Aux4**, **Aux5** e **Aux6** são resetadas, preparando o sistema para uma nova validação.



Figura 117 – Operações de Start e controle de mensagens na POU TEST_START.
Fonte: Autor.

3.3.4 POU TEMP_ESTUF

A POU **TEMP_ESTUF** é responsável pelo controle da temperatura da estufa. Sua lógica garante que a resistência seja acionada ou desligada conforme os limites definidos, mantendo o processo seguro e contínuo. Além disso, há proteção contra superaquecimento e integração com o botão de emergência.

Dessa forma, a POU **TEMP_ESTUF** desempenha as seguintes funções principais:

- Controle da temperatura em **TEMP_STF**;
- Acionamento da resistência conforme limites de temperatura;
- Mensagem de emergência se a temperatura ultrapassar 150 graus;

Na Figura 118, observam-se as três redes da POU **TEMP_ESTUF**. A rede 0001 acessa o valor da temperatura em **AIO** (ver Figura 119) proveniente do sensor de temperatura e o armazena em **TEMP_STF**. A rede 0002 é habilitada quando **Start** é acionado, garantindo que o teste de temperatura só ocorra durante o processo. Nessa rede, o valor de **TEMP_STF** é comparado com os limites definidos: se for inferior a 99,99 graus, a bobina **LR** é acionada para ligar a resistência e manter o aquecimento, se for maior ou igual a 100 graus, a bobina **DR_STF** é acionada para desligar a resistência, evitando superaquecimento e se ultrapassar 150 graus, a bobina **EmergncSTF** é acionada, indicando uma condição crítica e enviando uma mensagem de emergência ao supervisor. As bobinas **LR** e **DR_STF** também ativam esta rede, garantindo que a verificação da temperatura seja feita a todo momento após o **Start**. A rede 0003 controla a bobina **RESISTSTF**, que é ligada quando **LR** está ativo e desligada quando **DR_STF**, **EmergncSTF** ou o botão de emergência **Emergnc** estão acionados, garantindo a segurança do processo.

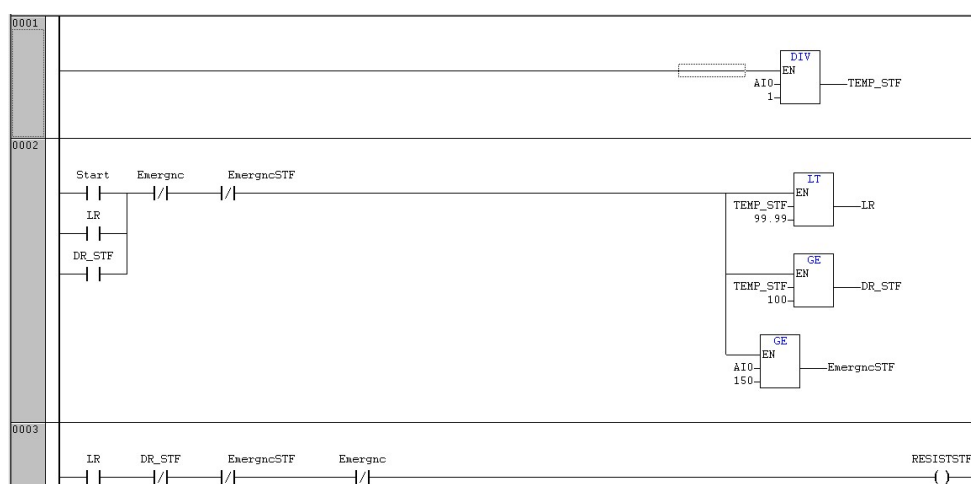


Figura 118 – Controle de temperatura da Estufa.

Fonte: Autor.

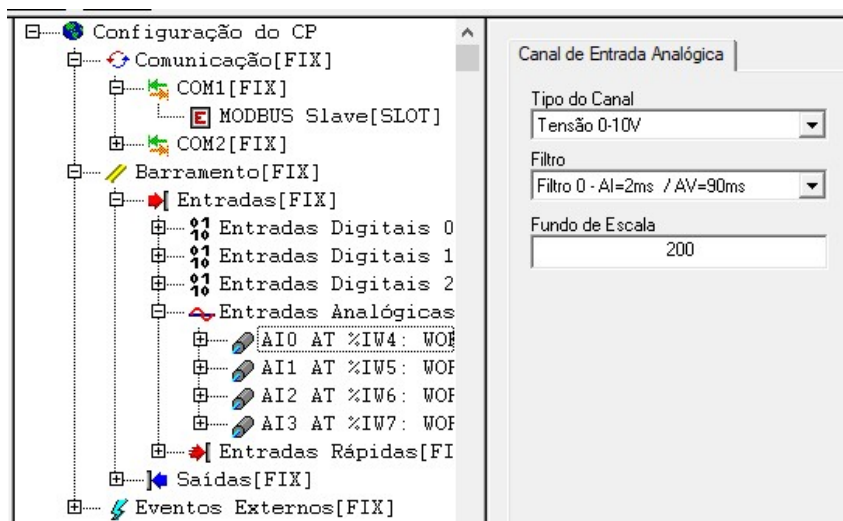


Figura 119 – Configuração da entrada analógica AI0.
Fonte: Autor.

3.3.5 POU TEMP_CENTR

A POU TEMP_CENTR é responsável pelo controle da temperatura da centrífuga. Sua lógica garante que a resistência seja acionada ou desligada conforme os limites definidos, mantendo o processo seguro e contínuo. Além disso, há proteção contra superaquecimento e integração com o botão de emergência.

Dessa forma, a POU TEMP_CENTR desempenha as seguintes funções principais:

- Controle da temperatura em TEMP_CNTR;
- Acionamento da resistência conforme limites de temperatura;
- Mensagem de emergência se a temperatura ultrapassar 150 graus;

Na Figura 120, observam-se as três redes da POU TEMP_CENTR. A rede 0001 acessa o valor da temperatura em AI1 (ver Figura 121) proveniente do sensor de temperatura e armazena o valor em TEMP_CNTR. A rede 0002 é habilitada quando Start está ativo e não há emergência acionada, garantindo que o teste de temperatura só ocorra durante o processo. Nessa rede, o valor de TEMP_CNTR é comparado com os limites definidos: se for inferior a 99,99 graus, a bobina LR é acionada para ligar a resistência e manter o aquecimento, se for maior ou igual a 100 graus, a bobina DR_CENTR é acionada para desligar a resistência, evitando superaquecimento e se ultrapassar 150 graus, a bobina EmergncCTR é acionada, indicando uma condição crítica e enviando uma mensagem de emergência ao supervisor. As bobinas LR e DR_CENTR também ativam esta rede, garantindo que a verificação da temperatura seja feita a todo momento após o Start. A rede 0003 controla a bobina RESISTCNT, que é ligada quando LR está ativo e desligada quando DR_CENTR,

EmergncCTR ou o botão de emergência **Emergnc** estão acionados, assegurando a proteção do processo.

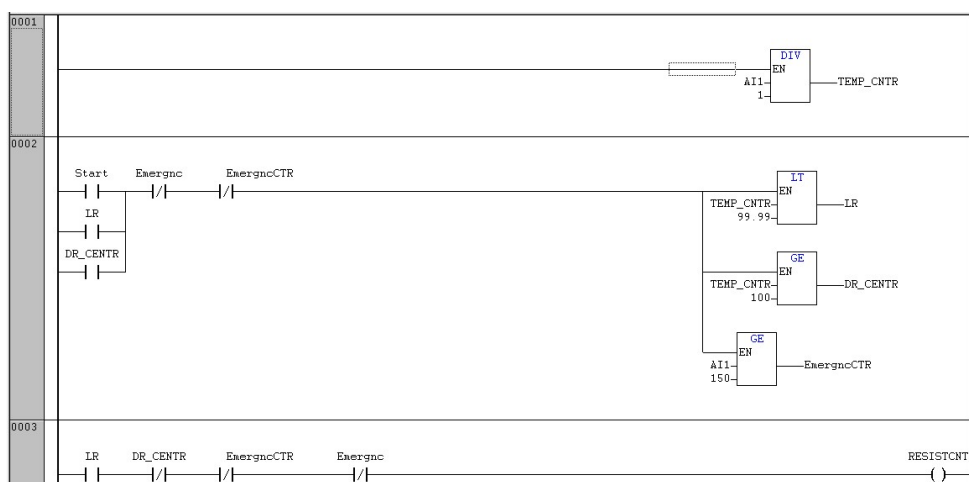


Figura 120 – Controle de temperatura da centrífuga.

Fonte: Autor.

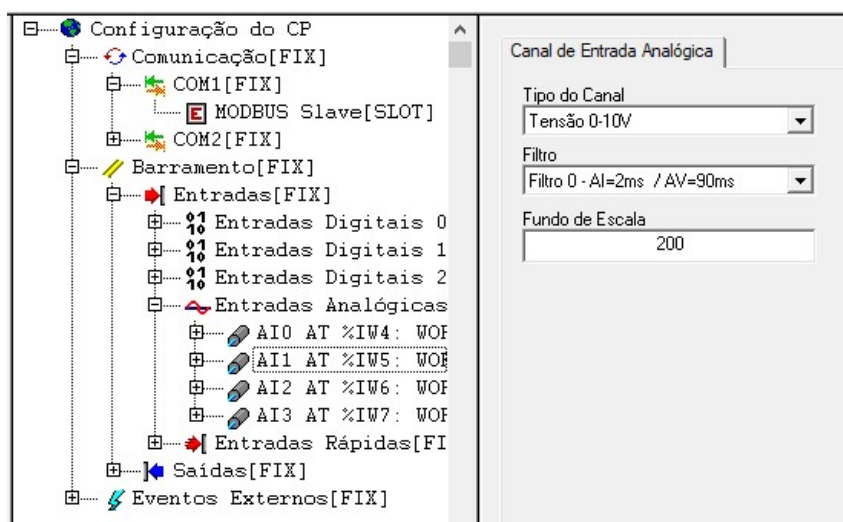


Figura 121 – Configuração da entrada analógica AI1

Fonte: Autor.

3.3.6 POU CAR_INT

A POU **CAR_INT** é responsável por levar o carrinho móvel interno para a posição correta, de acordo com o comprimento da peça que será revestida. Sua lógica garante que o carrinho seja posicionado com precisão, utilizando cálculos de deslocamento, temporizadores e o vetor de tempos configurado. Além disso, há integração com o botão de emergência e com o sensor de posição inicial.

As principais funções desempenhadas pela POU **CAR_INT** são:

- Posicionamento inicial do carrinho (S1_CAR_I);
- Cálculo do deslocamento conforme comprimento da peça;
- Uso do vetor **Tempos** para definir tempo adicional;
- Acionamento dos motores e freios nos sentidos horário e anti-horário;
- Liberação da próxima etapa com CIN_N_L.

Na Figura 122, observam-se as redes 0001 a 0003. A rede 0001 aciona o motor no sentido anti-horário (M_C_I_AH) para levar o carrinho à posição inicial, habilitada por **Start** se **Emergnc** e o sensor S1_CAR_I não estiverem acionados. A rede 0002 verifica o comprimento da peça: se for menor ou igual a 1000 mm, aciona **Aux**, se for maior que 1000 mm, aciona **Aux1** que calcula $Aux2 = \text{Comprimento} - 1000$ na rede 0004. A rede 0003 controla o motor no sentido horário (M_C_I_H) quando **Aux5** é acionado usando o temporizador D2C, garantindo o deslocamento correto do carrinho e resetando variáveis auxiliares: **Aux** e **Aux1**, após o movimento.

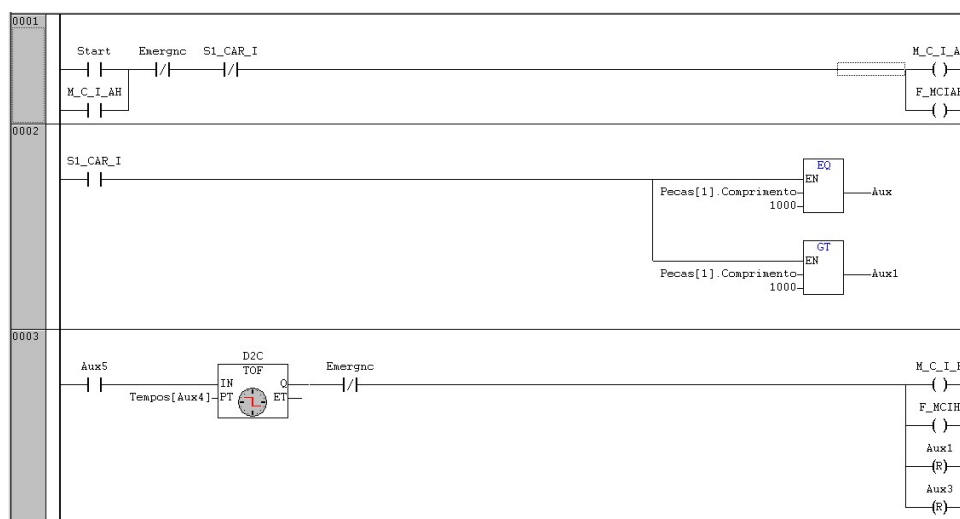


Figura 122 – Controle de motores da POU CAR_INT.

Fonte: Autor.

Na Figura 123, observam-se as redes 0004 e 0005. Essas redes realizam operações de subtração e divisão para calcular o tempo adicional de deslocamento. A rede 0004 subtrai 1000 do comprimento da peça e armazena o resultado em **Aux2**, verificando se o valor é maior ou menor que 100, se for maior ou igual a 100 aciona **Aux3** e se for menor que 100, aciona **Aux**. A rede 0005 divide **Aux2** por 100 e armazena o resultado em **Aux4**, acessando o vetor **Tempos** para definir o tempo que o temporizador D2C deverá contar.

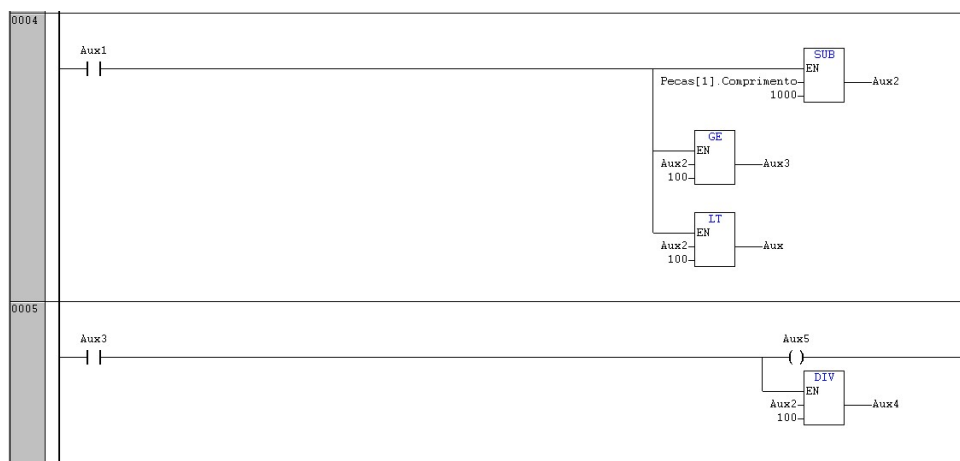


Figura 123 – Cálculo do tempo de ativação dos motores.

Fonte: Autor.

Na Figura 124, observam-se as redes 0006 e 0007. A rede 0006 utiliza **Aux6** para indicar o término da temporização, o acionando quando **D2C.ET** é igual ao valor contido no vetor **Tempos** e na posição dada por **Aux4**, enquanto a rede 0007 aciona a bobina **CIN_N_L** por **Aux** ou **Aux** dependendo do comprimento da peça, sinalizando que o carrinho chegou à posição correta. Nesse momento, **Aux** e **Aux6** são resetados, garantindo que as operações sejam realizadas apenas uma vez e liberando a próxima etapa do processo (abertura da centrífuga).

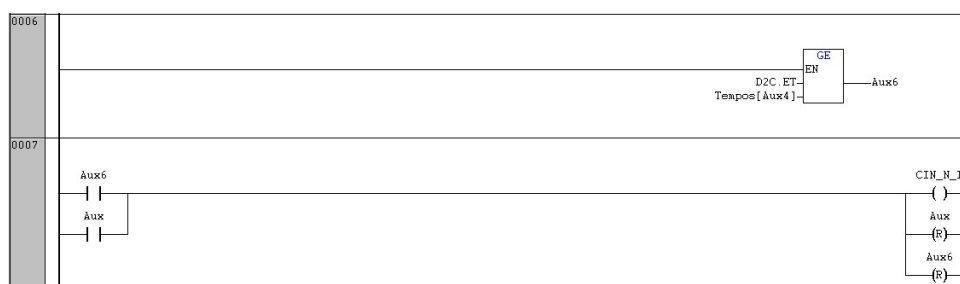


Figura 124 – Finalização do movimento do carrinho móvel interno.

Fonte: Autor.

3.3.7 POU POSICI

A POU **POSICI** é responsável por levantar o posicionador dentro da centrífuga até a altura correta, de acordo com o diâmetro nominal (DN) da peça e abaixar posteriormente. Sua lógica garante que o posicionador seja acionado apenas quando os valores de DN estiverem dentro das faixas válidas, utilizando sensores de posição para confirmar o movimento e resetar as variáveis auxiliares. Além disso, há integração com o botão de emergência e com a esteira 3 para permitir o abaixamento do posicionador.

As principais funções desempenhadas pela POU **POSICI** são:

- Testes de DN da peça para definir altura;
- Acionamento do motor hidráulico para levantar o posicionador;
- *Reset* automático das auxiliares quando sensores confirmam posição;
- Abaixa o posicionador quando a esteira 3 está liberada;
- Integração com o botão de emergência.

Na Figura 125, observam-se a rede inicial da POU POSICI. A rede 0001 realiza os testes de DN da peça: se o DN estiver entre 2 e 10, são acionadas as bobinas **Aux7** e **Aux8**, que juntas ativam **Aux9**, se o DN estiver entre 12 e 28, são acionadas **Aux4** e **Aux5**, que juntas ativam **Aux6**, e se o DN estiver entre 30 e 48, são acionadas **Aux** e **Aux1**, que juntas ativam **Aux3**. Cada uma dessas combinações é responsável por acionar o motor **M_L_POS** e liberar seu freio **F_M_LPOS**, levantando o posicionador até a altura correta, além de setar **Aux10**, mantendo o teste sendo feito até que o motor seja acionado.

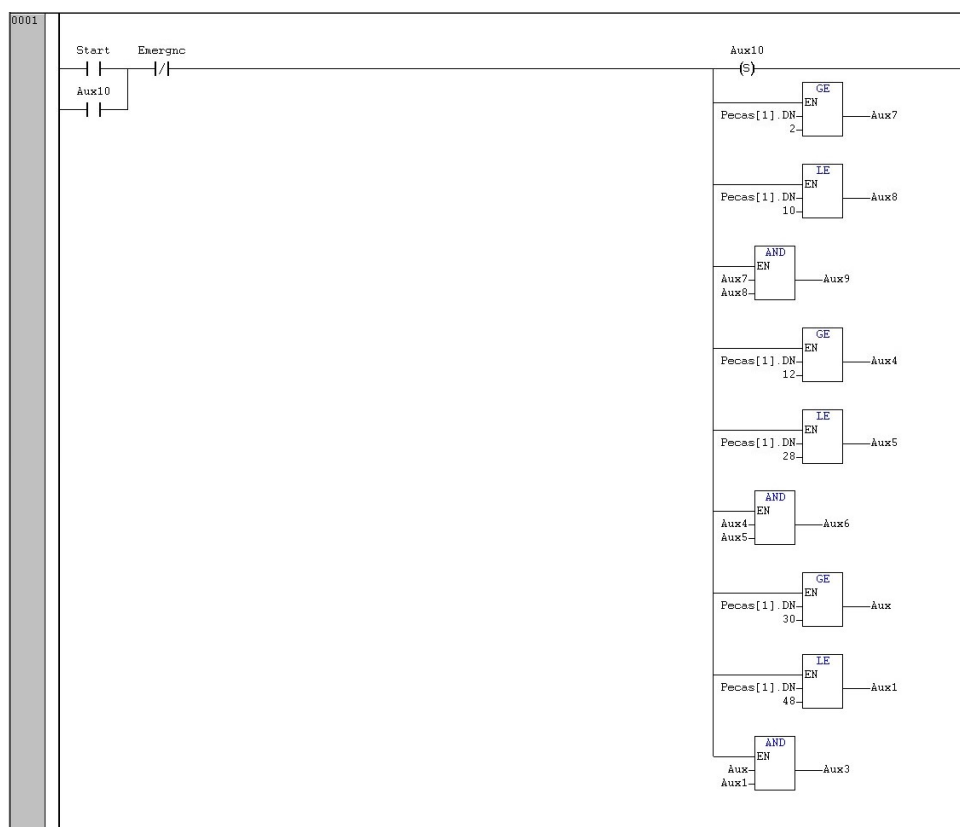


Figura 125 – Acionamento das bobinas conforme o DN na POU POSICI.
Fonte: Autor.

Na Figura 126, observam-se as redes 0002 e 0003. Essas redes controlam o acionamento do motor hidráulico **M_L_POS** e liberar seu freio, garantindo que o posicionador seja levantado apenas quando as bobinas auxiliares **Aux3**, **Aux6** ou **Aux9** forem ativadas.

Ao atingir a posição correta, os sensores (S1_LPOS, S2_LPOS ou S3_LPOS) interrompem o acionamento do motor (porém apenas em conjunto com as variáveis auxiliares correspondentes garantindo que o posicionador pare na angulação correta) e resetam todas as bobinas auxiliares, assegurando que o ciclo seja realizado apenas uma vez.

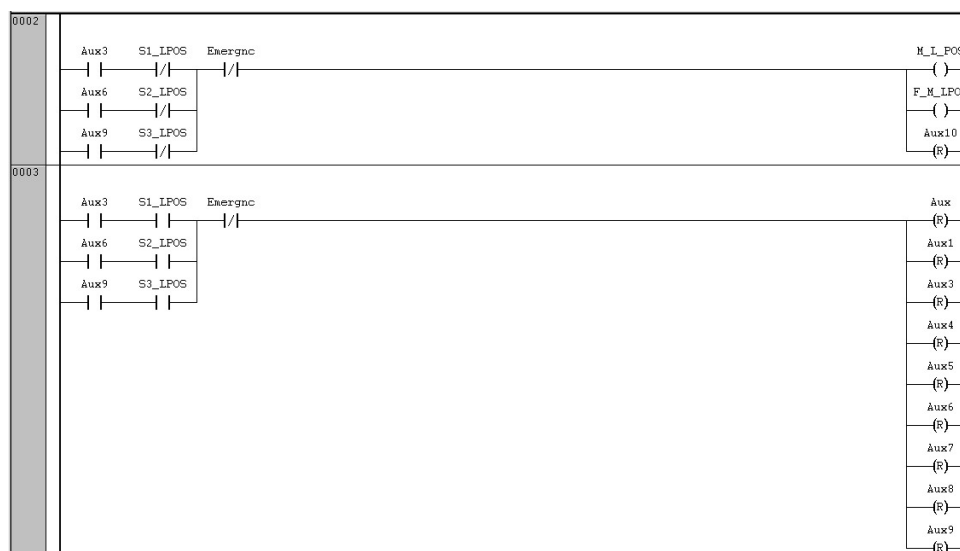


Figura 126 – Redes de acionamento e reset do motor.
Fonte: Autor.

Na Figura 127, observa-se a rede 0004. Essa rede é responsável por abaixar o posicionador quando a esteira 3 está abaixada (F_L_EST3 ativo). Nesse caso, são acionadas as bobinas M_A_POS e F_M_APOS, que retornam o posicionador para a posição inicial. O sensor POSP0 confirma que o posicionador está na posição zero, interrompendo o acionamento do motor e seu freio.

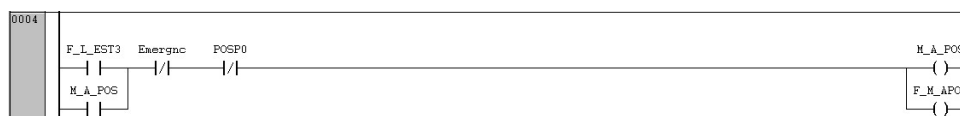


Figura 127 – Rede de abaixamento do posicionador.
Fonte: Autor.

3.3.8 POU L_A_ACIONAM

A POU L_A_ACIONAM é responsável por levantar e abaixar o acionamento conforme o diâmetro nominal (DN) da peça. Sua lógica garante que o acionamento seja posicionado corretamente, utilizando comparações de DN, sensores de posição e bobinas auxiliares. Além disso, há integração com o botão de emergência e com o carrinho do eixo para permitir o abaixamento seguro.

As principais funções desempenhadas pela POU L_A_ACIONAM são:

- Testes de DN da peça para definir altura;
- Acionamento do motor hidráulico para levantar o acionamento;
- *Reset* automático das auxiliares quando sensores confirmam posição;
- Abaixa o acionamento quando o carrinho do eixo está na posição inicial;
- Integração com o botão de emergência.

Na Figura 128, observa-se a rede 0001. Nela são realizados os testes de DN da peça: se o DN estiver entre 2 e 10, são acionadas **Aux** e **Aux1**, que juntas ativam **Aux3**, se o DN estiver entre 12 e 28, são acionadas **Aux4** e **Aux5**, que juntas ativam **Aux6**, e se o DN estiver entre 30 e 48, são acionadas **Aux7** e **Aux8**, que juntas ativam **Aux9**, além de setar **Aux10**, mantendo o teste sendo feito até que o motor seja acionado. Essas combinações definem qual faixa de DN está ativa e preparam o acionamento para ser levantado.

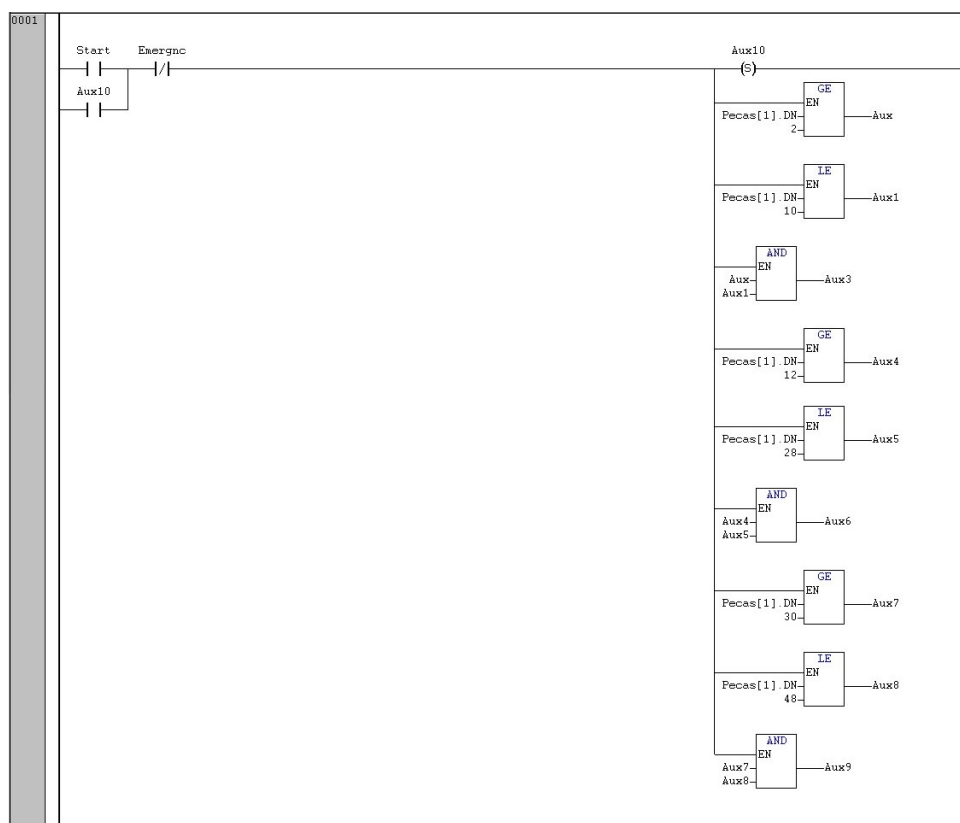


Figura 128 – Acionamento das bobinas conforme o DN na POU **L_A_ACIONAM**.
Fonte: Autor.

Na Figura 129, observam-se as redes 0002 e 0003. Essas redes controlam o acionamento do motor hidráulico **M_L_AC** e liberar seu freio, garantindo que o acionamento seja levantado apenas quando as bobinas auxiliares **Aux3**, **Aux6** ou **Aux9** forem ativadas. Ao acionar o motor, a bobina **VLAC** é setada, garantindo que o acionamento permaneça

no lugar até que a peça seja revestida e é resetada na POU **AC_REV**. Ao atingir a posição correta, os sensores (**S1_LAC**, **S2_LAC**, **S3_LAC**) interrompem o acionamento do motor (porém apenas em conjunto com as variáveis auxiliares correspondentes garantindo que o acionamento pare na altura correta) e resetam todas as bobinas auxiliares, assegurando que o ciclo seja realizado apenas uma vez.

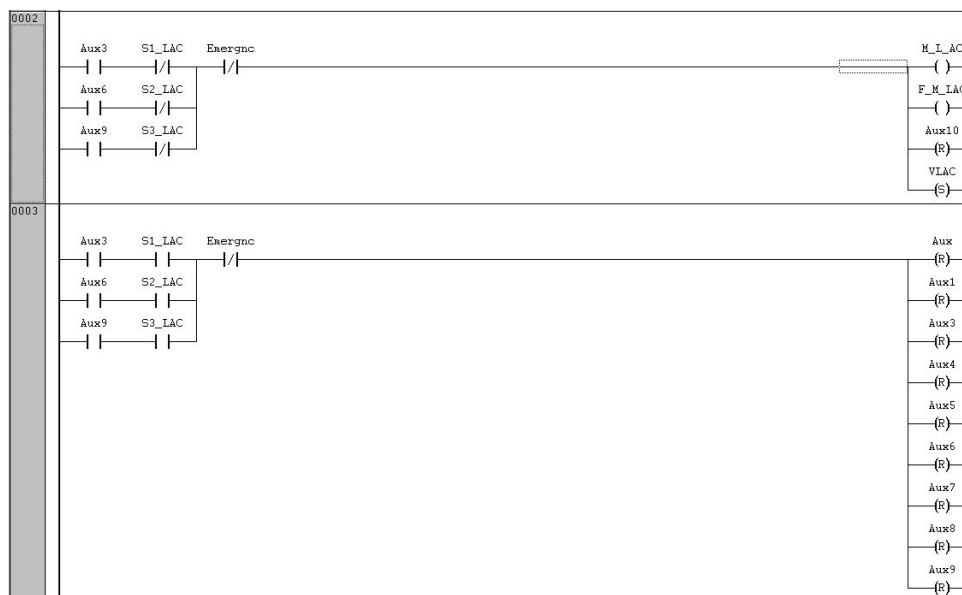


Figura 129 – Redes de acionamento e reset do motor.

Fonte: Autor.

Na Figura 130, observa-se a rede 0004. Essa rede é responsável por abaixar o acionamento quando o carrinho do eixo (conjunto do acionamento) está na posição inicial (**C_EIX_P0** ativo), o sensor **EIXOP0** confirma posição zero do eixo e **VLAC** indica que o acionamento já foi levantado. Nesse caso, são acionadas as bobinas **M_A_AC** e **F_M_AAC**, que retornam o acionamento para a posição inicial.

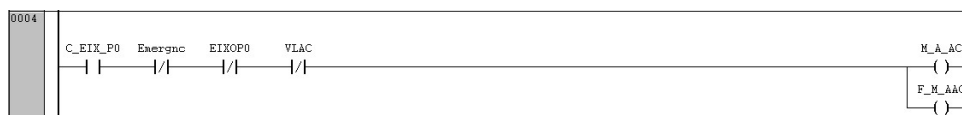


Figura 130 – Rede de abaixamento do acionamento.

Fonte: Autor.

3.3.9 POU ACESTEIRA1

A POU **ACESTEIRA1** é responsável por acionar e desligar a esteira 1, local onde as peças são posicionadas inicialmente. Sua lógica garante que a esteira seja ligada apenas quando houver peças válidas para o processo e desligada automaticamente quando a peça chega à esteira 2. Além disso, há integração com o botão de emergência e com a variável **VSTART**, que impede reinícios indevidos durante o ciclo.

As principais funções desempenhadas pela POU **ACESTEIRA1** são:

- Acionamento da esteira 1 quando **Start** é ativado;
- Desligamento automático quando a peça chega à esteira 2;
- Liberação do freio do motor junto com o acionamento;
- Integração com o botão de emergência;
- Uso de **VSTART** como trava lógica para evitar reinícios.

Na Figura 131, observam-se as duas redes da POU **ACESTEIRA1**. A rede 0001 aciona o motor da esteira 1 (**M_Est1**) e liberar seu freio (**F_M_Est1**) quando **Start** é ativado, desde que não haja emergência e que **FimEst1** ainda não tenha sido acionado. Nesse momento, também é setada a bobina **VSTART**, que funciona como trava lógica com a POU **TEST_START** para impedir que o operador reinicie o processo indevidamente. A rede 0002 utiliza o sensor **S_Est1** para detectar quando a peça chegou à esteira 2, se o motor da esteira 1 estiver ligado, a bobina **FimEst1** é acionada, desligando o motor, ativando seu freio e preparando a transição para a POU **ACESTEIRA2_3**.

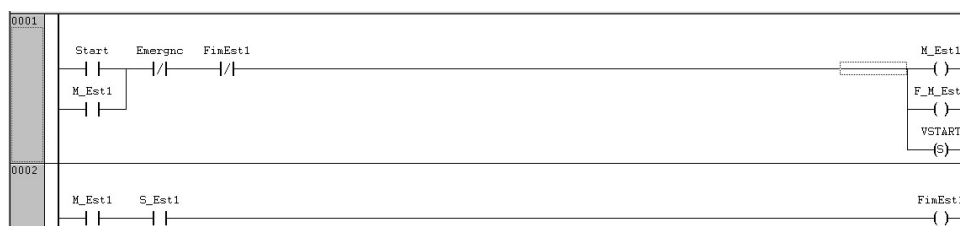


Figura 131 – Controle da esteira 1.

Fonte: Autor.

3.3.10 POU **ACESTEIRA2_3**

A POU **ACESTEIRA2_3** é responsável por acionar e desligar os motores das esteiras 2 e 3 após 15 segundos do término da esteira 1. Sua lógica garante que a peça seja transferida corretamente da esteira 2 para a esteira 3, utilizando temporização, contagem de flanges e integração com o botão de emergência.

As principais funções desempenhadas pela POU **ACESTEIRA2_3** são:

- Temporização de 15 segundos após o fim da esteira 1;
- Acionamento dos motores das esteiras 2 e 3;
- Contagem dos flanges da peça na esteira 3;

- Desligamento automático dos motores quando os dois flanges são detectados;
- Integração com o botão de emergência.

Na Figura 132, observam-se as quatro redes da POU ACESTEIRA2_3. A rede 0001 seta a bobina **AUX** quando **FinEst1** é acionado, indicando que a peça já saiu da esteira 1 e está na esteira 2. A rede 0002 reseta **AUX** quando **Emergnc** ou **FinEst2_3** são acionados, garantindo que em caso de emergência ou quando a peça já estiver corretamente posicionada na esteira 3, os motores sejam desligados. A rede 0003 utiliza o temporizador **T_Est2_3**, que aguarda 15 segundos após **AUX** ser setado para que a peça se estabilize na esteira 2 e ao término da contagem, aciona os motores **M_Est2_3** e libera seus freios com **F_M_Est23**. A rede 0004 conta os flanges da peça através do sensor **S_Est2_3** que alimenta o contador **C_FLG**, quando dois flanges são detectados, a bobina **FinEst2_3** é acionada, resetando **AUX**, desligando os motores e resetando o contador, preparando o sistema para o próximo ciclo e indicando que a peça está corretamente posicionada na esteira 3.

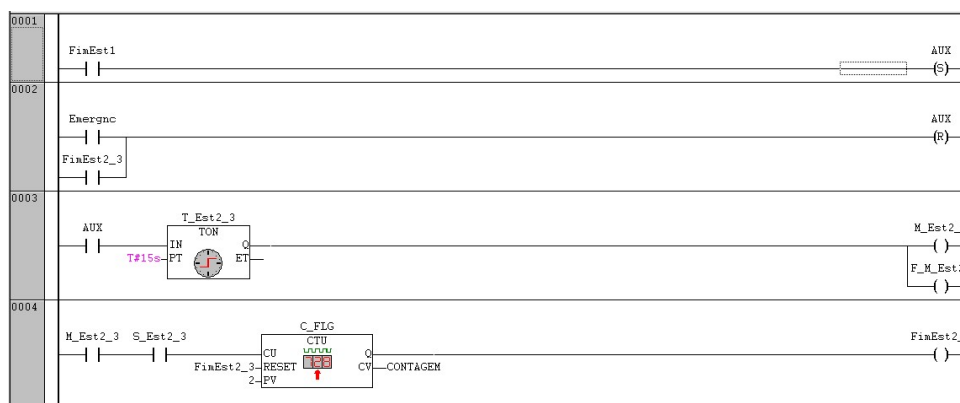


Figura 132 – Controle das esteiras 2 e 3.
Fonte: Autor.

3.3.11 POU AB_1_CENTR

A POU **AB_1_CENTR** é responsável por realizar a abertura e fechamento 1 da centrífuga, permitindo a entrada da peça para o revestimento. Sua lógica garante que os motores sejam acionados apenas quando todas as condições necessárias estiverem atendidas: temperatura correta, carrinho interno posicionado, acionamento hidráulico no lugar e posicionador ajustado. Além disso, há integração com o botão de emergência, temporização precisa e controle de fechamento condicionado ao acoplamento e à injeção.

As principais funções desempenhadas pela POU **AB_1_CENTR** são:

- Verificação de condições iniciais (temperatura, carrinho, acionamento e posicionador);
- Acionamento dos motores de abertura no sentido horário;

- Temporização de 66,74 segundos para manter a abertura;
- Acionamento dos motores de fechamento no sentido anti-horário;
- Liberação da próxima etapa com a bobina VCNTR.

Na Figura 133, observam-se as redes iniciais (0001 a 0004). Nelas, as bobinas auxiliares Aux, Aux1, Aux2 e Aux3 são setadas conforme as condições externas: temperatura da centrífuga (DR_CENTR), posição do carrinho interno móvel (CIN_N_L), acionamento hidráulico (S1_LAC, S2_LAC, S3_LAC) e posicionador (S1_LPOS, S2_LPOS, S3_LPOS). Essas variáveis são requisitos para o acionamento dos motores da abertura 1.



Figura 133 – Condições para abertura da centrífuga.

Fonte: Autor.

Na Figura 134, observam-se as redes 0005 e 0006. A rede 0005 aciona os motores M1_AB1CTH e M2_AB1CTH no sentido horário, junto com seus freios FM1AB1CTH e FM2AB1CTH, quando todas as condições estão atendidas e a centrífuga está fechada. Nesse momento, as auxiliares são resetadas para evitar reacionamento indevido. Além disso, os mesmos motores também podem ser acionados pela bobina FAQCT, em um segundo momento, indicando que a peça já foi aquecida e que a centrífuga deve ser aberta novamente para verificação da temperatura e adição do poliuretano. A rede 0006 utiliza o temporizador T_AB1H, que mantém os motores ligados por 66,74 segundos, ao término da contagem, a bobina TM12A1CTH é acionada, desligando os motores e ativando seus freios.

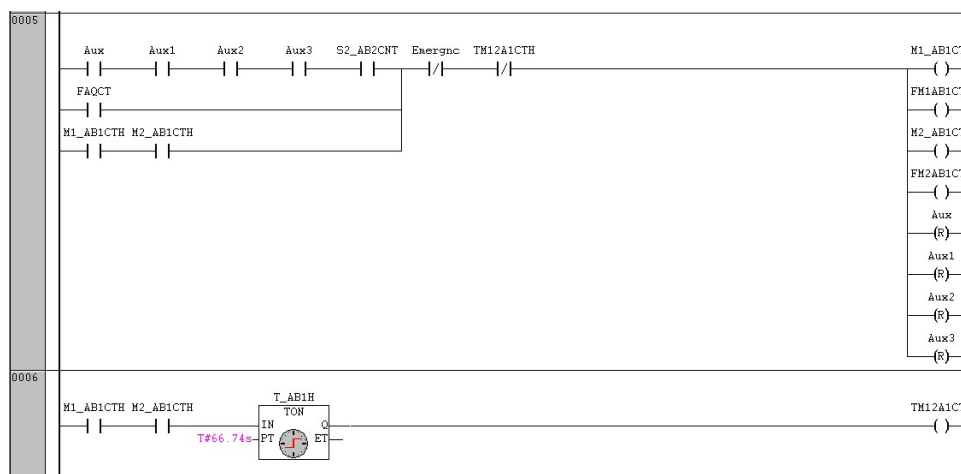


Figura 134 – Abertura da centrífuga temporizada.

Fonte: Autor.

Na Figura 135, observa-se a rede 0007. Nela, os motores M1AB1CTAH e M2AB1CTAH são acionados no sentido anti-horário por FLAC se for a primeira abertura, para verificação do acoplamento ou por FLAINJ se for a segunda abertura, para verificação da temperatura e adição do PU, junto com seus freios FM1AB1CAH e FM2AB1CAH. O fechamento é confirmado pelo sensor F_FAB1CTR, que interrompe o acionamento dos motores e libera a bobina VCNTR, sinalizando que a abertura 1 foi concluída e permitindo a próxima etapa do processo (aquecimento ou revestimento da peça).

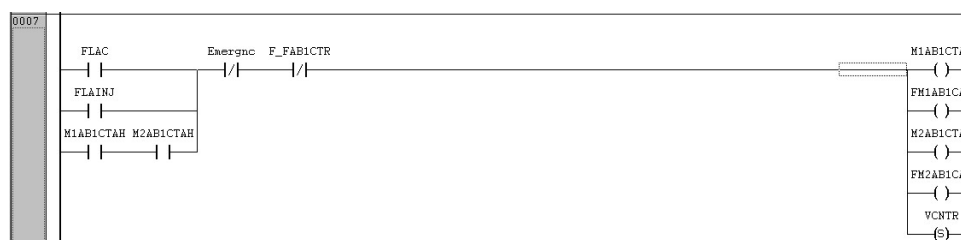


Figura 135 – Fechamento da abertura 1 da centrífuga.

Fonte: Autor.

3.3.12 POU L_ESTEIRA3

A POU L_ESTEIRA3 é responsável por levantar e abaixar a esteira 3, garantindo que a peça seja posicionada corretamente dentro da centrífuga. Sua lógica utiliza sinais provenientes da abertura 1 da centrífuga e da posição da peça na esteira 3, além de sensores que confirmam o movimento. Há integração com o botão de emergência e com o posicionador, assegurando que o ciclo seja realizado de forma segura e ordenada.

Dessa forma, a POU L_ESTEIRA3 desempenha as seguintes funções principais:

- Levantamento da esteira 3 condicionado por TM12A1CTH e FimEst2_3;

- *Reset* automático das auxiliares após o acionamento;
- Abaixa a esteira 3 quando o sensor confirma posição levantada;
- Integração com o eixo e com o posicionador após abaixamento;
- Controle de freios sincronizado com os motores.

Na Figura 136, observam-se todas as redes da POU **L_ESTEIRA3**. A rede 0001 seta a bobina **Aux** quando **TM12A1CTH** é acionada, indicando que a abertura 1 da centrífuga foi concluída. A rede 0002 seta a bobina **Aux1** quando **FimEst2_3** é acionada, confirmando que a peça está corretamente posicionada na esteira 3. A rede 0003 aciona o motor hidráulico **L_EST3** e libera seu freio **F_LEST3** quando **Aux** e **Aux1** estão ativos simultaneamente, levantando a esteira 3 e resetando as auxiliares, assim que **S1_EST3** é acionado este motor e seu freio são desligados. A rede 0004 aciona o motor **A_EST3** e libera seu freio **F_AEST3** quando o sensor **S1_EST3** indica que a esteira está totalmente levantada, permitindo o abaixamento. Por fim, a rede 0005 confirma o abaixamento através do sensor **S2_EST3**, nesse momento, a bobina **F_L_EST3** é acionada, desativando **A_EST3**, acionando o motor do eixo (**M_C_EIXAH**) e retornando o posicionador para a posição inicial na POU **POSICI**.

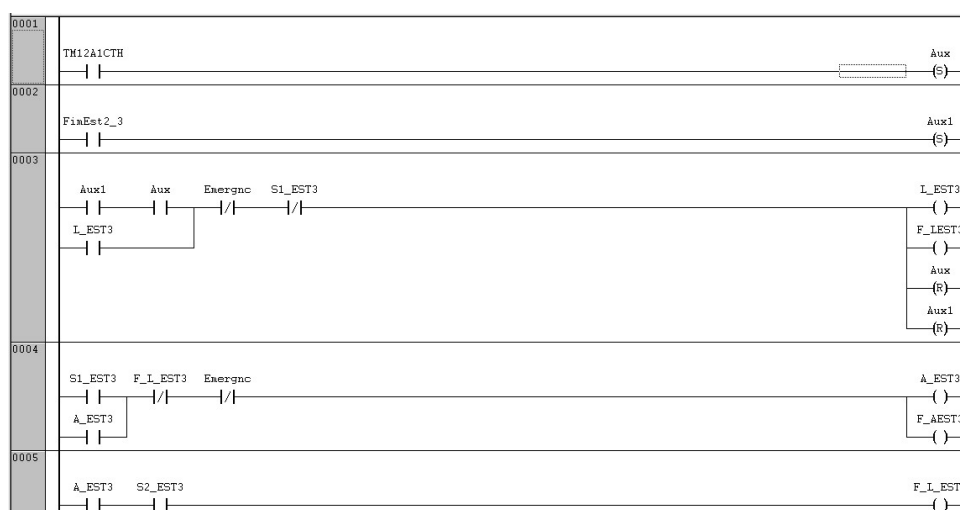


Figura 136 – Controle do basculamento da esteira 3.

Fonte: Autor.

3.3.13 POU CAR_EIXO

A POU **CAR_EIXO** é responsável por movimentar o carrinho do eixo (ou conjunto do acionamento), efetuando o acoplamento do acionador com a peça. Sua lógica garante que o carrinho se aproxime da peça, detecte o acoplamento através do sensor de mola, acione o motor de rotação para confirmar o acoplamento, e depois retorne à posição inicial quando o revestimento estiver concluído. Há integração com o botão de emergência, temporização de segurança e resets consistentes para evitar reacionamentos indevidos.

Dessa forma, a POU **CAR_EIX0** desempenha as seguintes funções principais:

- Aproximação do carrinho;
- Detecção do acoplamento pelo sensor **S_EIX**;
- Acionamento do motor de rotação **M_REV_10** e verificação com variáveis auxiliares;
- Temporização de 1 minuto para segurança;
- Retorno do carrinho à posição inicial após o revestimento.

Na Figura 137, observam-se as redes 0001 a 0004. A rede 0001 aciona o motor no sentido anti-horário **M_C_EIXAH** quando **F_L_EST3** é setado indicando que a esteira já abaixou, aproximando o carrinho da peça, e desliga quando o sensor **S_EIX** detecta contato. A rede 0002 aciona o motor de rotação **M_REV_10** se **S_EIX** estiver ativo e o tempo **T** ainda não tiver expirado, movendo o valor 1 para a variável **Aux** para indicar que a peça está na centrífuga e em contato com o acionamento. A rede 0003 aciona **Aux2** quando o fim de curso não está pressionado. A rede 0004 combina **Aux1** e **Aux2** para acionar **F_CEIX**, desde que **VCEIX** não esteja setado, confirmando que o acoplamento foi bem sucedido, ou seja, o fim de curso detectou a compressão da mola, e quando o motor girou, fez com que o acoplamento acontecesse, descomprimindo a mola.

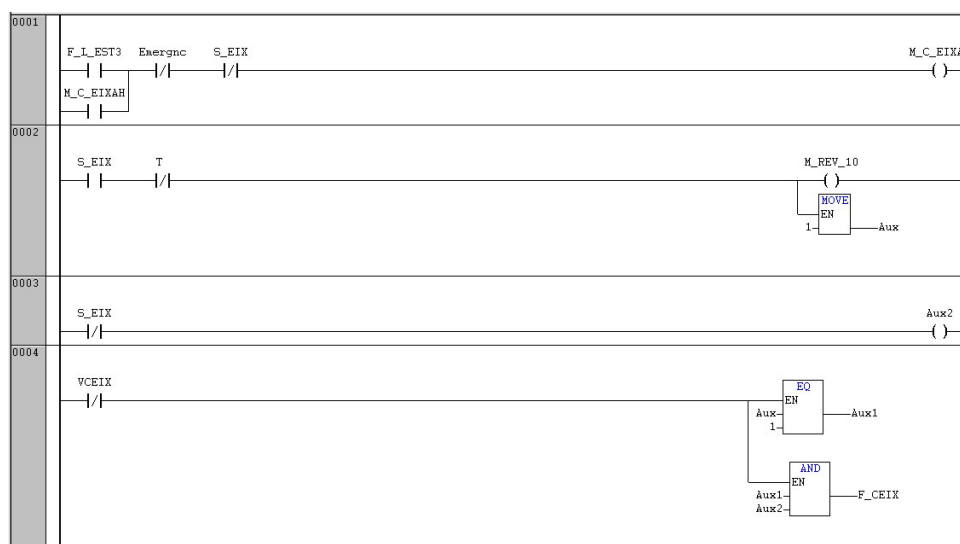


Figura 137 – Controle de aproximação para acoplamento.

Fonte: Autor.

Na Figura 138, observam-se as redes 0005 a 0007. A rede 0005 seta **VCEIX** quando **F_CEIX** é acionado, impedindo reacionamento. A rede 0006 utiliza o temporizador **T_M10**, que conta 1 minuto após **S_EIX** ser acionado, se o tempo expira sem acoplamento, a bobina **T** é setada, bloqueando **M_REV_10** e forçando a ativação de **M_L_INJE** na POU

LEV_INJE. A rede 0007 aciona o motor no sentido horário M_C_EIXH quando FimCntr é setado indicando o fim do revestimento da peça, retornando o carrinho para a posição inicial, nesse momento, Aux recebe o valor 0 e VCEIX é resetado, com o retorno confirmado pelo sensor C_EIX_P0.

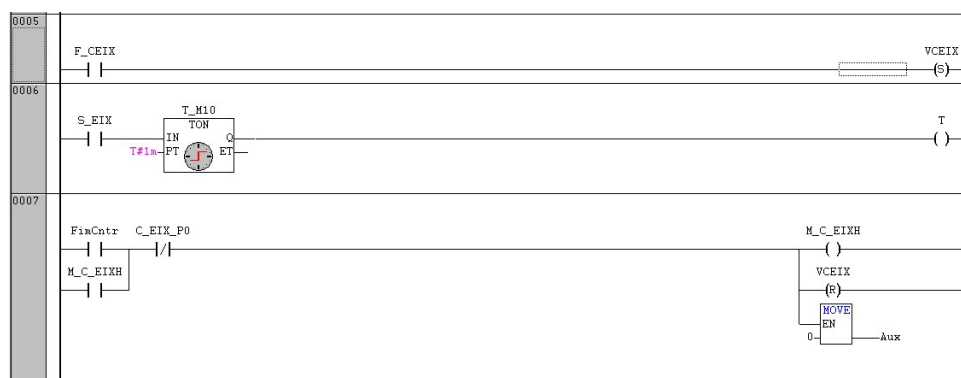


Figura 138 – Medidas de segurança e retorno do conjunto do acionamento.
Fonte: Autor.

3.3.14 POU LEV_INJE

A POU LEV_INJE é responsável por levantar apenas um lado da centrífuga para permitir a verificação do acoplamento e a injeção de poliuretano líquido dentro da peça a ser revestida. Sua lógica garante que o levantamento ocorra em condições seguras, que o operador receba mensagens de verificação de acoplamento e temperatura, e que o abaixamento seja realizado após confirmação. Além disso, integra-se ao fechamento da abertura 1 da centrífuga, acionando as bobinas FLAC ou FLAINJ conforme o estado da variável VL1.

Dessa forma, a POU LEV_INJE desempenha as seguintes funções principais:

- Levantamento da centrífuga por M_L_INJE, acionado por F_CEIX, T ou FAQCT;
- Envio de mensagens ao operador (AC e INJ) dependendo da condição de VL1;
- Abaixamento da centrífuga por M_A_INJE, acionado por AC_OK ou TPINJ_OK;
- Integração com o fechamento da abertura 1 da centrífuga através de FLAC e FLAINJ.

Na Figura 139, observam-se as redes 0001 a 0004. A rede 0001 aciona o motor hidráulico M_L_INJE e libera seu freio F_M_LINJ quando F_CEIX(indicando que o acoplamento ocorreu corretamente), T(indicando que o acoplamento não ocorreu) ou FAQCT(indicando o fim do aquecimento da peça) estão ativos, levantando um lado da centrífuga, além de ressetar F_CEIX. O sensor S1_L_INJ desativa o motor e seu freio. A rede 0002 ativa a bobina AC se S1_L_INJ estiver acionado e VL1 não estiver setado, enviando mensagem para

verificar o acoplamento. A rede 0003 ativa a bobina INJ se S1_L_INJ estiver acionado e VL1 já estiver setado, enviando mensagem para verificar a temperatura e adicionar poliuretano. A rede 0004 aciona o motor M_A_INJE e libera seu freio F_M_AINJ quando o operador confirma acoplamento (AC_OK) ou temperatura (TPINJ_OK), abaixando a centrífuga.

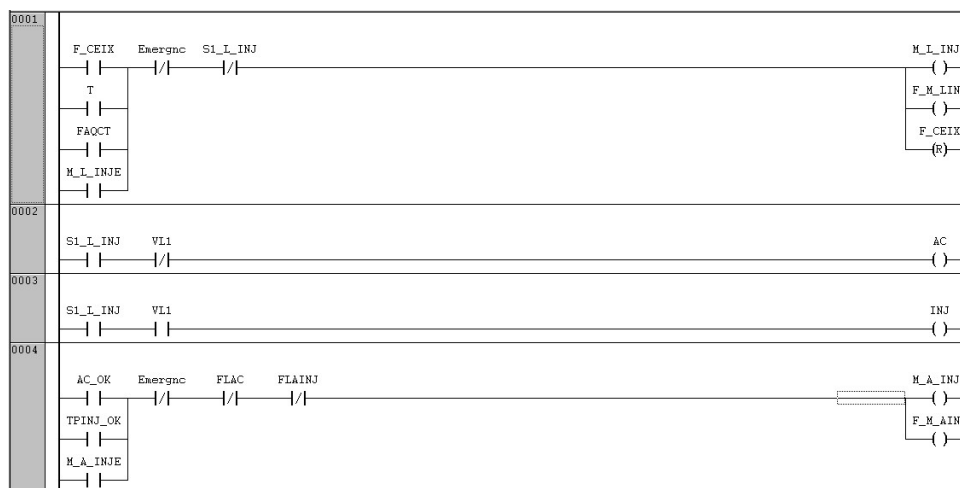


Figura 139 – Inclinação da centrífuga.

Fonte: Autor.

Na Figura 140, observam-se as redes 0005 e 0006. Na rede 0005, quando M_A_INJE está acionado e o sensor S2_L_INJ confirma que a centrífuga voltou à posição inicial, a bobina FLAC é ativada se VL1 não estiver setado. Essa condição representa o cenário em que o operador apenas verificou o acoplamento, sem ainda ter realizado a injeção de poliuretano. Ao ser acionada, FLAC desativa M_A_INJE e seu freio, além de iniciar o fechamento da abertura 1 da centrífuga na POU AB_1_CENTR. Já na rede 0006, também com M_A_INJE ativo e S2_L_INJ acionado, a bobina FLAINJ é ativada se VL1 estiver setado. Essa condição representa o cenário em que o operador já verificou a temperatura da peça e adicionou o poliuretano líquido. Assim como em FLAC, a bobina FLAINJ desativa M_A_INJE e seu freio, mas indica que o processo de injeção foi concluído, iniciando também o fechamento da abertura 1 da centrífuga na POU AB_1_CENTR.

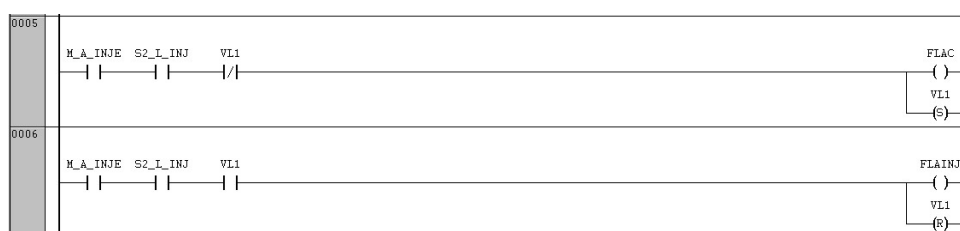


Figura 140 – Nivelamento da centrífuga e continuação do processo.

Fonte: Autor.

3.3.15 POU AC_REV

A POU AC_REV é responsável por ligar e desligar o motor que gira a peça, garantindo que o poliuretano seja aderido uniformemente às paredes internas. Sua lógica utiliza duas etapas temporizadas: primeiro o aquecimento da peça e depois o revestimento completo. Além disso, há integração com o botão de emergência e com outras POUs, assegurando que o processo seja realizado de forma segura e sequencial.

Dessa forma, a POU AC_REV desempenha as seguintes funções principais:

- Acionamento do motor de rotação M_AC_REV condicionado por VCNTR e F_FAB1CTR;
- Temporização de aquecimento (T1_M) com acionamento de FAQCT e set de VAC1;
- Temporização de revestimento (T_M) com acionamento de FimCntr e *reset* de variáveis globais;
- Integração com etapas seguintes (abertura da estufa, abertura 2 da centrífuga e retorno do carrinho do eixo).

Na Figura 141, observam-se as três redes da POU AC_REV. Na rede 0001, o motor M_AC_REV é acionado quando VCNTR está setado e o sensor F_FAB1CTR confirma o fechamento da abertura 1 da centrífuga, desde que não haja emergência e que as bobinas FimCntr e FAQCT não estejam ativas, em paralelo, há o *reset* de VCNTR quando M_AC_REV é acionado, garantindo que o sinal não se mantenha indefinidamente. Na rede 0002, com M_AC_REV ativo e VAC1 ainda não setado, o temporizador T1_M é acionado, contando o tempo de aquecimento da peça (25 minutos) e, ao final, acionando a bobina FAQCT para indicar à POU ACESTEIRA1 que a peça já está aquecida e a centrífuga pode se abrir para que o operador verifique a temperatura e adicione o PU além de setar VAC1, impedindo que o aquecimento seja repetido até que o revestimento seja concluído. Já na rede 0003, com M_AC_REV ativo e VAC1 já setado, o temporizador T_M é acionado, contando o tempo de revestimento da peça (1 hora) e, ao final, acionando a bobina FimCntr para indicar que o processo terminou, nesse momento, M_AC_REV é desativado, as bobinas VLAC e VAC1 são resetadas e o sistema libera a sequência para abertura da estufa, abertura 2 da centrífuga e retorno do carrinho do eixo à posição inicial.

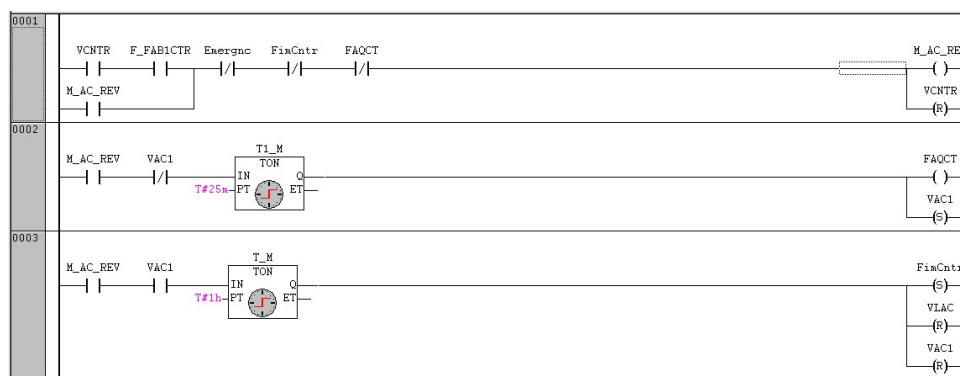


Figura 141 – Controle do motor de revestimento.

Fonte: Autor.

3.3.16 POU AB_1_ESTF

A POU AB_1_ESTF é responsável por realizar a abertura e fechamento da porta 1 da estufa, permitindo que a peça entre para o processo de cura. Sua lógica garante que os motores sejam acionados apenas quando o revestimento já estiver concluído e a temperatura da estufa for adequada, além de assegurar que não haja reacionamento indevido e que o ciclo seja finalizado corretamente.

Dessa forma, a POU AB_1_ESTF desempenha as seguintes funções principais:

- Abertura da porta 1 da estufa por M1AB1STAH e M2AB1STAH, condicionada por FimCntr e DR_STF;
- Travamento da lógica por VAB1STF após abertura confirmada;
- Fechamento da porta 1 por M1AB1STH e M2AB1STH, condicionado por S2_AB1Stf;
- *Reset* de variáveis globais durante o fechamento;
- Confirmação final do fechamento pela bobina F_FAB1Stf.

Na Figura 142, observam-se as redes 0001 e 0002. Na rede 0001, os motores M1AB1STAH e M2AB1STAH são acionados no sentido anti-horário para abrir a porta 1 da estufa, desde que FimCntr esteja ativo (indicando que a peça já foi revestida), DR_STF confirme que a temperatura da estufa é superior a 100 °C, não haja emergência e a bobina F_AB1Stf ainda não tenha sido acionada, ao mesmo tempo, os freios F_M1_STF e F_M2_STF são liberados. Já na rede 0002, quando os motores de abertura estão ativos e o sensor S1_AB1Stf detecta que a porta está aberta, a bobina F_AB1Stf é acionada para informar a abertura à POU AB_2_CENTR e VAB1STF é setado, garantindo que os motores não sejam acionados novamente até a próxima peça.

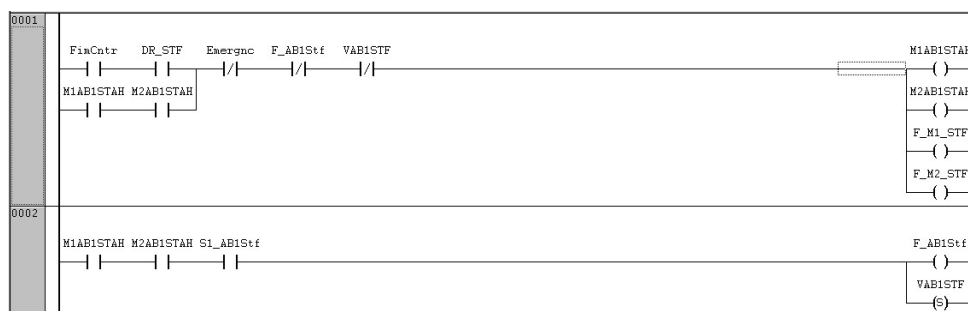


Figura 142 – Abertura da porta 1 da estufa.

Fonte: Autor.

Na Figura 143, observam-se as redes 0003 e 0004. Na rede 0003, os motores M1AB1STH e M2AB1STH são acionados no sentido horário para fechar a porta 1 da estufa, desde que o sensor S2_AB1Stf confirme que a peça já está dentro da estufa, não haja emergência e a bobina F_FAB1Stf ainda não tenha sido acionada, ao mesmo tempo, os freios F_M1_STF e F_M2_STF são liberados, e ocorre o *reset* de FimCntr e VAB1STF, preparando o sistema para o próximo ciclo. Já na rede 0004, quando os motores de fechamento estão ativos e o sensor S3_AB1Stf detecta que a porta já está fechada, a bobina F_FAB1Stf é acionada, confirmando o fim da abertura 1 da estufa e liberando a sequência para a próxima etapa do processo.

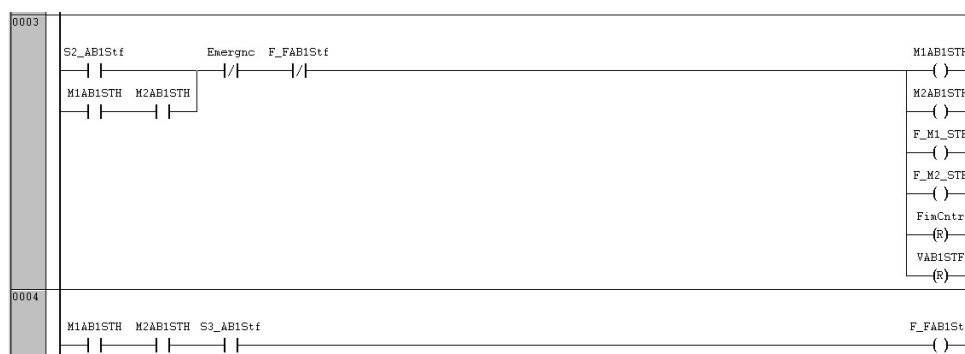


Figura 143 – Fechamento da porta 1 da estufa.

Fonte: Autor.

3.3.17 POU AB_2_CENTR

A POU AB_2_CENTR é responsável por realizar a abertura e fechamento 2 da centrífuga, permitindo que a peça caia dentro da estufa para o processo de cura. Sua lógica garante que o acionamento hidráulico seja realizado apenas quando o revestimento já estiver concluído, o eixo e o carrinho do eixo estiverem na posição inicial e a porta 1 da estufa estiver aberta, assegurando que o ciclo ocorra de forma segura e ordenada.

Dessa forma, a POU AB_2_CENTR desempenha as seguintes funções principais:

- Abertura da centrífuga por M_LAB2CNT, condicionada por FimCntr, EIXOP0, C_EIX_PO e F_AB1Stf;
- Fechamento da centrífuga por M_AAB2CNT, iniciado após a abertura completa (S1_AB2CNT) e concluído quando S2_AB2CNT confirma o fechamento;
- Liberação dos freios FMLAB2CNT e FMAAB2CNT sincronizada com os motores;
- Integração com a POU AB_1_CENTR para continuidade do processo.

Na Figura 144, observam-se as redes 0001 e 0002. Na rede 0001, o motor hidráulico M_LAB2CNT é acionado para levantar um dos lados da centrífuga e realizar a abertura 2, desde que a peça já esteja revestida (FimCntr), o eixo e o carrinho do eixo estejam na posição inicial (EIXOP0 e C_EIX_PO), a porta 1 da estufa esteja aberta (F_AB1Stf) e não haja emergência, ao mesmo tempo, o freio FMLAB2CNT é liberado. Quando o sensor S1_AB2CNT indica que a abertura chegou ao limite, M_LAB2CNT é desativado e inicia-se o fechamento pela rede seguinte. Já na rede 0002, o motor M_AAB2CNT é acionado para abaixar o lado levantado da centrífuga, realizando o fechamento 2, o freio FMAAB2CNT é liberado junto com o motor e quando o sensor S2_AB2CNT confirma que a abertura foi fechada, M_AAB2CNT é desativado.

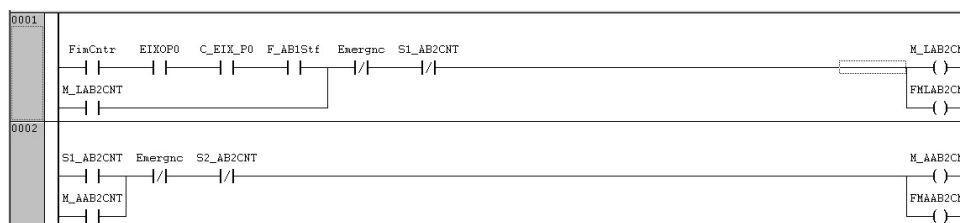


Figura 144 – Abertura e fechamento 2 da centrífuga.

Fonte: Autor.

3.3.18 POU FIM_INIC_PECA

A POU FIM_INIC_PECA é responsável por reorganizar a matriz *Pecas*, colocando o valor 0 na última posição e deslocando cada valor para a posição anterior, removendo a peça já revestida do sistema e reiniciando o processo com novos dados. Além disso, controla o início automático de uma nova peça, permitindo que o operador interrompa ou retome o ciclo por meio dos botões **Stop** e **Play**.

Dessa forma, a POU FIM_INIC_PECA desempenha as seguintes funções principais:

- Controle de início automático por **Stop** e **Play**, acionando STP e PLY;
- Temporização de 5 segundos por T1 antes de iniciar a reorganização;

- Reorganização da matriz **Pecas** através da sequência de auxiliares **Aux1** até **Aux20**;
- Verificação de existência de peças e decremento da variável **QTD_PECAS**;
- Reinício do processo por **Aux1Start** quando ainda há peças disponíveis.

Na Figura 145, observam-se as redes 0001 a 0004. Na rede 0001, o botão **Stop** seta **AuxStop** e aciona **STP**, interrompendo o início automático de uma nova peça e enviando uma mensagem ao supervisor. Na rede 0002, o botão **Play** reseta **AuxStop** e aciona **PLY**, retomando o processo e enviando outra mensagem ao supervisor. Já na rede 0003, o sensor **S2_AB1Stf** seta **Aux21** se **AuxStop** não estiver ativo, indicando que a peça entrou na estufa, e **Aux21** inicia o temporizador **T1** para que a peça possa passar completamente em frente ao sensor, e após 5 segundos seta **Aux1**, além de resetar **Aux21**, dando início à reorganização da matriz.

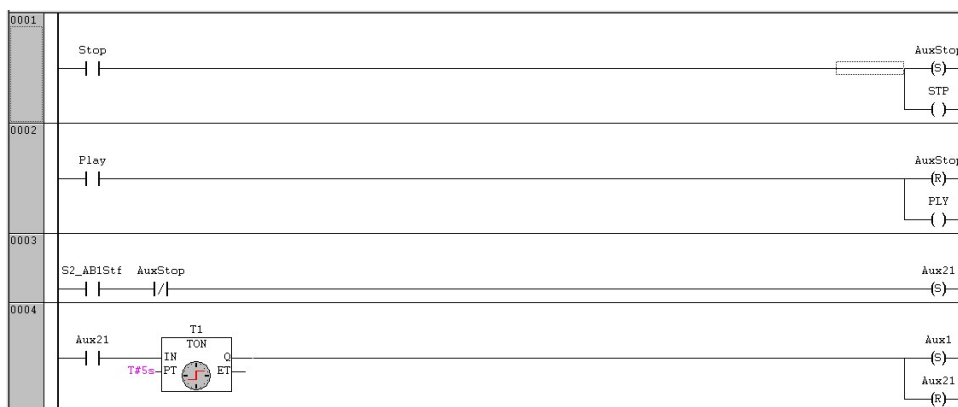


Figura 145 – Controle de início automático.
Fonte: Autor.

Na Figura 146, observam-se as redes 0005 a 0020. Nessa sequência ocorre o deslocamento dos valores da matriz **Pecas**, controlado por auxiliares (**Aux6** até **Aux20**), que garantem que cada operação seja validada por comparações (**EQ**) antes de avançar para a próxima etapa, movendo os valores de cada posição para a posição anterior até que a última receba o valor 0 contido em **Aux**.

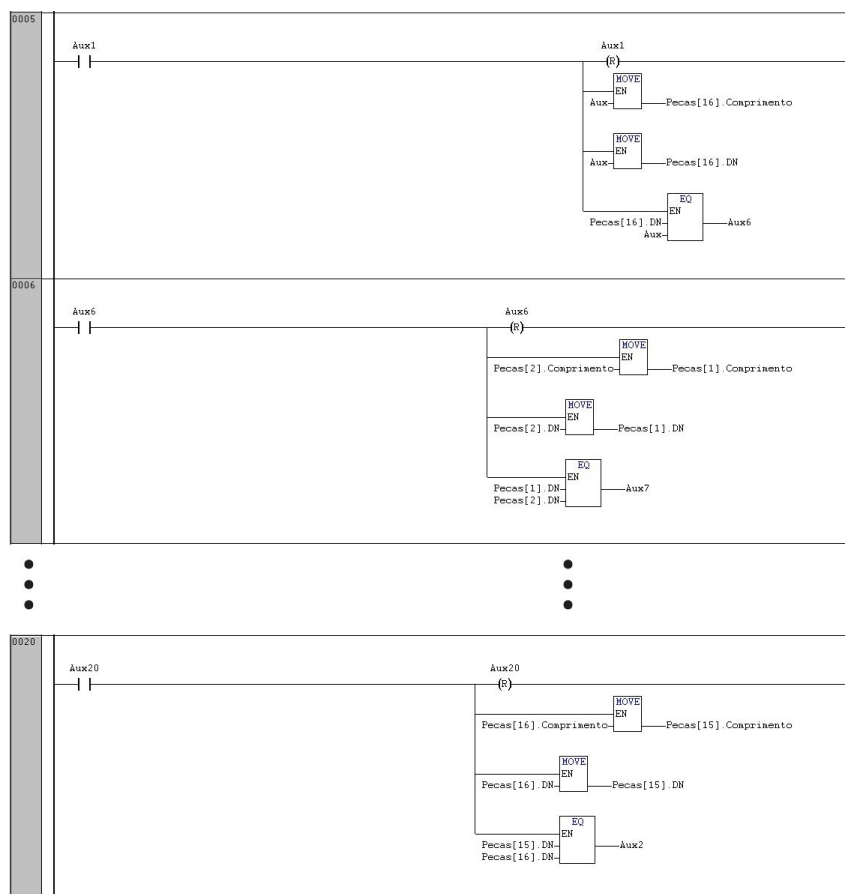


Figura 146 – Reorganização da matriz Pecas.

Fonte: Autor.

Na Figura 147, observam-se as redes 0021 e 0022. A rede 0021 verifica se ainda existem peças no sistema: se o comprimento e o DN da primeira posição forem maiores que zero, as bobinas Aux3 e Aux4 são acionadas e, juntas, ativam Aux5. Já na rede 0022, Aux5 aciona Aux1Start, reiniciando o processo de revestimento enviando um sinal à POU TEST_START, reseta Aux2, Aux3 e Aux4, subtrai 1 da variável QTD_PECAS e se reseta, garantindo que a operação seja realizada apenas uma vez.

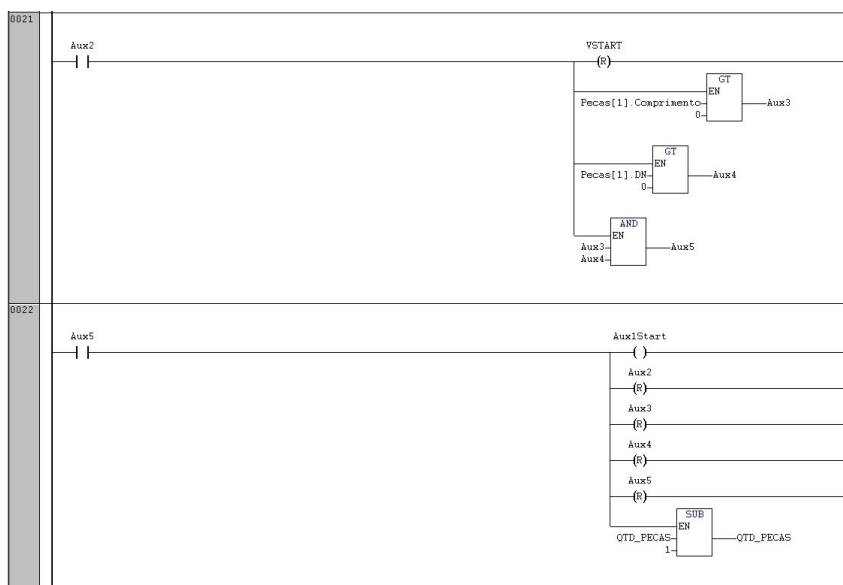


Figura 147 – Verificação e reinício do processo.

Fonte: Autor.

3.3.19 POU AB_2_ESTF

A POU AB_2_ESTF é responsável por realizar a abertura e fechamento 2 da estufa, controlando o tempo de cura das peças, a movimentação dos motores e a atualização da quantidade de peças dentro da estufa. Além disso, reorganiza o vetor **Tempos**, garantindo que cada peça tenha seu tempo de permanência corretamente registrado e que o ciclo seja concluído de forma segura.

Dessa forma, a POU AB_2_ESTF desempenha as seguintes funções principais:

- Controle da entrada de peças na estufa e atualização da quantidade em QTD_PC_STF;
- Temporização da cura da primeira peça (T_STF1) e das demais (T_STF2);
- Abertura e fechamento da porta 2 da estufa por motores anti-horário e horário;
- Reorganização do vetor **Tempos** para manter os tempos de cura atualizados;
- *Reset* de auxiliares e confirmação final por sensores.

Na Figura 148, observam-se as redes 0001 a 0003. Na rede 0001, o acionamento de F_FAB1Stf na POU AB_1_ESTF adiciona 1 em QTD_PC_STF, indicando que uma nova peça entrou na estufa, se o valor for maior que 1, a bobina AUX3 é acionada, e se for maior que 0, a bobina AUX4 é acionada. Na rede 0002, quando AUX4 está ativa, o temporizador T_INF inicia a contagem do tempo desde que a primeira peça entrou na estufa, funcionando como referência para calcular os tempos das demais peças. Na rede 0003, quando AUX3 é

acionada, o valor acumulado em **T_INF** é somado a 16 horas (tempo fixo da primeira peça) e gravado na posição correspondente do vetor **Tempos**, garantindo que cada peça tenha seu tempo de cura individual corretamente registrado.

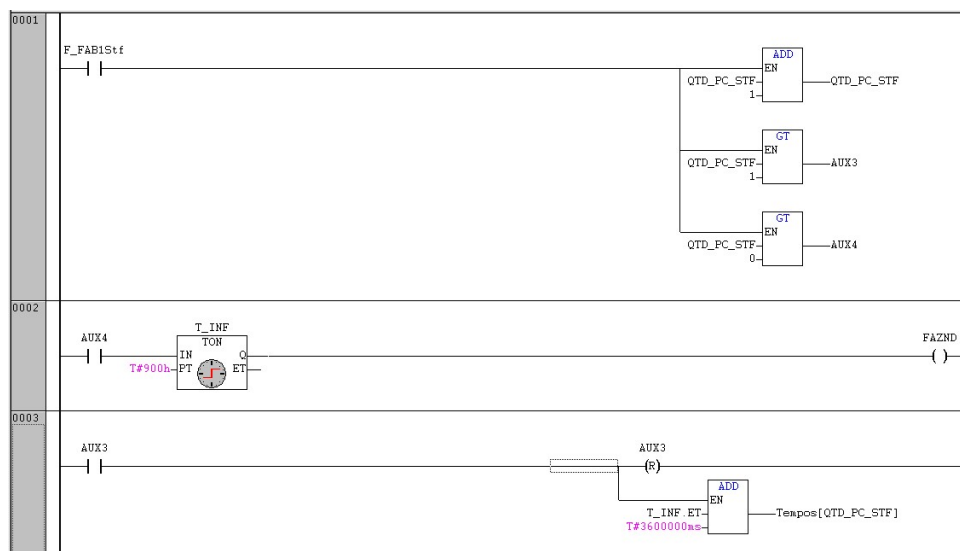


Figura 148 – Controle de peças na estufa e atualização de tempo de cura.

Fonte: Autor.

Na Figura 149, observam-se as redes 0004 a 0006. Na rede 0004, o temporizador **T_STF1** é acionado quando há peças na estufa (**AUX** ativo) e conta o tempo da primeira peça, armazenado em **Tempos[1]**, ao fim, aciona **AC1_SAIDA**, que abre a porta 2 da estufa, e seta **AUX1**, impedindo que **T_STF1** seja reativado e permitindo que **T_STF2** seja acionado para a próxima peça. Na rede 0005, o temporizador **T_STF2** é acionado quando **AUX**, **AUX1** e **VAB2STF** estão ativos, controlando o tempo das demais peças, ao fim, aciona **AC2_SAIDA**, que abre a porta 2 para liberar outra peça, reseta **AUX** e **VAB2STF**, garantindo que o ciclo só prossiga se houver peças na estufa. Na rede 0006, há uma verificação de **QTD_PC_STF**, acionando **AUX** apenas se o valor for maior que zero, assegurando que os temporizadores só funcionem quando realmente houver peças na estufa.

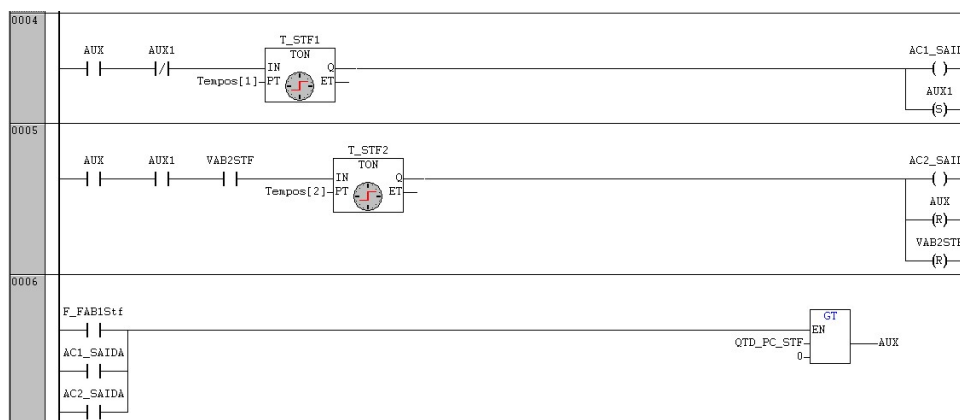


Figura 149 – Controle de tempos de cura.

Fonte: Autor.

Na Figura 150, observam-se as redes 0007 a 0009. Na rede 0007, quando AC1_SAIDA ou AC2_SAIDA são acionados, os motores M1AB2STAH, M2AB2STAH, M3AB2STAH e seus freios são liberados, girando no sentido anti-horário para abrir a porta 2 da estufa, liberando a peça mais antiga, o sensor S3_AB2Stf garante que os motores sejam desligados quando a porta estiver totalmente aberta, e a bobina AUX19 é acionada para permitir a detecção da saída da peça. Na rede 0008, ocorre a subtração de 1 em QTD_PC_STF, atualizando a quantidade de peças na estufa sempre que uma peça sai. Já na rede 0009, quando AC2_SAIDA é acionada, o valor T#0ms é movido para Tempos[16], e em seguida uma comparação verifica se Tempos[16] é igual a T#0ms, se a condição for verdadeira, a bobina AUX5 é acionada, iniciando a sequência de reorganização do vetor de tempos.

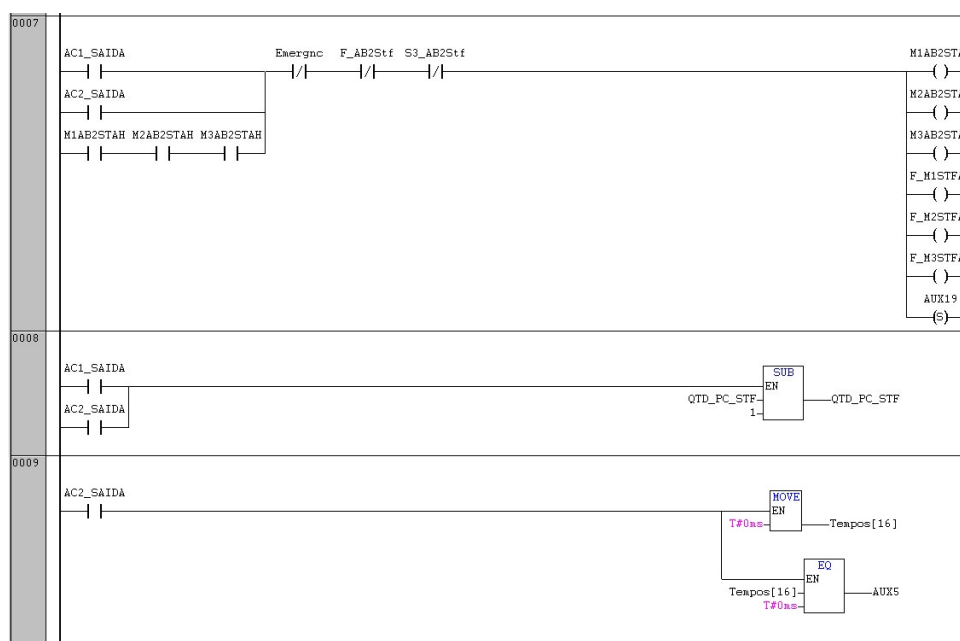


Figura 150 – Abertura da porta 2 da estufa.

Fonte: Autor.

Na Figura 151, observam-se as redes 0010 a 0023. Cada rede é responsável por reorganizar o vetor **Tempos**, movendo os valores de cada posição para a anterior e garantindo que os tempos de cura sejam atualizados corretamente após a saída de uma peça. Na rede 0010, AUX5 move o valor de **Tempos**[3] para **Tempos**[2] e valida a operação com uma comparação de igualdade. Na rede 0011, AUX6 move **Tempos**[4] para **Tempos**[3] e confirma a operação e assim por diante, até concluir a reorganização do vetor e preparando o sistema para o próximo ciclo.

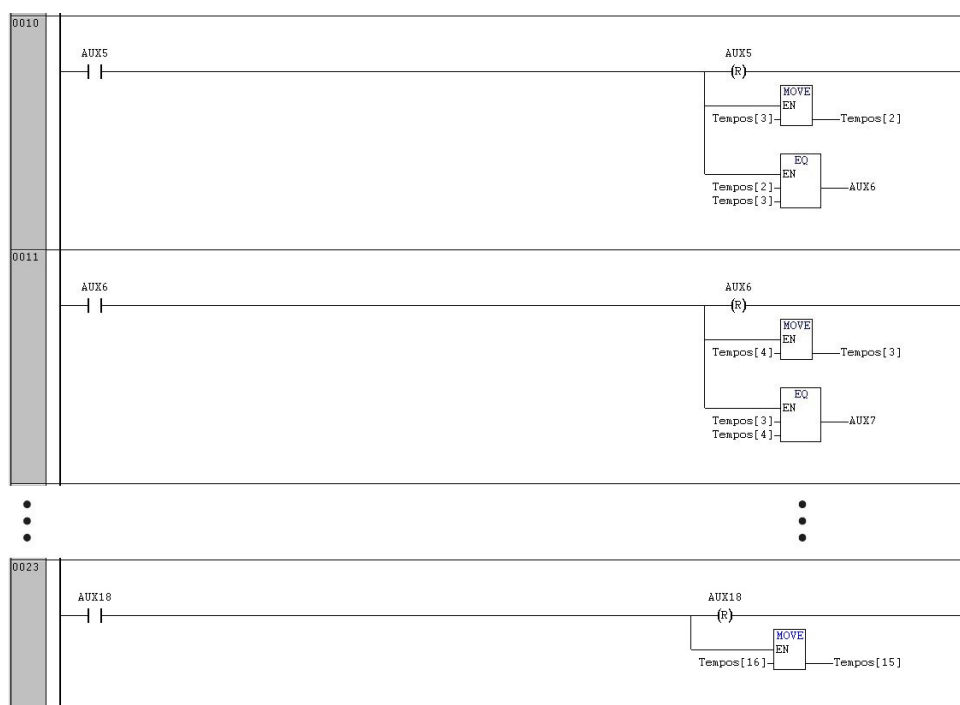


Figura 151 – Reorganização do vetor **Tempos**.

Fonte: Autor.

Na Figura 152, observam-se as redes 0024 a 0028. Na rede 0024, quando **AUX19** é acionado o sensor **S1_AB2Stf** confirma a saída da peça e aciona **F_AB2Stf**, desligando os motores de abertura e acionando os motores **M1AB2STH**, **M2AB2STH** e **M3AB2STH** no sentido horário para fechar a porta 2 da estufa. Na rede 0025, os motores de fechamento são acionados em conjunto com seus freios. Já na rede 0026, o fechamento é validado pelo acionamento simultâneo dos motores e do sensor **S2_AB2Stf**, acionando **F_FAB2Stf** e desligando os motores, além de setar **VAB2STF** como confirmação de que a porta 2 foi fechada pelo menos uma vez desde o **Start** do processo. Na rede 0027, ocorre a verificação de **QTD_PC_STF**, e se o valor for igual a zero, a bobina **AUX2** é acionada. Finalmente, na rede 0028, **AUX2** reseta **AUX1**, garantindo que os temporizadores não sejam reativados sem peças na estufa.

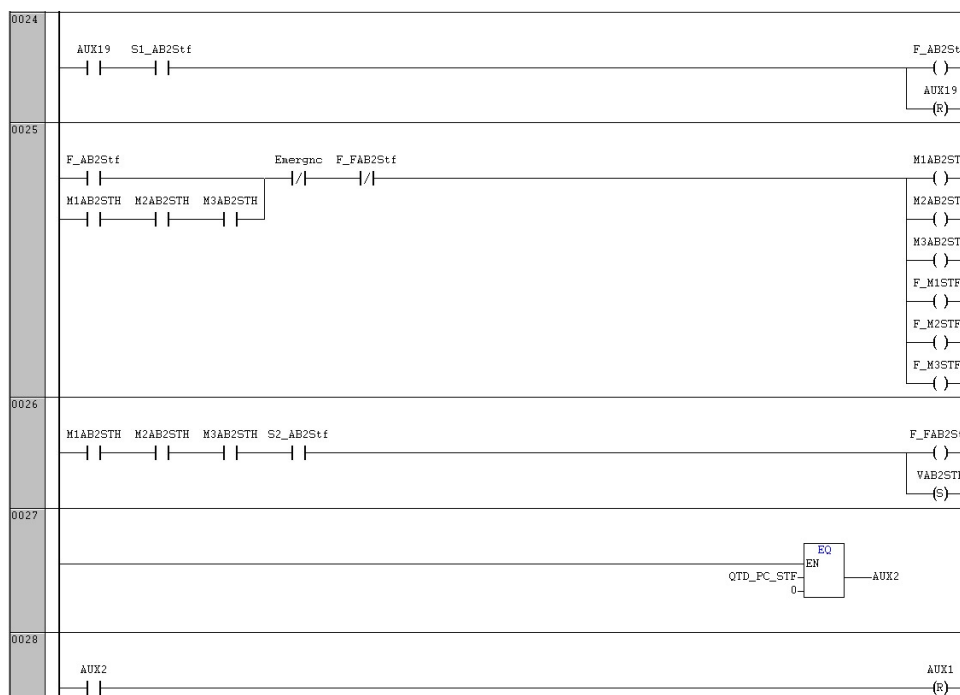


Figura 152 – Fechamento da porta 2 da estufa.

Fonte: Autor.

3.3.20 POU ALARMES

A POU ALARMES é responsável por exibir mensagens de alarme no supervisório, informando o operador sobre condições críticas, instruções de processo, validações de cadastro e status de operação. As mensagens são enviadas por meio da variável TXT, que recebe valores inteiros definidos pelas variáveis TXT1 a TXT14, cada uma representando um tipo específico de alerta ou informação seguindo a seguinte relação:

- TXT1 envia o número 1: mensagem do botão de emergência;
- TXT2 envia o número 2: temperatura da centrífuga acima do limite;
- TXT3 envia o número 3: temperatura da estufa acima do limite;
- TXT4 envia o número 4: acoplamento deve ser verificado;
- TXT5 envia o número 5: mensagem vazia (limpa o campo de mensagem);
- TXT6 envia o número 6: não existem peças cadastradas;
- TXT7 envia o número 7: temperatura da peça deve ser verificada e PU deve ser inserido;
- TXT8 envia o número 8: comprimento inválido ao cadastrar peça;
- TXT9 envia o número 9: DN inválido ao cadastrar peça;

- TXT10 envia o número 10: valores cadastrados são válidos;
- TXT11 envia o número 11: nenhum dos valores cadastrados é válido (DN e comprimento inválidos);
- TXT12 envia o número 12: uma peça entrou no processo;
- TXT13 envia o número 13: início automático de peça cadastrada foi interrompido;
- TXT14 envia o número 14: início automático de peça cadastrada foi reiniciado.

Contudo a POU contempla:

- Exibição de mensagens de emergência, falhas e validações;
- Controle da variável TXT, que recebe os códigos de mensagem;
- Indicação de status geral por meio da variável **Alerta**.

Na Figura 153, observam-se as redes 0001 a 0005. Na rede 0001, quando o botão de emergência **Emergnc** é acionado, o valor **TXT1** é movido para **TXT**, exibindo a mensagem correspondente. Na rede 0002, se **EmergncCTR** estiver ativo, indicando temperatura da centrífuga acima do limite, o valor **TXT2** é enviado ao supervisor. Na rede 0003, quando **EmergncSTF** é acionado, indicando temperatura da estufa acima do limite, o valor **TXT3** é exibido. Na rede 0004, se **INJ** estiver ativo, é enviada a mensagem **TXT4**, indicando que a temperatura da peça deve ser verificada e o poliuretano injetado. Por fim, na rede 0005, quando **ADPC** é acionado, o valor **TXT6** é movido para **TXT**, informando que não existem peças cadastradas.



Figura 153 – Mensagens de emergência e ausência de peças.

Fonte: Autor.

Na Figura 154, observam-se as redes 0006 a 0010. Na rede 0006, quando AC_OK e TPINJ_OK são acionados juntos, o valor TXT5 é movido para TXT, limpando a tela de mensagens. Na rede 0007, se AC estiver ativo, é exibida a mensagem TXT7, indicando que o acoplamento deve ser verificado. Na rede 0008, quando CMPI é acionado, o valor TXT8 é enviado, informando que o comprimento cadastrado é inválido. Na rede 0009, se DNI estiver ativo, a mensagem TXT9 é exibida, indicando que o DN cadastrado é inválido. Finalmente, na rede 0010, quando VLRSOK é acionado, o valor TXT10 é movido para TXT, confirmando que os valores cadastrados são válidos.



Figura 154 – Mensagens de validação e verificação.

Fonte: Autor.

Na Figura 155, observam-se as redes 0011 a 0014. Na rede 0011, quando VLRSI é acionado, o valor TXT11 é movido para TXT, indicando que tanto o DN quanto o comprimento cadastrados são inválidos. Na rede 0012, se STOK estiver ativo, a mensagem TXT12 é exibida, informando que uma peça entrou no processo. Na rede 0013, quando STP é acionado, o valor TXT13 é enviado, indicando que o início automático de uma peça já cadastrada foi interrompido. Por fim, na rede 0014, se PLY estiver ativo, a mensagem TXT14 é exibida, informando que o início automático foi retomado.



Figura 155 – [Mensagens de processo e controle automático.
Fonte: Autor.

3.4 Supervisório

O supervisório é responsável por realizar a interface entre o operador e o sistema de controle programado no CLP. Ele permite a visualização de mensagens, o acionamento de comandos e o acompanhamento em tempo real dos processos automatizados. Para isso, é necessário estabelecer uma comunicação eficiente entre o *software* de programação do CLP (MasterTool) e o ambiente de supervisão (E3 Studio).

3.4.1 Comunicação entre MasterTool e E3 Studio

A comunicação entre o MasterTool e o E3 Studio foi realizada por meio do protocolo Modbus RTU¹, utilizando a porta serial COM1. O CLP foi configurado como escravo Modbus, com endereço 1, permitindo que o E3 Studio atuasse como mestre na leitura e escrita das variáveis. O mapeamento das variáveis internas do programa Ladder para os endereços Modbus foi realizado de forma estruturada, associando variáveis a registradores compatíveis com o protocolo, de modo a garantir consistência entre o controle e a supervisão. Esse procedimento seguiu as diretrizes estabelecidas na documentação técnica do fabricante do CLP, disponibilizada pela *Altus Sistemas de Automação*, na qual são descritos os critérios para associação de variáveis a registradores Modbus do tipo *Holding Registers* e *Coils*. Os manuais de comunicação e utilização dos CLPs da fabricante *Altus*, bem como outros documentos técnicos relevantes, podem ser obtidos no site oficial do fabricante, na seção de suporte e downloads técnicos, por meio do endereço <https://www.altus.com.br/suporte/downloads/>. A utilização dessas documentações assegura que as configurações adotadas estejam em conformidade com as especificações do protocolo Modbus RTU,

¹ O protocolo Modbus foi originalmente desenvolvido pela empresa Modicon (atualmente Schneider Electric) e é atualmente mantido e padronizado pela Modbus Organization.

garantindo uma comunicação estável, confiável e compatível para a correta leitura e escrita das variáveis pelo sistema supervisor.

A porta COM1 foi configurada com os seguintes parâmetros:

- **Velocidade (baud rate):** 115200
- **Paridade:** Sem paridade
- **Bits de parada:** 1 stop bit
- **Sinais de modem:** Sem RTS/CTS
- **Delay:** 5 ms

Essas configurações, que podem ser observadas na Figura 156, garantem uma comunicação estável e confiável entre o CLP e o supervisor, respeitando os requisitos do protocolo Modbus RTU².

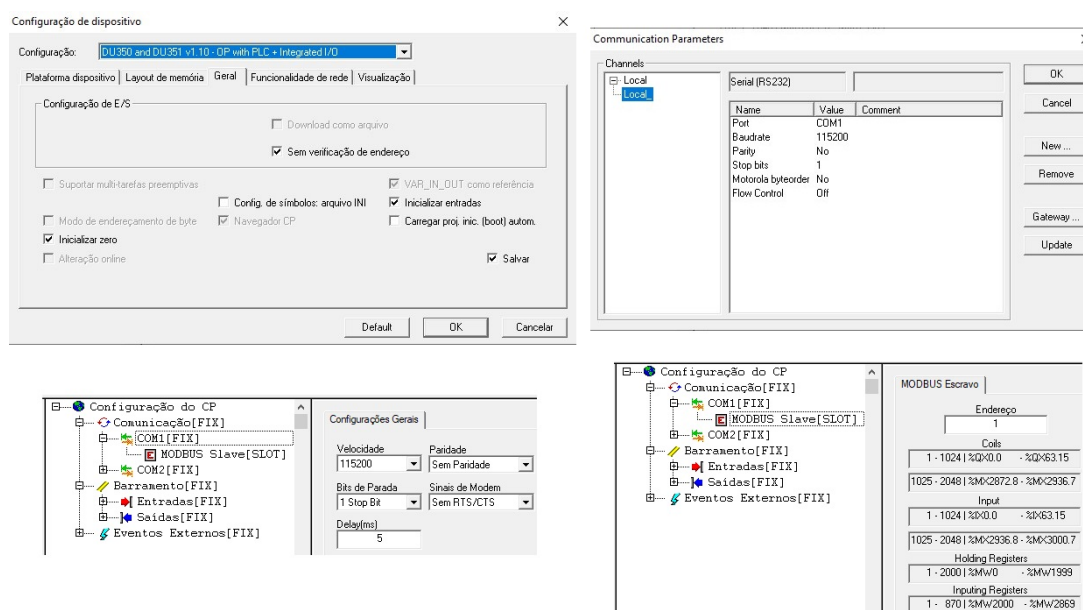


Figura 156 – Configurações gerais da porta COM1 no MasterTool.

Fonte: Autor.

No E3 Studio, foi utilizado o *driver* Modicon Modbus v4.0.1 (IOKit v2.0.100), disponibilizado no site oficial da Elipse Software (<https://www.elipse.com.br>), na seção de *downloads*, por meio do catálogo de *drivers* Modbus. Esse *driver*, configurado em modo RTU com endereçamento físico serial, *timeout* de 1000 ms e gerenciamento automático de conexão, é apresentado na Figura 157. A comunicação foi realizada com leitura cíclica de

² As especificações técnicas do protocolo Modbus RTU estão disponíveis em <https://www.modbus.org/file/secure/modbusprotocollspecification.pdf>.

variáveis a cada 100 ms, utilizando a porta COM1 com os mesmos parâmetros definidos no MasterTool.

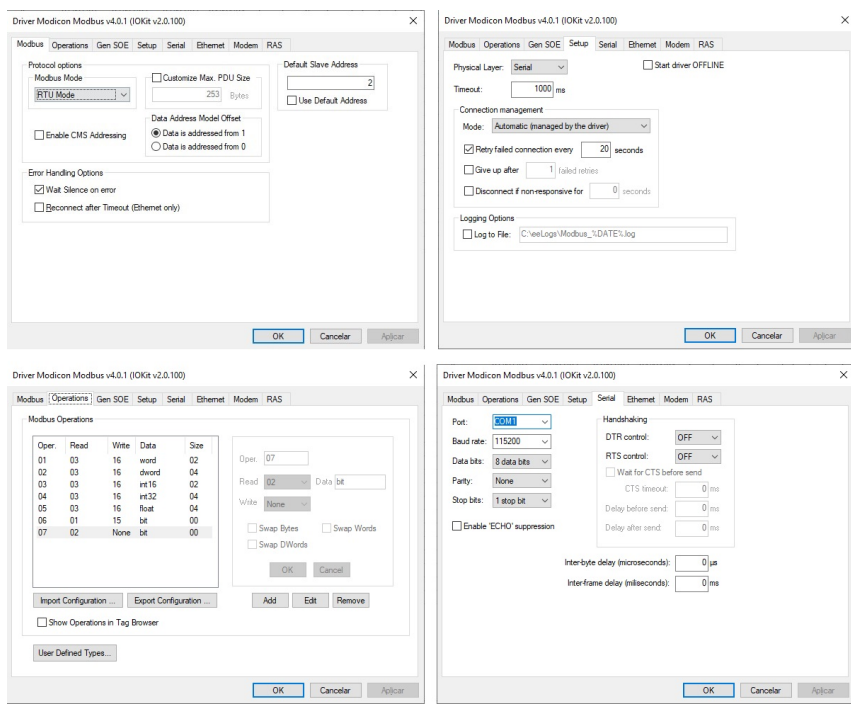


Figura 157 – Configuração do driver Modbus RTU no E3 Studio.
Fonte: Autor.

A versão gratuita do E3 Studio utilizada neste projeto possui uma limitação de até 20 tags. Por esse motivo, foi necessário selecionar cuidadosamente quais variáveis seriam expostas ao supervisório. A lista de variáveis configuradas, apresentada na Figura 158, mostra que foram priorizadas variáveis de entrada do operador, como Inserir (%MX0.0), Emergnc (%MX0.7), AC_OK (%MX0.5) e TPINJ_OK (%MX0.6), além de variáveis de saída como TXT (%MW36).

Nome	Dispo...	Item	P1/N1/B1	P2/N2/B2	P3/N3/B3	P4/N4/B4	Tamanh...	Varredura	Leitura?	Escrita?	Escala?	Min. UE	Máx. UE	UE	Min. E/S	Máx. E/S
Driver 1																
IO.JOKIEVnt		IO.JOKIEVnt	0	0	0	0	4	1000	☒	☐						
BOTOS		BOTOS	1	1	0	1		100	☒	☐		0	1000		0	1000
PECA_1_DI		PECA_1_DI	1	1	0	3		100	☒	☒	☐	0	48		0	48
PECA_1_DM		PECA_1_DM	1	1	0	4		100	☒	☒	☐	0	12000		0	12000
PECA_2_DI		PECA_2_DI	1	1	0	5		100	☒	☒	☐	0	48		0	48
PECA_2_DM		PECA_2_DM	1	1	0	6		100	☒	☒	☐	0	12000		0	12000
PECA_3_DI		PECA_3_DI	1	1	0	7		100	☒	☒	☐	0	48		0	48
PECA_3_DM		PECA_3_DM	1	1	0	8		100	☒	☒	☐	0	12000		0	12000
PECA_4_DI		PECA_4_DI	1	1	0	9		100	☒	☒	☐	0	48		0	48
PECA_4_DM		PECA_4_DM	1	1	0	10		100	☒	☒	☐	0	12000		0	12000
PECA_5_DI		PECA_5_DI	1	1	0	11		100	☒	☒	☐	0	48		0	48
PECA_5_DM		PECA_5_DM	1	1	0	12		100	☒	☒	☐	0	12000		0	12000
PECA_6_DI		PECA_6_DI	1	1	0	13		100	☒	☒	☐	0	12000		0	12000
PECA_6_DM		PECA_6_DM	1	1	0	14		100	☒	☒	☐	0	12000		0	12000
DN_AUX		DN_AUX	1	1	0	35		100	☒	☒	☐	0	48		0	48
CM_AUX		CM_AUX	1	1	0	36		100	☒	☒	☐	0	12000		0	12000
MSGAGM		MSGAGM	1	3	0	37		100	☒	☒	☐	0	1000		0	1000

Figura 158 – Lista de variáveis configuradas no E3 Studio respeitando o limite de 20 tags.
Fonte: Autor.

Durante a configuração da comunicação, foi adotado o uso de endereços %MX para representar variáveis booleanas. Essa escolha apresenta vantagens em relação aos endereços %IX (entradas físicas) e %QX (saídas físicas):

- **Flexibilidade:** variáveis %MX são internas ao CLP e podem ser manipuladas livremente por lógica de programa, sem depender de hardware físico.
- **Compatibilidade com supervisório:** o E3 Studio reconhece com mais facilidade os endereços %MX como Coils Modbus, permitindo leitura e escrita direta.
- **Isolamento lógico:** ao utilizar %MX, evita-se interferência direta com entradas e saídas físicas, garantindo maior segurança e controle sobre os dados trocados com o supervisório.

Essa abordagem permitiu que o sistema fosse testado e validado mesmo com restrições de hardware e software, mantendo a integridade da comunicação e a funcionalidade do supervisório.

3.4.2 Criação do quadro principal do supervisório

A interface do supervisório foi organizada em um quadro principal que estrutura todas as telas exibidas ao operador. Esse quadro é composto por três elementos fixos: o cabeçalho superior, a tabela de peças cadastradas à esquerda e a área central de visualização. Essa configuração garante que informações essenciais estejam sempre visíveis, independentemente da tela ativa. A disposição desses elementos pode ser observada no quadro inicial mostrado na Figura 159.

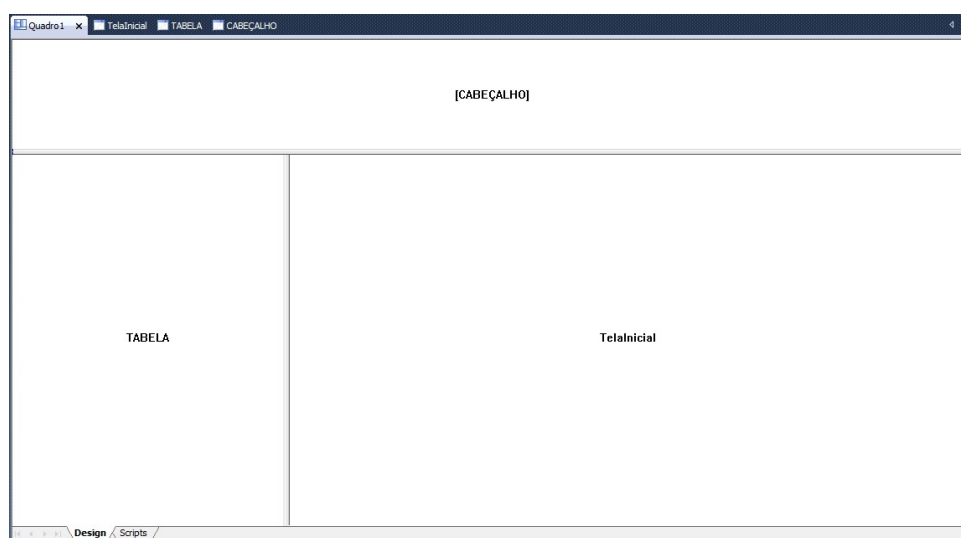


Figura 159 – Quadro inicial do supervisório com cabeçalho, tabela de peças e tela inicial.
Fonte: Autor.

Assim que a aplicação é iniciada, o operador visualiza a tela inicial, ilustrada na Figura 160, composta por:

- Um **print da planta industrial** ao fundo, representando visualmente o sistema de revestimento de tubulação.
- O **cabeçalho fixo**, com o nome do sistema: *Sistema de Monitoramento da Planta de Revestimento de Tubulação*, além da data e hora atual.
- A **tabela de peças cadastradas**, com 16 linhas e duas colunas: DN e Comprimento. No momento da inicialização, todos os valores estão zerados.
- Um **botão de navegação** chamado MENU PRINCIPAL, posicionado na área central inferior da tela.



Figura 160 – Tela inicial do supervisório com cabeçalho, tabela de peças e botão de navegação.

Fonte: Autor.

O cabeçalho e a tabela de peças foram configurados como elementos fixos no quadro principal. Isso significa que, mesmo quando o operador navega para outras telas, como o menu principal ou telas de operação, esses dois componentes continuam visíveis. Essa abordagem garante:

- **Consistência visual:** o operador mantém referência constante ao estado do sistema.
- **Acesso rápido:** a tabela de peças cadastradas pode ser consultada a qualquer momento.
- **Identificação clara:** o cabeçalho reforça o propósito da aplicação e a identidade da planta.

Ao clicar no botão MENU PRINCIPAL, o conteúdo do quadro direito é substituído pela tela de funcionalidades do sistema graças às configurações deste botão conforme demonstrado na Figura 161. Essa transição é feita sem alterar os elementos fixos, mantendo o cabeçalho e a tabela visíveis.

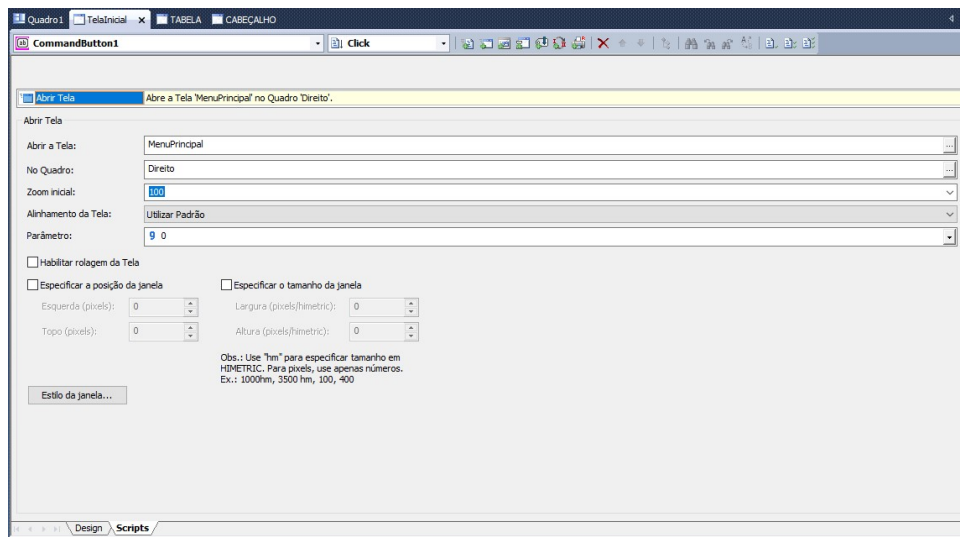


Figura 161 – Botão de transição da tela inicial para o menu principal.

Fonte: Autor.

3.4.3 Menu Principal do Supervisório

O menu principal do supervisório concentra as funcionalidades operacionais do sistema de revestimento de tubulação. Ele é acessado a partir da tela inicial por meio do botão MENU PRINCIPAL, e mantém visíveis os elementos fixos do quadro: o cabeçalho superior e a tabela de peças cadastradas. A área central é substituída por uma interface interativa com botões de controle, orientações operacionais e uma caixa de mensagens, como mostrado na Figura 162.

A interface apresenta os seguintes botões, cada um com função específica no processo automatizado:

- **START:** Inicia o processo automaticamente, desde que haja peças cadastradas.
- **STOP:** Interrompe o início automático das próximas peças cadastradas.
- **PLAY:** Retoma o início automático das próximas peças, desde que ainda haja peças em processo.
- **EMERGÊNCIA:** Interrompe todos os processos. As peças devem ser removidas manualmente e a lista de peças cadastradas deve ser refeita.

- **ACOPLAMENTO OK:** Após verificação do acoplamento, este botão deve ser pressionado para confirmar.
- **TEMPERATURA DA PEÇA OK E POLIURETANO INSERIDO:** Após verificação da temperatura e injeção do poliuretano, este botão deve ser pressionado para prosseguir.

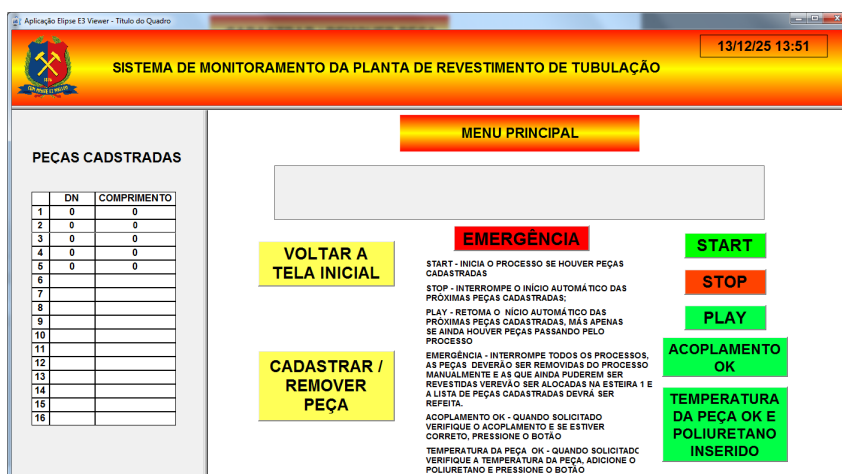


Figura 162 – Menu principal do supervisor com cabeçalho, tabela de peças e botão de navegação.

Fonte: Autor.

Os botões de comando (**START**, **STOP**, **PLAY**, **EMERGÊNCIA**, **ACOPLAMENTO OK** e **TEMPERATURA DA PEÇA OK E POLIURETANO INSERIDO**) operam alterando o valor do seu bit correspondente conforme configurado no MasterTool. A Figura 163 exemplifica essa configuração para o botão **START**, endereçado em %MX0.2.

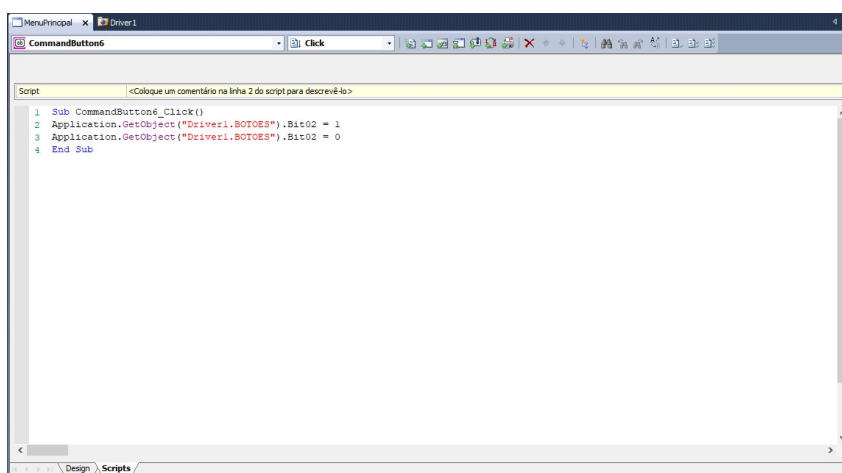


Figura 163 – Configuração do botão START endereçado em %MX0.2.

Fonte: Autor.

Ao lado dos botões, são exibidas instruções claras para o operador, explicando o momento correto de uso de cada botão e as consequências de sua ativação. Essas orientações, mostradas na Figura 164, foram inseridas como Labels no E3 Studio, garantindo que estejam sempre visíveis e atualizadas conforme o estado do sistema.

START - INICIA O PROCESSO SE HOUVER PEÇAS CADASTRADAS

STOP - INTERROMPE O INÍCIO AUTOMÁTICO DAS PRÓXIMAS PEÇAS CADASTRADAS;

PLAY - RETOMA O INÍCIO AUTOMÁTICO DAS PRÓXIMAS PEÇAS CADASTRADAS, MÁ S APENAS SE AINDA HOUVER PEÇAS PASSANDO PELO PROCESSO

EMERGÊNCIA - INTERROMPE TODOS OS PROCESSOS, AS PEÇAS DEVERÃO SER REMOVIDAS DO PROCESSO MANUALMENTE E AS QUE AINDA PUDEREM SER REVESTIDAS VEREVÃO SER ALOCADAS NA ESTEIRA 1 E A LISTA DE PEÇAS CADASTRADAS DEVRÁ SER REFEITA.

ACOPLAMENTO OK - QUANDO SOLICITADO VERIFIQUE O ACOPLAMENTO E SE ESTIVER CORRETO, PRESSIONE O BOTÃO

TEMPERATURA DA PEÇA OK - QUANDO SOLICITADO VERIFIQUE A TEMPERATURA DA PEÇA, ADICIONE O POLIURETANO E PRESSIONE O BOTÃO

Figura 164 – Orientações operacionais no menu principal.
Fonte: Autor.

Na parte inferior da interface, há um botão dedicado à transição para a tela de CADASTRAR / REMOVER PEÇA. Ao ser pressionado, o conteúdo do quadro direito é substituído pela tela de cadastro, onde o operador pode inserir novos valores ou remover peças do sistema. Essa transição mantém o cabeçalho e a tabela de peças visíveis, utilizando a mesma configuração do botão para ir ao MENU PRINCIPAL, garantindo continuidade na navegação.

3.4.4 Tela de Cadastro e Remoção de Peças

A tela de cadastro e remoção de peças (ver Figura 165) permite ao operador inserir manualmente os dados das peças que serão processadas na planta de revestimento. Essa tela é acessada a partir do menu principal e mantém visíveis os elementos fixos do quadro: o cabeçalho superior e a tabela de peças cadastradas.

Assim como nas demais telas, o cabeçalho com o nome do sistema e a tabela de peças cadastradas permanecem visíveis. A tabela exibe 16 posições com os campos DN e Comprimento, inicialmente zerados. Na lateral da interface, há dois botões de navegação:

- VOLTAR AO MENU PRINCIPAL
- VOLTAR À TELA INICIAL

PEÇAS CADSTRADAS

	DN	COMPRIMENTO
1	0	0
2	0	0
3	0	0
4	0	0
5	0	0
6		
7		
8		
9		
10		
11		
12		
13		
14		
15		
16		

REGRAS E ORIENTAÇÕES:

1. APENAS COMPRIMENTO DE 1000 A 12000 SÃO PERMITIDOS;
2. APENAS DIÂMETROS NOMINAIS (DN) DE 2 A 48 SÃO PERMITIDOS;
3. O LIMITE DE PEÇAS ESTÁ RELACIONADO AO COMPRIMENTO ÚTIL DA ESTUFA E AO TEMPO DE CURA DAS PEÇAS, OU SEJA, AO SOMAR O DIÂMETRO EXTERNO DO MAIOR FLANGE DAS PEÇAS CADASTRADAS, NÃO PODE ULTRAPASSAR 13.320mm OU 16 PEÇAS;
4. AO PREENCHER O COMPRIMENTO E DN PRESSEIONE A TECLA ENTER PARA CONFIRMAR OS DADOS E DEPOIS CLIQUE EM INSERIR PARA CADASTRAR A PEÇA;
5. AS PEÇAS DEVERÃO SER CADASTRADAS RIGOROSAMENTE NA MESMA ORDEM EM QUE SE ENCONTRAM POSICIONADAS NA ESTEIRA 1. DESSE FORMAS, A PRIMEIRA PEÇA LOCALIZADA À ESQUERDA DA ESTEIRA 1 (LADO MAIS PRÓXIMO DA ESTEIRA 2) DEVERÁ SER A PRIMEIRA A SER CADASTRADA NO SISTEMA E, CONSEQUENTEMENTE, A PRIMEIRA A PASSAR PELO PROCESSO DE REVESTIMENTO. AS DEMAIS PEÇAS DEVERÃO SEGUIR ESSA MESMA SEQUÊNCIA, RESPEITANDO INTEGRALMENTE A ORDEM FÍSICA DE POSICIONAMENTO NA ESTEIRA.
6. AO CLICAR EM REMOVER, O SISTEMA SEMPRE REMOVERÁ A ÚLTIMA PEÇA NA LISTA;

CADASTRO

DN: 0 Comprimento: 0

INSERIR

REMOVER

PARA INICIAR OU CONTROLAR OS PROCESSOS RETORNE AO MENU PRINCIPAL

Figura 165 – Tela de cadastro e remoção de peças com cabeçalho, tabela fixa e botões de navegação.

Fonte: Autor.

No lado direito inferior da tela, encontra-se a área de cadastro, composta por dois campos de entrada:

- Campo DN: vinculado à propriedade `Driver1.DN_AUX.Value`
- Campo Comprimento: vinculado à propriedade `Driver1.CM_AUX.Value`

Esses campos foram configurados no E3 Studio por meio de elementos do tipo `Panel.DrawString`, com associação direta às variáveis do driver Modbus como demonstrado na Figura 166. Isso permite que os valores digitados pelo operador sejam enviados ao CLP e utilizados na lógica de validação e inserção.

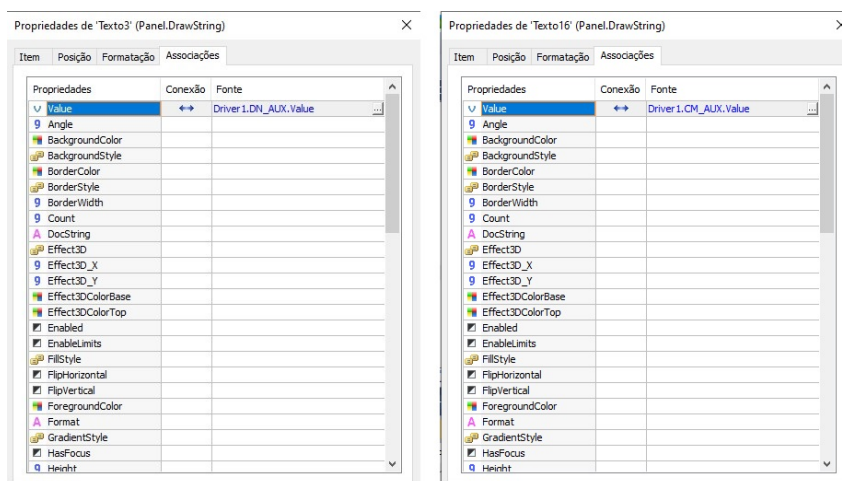


Figura 166 – Propriedades dos campos de entrada DN e Comprimento vinculados ao driver Modbus.

Fonte: Autor.

Abaixo dos campos de entrada, há dois botões principais:

- **INSERIR:** envia os valores digitados para o CLP e aciona a lógica de validação e inserção da peça.
- **REMOVER:** remove a última peça cadastrada da lista, conforme definido na lógica da POU RMV_PECA.

Ambos os botões seguem o mesmo raciocínio de acionamento por pulso, alterando o valor de um bit específico no driver Modbus (ver Figura 167). O botão **INSERIR** altera o bit correspondente à variável **Inserir** (%MX0.0), enquanto o botão **REMOVER** altera o bit da variável **Remove**, conforme configurado no MasterTool.

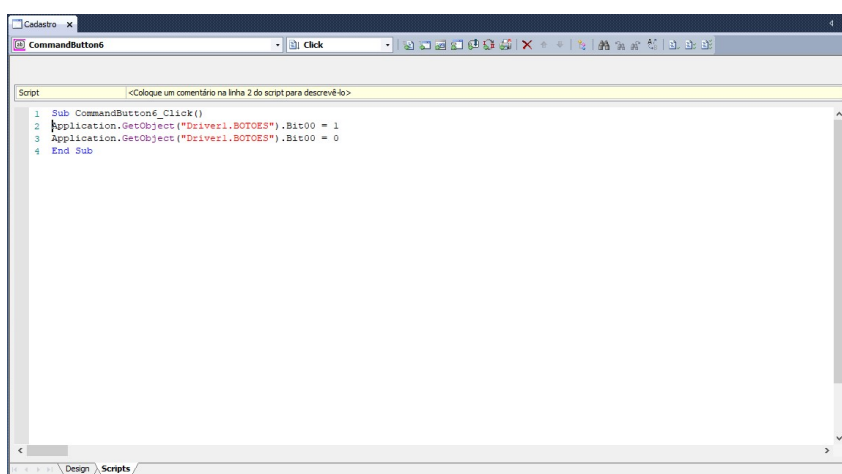


Figura 167 – Botões de ação para inserir e remover peças, com lógica de pulso via driver Modbus.

Fonte: Autor.

Ao lado da área de cadastro, são exibidas instruções claras para o operador, garantindo que os dados sejam inseridos corretamente e que a ordem física das peças na esteira seja respeitada. Essas orientações, apresentadas na Figura 168, incluem regras como:

- Apenas comprimentos entre 1000 mm e 12000 mm são permitidos.
- Apenas DN entre 2 e 48 são aceitos.
- O cadastro deve seguir rigorosamente a ordem física das peças na esteira 1.
- O botão REMOVER sempre exclui a última peça da lista.

REGRAS E ORIENTAÇÕES:

1- APENAS COMPRIMENTO DE 1000 A 12000 SÃO PERMITIDOS;

2- APENAS DIÂMETROS NOMINAIS (DN) DE 2 A 48 SÃO PERMITIDOS;

3- O LIMITE DE PEÇAS ESTÁ RELACIONADO AO COMPRIMENTO ÚTIL DA ESTUFA E AO TEMPO DE CURA DAS PEÇAS, OU SEJA, AO SOMAR O DIÂMETRO EXTERNO DO MAIOR FLANGE DAS PEÇAS CADASTRADAS, NÃO PODE ULTRAPASSAR 13.320mm OU 16 PEÇAS ;

4- AO PREENCHER O COMPRIMENTO E DN PRESSIONE A TECLA ENTER PARA CONFIRMAR OS DADOS E DEPOIS CLIQUE EM INSERIR PARA CADASTRAR A PEÇA;

5- AS PEÇAS DEVERÃO SER CADASTRADAS RIGOROSAMENTE NA MESMA ORDEM EM QUE SE ENCONTRAM POSICIONADAS NA ESTEIRA 1. DESSA FORMA, A PRIMEIRA PEÇA LOCALIZADA À ESQUERDA DA ESTEIRA 1 (LADO MAIS PRÓXIMO DA ESTEIRA 2) DEVERÁ SER A PRIMEIRA A SER CADASTRADA NO SISTEMA E, CONSEQUENTEMENTE, A PRIMEIRA A PASSAR PELO PROCESSO DE REVESTIMENTO. AS DEMAIS PEÇAS DEVERÃO SEGUIR ESSA MESMA SEQUÊNCIA, RESPEITANDO INTEGRALMENTE A ORDEM FÍSICA DE POSICIONAMENTO NA ESTEIRA.

6- AO CLICAR EM REMOVER, O SISTEMA SEMPRE REMOVERÁ A ÚLTIMA PEÇA NA LISTA;

Figura 168 – Orientações operacionais exibidas na tela de cadastro.

Fonte: Autor.

3.4.5 Mensagens e Alertas do Supervisório

Nesta seção são apresentadas as principais mensagens e alertas exibidos pelo supervisório durante o processo de revestimento de tubulação. Cada mensagem está vinculada a uma condição específica do sistema e serve para orientar o operador quanto às ações necessárias.

Quando o botão de emergência é pressionado, o sistema interrompe todos os processos e exibe uma mensagem crítica: *"BOTÃO DE EMERGÊNCIA ATIVADO, SAIA*

IMEDIATAMENTE E CHAME AS AUTORIDADES!”, conforme ilustrado na Figura 169. Essa ação exige intervenção imediata do operador e reinicialização manual do sistema.

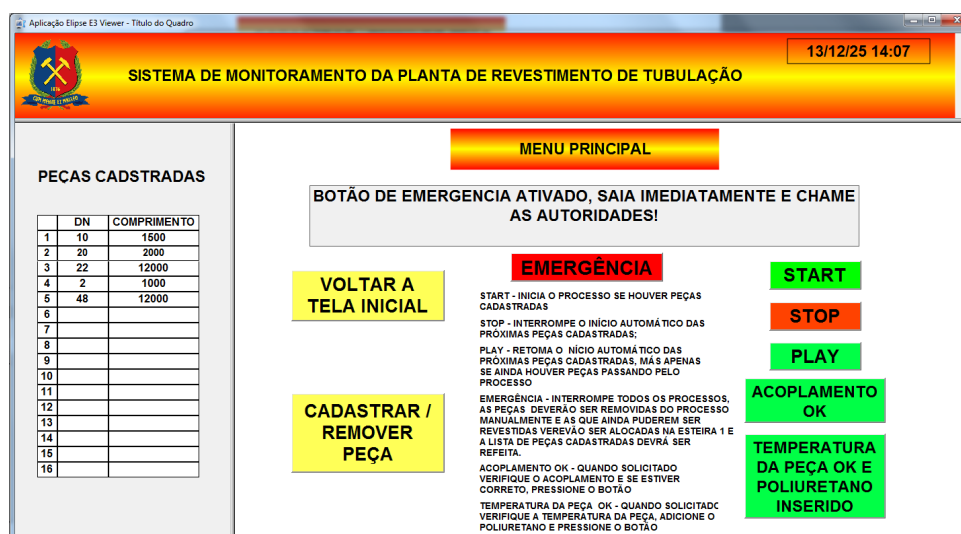


Figura 169 – Mensagem de emergência exibida no supervisório.
Fonte: Autor.

Ao tentar cadastrar uma peça com comprimento fora da faixa de 1000 a 12000 mm, o sistema bloqueia a ação e exibe a mensagem: *”Comprimento inválido, Revestimento apenas entre 1000 a 12000mm.”*, como mostrado na Figura 170. Essa validação evita falhas no processo de cura e revestimento.



Figura 170 – Mensagem de erro de comprimento inválido.
Fonte: Autor.

Se o DN inserido estiver fora da faixa permitida (2 a 48), o sistema exibe: *”DN inválido, Revestimento apenas do DN 2 a 48.”*, conforme apresentado na Figura 171. Essa verificação garante compatibilidade com os limites físicos da planta.

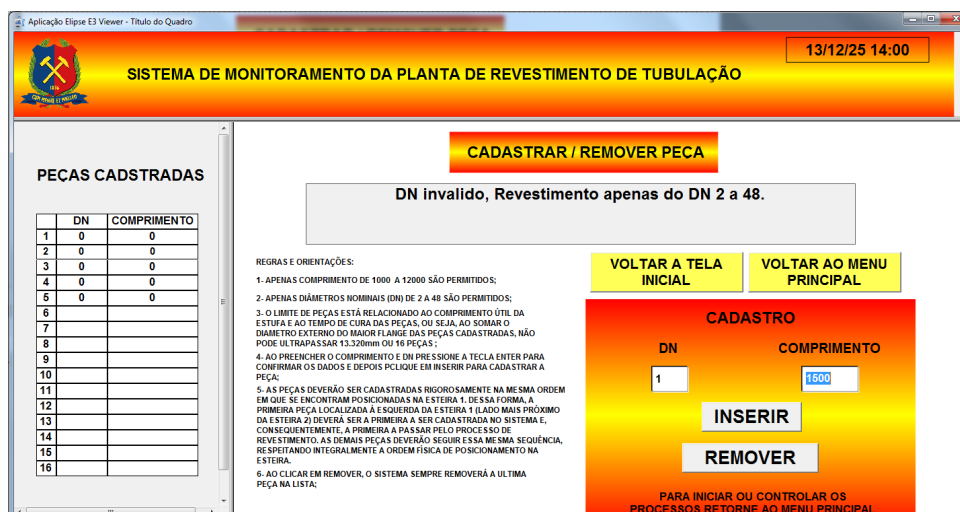


Figura 171 – Mensagem de erro de DN inválido.

Fonte: Autor.

Quando ambos os valores estão fora dos limites, o sistema exibe: *"DN aceitável: 2 a 48. Comprimento aceitável: 1000 a 12000mm."*, como ilustrado na Figura 172. Essa dupla validação impede o cadastro de peças incompatíveis.

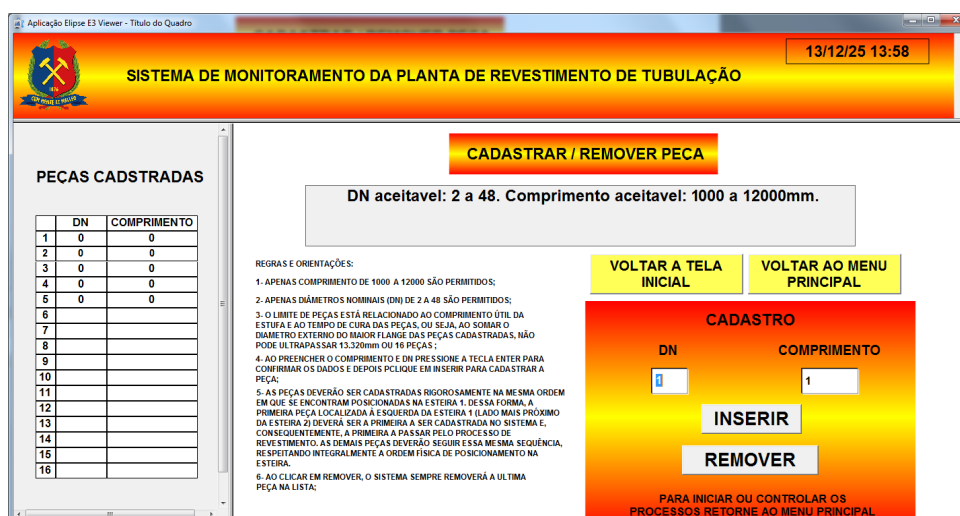


Figura 172 – Mensagem de erro de DN e comprimento inválidos.

Fonte: Autor.

Ao cadastrar uma peça com DN 10 e comprimento 1500 mm, o sistema aceita os dados sem erro, registrando a peça com sucesso na tabela, como mostrado na Figura 173.

PEÇAS CADSTRADAS

	DN	COMPRIMENTO
1	10	1500
2	0	0
3	0	0
4	0	0
5	0	0
6		
7		
8		
9		
10		
11		
12		
13		
14		
15		
16		

REGRAS E ORIENTAÇÕES:

1. APENAS COMPRIMENTO DE 1000 A 12000 SÃO PERMITIDOS;
2. APENAS DIÂMETROS NOMINAIS (DN) DE 2 A 48 SÃO PERMITIDOS;
3. O LIMITE DE PEÇAS ESTÁ RELACIONADO AO COMPRIMENTO ÚTIL DA ESTUFA E AO TEMPO DE CURA DAS PEÇAS, OU SEJA, AO SOMAR O DIÂMETRO EXTERNO DO MAIOR FLANGE DAS PEÇAS CADSTRADAS, NÃO PODE ULTRAPASSAR 13.320mm OU 16 PEÇAS;
4. AO PREENCHER O COMPRIMENTO E DN PRESSIONE A TECLA ENTER PARA CONFIRMAR OS DADOS E DEPOIS CLIQUE EM INSERIR PARA CADASTRAR A PEÇA;
5. AS PEÇAS DEVERÃO SER CADASTRADAS RIGOROSAMENTE NA MESMA ORDEM EM QUE SE ENCONTRAM POSICIONADAS NA ESTEIRA 1. DESSA FORMA, A PRIMEIRA PEÇA LOCALIZADA À ESQUERDA DA ESTEIRA 1 (LADO MAIS PRÓXIMO DA ESTEIRA 2) DEVERÁ SER A PRIMEIRA A SER CADASTRADA NO SISTEMA E, CONSEQUENTEMENTE, A PRIMEIRA A PASSAR PELO PROCESSO DE REVESTIMENTO. AS DEMAIS PEÇAS DEVERÃO SEGUIR ESSA MESMA SEQUÊNCIA, RESPEITANDO INTEGRALMENTE A ORDEM FÍSICA DE POSICIONAMENTO NA ESTEIRA.
6. AO CLICAR EM REMOVER, O SISTEMA SEMPRE REMOVERÁ A ÚLTIMA PEÇA NA LISTA;

CADASTRO

DN: COMPRIMENTO:

INSERIR

REMOVER

PARA INICIAR OU CONTROLAR OS PROCESSOS RETORNE AO MENU PRINCIPAL

Figura 173 – Cadastro de valores aceitáveis no supervisorio.
Fonte: Autor.

Após cadastrar cinco peças, o operador pode remover a última. O sistema zera os valores da quinta linha, mantendo as demais intactas, como ilustrado na Figura 174. Isso é útil para correções rápidas.

PEÇAS CADSTRADAS

	DN	COMPRIMENTO
1	10	1500
2	20	2000
3	22	12000
4	2	1000
5	0	0
6		
7		
8		
9		
10		
11		
12		
13		
14		
15		
16		

REGRAS E ORIENTAÇÕES:

1. APENAS COMPRIMENTO DE 500 A 12000 SÃO PERMITIDOS;
2. APENAS DIÂMETROS NOMINAIS (DN) DE 2 A 48 SÃO PERMITIDOS;
3. O LIMITE DE PEÇAS ESTÁ RELACIONADO AO COMPRIMENTO ÚTIL DA ESTUFA E AO TEMPO DE CURA DAS PEÇAS, OU SEJA, AO SOMAR O DIÂMETRO EXTERNO DO MAIOR FLANGE DAS PEÇAS CADSTRADAS, NÃO PODE ULTRAPASSAR 13.320mm OU 16 PEÇAS;
4. AO PREENCHER O COMPRIMENTO E DN PRESSIONE A TECLA ENTER PARA CONFIRMAR OS DADOS E DEPOIS CLIQUE EM INSERIR PARA CADASTRAR A PEÇA;
5. AS PEÇAS DEVERÃO SER CADASTRADAS RIGOROSAMENTE NA MESMA ORDEM EM QUE SE ENCONTRAM POSICIONADAS NA ESTEIRA 1. DESSA FORMA, A PRIMEIRA PEÇA LOCALIZADA À ESQUERDA DA ESTEIRA 1 (LADO MAIS PRÓXIMO DA ESTEIRA 2) DEVERÁ SER A PRIMEIRA A SER CADASTRADA NO SISTEMA E, CONSEQUENTEMENTE, A PRIMEIRA A PASSAR PELO PROCESSO DE REVESTIMENTO. AS DEMAIS PEÇAS DEVERÃO SEGUIR ESSA MESMA SEQUÊNCIA, RESPEITANDO INTEGRALMENTE A ORDEM FÍSICA DE POSICIONAMENTO NA ESTEIRA.
6. AO CLICAR EM REMOVER, O SISTEMA SEMPRE REMOVERÁ A ÚLTIMA PEÇA NA LISTA;

CADASTRO

DN: COMPRIMENTO:

INSERIR

REMOVER

PARA INICIAR OU CONTROLAR OS PROCESSOS RETORNE AO MENU PRINCIPAL

Figura 174 – Mensagem após remoção da última peça cadastrada.
Fonte: Autor.

Ao pressionar o botão **START** com todas as condições atendidas, o sistema confirma o início do ciclo exibindo: *"Uma peça entrou para o processo."*, como mostrado na Figura 175.

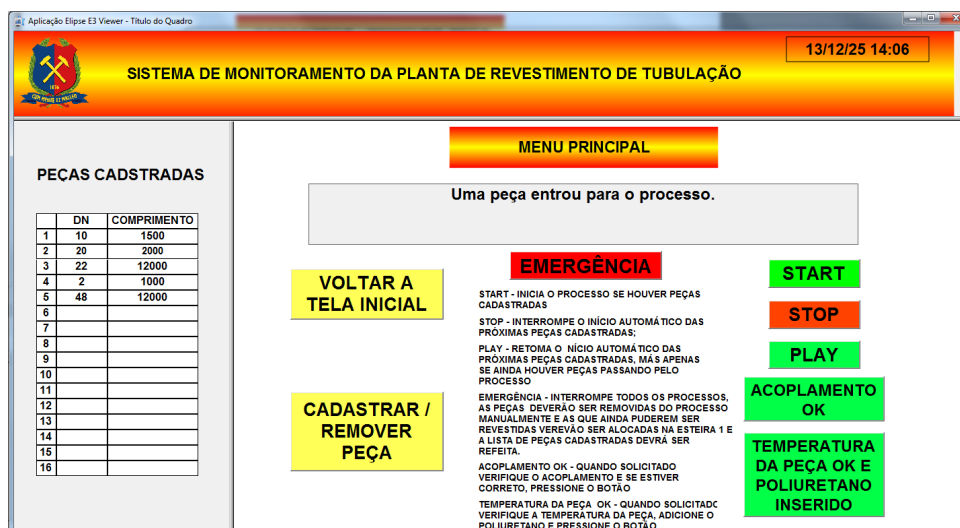


Figura 175 – Mensagem de confirmação de peça entrando no processo.

Fonte: Autor.

Quando o operador pressiona o botão **STOP**, o sistema exibe: *"Você parou a etapa de início automático da próxima peça já cadastradas."*, como ilustrado na Figura 176. Isso suspende temporariamente o avanço automático.

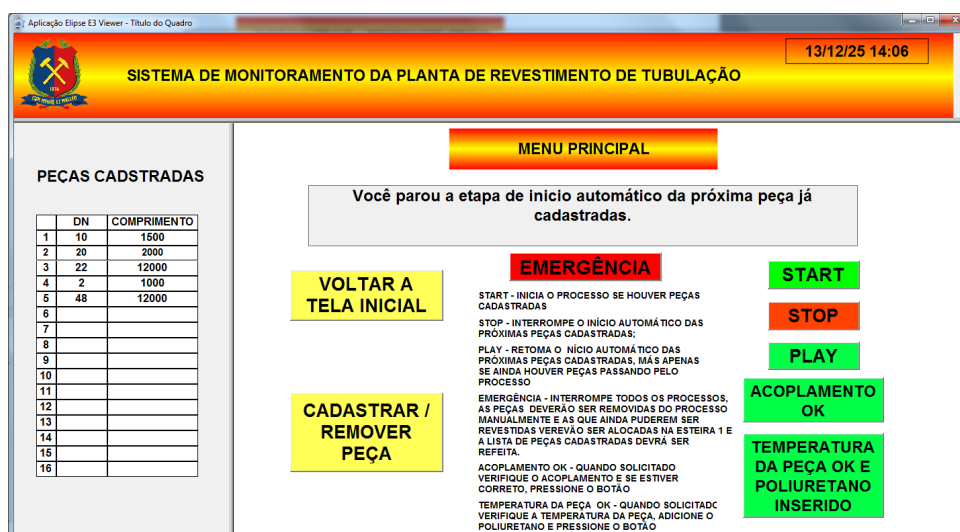


Figura 176 – Mensagem de parada do início automático.

Fonte: Autor.

Ao pressionar o botão **PLAY**, o sistema exibe: *"Você reiniciou a etapa de início automático da próxima peça já cadastrada."*, como mostrado na Figura 177, permitindo que o processo continue normalmente.

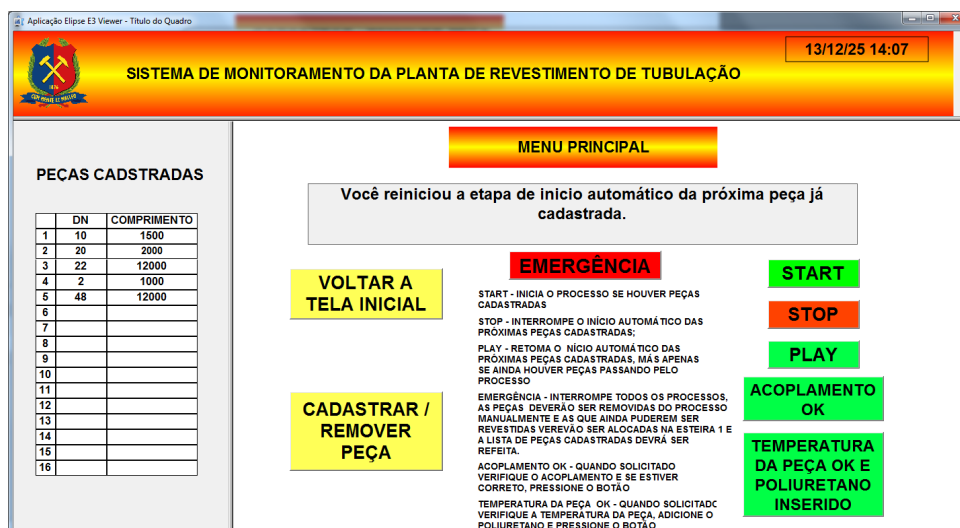


Figura 177 – Mensagem de retomada do início automático.

Fonte: Autor.

Se a temperatura da centrífuga exceder o limite, o sistema alerta o operador com a mensagem: *"TEMPERATURA DA CENTRÍFUGA ACIMA DO LIMITE, POSSÍVEL PRINCÍPIO DE INCÊNDIO!"*, como ilustrado na Figura 178.



Figura 178 – Alerta de temperatura da centrífuga acima do limite.

Fonte: Autor.

Quando a estufa ultrapassa o limite de segurança, o sistema exibe: *"TEMPERATURA DA ESTUFA ACIMA DO LIMITE, POSSÍVEL PRINCÍPIO DE INCÊNDIO!"*, como mostrado na Figura 179. Nesse caso, o botão de emergência deve ser acionado.

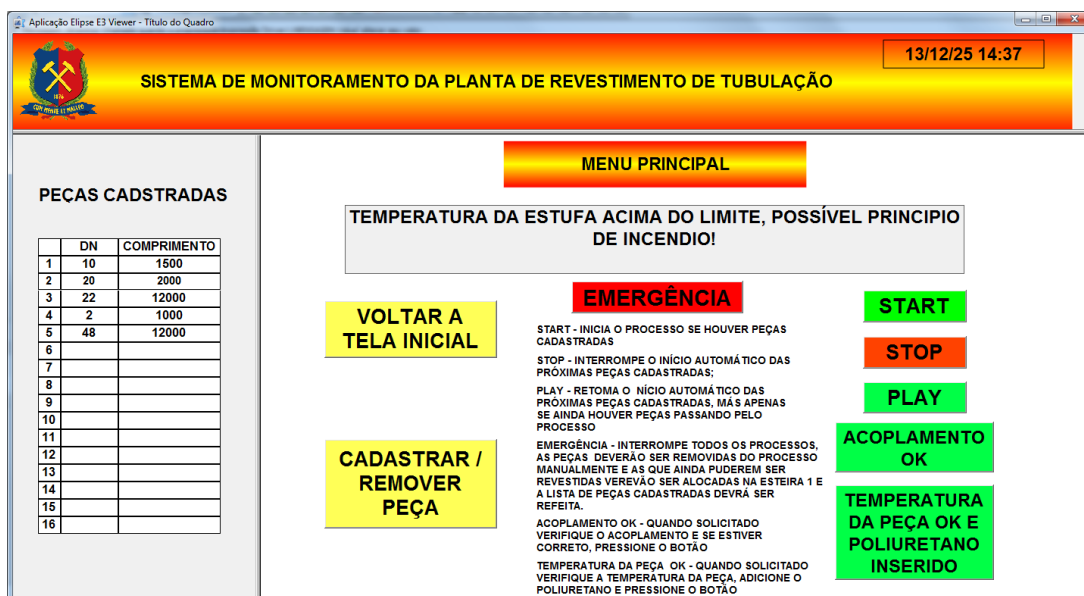


Figura 179 – Alerta de temperatura da estufa acima do limite.
 Fonte: Autor.

Quando o operador confirma o acoplamento correto, o sistema exibe: *"Acoplamento verificado com sucesso."*, como ilustrado na Figura 180, garantindo que a peça está posicionada corretamente.

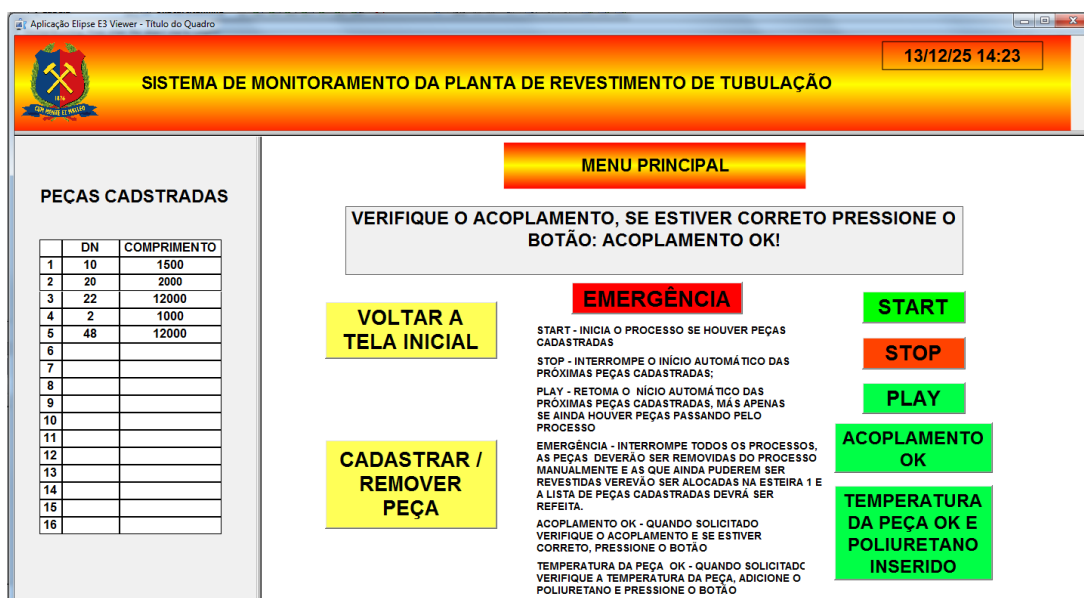


Figura 180 – Mensagem de verificação de acoplamento.
 Fonte: Autor.

Após verificar a temperatura da peça e injetar o poliuretano, o operador pressiona o botão correspondente e o sistema exibe: *"Temperatura da peça OK e poliuretano inserido."*, como mostrado na Figura 181.



Figura 181 – Mensagem de verificação de temperatura e inserção de PU.

Fonte: Autor.

Todas as mensagens descritas nesta seção são exibidas tanto na tela de *Cadastro/Remover Peça* quanto na tela de *Menu Principal*. Essa duplicidade garante melhor acompanhamento do estado do sistema e reforça a segurança operacional, permitindo que o operador visualize os alertas e instruções em qualquer etapa do processo.

Em cada uma dessas telas, o campo de mensagens é alimentado por dois scripts distintos:

- **Script 1 — Evento personalizado `mensagem_dinamica`:** Esse script é executado automaticamente sempre que a tag `Driver1.MENSAGEM` altera seu valor. Ele interpreta o código recebido e atualiza o campo de mensagem com o texto correspondente, como ilustrado na Figura 182.

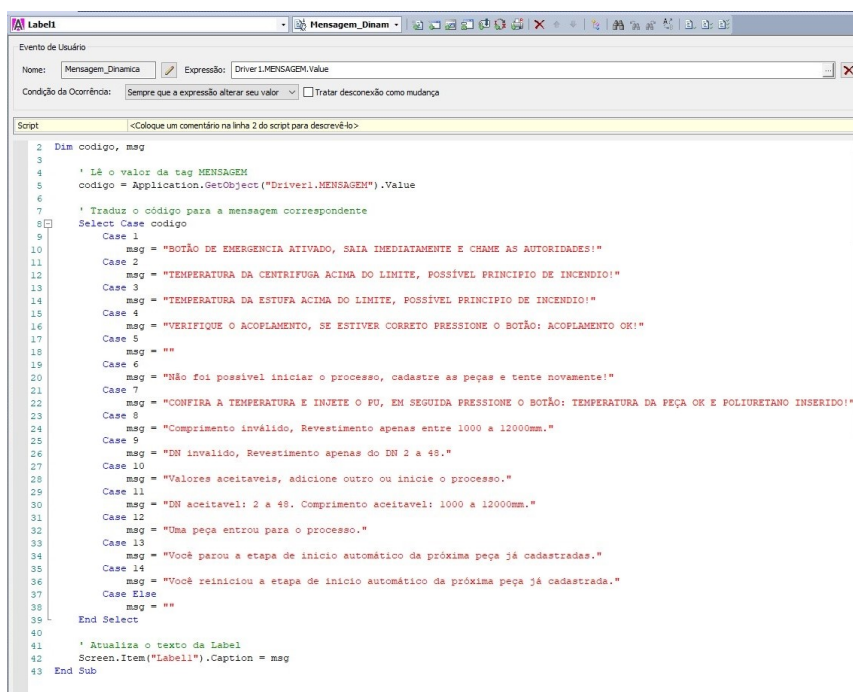
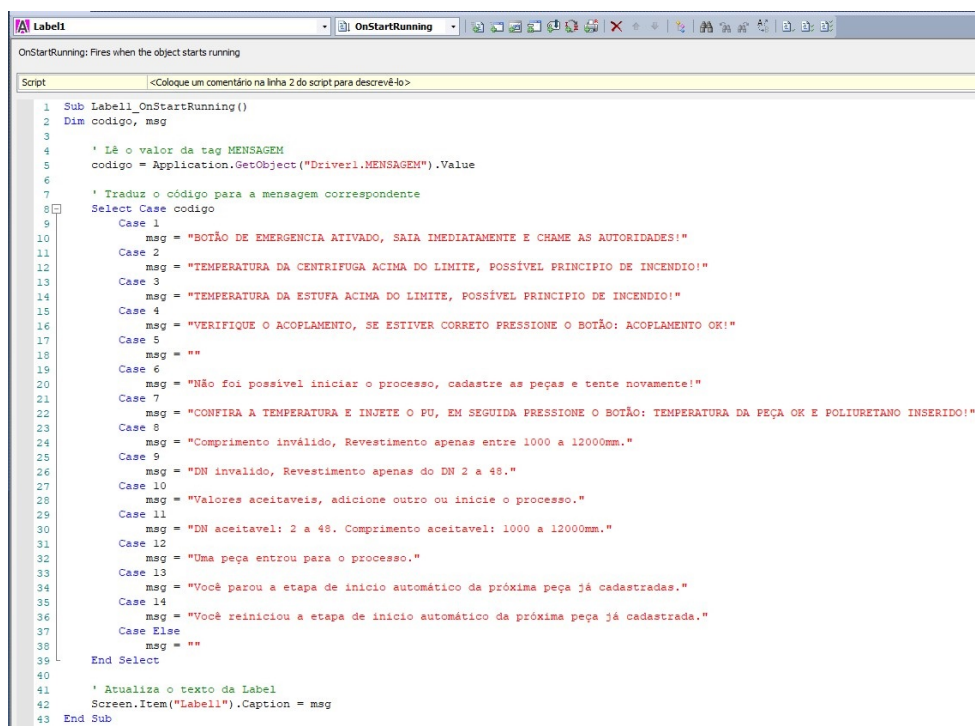


Figura 182 – Script do evento mensagem_dinamica.

Fonte: Autor.

- **Script 2 — Evento OnStartRunning:** Executado assim que a tela é aberta, esse script garante que a última mensagem registrada seja exibida imediatamente, mesmo antes de qualquer nova alteração na tag, como mostrado na Figura 183. Dessa forma, o operador sempre tem acesso à informação mais recente, reforçando a confiabilidade do sistema.



```

1 Sub Label1_OnStartRunning()
2 Dim codigo, msg
3
4 ' Lê o valor da tag MENSAGEM
5 codigo = Application.GetObject("Driver1.MENSAGEM").Value
6
7 ' Traduz o código para a mensagem correspondente
8 Select Case codigo
9     Case 1
10        msg = "BOTÃO DE EMERGENCIA ATIVADO, SAIA IMEDIATAMENTE E CHAME AS AUTORIDADES!"
11     Case 2
12        msg = "TEMPERATURA DA CENTRIFUGA ACIMA DO LIMITE, POSSÍVEL PRINCÍPIO DE INCENDIO!"
13     Case 3
14        msg = "TEMPERATURA DA ESTUFA ACIMA DO LIMITE, POSSÍVEL PRINCÍPIO DE INCENDIO!"
15     Case 4
16        msg = "VERIFIQUE O ACOPLAMENTO, SE ESTIVER CORRETO PRESSIONE O BOTÃO: ACOPLAMENTO OK!"
17     Case 5
18        msg = ""
19     Case 6
20        msg = "Não foi possível iniciar o processo, cadastre as peças e tente novamente!"
21     Case 7
22        msg = "CONFIRA A TEMPERATURA E INJETE O PU, EM SEGUIDA PRESSIONE O BOTÃO: TEMPERATURA DA PEÇA OK E POLIURETANO INSERIDO!"
23     Case 8
24        msg = "Comprimento inválido, Revestimento apenas entre 1000 a 12000mm."
25     Case 9
26        msg = "DN inválido, Revestimento apenas do DN 2 a 48."
27     Case 10
28        msg = "Valores aceitáveis, adicione outro ou inicie o processo."
29     Case 11
30        msg = "DN aceitável: 2 a 48. Comprimento aceitável: 1000 a 12000mm."
31     Case 12
32        msg = "Uma peça entrou para o processo."
33     Case 13
34        msg = "Você parou a etapa de início automático da próxima peça já cadastradas."
35     Case 14
36        msg = "Você reiniciou a etapa de início automático da próxima peça já cadastrada."
37     Case Else
38        msg = ""
39 End Select
40
41 ' Atualiza o texto da Label
42 Screen.Item("Label1").Caption = msg
43 End Sub

```

Figura 183 – Script do evento OnStartRunning.

4 Resultados

Este capítulo apresenta os principais resultados obtidos ao longo do desenvolvimento da planta de revestimento de tubulação, abrangendo desde a etapa de modelagem tridimensional até a implementação da lógica em Ladder e a construção do sistema supervisor. Os resultados demonstram a integração entre diferentes áreas de conhecimento e confirmam a eficácia da metodologia aplicada.

4.1 Resultados da Modelagem 3D

A modelagem tridimensional realizada no *SolidWorks* permitiu visualizar a planta automatizada em sua totalidade antes da fase de programação. Entre os resultados obtidos destacam-se:

- Representação fiel dos equipamentos necessários ao processo, incluindo centrífuga, estufa, esteiras e dispositivos auxiliares.
- Definição dos limites físicos da planta, como o comprimento máximo das tubulações (12.000 mm) e a capacidade da estufa (13.320 mm).
- Desenvolvimento de mecanismos específicos, como o acoplamento do tipo Oldham, que garantiu transmissão eficiente de movimento mesmo em situações de desalinhamento.
- Estruturação das esteiras com canais, inclinações e pistões hidráulicos, assegurando transporte seguro e posicionamento preciso das peças.
- Modelagem das tubulações e flanges conforme normas industriais, garantindo compatibilidade com padrões consolidados.

Esses resultados forneceram a base física e conceitual para a etapa de programação e automação.

4.2 Resultados da Programação em Ladder

Na etapa de programação em Ladder, os resultados evidenciaram a robustez da lógica implementada:

- Criação de tipos de dados específicos para acessar simultaneamente o Diâmetro Nominal (DN) e o comprimento das peças.

- Desenvolvimento de aproximadamente 20 POUs, cada uma responsável por uma parte distinta do processo, garantindo modularidade e organização.
- Utilização de variáveis auxiliares e globais para assegurar integração entre rotinas e maior eficiência no controle.
- Implementação de regras de validação que impediram o cadastro de peças fora dos limites técnicos estabelecidos.
- Comunicação eficiente com o supervisor por meio de alocações de memória flexíveis.

Os testes confirmaram que a lógica implementada atende aos requisitos de segurança e confiabilidade, permitindo o controle adequado do fluxo de peças.

4.3 Resultados do Supervisor

Na etapa de supervisão, os resultados mostraram a eficácia da interface gráfica desenvolvida:

- Implementação de uma tabela de peças para acompanhamento detalhado do processo.
- Criação de telas específicas, como a tela de cadastro e o menu inicial, que possibilitam controlar e iniciar o processo de forma intuitiva.
- Desenvolvimento de *labels* de mensagens dinâmicas, que exibem alertas e instruções claras ao operador.
- Integração de scripts (`mensagem_dinamica` e `OnStartRunning`), garantindo atualização em tempo real das mensagens.
- Exibição correta de mensagens críticas, como alertas de sobretemperatura e acionamento do botão de emergência.

Esses resultados reforçam a interação homem-máquina e aumentam a segurança operacional.

4.4 Integração do Sistema

A integração entre modelagem 3D, programação em Ladder e supervisor resultou em um sistema completo e funcional. Os principais resultados dessa integração foram:

- Fluxo contínuo da peça: cadastro → validação → transporte pelas esteiras → acoplamento → injeção de PU → centrífuga → estufa.

- Confirmações manuais de acoplamento e temperatura, assegurando que o processo siga parâmetros técnicos corretos.
- Controle eficiente do fluxo de peças por meio dos botões **START**, **STOP** e **PLAY**.
- Emissão de alertas críticos em situações de risco, como sobretemperatura da centrífuga e da estufa.
- Resposta imediata ao acionamento do botão de emergência, interrompendo o processo e exibindo mensagem de alerta.

4.5 Síntese dos Resultados

Os resultados obtidos comprovam que:

- A modelagem 3D foi essencial para identificar limitações físicas e definir parâmetros técnicos.
- A programação em Ladder garantiu a lógica de controle robusta e modular.
- O supervisório proporcionou uma interface clara, dinâmica e segura para o operador.
- A integração das três etapas resultou em um sistema confiável, seguro e eficaz para monitorar e controlar o processo de revestimento de tubulação.

Dessa forma, o trabalho atingiu os objetivos propostos, demonstrando a viabilidade da solução desenvolvida e oferecendo uma base sólida para futuras melhorias e aplicações em ambientes industriais reais.

5 Considerações finais

O desenvolvimento deste trabalho permitiu a construção de uma planta automatizada para o revestimento interno de tubulações com poliuretano (PU), integrando aspectos de fabricação, modelagem tridimensional, programação em Ladder e supervisão por meio da plataforma Elipse E3. A metodologia aplicada possibilitou não apenas a representação fiel do processo físico, mas também a implementação de rotinas de controle e segurança que asseguram a confiabilidade do sistema.

A etapa de levantamento do processo de fabricação foi fundamental para compreender os requisitos técnicos do revestimento, como a preparação adequada da superfície, aplicação controlada do adesivo, preparação do polímero em condições específicas de temperatura e tempo de *pot life*, além da fundição e cura em centrífuga e estufa. Esses parâmetros forneceram a base para o desenvolvimento do modelo e das rotinas de automação.

A modelagem 3D desempenhou papel essencial ao permitir a visualização completa da planta, antecipando limitações físicas e propondo soluções como o uso do acoplamento Oldham, o dimensionamento da estufa e a concepção das esteiras com canais e pistões hidráulicos. Essa etapa garantiu maior realismo e embasamento para a programação subsequente.

Na programação em Ladder, os resultados mostraram a robustez da lógica implementada, com a criação de tipos de dados específicos, desenvolvimento de aproximadamente 20 POU's, uso de variáveis auxiliares e globais, além da validação automática de DN e comprimento. Essa estrutura modular assegurou flexibilidade e integração eficiente com o supervisor.

O sistema supervisor complementou o projeto ao oferecer uma interface clara e dinâmica para o operador. A implementação de telas de cadastro, tabela de peças, menu inicial e mensagens dinâmicas garantiu maior interação homem-máquina, enquanto os alertas críticos e o botão de emergência reforçaram a segurança operacional.

De forma integrada, o sistema desenvolvido demonstrou ser capaz de monitorar e controlar todas as etapas do processo de revestimento, desde o cadastro das peças até a cura final na estufa. Os testes realizados confirmaram que os objetivos propostos foram atingidos, assegurando segurança, confiabilidade e eficiência.

Entretanto, algumas limitações inerentes ao escopo do projeto devem ser reconhecidas, como a realização dos testes em ambiente simulado e a ausência de integração com banco de dados para registro histórico. Como perspectivas futuras, sugere-se:

- Implementação de recursos de monitoramento remoto via IoT;

- Integração com banco de dados para geração de relatórios e análise de desempenho;
- Testes em planta real para validação em condições industriais;
- Expansão do sistema para contemplar outros processos complementares da linha de produção.

Adicionalmente às perspectivas mencionadas, cabe ressaltar que, por se tratar de um projeto de caráter acadêmico e conceitual, a implementação prática da planta automatizada em ambiente industrial demandaria a incorporação de sistemas adicionais de segurança, confiabilidade e manutenção.

Durante a preparação deste trabalho, foi utilizada a ferramenta de inteligência artificial ChatGPT, desenvolvida pela OpenAI e Microsoft Copilot (versão 2026) como apoio na revisão textual, organização de ideias e esclarecimento conceitual. Todo o conteúdo gerado com auxílio da ferramenta foi posteriormente analisado, revisado e adaptado pelo autor, que assume integral responsabilidade pelo texto final apresentado.

Em síntese, este trabalho apresentou uma solução prática e segura para o revestimento de tubulações com poliuretano, demonstrando a viabilidade da automação industrial aplicada a processos complexos e oferecendo uma base sólida para futuras melhorias e aplicações em ambientes industriais reais.

Referências

- AKABANE, Getulio K. *Inovação, tecnologia e sustentabilidade: histórico, conceitos e aplicações*. REditora Saraiva, 2020. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788536532646/>. Citado 1 vez na página 24.
- AWANO, Carlos Miranda. *Preparação e caracterização de sílicas mesoporosas*. 2012. Dissertação (Mestrado em Física Aplicada) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/server/api/core/bitstreams/7f57b430-9a61-4722-89b0-6660d3d0abf5/content>. Acesso em: 17 out. 2025. Citado 1 vez na página 73.
- BERNARDO, Paulo Cheque; KON, Fabio. A Importância dos Testes Automatizados. *Engenharia de Software Magazine*, v. 1, n. 1, p. 7, 2008. Disponível em: https://www.academia.edu/61430105/A_import%C3%Aancia_dos_testes_automatizados. Citado 1 vez na página 26.
- BOLTON, William. *Automação Industrial*. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2006. Citado 1 vez na página 28.
- BOLTON, William. *Programmable Logic Controllers*. Elsevier, 2006. v. 4. Disponível em: <https://shop.elsevier.com/books/programmable-logic-controllers/bolton/978-0-7506-8112-4>. Citado 1 vez na página 24.
- BRAMBATTI, Marcel *et al.* A influência da automação em um processo de produção: estudo de caso na indústria moveleira. *Administração de Empresas Unicuritiba*, v. 1, n. 1, p. 24, fev. 2022. Disponível em: <https://revista.unicuritiba.edu.br/index.php/admrevista/article/view/5512>. Citado 1 vez na página 19.
- CHEMITAC – Soluções em Revestimentos Industriais. Chemitac. Disponível em: <https://chemitac.com/latam/>. Citado 3 vezes nas páginas 29, 30.
- CHEN, Ting-Hui; HUANG, Shuan-Yu. Melhoria da força centrífuga no método acionado pela gravidade para a fabricação de cristal coloidal altamente ordenado e com espessura submilimétrica. *Polymers*, v. 13, p. 10, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4360/13/5/692>. Citado 1 vez na página 73.
- CORRÊA, Douglas. *Mineração cresceu 6% no primeiro semestre do ano*. Agência Brasil. Jul. 2023. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/economia/noticia/2023-07/mineracao-cresceu-6-no-primeiro-semester-do-ano>. Citado 1 vez na página 18.
- TUBULAÇÃO revestida em poliuretano. Del Rey Minerals. Disponível em: <https://delreyminerals.com/tubulacao/>. Citado 1 vez na página 18.

FIGUEREDO, Aureo Emanuel Pasqualetto. Automação portuária e segurança no trabalho. *Escola Politécnica da Universidade de São Paulo*, v. 1, n. 1, p. 216, 2015. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3143/tde-22062016-080239/publico/AureoEmanuelPasqualettoFigueiredo_corrigida_2015.pdf. Citado 1 vez na página 26.

FOGLIATTO, Flávio Sanson. *Confiabilidade e Manutenção Industrial*. Grupo GEN, 2009. v. 10. Disponível em: https://web.archive.org/web/20221020024622id_/https://poisson.com.br/livros/individuais/Topicos_Engenharia_Civil/volume1/Topicos-especiais_de_Engenharia_Civil_Vol1.pdf#page=52. Citado 1 vez na página 18.

GABRIEL, João Carlos; AMARAL, Marcos Almeida do; CAMPOS, Gustavo Maciel de. Automação e robótica na construção civil. *Brazilian Technology Symposium*, n. 1, p. 7, 2018. Disponível em: <https://lcv.fee.unicamp.br/images/BTSym18/Papers/XX09.pdf>. Citado 1 vez na página 19.

GONÇALVES, Jordana Catarina Carvalho. Estudo da influência de nanotubos de carbono nas propriedades de revestimentos de poliuretano. *RepositoriUM Universidade do Minho*, n. 1, p. 11, 2013. Disponível em: <https://repositorium.uminho.pt/entities/publication/3e331692-fae7-48f5-b9b4-02676092fd42>. Citado 1 vez na página 18.

LANXESS. Lanxes. Disponível em: <https://lanxess.com>. Citado 7 vezes nas páginas 29, 31, 32, 73, 85.

PIPE. PIPE. Disponível em: <https://www.pipeest.com.br>. Citado 1 vez na página 35.

PONTICELLI, Claudiomar; SUSKI, Cássio Aurélio. O avanço do desenvolvimento de produtos através da engenharia reversa. *Revista da Unifebe*, v. 1, n. 1, p. 13, 2010. Disponível em: <https://periodicos.unifebe.edu.br/index.php/RevistaUnifebe/article/view/513>. Citado 1 vez na página 24.

RIBEIRO, Milena Hellen Damasceno; NETO, André Pedro Fernandes. O impacto da automação na indústria têxtil no município de Jaguaruana-CE. *Universidade Federal Rural do Semi-Árido*, n. 1, p. 12, ago. 2021. Disponível em: <https://repositorio.ufersa.edu.br/handle/prefix/6555>. Citado 1 vez na página 19.

SANTOS AREVALO, Fabrício dos. *Tópicos Especiais de Engenharia Civil*. Poisson, 2022. v. 1. Disponível em: [https://integrada.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788595154933/epubcfi/6/2\[%3Bvnd.vst.idref%3Dhtml-cover-page\]!/4/2/4%4051:2](https://integrada.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788595154933/epubcfi/6/2[%3Bvnd.vst.idref%3Dhtml-cover-page]!/4/2/4%4051:2). Citado 1 vez na página 19.

SESIRS. *Automação industrial: por que devo investir nessa área?* SENAI RS. Nov. 2018. Disponível em: <https://www.sesirs.org.br/industria-inteligente/automacao-industrial-por-que-devo-investir-nessa-area>. Citado 1 vez na página 18.

SILVEIRA, Paulo Rogério da; SANTOS, Winderson E. *Automação e Controle Discreto*. São Paulo: Érica, 2015. Citado 1 vez na página 28.

TROVATI, Graziella *et al.* Characterization of polyurethane resins by FTIR, TGA, and XRD. *Journal of Applied Polymer Science*, v. 115, n. 1, p. 268, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1002/app.31096>. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/app.31096>. Citado 1 vez na página 18.

FLANGES. Val Aço. Disponível em: https://www.valaco.com.br/produtos/prod_flanges.html. Citado 1 vez na página 36.

VILAR, Walter Dias. *Química e tecnologia dos poliuretanos*. Rhodia Solvay Group, 2010. v. 3. Disponível em: <https://poliuretanos.com.br/Capa/inicial.htm>. Citado 2 vezes nas páginas 25, 27.