



Projeto de máquina de slitting de fitas compósitas

ANTÓNIO MANUEL SALVADOR ALVES

outubro de 2024

Projeto de Máquina de *Slitting* de Fitas Compósitas

António Manuel Salvador Alves

**Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica, Área de Especialização em
Construções Mecânicas**

**Orientador: Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho
Coorientador: Fernando Daniel Ribeiro da Silva
Supervisor da empresa: Tiago Miguel Salvador Rodrigues**

Júri:

Presidente:

Púria Esfandiari

Vogais:

Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho

Ricardo Fernando Rodrigues Pinto

Porto, Setembro de 2024

Agradecimentos

Gostaria de agradecer ao meu orientador, Professor Doutor Raul Campilho, pela sua incrível disponibilidade e constante apoio ao longo deste trabalho. A sua orientação foi essencial para o progresso da dissertação.

Agradeço também a toda a equipa de automação da UMEC do INEGI, pelo apoio e partilha de conhecimentos durante o percurso, em especial aos Eng. Fernando Silva e Eng. Tiago Rodrigues, que sempre se mostraram disponíveis para esclarecer dúvidas e oferecer apoio.

Por fim, um agradecimento especial à minha família, pelo apoio constante e incentivo, fundamentais para a conclusão desta etapa.

Resumo

Esta dissertação foca-se no projeto e montagem de uma máquina de *slitting* para fitas compósitas de fibra de carbono com matrizes termoplásticas. O objetivo foi aplicar a um equipamento preliminar a funcionalidade de cortar fitas compósitas em larguras específicas, de modo a garantir a precisão e eficiência operacional. Para isso, começou-se por caracterizar o equipamento preliminar bem como a proposta de sistema de corte já existente. Depois, na fase de anteprojecto, foram apresentadas várias soluções construtivas dos componentes mecânicos, como o sistema de acoplamento das facas, o sistema de fixação do sensor ultrassónico e o sistema de guiamento das fitas. Ainda no anteprojecto, foram estabelecidos os princípios de funcionamento tanto do sistema eléctrico como do controlo da máquina. Na fase de projecto, foram desenvolvidos os dimensionamentos dos sistemas mecânicos e eléctricos, e elaborados os desenhos técnicos. O sistema eléctrico foi desenvolvido com medidas de segurança, incluindo circuitos de paragem de emergência e sistemas de barramento para garantir uma operação segura. Um sistema de controlo, com recurso a um controlador lógico programável (PLC), foi implementado para gerir a tensão e o alinhamento da fita, bem como o processo de corte. Foram realizados testes na máquina que validaram a sua funcionalidade no processo de *slitting*.

Palavras-chave: Máquina de *slitting*, compósitos de fibra de carbono, sistemas mecânicos, sistemas eléctricos, sistemas de controlo, sistemas de segurança, processamento de fitas.

Abstract

This dissertation focuses on the design and assembly of a slitting machine for carbon fiber-reinforced composite tapes with thermoplastic matrices. The objective was to adapt a preliminary machine to incorporate the functionality of cutting composite tapes into specific widths, ensuring precision and operational efficiency. The process began with the characterization of the preliminary equipment, as well as the evaluation of the existing cutting system proposal. During the conceptual design phase, several constructive solutions for the mechanical components were presented, such as the knife coupling system, the ultrasonic sensor mounting system, and the tape guiding system. Additionally, the operating principles of both the electrical system and machine control were established during this phase. In the detailed design stage, the mechanical and electrical systems were dimensioned, and technical drawings were prepared. The electrical system was developed with safety measures, including emergency stop circuits and busbar systems to ensure safe operation. A control system, using a programmable logic controller (PLC), was implemented to manage tape tension and alignment, as well as the cutting process. Tests were conducted on the machine, which validated its functionality in the slitting process.

Keywords: Slitting machine, carbon fiber composites, mechanical systems, electrical systems, control systems, safety systems, tape processing.

Índice

Agradecimentos	1
Resumo	3
Abstract	5
Índice	7
Lista de Figuras.....	11
Lista de Tabelas	15
Acrónimos e Símbolos.....	17
1. Introdução.....	1
1.1. Contextualização	1
1.2. Objetivos	1
1.3. Metodologia	2
1.4. Estrutura do Relatório	4
2. Revisão Bibliográfica	5
2.1. Materiais compósitos	5
2.1.1. Definição	5
2.1.2. Tipos de materiais compósitos	5
2.1.3. Tipos de matrizes e reforços	8
2.1.4. Processos de fabrico	9
2.1.5. Aplicações	13
2.1.6. Áreas de desenvolvimento atuais	14
2.2. Equipamentos para processamento de compósitos	15
2.2.1. Tipos de soluções e equipamentos	15
2.2.2. Programação de equipamentos	17
2.2.3. Fornecedores de equipamentos e características	18
2.2.4. Fundamentos do processo de <i>slitting</i>	18
2.2.5. Equipamentos de <i>slitting</i>	22
2.2.6. Estado da arte	24
3. Desenvolvimento do Projeto	25
3.1. Empresa de Acolhimento	25
3.2. Caracterização do sistema de <i>slitting</i>	26
3.3. Caracterização da proposta atual	28
3.3.1. Sistema de suporte de bobines.....	29
3.3.2. Estrutura	29
3.3.3. Sistema de Controlo.....	31

3.3.4. Sistema de correção dos desvios da fita	33
3.3.5. Sistema elétrico.....	34
3.4. Objetivos específicos do trabalho	35
3.5. Requisitos da empresa e limitações	35
3.6. Anteprojeto	35
3.6.1. Método da matriz de seleção	35
3.6.2. Sistema de acoplamento das facas	37
3.6.3. Sistema de fixação do sensor ultrassónico	44
3.6.4. Sistema de guiamento das fitas	47
3.6.5. Sistema de controlo	49
3.6.6. Sistema elétrico.....	56
3.7. Projeto	59
3.7.1. Equipamento final.....	59
3.7.2. Princípio de funcionamento.....	61
3.7.3. Sistema de acoplamento das facas	62
3.7.4. Sistema de fixação do sensor ultrassónico	70
3.7.5. Sistema de guiamento das fitas	75
3.7.6. Sistema de controlo	76
3.7.7. Sistema elétrico.....	84
3.7.8. Disposição de Rolos	90
3.7.9. Manual de operação	92
4. Integração e Validação.....	93
4.1.1. Integração dos sistemas no equipamento.....	93
4.1.2. Estabelecimento de protocolos de validação	96
4.1.3. Validação de funcionamento dos subsistemas.....	97
4.1.4. Validação de qualidade do produto final.....	103
4.1.5. Estudo económico e ROI	107
5. Conclusão	109
5.1. Conclusões finais.....	109
5.2. Limitações e trabalhos futuros.....	110
Referências.....	113
Declaração de Integridade	119
Apêndice A	121
Apêndice B	135
Apêndice C	139
Apêndice D	143
Apêndice E.....	171

Apêndice F..... 173

Apêndice G..... 219

Apêndice H..... 225

Lista de Figuras

Figura 1 - Esquema de classificação para os vários tipos de reforço dos compósitos [2]	6
Figura 2 -a) Reforço com partículas; b) Reforço com partículas achatadas; c) Reforço com fibras descontínuas; d) Reforço com fibras descontínuas [1].....	7
Figura 3 - Moldação manual [9].	11
Figura 4 - Moldação por projeção [10].	11
Figura 5 - Esquema de funcionamento de um AFP [19].....	13
Figura 6 - Esquema de funcionamento de um ATL [20].	13
Figura 7 - Lógica <i>Ladder</i>	17
Figura 8 - Esquema representativo do sistema de <i>slitting</i>	19
Figura 9 - Tipos de Facas: a) faca em disco; b) faca chanfrada; c) faca côncava.....	19
Figura 10 - Modos de funcionamento de um equipamento de <i>slitting</i> : a) Corte em modo reto; b) Corte em modo de <i>loop</i> livre.	20
Figura 11 -a) Esquema de representação de um rolo tensionador; b) esquema de representação de uma célula de carga [43].	21
Figura 12 - a) Defeito <i>starring</i> ; b) Defeito <i>telescoping</i> [45].	21
Figura 13 - Máquina de <i>slitting</i> FQ-320/450 [48].	23
Figura 14 - Equipamento de <i>slitting</i> Diamond T [49].	23
Figura 15 - Logótipo do INEGI [53].	25
Figura 16 - Conjunto facas, contrafacas e veios.....	26
Figura 17 - Estrutura do sistema de corte.....	27
Figura 18 - a) Sistema de corte; b) sistema de suporte da faca; c) contrafaca.	27
Figura 19 - Sistema de transmissão.	28
Figura 20 - Equipamento de rebobinagem.	28
Figura 21 - a) bloqueador; b) adaptador de diâmetro; c) suporte da bobine; d) veio/suporte da bobine; e) flange.	29
Figura 22 – Modelo 3D da estrutura do equipamento de <i>slitting</i>	30
Figura 23 - a) perfil utilizado nas travessas do sistema de corte; b) perfil utilizado nos reforços do armário; c) perfil utilizado na base da estrutura; d) cantoneiras utilizadas na base; e) cantoneiras utilizadas na estrutura.	30
Figura 24 - a) Motor; b) Redutor; c) <i>Drive</i> ; d) PLC.....	31
Figura 25 - a) <i>Program blocks</i> ; b) <i>Networks</i> do <i>main organizational block</i>	31
Figura 26 - ecrã HMI 7" da SIEMENS.....	32
Figura 27 - Equipamento de rebobinagem.	33
Figura 28 – Sistema de correção de desvios da fita: a) vista lateral; b) vista frontal.....	33
Figura 29 - a) rolo 1; b) rolos 2 e 3, vista lateral; c) rolos 2 e 3, vista frontal; d) rolo 4.	34
Figura 30 - Fluxograma do sistema elétrico.	34
Figura 31 – Solução 1: a) vista frontal; b) vista explodida.	37
Figura 32 - a) Suporte das facas; b) Suporte das contrafacas.	38
Figura 33 - Solução 2: a) vista frontal; b) vista explodida.	38
Figura 34 - Tubo roscado com dois casquilhos.	38

Figura 35 - Solução 3: a) posição das facas para corte de fitas de 150 mm; b) posição das facas para corte de fitas de 6,35 mm.....	39
Figura 36 - Peças a fabricar.	40
Figura 37 - a) Adaptador do suporte das facas; b) adaptador de uma contrafaca; c) adaptador de duas contrafacas.	40
Figura 38 - Solução 4: a) vista frontal; b) vista explodida.	41
Figura 39 - a) Adaptador para suporte das facas esquerdo; b) adaptador para suporte das facas direito; c) contrafaca maquinada.....	41
Figura 40 - Solução 5.	41
Figura 41 - Esquema de representação dos índices de importância (em %).	43
Figura 42 - Índices de desempenho das soluções.	44
Figura 43 - a) Modelo CAD da peça; b) modelo CAD da montagem da peça no sistema.	44
Figura 44 - a) Modelo CAD da peça; b) modelo CAD da montagem da peça no sistema.	44
Figura 45 - a) Modelo CAD do sistema em duas posições distintas, b) vista frontal do sistema.	45
Figura 46 - Modelo CAD do sistema de fixação.	45
Figura 47 - Gráfico circular dos índices de importância.	46
Figura 48 - Gráfico dos índices de desempenho.	47
Figura 49 - a) Vista isométrica do modelo CAD do sistema; b) Vista lateral do sistema.	48
Figura 50 - a) Vista isométrica do sistema; b) rolamento com ranhura em V.	48
Figura 51 - Variação da tensão na fita com a razão dos raios.....	50
Figura 52 - Esquema de funcionamento do equipamento.	50
Figura 53 - Variação do binário do servomotor correspondente à bobine de alimentação com a razão dos raios.	51
Figura 54 - Esquema de montagem do sistema de controlo.	53
Figura 55 - <i>Grafcet</i> do funcionamento do equipamento: a) definição do modo de funcionamento; b) passagem entre estados; c) ativação do modo de emergência.....	55
Figura 56 – Esquema do circuito com os componentes essenciais.	56
Figura 57 – Divisão do sistema elétrico pelos disjuntores.	57
Figura 58 – Esquema geral do sistema.....	58
Figura 59 – Elementos adicionais acrescentados ao sistema elétrico.	58
Figura 60 - Modelo CAD do equipamento final.	59
Figura 61 - Disposição dos rolos: a) montagem da fita em modo <i>slitting</i> ; b) montagem da fita em modo rebobinagem.	61
Figura 62 - a) Inserto para fixar os adaptadores no veio; b) Inserto para fixar os componentes.	62
Figura 63 - a) Suporte da fita; b) diâmetro externo da peça de 80 mm.	62
Figura 64 - Espessura dos batentes dos adaptadores modulares de 3,35 mm; b) espessura dos suportes de 12,7 mm.	63
Figura 65 - Esquema de funcionamento do sistema de <i>slitting</i>	63
Figura 66 – Representação esquemática das forças geradas no sistema de corte: a) esquema com facas e fita; b) ampliação para observação do esquema da distribuição de forças.	64
Figura 67 - Representação da área de corte [55].....	64

Figura 68 - a) Esquema de representação do sistema de corte; b) secção de corte.	64
Figura 69 - Esquema de representação da área de contacto entre a faca e o adaptador.....	67
Figura 70 - Zona crítica do adaptador 2.1.	67
Figura 71 – a) Cavidades dos incertos metálicos; b) zona de contacto entre a contrafaca e o adaptador.....	68
Figura 72 - a) Malha; b) parâmetros da malha.	68
Figura 73 - Distribuição de tensões equivalente de von Mises.....	68
Figura 74 - a) Peça em L integradora do sensor; b) Suporte do sensor.	70
Figura 75 - Posições do sensor no suporte: a) alinhada com a fita; b) mínima; c) máxima.....	70
Figura 76 - Inclinação do sensor: a) mínima; b) máxima.	71
Figura 77 - Diagrama de corpo livre do sistema.	71
Figura 78 - Ferramenta <i>Measure</i> do Solidworks: a) distância entre centro de massa do sensor e eixo; b) distância entre centro de massa da peça em L e eixo.	72
Figura 79 - Área de contacto entre a anilha e a peça em L.....	73
Figura 80 - Distância entre eixo do parafuso de fixação e eixo de rotação.	73
Figura 81 - Esquema de representação da força de compressão na peça em L.....	74
Figura 82 - a) modelo da peça de suporte fatiada, com um corte na zona de acoplamento do parafuso de fixação; b) esquema de representação da secção reta do furo de acoplamento do parafuso.	74
Figura 83 - Vista isométrica do sistema de guiamento.....	76
Figura 84 - Vista explodida do sistema de guiamento.	76
Figura 85 - Rede configurada no TIA Portal.	78
Figura 86 – a) <i>Drive</i> selecionado no software TIA Portal; b) telegramas adicionados aos <i>drives</i>	78
Figura 87 - Cálculo dos raios das bobines.	79
Figura 88 - Sequência de acionamento dos motores.....	79
Figura 89 - a) bloco de função de controlo de binário; b) bloco de função de controlo de velocidade.....	80
Figura 90 - a) cálculo da tensão real; b) cálculo da tensão máxima admissível; c) cálculo do binário da bobine 1.	81
Figura 91 - Lista de redes do bloco de função "Etapas".....	81
Figura 92 - a) ecrã inicial com parâmetros; b) ecrã de monitorização.	82
Figura 93 - Ecrã de visualização das referências dos erros.	83
Figura 94 - a) <i>Pop-up</i> de inserção de dados para acesso ao ecrã de administrador; b) ecrã do administrador.....	83
Figura 95 - a) sinalizadores de funcionamento dos servomotores; b) barras de progresso indicadoras da quantidade de material presente nas bobines; c) tensão real da fita, velocidade linear real da fita e LED sinalizador de erros; d) botão de alteração da língua..	84
Figura 96 - Tabela de dimensionamento de condutores elétricos [62].	86
Figura 97 - Sistema de aterramento: a) borne de aterramento; b) quadro elétrico.	87
Figura 98 - Fixação dos <i>drives</i>	87
Figura 99 – Quadro elétrico.	89
Figura 100 – Painel de controlo.	90

Figura 101 - Torre de sinalização.	90
Figura 102 - Disposição dos rolos: a) montagem da fita em modo <i>slitting</i> ; b) montagem da fita em modo rebobinagem.	91
Figura 103 - Fixação dos rolos.	91
Figura 104 – a) Montagem do servomotor; b) abertura na chapa para acoplamento do servomotor.	92
Figura 105 - a) Montagem do sistema de corte; b) abertura na chapa para acoplamento do sistema de corte.	92
Figura 106 - Acoplamento das facas ao veio.	93
Figura 107 - a) Manípulo do sistema de corte; b) acrílico de proteção.	94
Figura 108 - a) Sistema de fixação do sensor; b) Sistema de guiamento da fita.	94
Figura 109 - Quadro elétrico do equipamento.	94
Figura 110 - Porta Ethernet em utilização no equipamento.	95
Figura 111 - Fotografia da chapa maquinada.	95
Figura 112 - Fotografia do equipamento.	96
Figura 113 - Fotografia do sistema de corte.	96
Figura 114 - a) Configuração $\frac{1}{4}''$; b) configuração $\frac{1}{2}''$; c) configuração $1''$	98
Figura 115 - Medições entre as contrafacas com paquímetro: a) configuração $\frac{1}{4}''$; b) configuração $\frac{1}{2}''$; c) configuração $1''$	98
Figura 116 - Fotografias do corte da fita de pré-impregnado: a) perspectiva à entrada do sistema de corte; c) perspectiva de frente para o equipamento.	100
Figura 117 – a) Microscópio digital RS Pro; b) zona de aresta sem defeitos com ampliação de x50; c) zona de aresta sem defeitos com ampliação de x230.	100
Figura 118 - Exemplos de defeitos: a) defeito Tipo I; b) defeito Tipo II.	100
Figura 119 - a) Posição de altura máxima do sensor; b) posição de altura mínima do sensor.	101
Figura 120 - Instrumentos utilizados para a medição dos ângulos máximos do sistema de fixação do sensor: 1 – esquadro de precisão; 2 – transferidor; 3 – goniómetro; 4 – Sistema de fixação do sensor.	102
Figura 121 – Posição de inclinação máxima no sentido horário; b) Posição de inclinação máxima no sentido anti-horário.	102
Figura 122 - Posicionamento do sensor face à fita.	103
Figura 123 - Componentes utilizados no teste de validação do produto final.	103
Figura 124 - Fotografia do equipamento durante o teste de validação.	104
Figura 125 - Gráfico de variação de posição e largura da fita.	105
Figura 126 - Gráfico de variação da posição e largura da fita sem <i>outliers</i>	105
Figura 127 - a) logótipo da Autodesk; b) Workspace do Inventor da Autodesk [65].	123
Figura 128 - a) logótipo do SOLIDWORKS; b) Workspace do SOLIDWORKS CAD [67]	123
Figura 129 - a) logótipo do Ansys; b) Workspace do Ansys [66]	124
Figura 130 - a) modelo de elementos finitos; b) modelo de elementos finitos refinado [80].	129
Figura 131 - Distribuição de energia pelos elementos dum sistema automatizado [81]	131
Figura 132 - Esquema de um circuito fechado [81]	132
Figura 133 - Esquema de um circuito aberto [81].	132

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Tarefas do projeto	3
Tabela 2 - Características de reforços [6].....	8
Tabela 3 - Características de matrizes [7]	9
Tabela 4 - Símbolos da lógica Ladder.....	17
Tabela 5 Estado-da-arte de equipamentos de <i>slitting</i>	24
Tabela 6 - <i>Networks</i> do <i>main organizational block</i>	32
Tabela 7 - Componentes do sistema elétrico.....	34
Tabela 8 - Tabela de cálculo de índices de importância.	36
Tabela 9 - Exemplo de matriz de seleção.....	36
Tabela 10 - Índices de importância.	42
Tabela 11 - Matriz de seleção.	43
Tabela 12 - Cálculo dos índices de importância.....	46
Tabela 13 - Matriz de seleção.	47
Tabela 14 - Legenda dos <i>grafcets</i>	55
Tabela 15 - Tabela de resultados.	66
Tabela 16 - Propriedades mecânicas do PETG [57].....	67
Tabela 17 - Componentes de catálogo.	69
Tabela 18 - Elementos que provocam binário.	72
Tabela 19 - Componentes de catálogo para o sistema de fixação do sensor ultrassônico.	75
Tabela 20 - Lista de componentes do sistema de guiamento.....	76
Tabela 21 - Lista de IP's dos componentes.	78
Tabela 22 - Dimensionamento da fonte de alimentação.....	85
Tabela 23 - Cálculo da corrente total e da potência total do equipamento.....	85
Tabela 24 - Secções retas dos cabos do equipamento de rebobinagem.....	86
Tabela 25 - Resultados das medições.	98
Tabela 26 - Média, valor mínimo e máximo, desvio absoluto, valor de referência e desvio máximo em relação à média das medições.....	99
Tabela 27 - Número de defeitos nas arestas de corte.	101
Tabela 28 - Parâmetros da operação.	104
Tabela 29 - Média, valor mínimo, valor máximo e desvio absoluto das medições.	106
Tabela 30 - Custo do equipamento de <i>slitting</i>	107
Tabela 31 – Materiais mais utilizados em projeto mecânico [2, 69-74]	124
Tabela 32 - Processos de fabrico utilizados em projeto mecânico [75, 76].....	128
Tabela 33 - Estado-da-arte de projeto de equipamentos mecânicos.....	133
Tabela 34 - Fornecedores de equipamentos de processamento de compósitos	135
Tabela 35 - Estratégias de controlo de tensão.....	136
Tabela 36 - Avaliação das soluções construtivas do sistema de acoplamento de facas.....	139
Tabela 37 - Avaliação das soluções construtivas do sistema de fixação do sensor.....	141

Acrónimos e Símbolos

Lista de Acrónimos

ABS	<i>Acrylonitrile Butadine Styrene</i>
AFP	<i>Automated fiber placement</i>
ATL	<i>Automated tape placement</i>
CAD	<i>Compute aided design</i>
CAE	<i>Computer aided engineering</i>
CAM	<i>Computer aided manufacturing</i>
CFRTPC	<i>Continuous fiber reinforced thermoplastic</i>
CPU	<i>Central processing unit</i>
HMI	<i>Human machine interface</i>
INEGI	Instituto de Ciências e Inovação em Engenharia Mecânica e Gestão Industrial
ISEP	Instituto Superior de Engenharia do Porto
MEF	Método de elementos finitos
P.Porto	Politécnico do Porto
PETG	<i>Polyethylene Terephthalate Glycol-modified</i>
PLA	<i>Polylactic Acid</i>
PLC	<i>Programmable logic controller</i>
ROI	<i>Return on investment</i>
RTM	<i>Resin transfer moulding</i>
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>
TIA	<i>Totally integrated automation</i>
VARTM	<i>Vacuum assisted resin transfer moulding</i>

Lista de Símbolos

ρ	densidade	kg/cm ³
m	massa	kg
σ	tensão	Pa
τ	tensão de corte	Pa
B	Binário	N·m
F	Força	N
ω	Velocidade angular	Rad/s
v	velocidade	m/s

r	raio	m
T	Tensão da fita	N/m

1. Introdução

1.1. Contextualização

As máquinas de *slitting* são utilizadas para ajustar a largura de fitas ou filmes plásticos, de papel ou materiais compósitos enrolados em bobines. Estas máquinas desenrolam a fita, realizam o corte longitudinal e rebobinam a fita com a largura corrigida. São amplamente utilizadas na indústria quando é fundamental garantir que as fitas tenham a largura exata para a aplicação final. Atualmente, o INEGI subcontrata uma empresa externa para realizar o corte de fitas compósitas, o que aumenta os custos e prolonga os prazos de entrega, impactando negativamente a eficiência dos processos. Nesta dissertação é apresentado um projeto mecânico e elétrico, juntamente com o desenvolvimento e integração de um sistema de monitorização e controlo, de uma máquina de *slitting* utilizada no laboratório de compósitos do Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial (INEGI). O interesse da tese reside na criação de um equipamento próprio para o corte de fitas compósitas de fibras de carbono e matriz termoplástica, de modo a eliminar a dependência de serviços externos. Máquinas como as de deposição automática de fibras AFP (*Automated Fibre Placement*) e deposição de fitas ATL (*Automated Tape Laying*) utilizam fitas de diferentes larguras, que variam de acordo com a geometria das peças a produzir. A capacidade de ajustar internamente a largura das fitas permite uma maior flexibilidade e precisão na produção. Os benefícios do projeto são reduzir custos e tempos de espera associados à subcontratação, o permitir um maior controlo sobre o processo de fabricação, com aumento da eficiência e redução de desperdícios. A necessidade de cortar as fitas resulta dos custos mais elevados de adquirir diretamente do fornecedor fitas com as larguras exatas para cada aplicação, tornando a implementação de uma máquina de *slitting* no INEGI uma solução vantajosa e estratégica.

1.2. Objetivos

O principal objetivo desta dissertação é desenvolver e montar um equipamento de *slitting* automatizado para o corte de fitas compósitas de fibras de carbono e matriz termoplástica, destinado ao laboratório de compósitos do INEGI. Este sistema oferece a possibilidade de realizar cortes precisos, de modo a ajustar a largura das fitas conforme as exigências dos processos de fabrico, como as máquinas AFP ou ATL.

Entre os objetivos específicos, destaca-se o desenvolvimento do projeto mecânico do equipamento, com a capacidade de ajustar as fitas a diferentes larguras, garantindo uma

tolerância de $\pm 0,3$ mm, em conformidade com as necessidades das aplicações. Outro objetivo fundamental é o projeto do sistema elétrico e de automação do equipamento, assegurando o cumprimento das normas de segurança e a criação de um sistema de controle eficiente que permita o funcionamento contínuo e preciso da máquina. A programação do sistema de monitorização e controle também é um ponto central, com o objetivo de garantir que o processo de corte ocorra de forma segura, precisa e eficiente. O desenvolvimento de uma interface intuitiva, que permita monitorizar o sistema em tempo real, constitui outro objetivo essencial deste trabalho. Por fim, está prevista a realização de testes para validar o desempenho dos sistemas desenvolvidos, de modo a garantir que equipamento esteja totalmente operacional e pronto a ser utilizado no laboratório.

1.3. Metodologia

A dissertação iniciou-se com uma revisão bibliográfica abrangente. Por meio da pesquisa de livros e artigos especializados em temas pertinentes ao projeto, foi possível compilar um capítulo com informações essenciais para o desenvolvimento do equipamento.

Após estas fases, o desenvolvimento da dissertação foi dividido em 6 atividades:

1. Especificações do equipamento de *slitting*.

A atividade 1 foi a fase de levantamento das informações gerais acerca do projeto, bem como a análise do conceito já existente;

2. Projeto do sistema de corte;

A atividade 2 consiste no projeto mecânico do sistema de corte. Foi analisado também o projeto já existente, e finalizado com os sistemas em falta.

3. Projetos mecânico e elétrico do equipamento;

A atividade 3 trata-se do desenvolvimento e finalização do projeto mecânico do equipamento em geral e não apenas no sistema de corte, bem como a elaboração do projeto elétrico.

4. Integração, Programação e Controle;

A atividade 4 diz respeito à montagem de todos os sistemas, mecânicos e elétricos, do equipamento, e desenvolvimento do controle dos mesmos. A programação da máquina e a montagem do sistema de controle e ligação à rede IIoT foram desenvolvidos nesta fase.

5. Validação experimental;

A atividade 5 é referente aos testes do equipamento. Nesta fase, os sistemas são afinados, e o equipamento, bem como o produto, são validados.

6. Revisão bibliográfica e escrita.

A atividade 6 é uma tarefa contínua, e refere-se à escrita da dissertação ao longo do projeto.

Na Tabela 1 observam-se as tarefas realizadas ao longo do projeto. Esta foi retirada do gráfico de Gantt utilizado no desenrolar do trabalho para controlo de execução do mesmo.

Tabela 1 - Tarefas do projeto

ID	Tarefas
A1	Especificações do equipamento de <i>slitting</i>
T1.1	Análise do conceito de funcionamento previsto
T1.2	Identificação de requisitos de funcionamento
T1.3	Definição de especificações gerais de projeto
T1.4	Levantamento de <i>stock</i> de componentes e equipamentos existentes
T1.5	Plano de execução preliminar (projeto, montagem e programação)
T1.6	Definição de protocolos de validação
A2	Projeto do sistema de corte
T2.1	Avaliação e ajuste do conceito de funcionamento
T2.2	Identificação de soluções complementares (fixação das facas)
T2.3	Projeto mecânico
T2.4	Montagem de protótipo para prova de conceito
T2.5	Fabrico e/ou aquisição de componentes
A3	Projetos mecânico e elétrico do equipamento
T3.1	Avaliação e ajuste dos projetos preliminares
T3.2	Análise de risco e identificação de medidas de segurança
T3.3	Projetos mecânico e elétrico
T3.4	Montagem de protótipos para prova de conceitos
T3.5	Fabrico e/ou aquisição de componentes
A4	Integração, programação e controlo
T4.1	Montagem mecânica dos sistemas
T4.2	Montagem elétrica
T4.3	Programação (controlo +HMI)
T4.4	Escrita do manual de utilizador
A5	Validação experimental
T5.1	Afinação inicial dos sistemas
T5.2	Testes preliminares de funcionamento
T5.3	<i>Slitting</i> de fitas compósitas
T5.4	Protocolos de validação do produto
T5.5	Análise de resultados
A6	Revisão bibliográfica e escrita
T6.1	Estado da arte da tecnologia
T6.2	Escrita
T6.3	Revisão do documento

1.4. Estrutura do Relatório

O presente relatório está organizado em cinco capítulos principais: Introdução, Revisão Bibliográfica, Métodos e Aplicação, Integração e Validação, e Conclusão.

O primeiro capítulo é exclusivamente dedicado à introdução, abrangendo a Contextualização, os Objetivos, a Metodologia, a Estrutura do Relatório e uma breve apresentação da empresa de acolhimento.

No segundo capítulo, subdividido em três partes principais, são abordados os temas Materiais Compósitos, Projeto de Equipamentos Mecânicos e Equipamentos para Processamento de Compósitos. O primeiro subcapítulo inclui seis divisões, o segundo é composto por sete subdivisões e o último por três.

O terceiro capítulo contém seis subcapítulos, nos quais se avalia o conceito de funcionamento do sistema de corte existente no subcapítulo Caracterização do sistema de *slitting*, bem como o equipamento que integra o sistema de *slitting* no subcapítulo Caracterização da proposta atual. Seguem-se os capítulos Objetivos específicos do trabalho e “Requisitos da empresa e limitações” e o capítulo finaliza com os subcapítulos de Anteprojeto e Projeto.

O quarto capítulo trata da integração dos sistemas no equipamento e da respetiva validação. Este encontra-se dividido em quatro subcapítulos: Integração dos sistemas no equipamento, Estabelecimento de protocolos de validação, Validação de funcionamento dos subsistemas, Validação de qualidade do produto final, e Estudo económico e ROI.

O quinto capítulo diz respeito às conclusões e propostas de trabalhos futuros com os subcapítulos Conclusões finais e “Limitações e trabalhos futuros.

2. Revisão Bibliográfica

2.1. Materiais compósitos

Os materiais compósitos são um tipo de materiais que têm vindo a ser explorados cada vez mais em diferentes ramos. Este subcapítulo começa por definir o termo “materiais compósitos” e explica as suas diferentes classificações. De seguida, aborda os diferentes constituintes de um material compósito e apresenta as principais características de cada um. Os processos de fabrico de materiais compósitos são variados, e neste subcapítulo são abordados os mais relevantes na indústria. Como referido anteriormente, os materiais compósitos estão em crescimento nos diferentes ramos de aplicação. Como tal, são abordados quais os ramos de aplicação principais, e as áreas de maior desenvolvimento desta temática.

2.1.1. Definição

Por definição, um material compósito é um material resultante da mistura heterogénea e macroscópica de dois componentes com propriedades complementares, de modo a obter um material com propriedades mecânicas combinadas melhores [1]. Este conceito permite projetar uma grande variedade de materiais com diferentes propriedades [2]. Geralmente, um material compósito é constituído pelo reforço (fibras ou partículas) envolvido numa matriz (polimérica, metálica ou cerâmica). A matriz mantém o reforço e a forma desejada, enquanto o reforço melhora as propriedades mecânicas da matriz [1].

A prática de utilizar fibras de reforço para melhorar propriedades de um material remonta a 2181 a.C., quando os egípcios empregavam camadas de linho ou papiro embebidas em gesso [3]. Este conceito é utilizado em vários setores como na construção civil, onde varões de aço são utilizados para reforçar betão, resultando em betão armado. Contudo, os compósitos de elevado desempenho são mais prevalentes nos setores náutico, aeroespacial ou automóvel [2].

2.1.2. Tipos de materiais compósitos

Tendo em conta que os materiais compósitos podem ser diversificados, existem classificações referentes tanto à natureza da matriz, como do reforço. Segundo Reddy [1], existem dois níveis de classificação:

- O primeiro nível é referente aos constituintes da matriz. As maiores classes incluem compósitos de matriz orgânica, compósitos de matriz metálica e compósitos de matriz

cerâmica. Os compósitos de matriz orgânica incluem os compósitos de matriz polimérica e de matriz de carbono. Dentro dos compósitos de matriz polimérica, distinguem-se os compósitos de matriz termoplástica e de matriz termoendurecível. Estas matrizes distinguem-se principalmente pelo seu comportamento a altas temperaturas. Um polímero termoplástico passa por um processo de amolecimento e solidificação ao ser exposto a temperaturas elevadas e à temperatura ambiente, respetivamente. Por outro lado, um polímero termoendurecível, após o processo de cura, mantém-se solidificado mesmo quando exposto a altas temperaturas [2];

- O segundo nível de classificação diz respeito ao tipo de geometria do reforço presente no compósito. Este pode ser reforçado com fibras, partículas ou laminados [1]. Callister, Jr. [2] empregou o esquema ilustrado na Figura 1 para representar os diferentes tipos de compósitos.

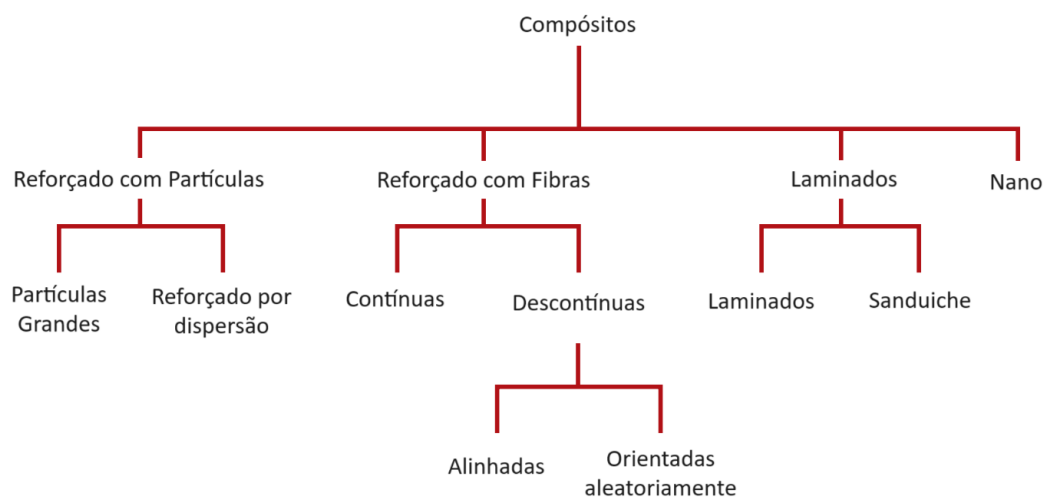


Figura 1 - Esquema de classificação para os vários tipos de reforço dos compósitos [2]

Os compósitos reforçados com partículas são divididos em compósitos reforçados com partículas de grandes dimensões e reforçados por dispersão. Reddy [1] distingue também entre os compósitos reforçados por partículas, os reforçados por partículas com formato achatado. As partículas de reforço limitam o deslocamento da matriz nas imediações de cada partícula e como tal, quando é aplicada uma carga ao material compósito, a matriz transfere parte dessa carga para as partículas de reforço [2]. Um exemplo deste tipo de compósito é o betão, constituído por cimento, areia e água.

As fibras de reforço dos compósitos podem ser contínuas ou descontínuas. No caso dos compósitos de fibra contínua, o módulo de elasticidade do compósito não aumenta com o aumento adicional no comprimento das fibras. Por outro lado, os compósitos de fibra descontínua variam as suas propriedades consoante o comprimento da fibra [1].

Na Figura 2 é possível observar esquemas dos reforços com partículas e dos reforços com fibras.

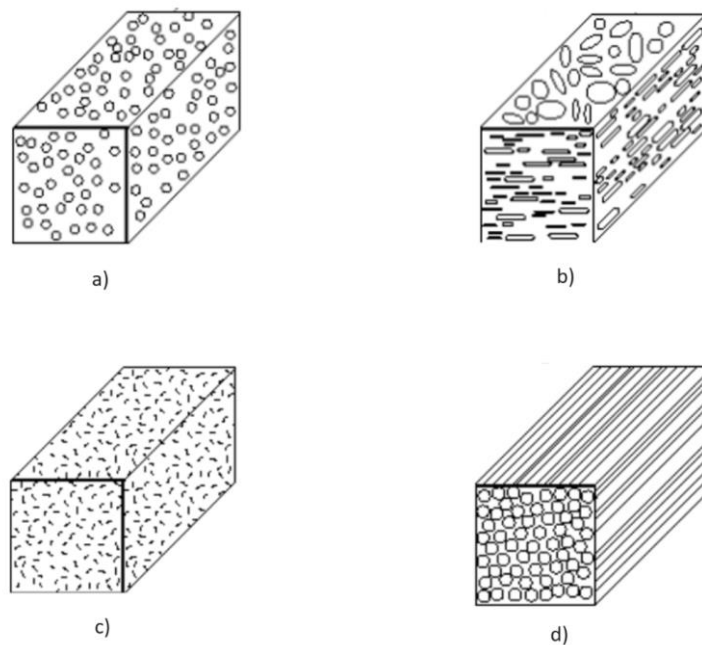


Figura 2 -a) Reforço com partículas; b) Reforço com partículas achatadas; c) Reforço com fibras descontínuas; d) Reforço com fibras descontínuas [1]

Os compósitos estruturais são constituídos por camadas, incluindo os laminados e os compósitos em sanduiche. Os reforços estão disponíveis no mercado em várias formas diferentes:

- As fibras contínuas enroladas em bobines são produzidas ao unir várias fibras entre si até atingir a relação entre peso e comprimento de filamento pretendida, e posteriormente envolvido numa bobine para armazenamento. Estas fibras são comumente utilizadas em processos como pultrusão e enrolamento filamentar e no fabrico de pré-impregnados [4];
- As mantas são produzidas comprimindo várias fibras em orientações aleatórias. As mantas podem ser de três tipos: manta de filamentos cortados, manta de filamentos contínuos e *veil* ou manta de acabamento. As mantas de filamentos cortados têm fibras com comprimentos entre 25 e 50 mm, que são comprimidos num plano horizontal e unidas com um adesivo próprio. As mantas de filamentos contínuos apresentam fibras compridas unidas entre si num plano horizontal por entrelaçamento. Por fim, as mantas de acabamento são mantas muito finas, também constituídas por fibras contínuas. No entanto, estas são aplicadas somente na superfície do compósito, de modo a minimizar a visibilidade da transição do reforço principal para a superfície do compósito, resultando numa superfície com acabamento com menor rugosidade. É comumente utilizada no processo de moldação manual [4];
- Os tecidos são constituídos por fibras contínuas unidas com operações têxteis padrão. Existem vários padrões de tecelagem possíveis, e as orientações das fibras são definidas consoante as propriedades mecânicas necessárias para o reforço. Podem ser 2D, se todas as fibras estiverem orientadas num plano horizontal, ou 3D, se existirem fibras orientadas na direção da espessura [5].

2.1.3. Tipos de matrizes e reforços

Existem vários materiais que constituem as matrizes e os reforços. Na Tabela 2 e na Tabela 3 é possível observar a tensão de rotura, a densidade, o módulo de Young e as principais características de alguns reforços e matrizes representativos na indústria, respetivamente.

Tabela 2 - Características de reforços [6]

Reforços	Tensão de rotura (GPa)	Densidade (g/cm ³)	Módulo de Young (GPa)	Principais características
Vidro E ^(a)	3,45	2,54	72,4	- Baixa rigidez; - Resistência moderada; - Baixo custo; - Elevada resistência à corrosão; - Tenacidade elevada.
Vidro S ^(a)	4,58	2,49	86,2	
Carbono HS, T300 ^(b)	3,54	1,74	230	- Elevada rigidez; - Boa proporção entre resistência e densidade; - Custo elevado.
Carbono AS4 ^(b)	4,00	1,80	228	
Carbono IM7 ^(b)	5,41	1,80	276	
Carbono GY80 ^(b)	1,86	1,96	572	
Boro	3,44	2,60	407	- Elevada rigidez; - Custo muito elevado;
Kevlar 49 ^(c)	3,62	1,44	130	- Elevada resistência à tração; - Baixa resistência à compressão.

(a)- Fibra de vidro; (b) Fibra de Carbono; (c) Fibra de aramida

Tabela 3 - Características de matrizes [7]

Matrizes	Tensão de rotura (MPa)	Densidade (g/cm ³)	Módulo de Young (GPa)	Principais características
Epóxida	50 – 110	1,2 – 1,4	2,5 – 5,0	- Boa versatilidade; - Baixa contração; - Elevada toxicidade.
Fenólica	35 – 60	1,2 – 1,4	2,7 – 4,1	- Baixa toxicidade; - Resistência a temperaturas elevadas; - Boa resistência ao desgaste; - Boa resistência à corrosão química.
Poliéster	35 – 95	1,1 – 1,4	1,6 – 4,1	- Baixo custo; - Excelente resistência à corrosão.
Poliamida	55 – 90	1,1	1,3 – 3,5	- Bom acabamento superficial; - Boa lubrificação; - Absorve humidade e compromete as propriedades e a estabilidade dimensional da peça.
PEEK	100	1,3 – 1,35	3,5 – 4,4	- Custo muito elevado; - Resistência a altas temperaturas; - Elevada tenacidade.
PPS	80	1,3 – 1,4	3,4	- Resistência a elevadas temperaturas; - Boa resistência à corrosão química.

2.1.4. Processos de fabrico

Atualmente, existem vários métodos para fabricar compósitos. Alguns métodos foram adaptados (como a moldação por injeção, por exemplo), mas muitos foram desenvolvidos para atender a desafios específicos de design ou fabrico com estes materiais. A escolha do processo depende das instalações disponíveis, da aplicação do compósito, do tipo de compósito, dos materiais aplicados, do design da peça, volume de produção e do orçamento financeiro. Como por vezes existe a necessidade de produzir compósitos com geometrias específicas, alguns métodos exigem moldes mais complexos para dar forma ao reforço e à matriz no formato final pretendido [1, 8].

A maioria dos processos de fabrico de compósitos têm o conceito de montagem em comum, montar o reforço na forma pretendida e adicionar a matriz, de modo a garantir que exista uma boa penetração da matriz no reforço. Após este processo, segue-se o processo de cura (solidificação da matriz), que pode ser realizado através de vários métodos. O método mais básico consiste na cura da matriz à temperatura ambiente. Porém, é possível acelerar a cura aplicando calor, geralmente com um forno. Muitos compósitos com matriz termoendurecível de alto desempenho requerem calor e alta pressão de consolidação para realizar a cura. Para isto, são utilizados equipamentos chamados autoclaves, que possuem sistemas computadorizados que controlam a temperatura, a pressão, o vácuo e a atmosfera no interior da câmara. Este equipamento permite assim a supervisão não assistida e/ou remota do processo de cura e maximizam a eficiência da técnica. A cura por feixe de eletrões (*E-beam*) tem sido explorada como um método eficiente para laminados finos. Na cura por *E-beam*, a matriz e o reforço são expostos a um fluxo de eletrões que fornece radiação ionizante, provocando a polimerização e reticulação em resinas sensíveis à radiação. A cura por ultravioleta (UV), envolve o uso de radiação UV para ativar um fotoiniciador adicionado a uma resina termoendurecível, que, quando ativado, inicia uma reação de reticulação. A cura por UV requer resina e reforços permeáveis à luz [1].

De seguida, serão discriminados os processos de fabrico mais relevante da indústria utilizados para produzir compósitos, as suas características, vantagens e desvantagens.

Técnicas em molde aberto

A moldação manual e a moldação por projeção são consideradas técnicas em molde aberto. Nestes processos, o acabamento de uma das superfícies fica sempre comprometido, e a emissão de produtos voláteis, nocivos à saúde, resultante das resinas de poliéster, apresentam-se como desvantagens. Por outro lado, a possibilidade de realizar componentes de grandes dimensões e de geometria complexa, devido à pressão exercida ser reduzida ou inexistente [5], e o baixo custo de produção, são vantagens da utilização de processos em molde aberto.

A moldação manual é o método mais simples e tradicional para fabricar compósitos. Inicialmente, fibras secas na forma de tecido ou malha são colocadas manualmente no molde, e um pincel é usado para aplicar a matriz de resina no material de reforço. Posteriormente, são usados rolos no compósito húmido, de modo a garantir uma boa penetração da matriz no reforço, facilitar uma distribuição uniforme da resina e obter a espessura do laminado pretendida. Por fim, os laminados são deixados para curar em condições atmosféricas padrão. Geralmente, este processo é dividido em quatro etapas: preparação do molde, aplicação de *gelcoat*, moldação manual e cura. O *gelcoat* é utilizado inicialmente na superfície do molde para obter uma superfície do produto de alta qualidade [9]. Na Figura 3 está esquematizado o processo de moldação manual.

Na moldação por projeção, a fibra de reforço e a resina são manualmente pulverizadas no molde usando uma pistola de projeção, que corta fibras contínuas em comprimentos curtos, e as projeta diretamente na corrente de resina pulverizada, de modo que ambos os materiais sejam aplicados simultaneamente [1]. Na Figura 4 é possível observar um esquema ilustrativo

da moldação por projeção. Este método, apesar de resultar em peças com piores características mecânicas, é uma técnica mais rápida e prática comparativamente à moldação manual [5, 8].

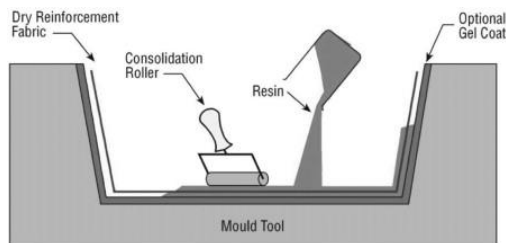


Figura 3 - Moldação manual [9].

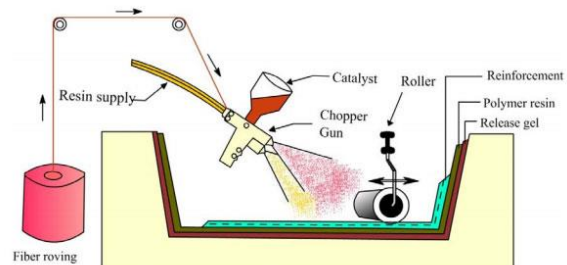


Figura 4 - Moldação por projeção [10].

O processo de pultrusão termoplástica utiliza reforços longitudinais de fibras de vidro, carbono ou aramida, que são conduzidos para o bloco de matriz aquecida, onde o polímero é derretido em conjunto com as fibras de reforço e o compósito assume a forma desejada. Na etapa final, o perfil é cortado em secções com comprimentos requeridos [5, 11]. A pultrusão resulta em peças com rugosidades baixas, que geralmente não requerem pós-processamento. Este processo permite fabricar uma ampla variedade de perfis contínuos, consistentes, sólidos e ocos, e o processo pode ser personalizado para se adequar a aplicações específicas [1].

O enrolamento filamental é utilizado na produção de peças em material compósito com simetria axial. Alguns exemplos de peças produzidas por este método são os tubos e peças cilíndricas (como varas de tacos de golfe, eixos de veículos automóveis e estruturas de espaçonaves). Neste processo, o reforço é constituído por fibras contínuas impregnadas em resina que são enroladas em torno de um mandril rotativo de modo a criar uma disposição específica [8]. O design do enrolamento é o passo mais crítico deste processo, pois influencia diretamente o processamento de fabrico (orientação e trajetórias geodésicas das fibras) e as propriedades mecânicas do produto final [12]. O enrolamento filamental é um método contínuo de fabrico que pode ser altamente automatizado, e apresenta custos de material relativamente baixos [1].

Técnicas em molde fechado

Os processos de infusão de resina são as técnicas de utilização mais comuns na indústria para a produção de peças compósitas de grandes dimensões [13]. Estas técnicas são consideradas técnicas em molde fechado e utilizam pressão para conduzir a resina para o interior de um laminado. O reforço é colocado a seco no molde e a resina é introduzida posteriormente através de tubos posicionadas estrategicamente para conduzir a resina por toda a peça de forma homogênea [13].

RTM (Resin Transfer Moulding) é um exemplo de processo de infusão de resina. Este processo consiste num processo de três etapas que envolve colocar uma pré-forma de fibra numa cavidade de um molde, injetar resina polimérica com baixa viscosidade e a baixas pressões no molde e, posteriormente, curar a resina para produzir uma peça de material compósito [8, 13]. Existem várias vantagens associadas a esta técnica, tais como os custos do processo inferiores

ao de utilização de pré-impregnados; a possibilidade de armazenar os materiais à temperatura ambiente; fabrico de peças com geometrias complexas de forma bastante precisa e com acabamento superficial com elevado detalhe e a redução significativa dos tempos de ciclo [1].

Vacuum assisted resin transfer molding (VARTM), ou a moldação a vácuo, é também um processo com infusão de resina. Neste processo, a diferença de pressões é criada aplicando vácuo no molde, ao contrário do RTM, em que a pressão é exercida na resina para ser injetada no molde [1]. As vantagens da moldação a vácuo são muito semelhantes às do RTM. O processo VARTM permite evitar o "race-tracking" (trajeto irregular) da resina ao longo das bordas do molde, o que impede padrões de fluxo que levam a defeitos, como poros [14].

A moldação por compressão pode ser feita a frio ou a quente, dependendo da necessidade de pré-aquecimento dos moldes utilizados [5]. Esta necessidade advém de fatores como a natureza da matriz ou a precisão dimensional da peça a produzir. Os processos de moldação por compressão oferecem um alto grau de automação, tempos de ciclo curtos, boa reprodutibilidade e excelente estabilidade dimensional tanto para termoplásticos quanto para termoendurecíveis, o que justifica diversas aplicações em vários setores industriais, incluindo a indústria automóvel [15]. A grande diferença entre a compressão a quente e a frio são as temperaturas e pressões atingidas pelos equipamentos durante os ciclos. Como os moldes de compressão a quente são sujeitos a elevadas temperaturas, estes são geralmente de metal. Os moldes de compressão a frio podem ser de um material compósito de matriz termoendurecível, logo de custos inferiores aos metálicos. Para além disto, a moldação por compressão a frio tem tempos de ciclo superiores, e o acabamento das superfícies e a precisão dimensional apresentam menos rigor do que os observados para a moldação por compressão a quente [5].

A moldação por injeção é um processo rápido, de alto volume, baixa pressão e fechado. Este método é mais utilizado em compósitos de matriz termoplástica, como nylon com fibra de vidro. Neste processo de fabrico, os compósitos são comprimidos num molde e, em seguida, a resina é injetada através dos poros incorporados dentro do molde [8]. Os tempos de injeção são tipicamente de 1 a 5 segundos, e permite produzir até 2000 peças pequenas por hora em moldes de cavidade múltipla [1].

Processos Automatizados

O AFP (automated fibre placement) (Figura 5) é um processo automatizado em que feixes de fibras de carbono pré-impregnadas são aplicadas na superfície de um molde para o fabrico de materiais compósitos [16]. O processo é realizado por um dispositivo de colocação robótica controlado numericamente e articulado para dispensar, aplicar, cortar e reiniciar o processo simultaneamente até 32 feixes de fibras. Os dispositivos de colocação de fibras podem ser acoplados a um pórtico de 5 eixos, adaptados para um enrolador de filamentos ou fornecidos como um sistema personalizado completo [1]. Apesar do elevado custo do equipamento, este processo apresenta vantagens como a maior taxa de produção e o menor desperdício de material [3].

O ATL (automated tape laying) (Figura 6) é um processo muito parecido com o AFP. Porém em vez de utilizar feixes individuais de fibras, este equipamento dispensa fitas contínuas unidirecionais de pré-impregnado com larguras tipicamente entre 75 e 300 milímetros [17, 18].

A largura adequada da fita está relacionada com a geometria da superfície de molde. Se a superfície apresentar curvaturas maiores, deve-se optar por fitas com largura inferior. O ATL é especialmente utilizado no fabrico de superfícies quase planas ou quase cilíndricas [18] como revestimentos de asas de aeronaves ou painéis planos. Esta técnica de processamento de compósitos tem uma taxa de produção maior relativamente à AFP devido à maior deposição de material em distâncias mais longas [1].

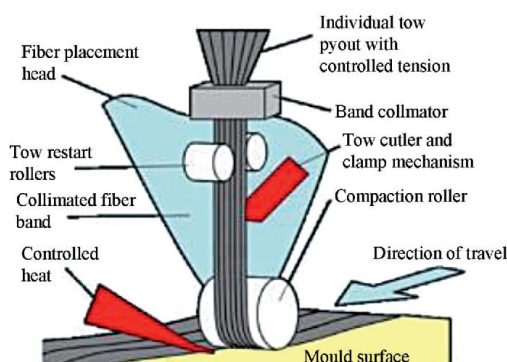


Figura 5 - Esquema de funcionamento de um AFP [19].

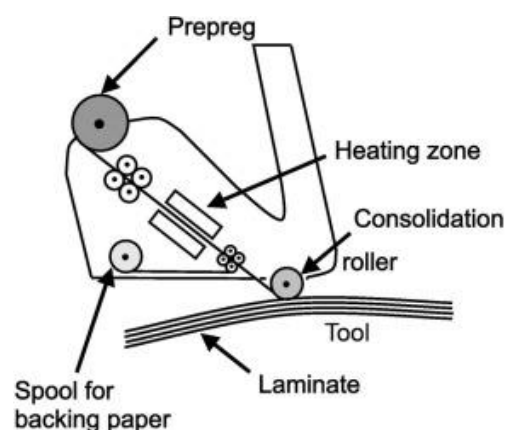


Figura 6 - Esquema de funcionamento de um ATL [20].

2.1.5. Aplicações

As propriedades mecânicas elevadas e a densidade reduzida são características que, evidentemente, tornam atrativa a utilização de materiais compósitos nos mais diversos setores [21].

O setor aeronáutico é um setor que exige contínuos esforços para melhorar o desempenho de aeronaves comerciais e militares, o que impulsiona o desenvolvimento de materiais estruturais com desempenho superior. Os materiais compósitos são particularmente atrativos para aplicações na aviação e no setor aeroespacial devido às suas elevadas propriedades mecânicas e densidade reduzida. Cada vez mais se utilizam compósitos de matriz polimérica, reforçados com fibras de aramida, boro e especialmente carbono. Estes materiais são usados nas estruturas da cauda, revestimento das asas, montantes e secção central da asa no Airbus 350 e Boeing 787, por exemplo [5, 22, 23].

No caso da indústria automóvel, as limitações económicas são mais significativas quando comparadas com as observadas na indústria aeronáutica. Como tal, a utilização de materiais compósitos de alto desempenho é considerada dispendiosa, tanto do ponto de vista dos materiais como do seu fabrico. Assim, os compósitos de matriz de poliéster e reforço em fibra de vidro, por apresentarem custos mais baixos, são os mais utilizados neste setor [24]. Um dos primeiros passos na implementação de compósitos no setor automóvel foi dado pela Ford, em 1977, quando se decidiu criar uma equipa constituída por especialistas em chassis e estruturas de veículos, e especialistas em compósitos. O objetivo seria criar um veículo “conceito” com número de peças e peso total do veículo significativamente reduzidos. O objetivo foi cumprido

com sucesso com a criação do 1979 Ford LTD Lightweight, que pesava menos 565 kg do que o modelo original. Apesar do grande interesse e ambição no século 20 em tentar inovar as estruturas dos automóveis, atualmente o uso principal de compósitos reforçados com fibras em automóveis, com exceção de alguns veículos especializados de baixo volume de produção, tem sido em peças semiestruturais ou decorativas. Como tal, existe ainda uma grande oportunidade de expansão dos compósitos neste setor, mas que necessita de maior investigação na comprovação da durabilidade estrutural, e no desenvolvimento de processos de fabrico rápidos o suficiente para acompanhar a taxa de produção do ramo automóvel [24, 25].

Na indústria náutica, tem-se observado também uma evolução tecnológica significativa no que toca à escolha dos materiais utilizados nos componentes dos navios. Como este tipo de transportes é sujeito a vários fatores de stress, como corrosão química e cargas de impacto subaquático, surgiu a necessidade de desenvolver uma solução construtiva mais eficiente que o aço, alumínio e madeira, e que implicasse menos ações de manutenção. Foi após a 2ª Guerra Mundial que se iniciou a produção de pequenos barcos em materiais compósitos, e se impulsionou a posterior incorporação destes materiais nos grandes navios. A resistência à corrosão química, as boas propriedades mecânicas, a atenuação sonora, a redução da massa total dos barcos e a possibilidade de combinar múltiplas peças e reduzir o número de manutenções, são algumas das vantagens principais que justificam o aumento considerável da utilização de materiais compósitos nesta indústria [26, 27].

2.1.6. Áreas de desenvolvimento atuais

Na atualidade, os materiais compósitos são ainda uma ciência em desenvolvimento, com muitas áreas diferentes em expansão.

Atualmente, uma das áreas de maior desenvolvimento dos compósitos diz respeito à sustentabilidade. De modo a obter materiais compósitos mais ecológicos, estuda-se o conceito de “bio-compósitos”, ou “compósitos verdes”, que consistem em materiais compósitos com reforço em fibras naturais (vegetais, animais), e matriz reciclada, reciclável ou biodegradável. Este último é um conceito complexo devido ao tempo de biodegradação do plástico ser bastante longo. Apesar disso, os termoplásticos são mais recomendados quando comparados com os termoendurecíveis pela sua reciclabilidade. Existem cada vez mais estudos acerca de polímeros biodegradáveis para, eventualmente, utilização em substituição dos sintéticos, sem abdicar das propriedades mecânicas [28].

Um processo de fabrico aditivo que está em desenvolvimento atualmente é a impressão 3D de peças em compósitos. Um exemplo de equipamento desenvolvido são os CFRTPC (*continuous fiber reinforced thermoplastic composites*). Este equipamento permite o fabrico de peças com geometrias complexas através da deposição de um material polimérico termoplástico com fibras contínuas no seu interior. Neste processo, a cabeça de extrusão recebe o filamento de material termoplástico e aquece-o até um estado semilíquido no bocal. Ao mesmo tempo, a fibra contínua é alimentada a partir da bobine de fornecimento de fibra e passa pelo orifício interno da cabeça de extrusão até à bocal. Este processo tem a vantagem de fabricar peças com

geometrias complexas sem utilizar moldes, no entanto, tem uma resistência ao cisalhamento interlaminar muito baixa [29].

Outra área de desenvolvimento é a de nanocompósitos. O nome desta nova classe de materiais advém principalmente da integração de materiais nanoestruturados em compósitos poliméricos através de técnicas de nanofabricação. Estes novos compósitos podem apresentar várias vantagens quando comparados com os compósitos habituais, tais como estabilidade térmica, condutividade elétrica, durabilidade e maior permeabilidade. Estas vantagens têm expandido significativamente a investigação deste novo tipo de materiais, que cada vez mais é implementado em diferentes ramos como biotecnologia, cosmética ou eletrônica [30].

2.2. Equipamentos para processamento de compósitos

Este capítulo aborda os diferentes tipos de processamentos de compósitos e respetivos equipamentos. Para abordar os equipamentos referentes a estes processos, é necessário ter em conta a temática de projeto mecânico, cujos princípios fornecem a base para o desenvolvimento dos mesmos. O Apêndice A é uma revisão bibliográfica acerca da temática projeto de equipamentos mecânicos. Os equipamentos de processamento de compósitos são essenciais na fabricação de materiais avançados, como compósitos de elevado desempenho. Assim sendo, neste capítulo serão abordados três equipamentos de processamento de compósitos. Quanto aos fornecedores, a sua seleção adequada é crucial para garantir qualidade e eficiência, como tal, são descritos três fornecedores que comercializam este tipo de equipamentos. Destacam-se os equipamentos de *slitting*, analisando o funcionamento de dois equipamentos comercializados. Por fim, o subcapítulo termina com um estado-da-arte, onde são apontados dois trabalhos de investigação pertinentes acerca dos equipamentos de *slitting*, e elaborada uma descrição breve dos mesmos.

2.2.1. Tipos de soluções e equipamentos

Dado que os materiais compósitos estão em crescente aplicação nas mais variadas áreas, torna-se necessário criar estratégias cada vez mais eficientes de produção, processamento e testagem destes materiais. Partindo desta premissa, são desenvolvidos novos processos e equipamentos referentes aos mesmos, a fim de se obter compósitos com melhores desempenhos, tempos de ciclo mais curtos e processos de fabrico mais eficientes.

O processo de pultrusão é um processo de fabrico no qual as fibras de reforço impregnadas com a matriz são puxadas através de uma matriz para formar compósitos com uma secção transversal constante [31]. Apesar do conceito ser semelhante, o processo em si varia consoante o tipo de material da matriz. Os equipamentos de pultrusão de compósitos de matriz termoplástica apresentam um sistema de guia com a função de alimentar o bloco de molde aquecido com as fibras. O bloco de molde aquecido serve para fundir o polímero e moldar o compósito para a forma pretendida. Depois, o perfil passa numa matriz de arrefecimento onde a sua forma é fixada. No final da cadeia, existe um sistema de corte que corta o perfil em secções com o comprimento desejado [11]. Para além disto, apresentam também um suporte para os

fios e um mecanismo de tração. No caso da pultrusão de compósitos de matriz termoendurecível, o perfil passa apenas por um bloco de aquecimento ou um forno, para realizar a cura do polímero [31].

A máquina de pultrusão Pultrex Px500-6T é um equipamento utilizado para produzir perfis termoplásticos planos com uma secção transversal retangular. Neste caso, as matrizes de aquecimento e de arrefecimento são em aço, e constituem o bloco de aquecimento e arrefecimento. A matriz de aquecimento tem uma cavidade de secção cónica, enquanto a matriz de arrefecimento tem uma cavidade retangular. As cavidades dos blocos de matrizes são revestidas de crómio. A temperatura da matriz de aquecimento é 200 ± 10 °C, e a temperatura da matriz de arrefecimento é 60 ± 10 °C, e são controladas por quatro termopares localizados em ranhuras no topo dos moldes. Os canais de aquecimento e de água de arrefecimento foram colocados em ranhuras horizontais [11]. Após curado, o perfil é fixado e puxado pelas unidades de tração alternada. Estas unidades de tração movem-se num movimento alternado, em que o movimento de retorno é mais rápido do que o movimento de puxar. Esse design permite um movimento contínuo a uma velocidade constante, independentemente da força necessária para o puxar. Após passar pelas unidades de tração, o perfil avança para a serra de corte em movimento, onde é cortado de acordo com o comprimento pretendido [32].

Os equipamentos de *Automated Fiber Placement* (AFP) e de *Automated Tape Layup* (ATL) são equipamentos de elevada complexidade, de aplicação automática de pré-impregnados para a produção de compósitos. Até à data, a investigação sobre a moldação automatizada de estruturas primárias de aeronaves, por exemplo, tem-se centrado principalmente nestes dois processos de fabrico. Esta investigação levou ao desenvolvimento de uma indústria que fornece este tipo de equipamentos, tendo-se tornado amplamente utilizadas, por exemplo, em estruturas primárias de aeronaves comerciais modernas, como o Boeing 787 e o Airbus A350. No entanto, estes desenvolvimentos ainda não permitiram desenvolver tecnologias que permitissem o fabrico de componentes com geometrias complexas, e como tal, as estruturas que estão a ser fabricadas são bastante simples do ponto de vista geométrico [33].

Os equipamentos de AFP e ATL são incorporados em máquinas CNC, que funcionam com movimentos programáveis em sistema de eixos, e acionamento por sistema cremalheira-pinhão, ou motor linear. No entanto, a tecnologia de AFP e ATL trata-se da “cabeça de colocação de material”, e não tanto o equipamento CNC associado [34]. Esta deve ser dotada de um sistema de aplicação do pré-impregnado, um sistema de corte da fita e de *restart*, um sistema de rolos para compressão e por fim, um sistema de aquecimento [35]. Os equipamentos ATL utilizam fitas de pré-impregnado de larguras consideradas superiores, enquanto o sistema AFP utiliza feixes de fibra individuais, ou várias fitas de larguras inferiores controladas individualmente. Apesar do processo de AFP ser mais dispendioso que o ATL devido aos custos superiores das fitas de pré-impregnado de larguras inferiores, este tem um impacto muito superior na quantidade de resíduos resultantes do processo.

As autoclaves são equipamentos muito utilizados na produção de compósitos, pois permitem criar um ambiente com a temperatura e pressão adequadas para a cura da matriz. Cada componente da autoclave, desde o sistema de aquecimento até ao sistema de arrefecimento, é crucial para alcançar os valores desejados de homogeneidade. A OLMAR SA. é uma empresa

que se dedica à conceção e fabrico de autoclaves, fornos, geradores de vapor e todo o tipo de recipientes sob pressão. As autoclaves para produção de compósitos produzidas pela OLMAR realizam arrefecimento através da circulação de água fria num trocador ar-água, com a ajuda de um ventilador elétrico, até atingir as temperaturas estipuladas. Para manter o vácuo adequado, utilizam-se sacos de vácuo separados ligados a um sistema independente. A alimentação de ar comprimido ou nitrogénio permite uma operação autónoma do autoclave. Todos os valores são controlados por termopares e sensores de pressão, com sistemas de segurança ativados em caso de falha.

2.2.2. Programação de equipamentos

Atualmente, existem vários programas e linguagens que podem ser utilizados para programar equipamentos e automatizá-los.

O *Ladder Logic* (Figura 7) é uma linguagem gráfica de programação utilizada para desenvolver circuitos integrados. Esta linguagem consiste em três operações: disjunção, conjunção e negação, podendo definir todas as outras operações booleanas a partir destas operações. Na Tabela 4 estão apresentados os diferentes símbolos associados a cada operação. Esta linguagem, por ser baseada em diagramas elétricos, é uma linguagem de leitura fácil e utilizada em todo o mundo como o padrão para automatização de máquinas. Este modelo apresenta a lógica de controlo como um "fluxo" variável que se move da esquerda para a direita numa estrutura em escada fixa. Cabe ao utilizador desenvolver uma estrutura de escada de modo que o fluxo tenha o comportamento desejado [36, 37].

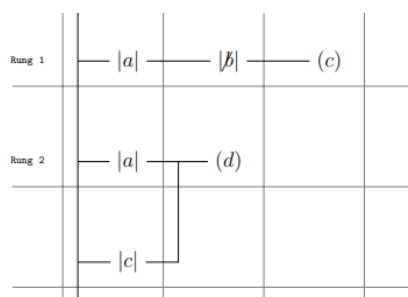


Figura 7 - Lógica *Ladder*.

Tabela 4 - Símbolos da lógica *Ladder*.

Símbolo	Nome	Descrição
x	Normal	Representa o valor da variável proposicional x.
x̄	Fechado	Representa o valor negado da variável proposicional x.
x — y	Conjunção	Representa a conjunção $x \wedge y$, onde x e y são variáveis proposicionais.
x — y —	Disjunção	Representa a disjunção $x \vee y$, onde x e y são variáveis proposicionais.
(x)	Bobine	Representa a variável proposicional que armazena o resultado da linha.

Os *Function Block Diagrams* (FBD) são introduzidos como representações gráficas da função de um sistema. Um *function block* fornece um *output* como resultado de uma função definida pelos *inputs* do sistema e pelos seus vários estados. Os *function blocks* correspondentes a diferentes subsistemas são combinados para formar um diagrama de *function blocks* que representa as características funcionais do sistema combinado. Por outro lado, um sistema complexo representado por um único bloco funcional é decomposto em componentes constituintes com um diagrama de blocos funcionais correspondente [38].

O Totally Integrated Automation Portal (TIA Portal) é um software para automação industrial desenvolvido pela empresa Siemens. É um programa que incorpora todas as tarefas de automação num único ambiente.

2.2.3. Fornecedores de equipamentos e características

Na Tabela 34 do Apêndice B são apresentados três fornecedores de equipamentos de processamento de compósitos.

2.2.4. Fundamentos do processo de *slitting*

Os equipamentos de *slitting* são utilizados nas mais variadas indústrias. Estes equipamentos visam cortar longitudinalmente materiais metálicos, poliméricos, compósitos ou papel. São principalmente utilizados quando se pretende obter uma largura de fitas em rolos menor, mantendo o seu comprimento. Este processo de corte é um processo que pode influenciar a qualidade das extremidades da fita produzida. O processo mais comum para realizar a operação é o corte por cisalhamento, ou *slitting*. Este processo de corte é semelhante à ação de uma tesoura, na medida em que existem duas arestas afiadas que se juntam num ângulo convergente para realizar o corte. A velocidade a que a fita entra na interface de corte é variável no processo de corte. No entanto, o ângulo de convergência das duas lâminas rotativas é considerado o fator mais importante na qualidade do corte [39]. Os parâmetros de corte, que podem afetar a qualidade da borda da fita cortada, são: velocidade de alimentação da fita, velocidades das lâminas rotativas, afiação das lâminas rotativas, penetração vertical entre as duas lâminas, uniformidade da afiação das lâminas, ângulo de convergência do par de lâminas rotativas, propriedades dos materiais da fita e tensão axial da fita [39]. Um processo de corte ideal seria um corte sem resíduos derivados, deformações na borda do corte nem fraturas secundárias, e seria formado a altas velocidades. No entanto, existem sempre deformações envolvidas num processo de criação de uma superfície nova [40].

A técnica de corte abordada nesta dissertação utiliza uma faca que entra em contacto com a contrafaca na ranhura de corte, aplicando um sistema semelhante ao de uma tesoura ou guilhotina (Figura 8). Estas facas apresentam uma geometria circular e são rotativas. O processo ocorre em três fases principais de deformação e de dano. A primeira fase é de deformação elástica e resulta numa deformação de corte muito pequena do material. Com tensões que atingem o limite de elasticidade do material, forma-se uma zona plástica na região de folga entre as facas, onde se iniciam pequenas fissuras com a continuação do percurso da lâmina.

Subsequentemente, estas fissuras aumentam de tamanho e coalescem para causar a separação final do material por fratura dúctil [41].

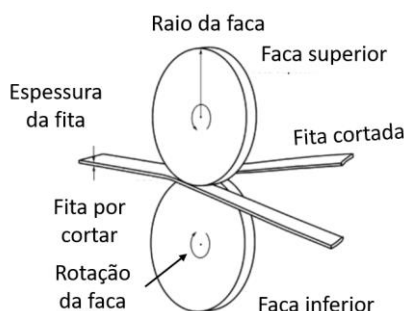


Figura 8 - Esquema representativo do sistema de *slitting*.

As facas circulares dos equipamentos de *slitting* podem apresentar geometrias diferentes, a faca em disco (Figura 9 a) , faca chanfrada (Figura 9 b) ou faca côncava (Figura 9 c). A faca em disco tem a forma de um disco cilíndrico e pode ser carregada lateralmente em qualquer direção. No caso da contrafaca, esta é fixa e não tem movimento axial. Esta conceção permite que a faca superior corte em ambos os lados. No caso da faca chanfrada, esta apresenta um chanfro de cerca de 60° no diâmetro exterior. Esta configuração é utilizada com uma mola de disco em cada faca para fornecer uma força constante quando a faca é carregada lateralmente. A faca côncava apresenta a geometria apresentada na Figura 9 c). Esta faca também é utilizada com uma mola e o que a distingue das anteriores é a sua geometria côncava com ângulo de 1° a $3,5^\circ$, criando um ângulo de corte positivo [39].

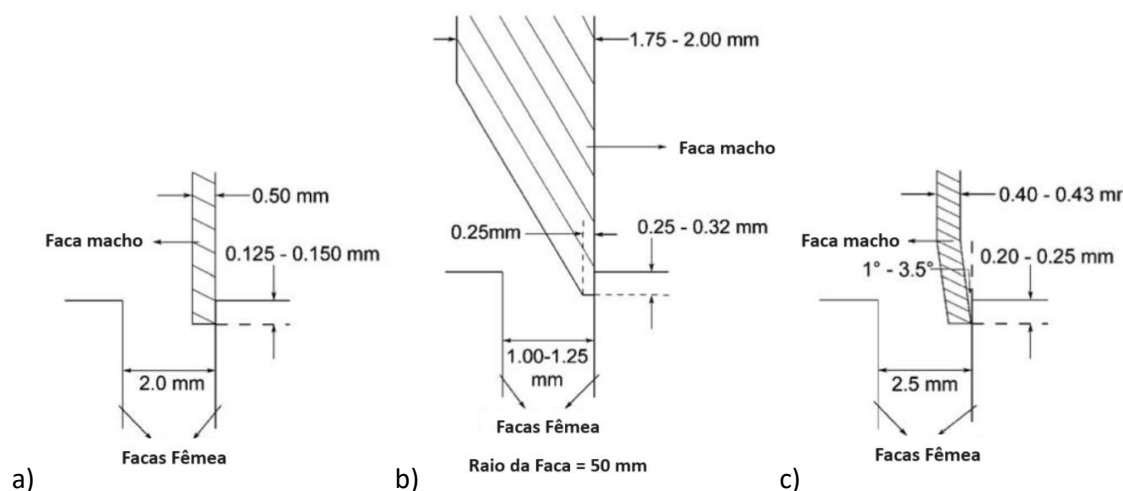


Figura 9 - Tipos de Facas: a) faca em disco; b) faca chanfrada; c) faca côncava.

Uma linha de *slitting* é constituída por um desbobinador, um sistema de corte e um enrolador, cada um acionado pelo seu motor. Existem diferentes modos de conduzir o material através das facas de corte, dependendo da forma como o desbobinador, o sistema de corte e o enrolador são acionados. A escolha do método depende do material, da espessura da fita e do número de cortes pretendidos. Existem dois modos de funcionamento num equipamento de *slitting*:

1. No corte em modo reto (Figura 10 a), o enrolador acionado puxa o material do desbobinador através do sistema de *slitting*. O corte é designado por *pull-through slitting*, quando o desbobinador e o sistema de *slitting* são acionados apenas para alimentar o material para o enrolador. No *driven slitting*, o sistema de *slitting* também é acionado durante o processo. Nestes casos, os motores devem ser sincronizados para manter uma velocidade constante do material à medida que este se desloca através da linha. As vantagens do corte em modo reto são a capacidade de cortar chapas finas e uma melhor qualidade dos bordos para todas as espessuras.
2. No corte em *loop* livre (Figura 10 b), o material pode formar um *loop* entre a máquina de corte e o enrolador. É necessário um dispositivo de tensionamento na frente do enrolador para produzir bobines corretamente enroladas. Este método permite processar melhor bobines com defeitos como irregularidades na tensão [39, 42].

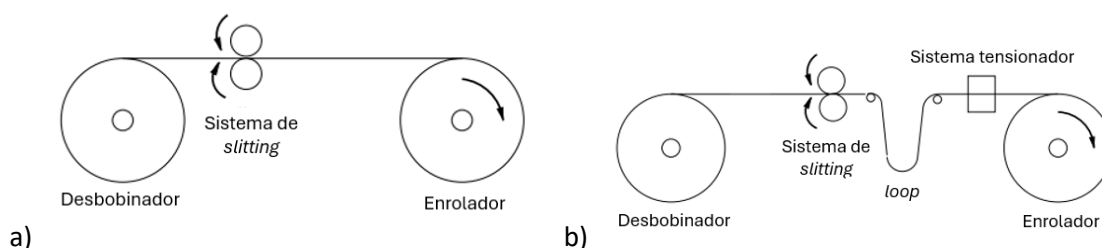


Figura 10 - Modos de funcionamento de um equipamento de *slitting*: a) Corte em modo reto; b) Corte em modo de *loop* livre.

Tensão

Um dos fatores fundamentais a serem considerados num equipamento de *slitting* é a tensão das fitas. Dado que numa operação de rebobinagem e desbobinagem, o diâmetro nas bobines não é constante ao longo do tempo. Como tal, é necessário ajustar-se a velocidade ou o binário dos motores de modo a obter a tensão pretendida nas fitas. Existem várias possibilidades de medir diretamente a tensão nas fitas, no entanto as mais frequentes empregam rolos tensionadores ou células de carga.

Os **rolos tensionadores** (Figura 11 a) são dispositivos de medição com controlo de posição. Se a fita estiver sobre algum valor de tensão, está irá realizar uma pressão no rolo. Por sua vez, o rolo tensionador permite realizar uma força contrária ajustável. O dispositivo encontra-se na posição de referência quando estas forças se encontram em equilíbrio. Cada vez que existe uma perturbação na tensão da fita, o rolo sofre um deslocamento. Estas variações de tensão podem ser compensadas através de alteração da velocidade no motor ou adaptando o binário do motor, até que o rolo tensionador volte à sua posição de referência.

As **células de carga** (Figura 11 b) são sensores que medem força através da deformação elástica de um material, convertendo essa deformação em um sinal elétrico mensurável. Neste caso, o rolo é acoplado a uma célula de carga, que mede diretamente a força realizada pela fita. É possível determinar a tensão nas fitas através deste valor de força, servindo de *input* para o sistema de controlo [43].

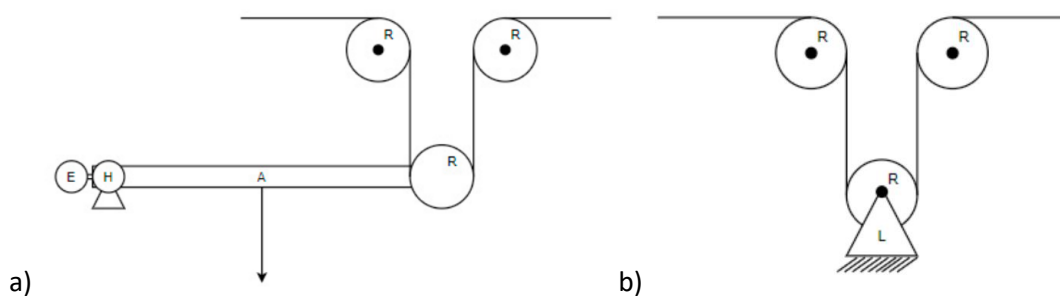


Figura 11 -a) Esquema de representação de um rolo tensionador; b) esquema de representação de uma célula de carga [43].

Existem seis estratégias de controlo de tensão, três sem *feedback* e três com *feedback*. Na Tabela 35 do Apêndice B é possível observar as características de cada uma [44].

O controlo de tensão é essencial para evitar defeitos nas bobines produzidas. O processo de rebobinagem pode resultar em dois tipos de defeitos principais, resultantes das tensões exercidas nas fitas: *starring* e *telescoping*. O defeito *starring* é detetado quando se verificam ondulações no enrolamento, como demonstra a Figura 12 a). Este defeito é minimizado através da distribuição da tensão radial, que é a tensão na direção do raio da bobine, provocada pela tensão da fita durante o processo de rebobinagem. O defeito *telescoping* refere-se à falta de planura da superfície lateral do enrolamento, como demonstra a Figura 12 b). Este defeito é provocado pelos desvios laterais da fita durante o processo de rebobinagem, resultado da distribuição transversal heterogénea da tensão na fita. Esta distribuição é resultante do desalinhamento dos rolos do equipamento.

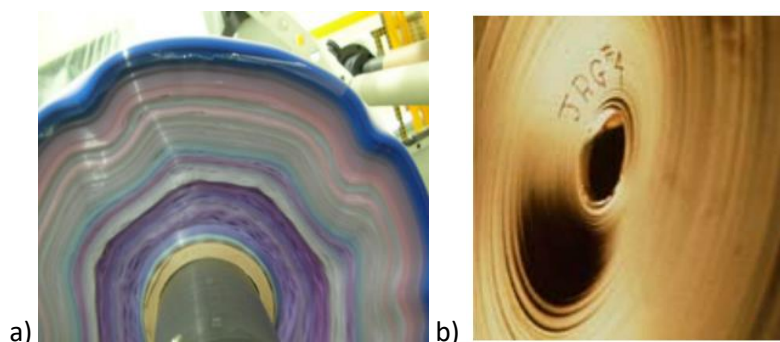


Figura 12 - a) Defeito *starring*; b) Defeito *telescoping* [45].

De modo a minimizar os defeitos *starring* e *telescoping*, existem vários perfis possíveis de variação de tensão em função do raio da bobine durante o enrolamento, conforme descrito pelas Equações 1, 2, 3 e 4 [46]. O perfil de tensão constante (Equação 1), segundo o qual a tensão na fita é mantida constante ao longo de todo o raio, é o perfil menos adequado no enrolamento de filmes, por exemplo, devido às elevadas tensões radiais obtidas nas bobines. No perfil de binário constante (Equação 2), a tensão da fita é inversamente proporcional ao raio da bobine. No perfil linear (Equação 3), a tensão é diminuída a uma taxa constante, enquanto no perfil hiperbólico (Equação 4), a diminuição da tensão é traduzida numa hipérbole [46].

$$T_{\text{tensão } c}(r) = T_0 \quad (1)$$

$$T_{torquec}(r) = T_0 \left[1 - \left(\frac{r-1}{r} \right) \right] \quad (2)$$

$$T_{linear}(r) = T_0 \left[1 - \left(\frac{taper}{100} \right) \times \left(\frac{r-1}{r_M-1} \right) \right] \quad (3)$$

$$T_{hiperbolico}(r) = T_0 \left[1 - \left(\frac{taper}{100} \right) \times \left(\frac{r-1}{r} \right) \right] \quad (4)$$

O T_0 é a tensão inicial na fita no início da rebobinagem, o r é a razão entre o raio corrente e o raio do núcleo da bobine, e o r_M é a razão entre o raio máximo da bobine e o raio do núcleo. O valor *taper* trata-se do valor percentual do decréscimo da tensão ao longo da rebobinagem. Ao definir-se um valor *taper* de 40%, a tensão final da fita seria 40% inferior à tensão inicial no núcleo da bobine [47]. O aumento deste valor pode resultar em menor tensão radial, o que minimiza o defeito *starring*. Porém, um *taper* mais elevado aumenta os desvios laterais da fita, possibilitando o aumento de defeitos *telescoping*. Como tal, é recomendado utilizar um valor de *taper* inferior a 40% em rebobinagens com r_M inferior a 2, e superiores a 40% quando o r_M é superior a 2. O perfil de binário constante é um tipo de perfil hiperbólico com um valor de *taper* de 100%.

2.2.5. Equipamentos de *slitting*

Este tipo de equipamento é encontrado no mercado com dimensões e aplicações diferentes. Um exemplo de equipamento de *slitting* relativamente simples e compacto é o FQ-320/450 da ZONTEN (Figura 13). A ZONTEN é uma empresa especializada no desenvolvimento, produção e comercialização de equipamentos de impressão de etiquetas. A ZONTEN produz maioritariamente máquinas de impressão *offset*, máquinas de impressão tipográfica de etiquetas, máquinas de impressão flexográfica e máquinas de corte. O FQ-320/450, observado na Figura 13, é um exemplo de equipamento que desenrola um rolo, corta a fita em quatro fitas com larguras mais pequenas, e as enrola novamente em quatro rolos independentes. A máquina de corte e rebobinagem tem dois sensores de guia de banda para alimentação de papel, um sensor para contagem de comprimento, um conjunto de lâminas de corte (10 lâminas substituíveis), e também pode instalar uma faca de corte para corte de película. A máquina de corte e rebobinagem está equipada com dois eixos de 3 polegadas de diâmetro, mas também pode ser equipada com eixo de 1,5 polegadas ou 1 polegada. A máquina é munida de um painel de controlo com controladores como botões de *on* e *off*, e controlador de velocidade [48].



Figura 13 - Máquina de *slitting* FQ-320/450 [48].

A ASHE é uma empresa inglesa especializada no projeto e fabrico de equipamentos de *slitting* e rebobinagem. O equipamento de *slitting* Diamond T (Figura 14), da ASHE, foi projetado para produzir rolos de filmes plásticos ou papel. Este equipamento de *slitting* é compacto e altamente eficiente, devido à secção de rebobinagem de rolos da máquina. Uma das grandes diferenças entre este equipamento e o FQ-320/450, é que o Diamond T assegura que os eixos do rebobinador permaneçam totalmente apoiados durante o ciclo de rebobinagem. Devido a este suporte, este equipamento é capaz de oferecer tempos de ciclo muito rápidos, desde o momento em que a máquina para quando um comprimento definido é atingido, até ao momento em que começa a próxima passagem. Outra grande diferença é o mecanismo automático de corte transversal para cortar e transferir automaticamente para os novos rolos. Neste equipamento, o sistema de desenrolamento do rolo está integrado na estrutura principal da máquina, embora este possa ser separado para a inclusão de equipamento auxiliares. Todas as formas de corte podem ser acomodadas no Diamond T, por isso ela é capaz de cortar e rebobinar a maioria dos substratos com a máxima eficiência e qualidade [49].



Figura 14 - Equipamento de *slitting* Diamond T [49].

2.2.6. Estado da arte

Os equipamentos de *slitting* são equipamentos muito presentes na indústria, e como tal, são equipamentos alvo de investigações e processos de otimização atualmente. Na Tabela 5 é possível observar trabalhos de investigação e breves descrições dos mesmos acerca de equipamentos de *slitting*.

Tabela 5 Estado-da-arte de equipamentos de *slitting*

Referência bibliográfica	Descrição do trabalho
Priya, V.P. and R. Mukunth [50]	A máquina de <i>slitting</i> e rebobinagem é muito comum na indústria do papel, sendo esta responsável por cortar rolos grandes em rolos com larguras mais reduzidas. Como tal, qualquer problema na máquina pode parar toda a produção. O trabalho detalha a transformação de um destes equipamentos manuais em um sistema totalmente automatizado. Utiliza-se tecnologia como controladores de tensão baseados em células de carga, válvulas, interfaces homem-máquina (HMI) e PLC. O objetivo principal é automatizar o processo para evitar quebras de papel e otimizar a qualidade e gestão do tempo de rebobinagem. Na conclusão do trabalho, é referido que o equipamento foi implementado com sucesso, e pode cortar papel de 1189 mm a 40 mm, sem quaisquer restrições.
Zhu, Y., Q. Yan, and J. Lu [51]	Este trabalho aborda o <i>slitting</i> como um método eficiente e económico para dividir chapas metálicas largas em chapas de larguras mais reduzidas. No entanto, máquinas de <i>slitting</i> em alta velocidade podem enfrentar várias falhas. O trabalho trata-se do desenvolvimento de um sistema de medição para detetar em tempo real as forças de corte em três direções durante o processo. Na conclusão, o autor afirma que o método de diagnóstico de falhas se mostrou eficaz na identificação de falhas específicas, como desalinhamento circular do cortador, inatividade da ferramenta e paragem da máquina, com uma precisão de 95,6%. Além disso, o método tem potencial para diagnóstico de falhas em outras máquinas rotativas, como rolamentos e motores, com aplicações industriais promissoras.

3. Desenvolvimento do Projeto

3.1. Empresa de Acolhimento

O Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial (INEGI) (Figura 15) é um centro de tecnologia e inovação (CTI). O INEGI foi fundado por investigadores do Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial (DEMEGI) da Faculdade de Engenharia do Porto (FEUP), em 1986, com o objetivo de se desenvolver atividades de investigação e de inovação de base tecnológica, transferência de tecnologia, consultoria e serviços tecnológicos, orientadas para o desenvolvimento da indústria e da economia em geral [52].



Figura 15 - Logótipo do INEGI [53].

O INEGI é uma organização privada sem fins lucrativos com um estatuto de utilidade pública que conta com mais de 332 colaboradores, 174 projetos de inovação com a indústria, 766 clientes, 479 parceiros internacionais, 8 patentes, 6 empresas *spin-off* no mercado e apresenta um volume de negócios de 17,9 milhões de euros em 2023 [52].

O INEGI conta com 6 grupos de investigação [52]:

1. Materiais e Processos de Fabrico;
2. Estruturas e Sistemas Mecânicos;
3. Energia, Ambiente e Sustentabilidade;
4. Sistemas e Controlo Inteligentes;
5. Biomecânica;
6. Gestão e Engenharia Industrial.

De modo a atuar nestas áreas de investigação, o INEGI é dividido em 15 unidades diferentes [52]:

1. Ambiente e Fogo;
2. Centro de Estudos de Fenómenos de Transporte;

3. Tribologia, Vibrações e Manutenção Industrial;
4. Centro de Tecnologia e Investigação;
5. Desenvolvimento de Produto e Sistemas;
6. Energia;
7. Energia Eólica;
8. Formação Avançada;
9. Gestão e Engenharia Industrial;
10. Laboratório de Sistemas e Tecnologia Subaquática;
11. Biomecânica e Saúde;
12. Monitorização Avançada e Integridade Estrutural;
13. Materiais e Estruturas Compósitas;
14. Processos Avançados de Ligação;
15. Tecnologias Avançadas de Fabrico.

3.2. Caracterização do sistema de *slitting*

Apesar de o equipamento preliminar não ser munido de sistema de corte, existe um projeto preliminar para este sistema. Optou-se por utilizar o corte por cisalhamento com facas circulares rotativas. Neste método, para cada linha de corte existe um conjunto de facas constituído pela faca superior (ou faca) e pela faca inferior (ou contrafaca) (Figura 16). Existem dois veios paralelos no sistema, o superior que acopla as facas superiores, e o inferior, com as facas inferiores. Nestes mecanismos, os veios apresentam rotações em sentidos contrários. Como tal, um dos requisitos do sistema de corte é a existência de um sistema de transmissão que garanta este fenómeno. As facas são acopladas ao veio de modo a ficarem solidárias com os mesmos. No entanto, deve ser possível realizar afinações de posição de modo a possibilitar o corte de fitas com larguras variáveis. A distância entre os veios é definida pela sobreposição pretendida das facas, que depende do tipo de material e da espessura da fita.

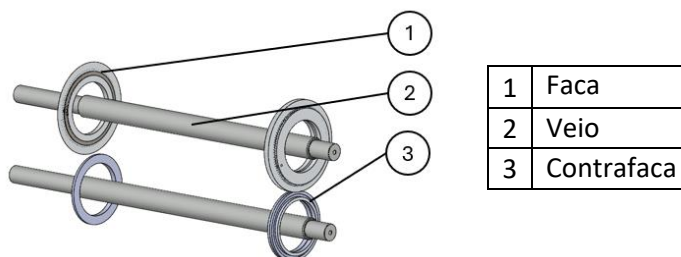


Figura 16 - Conjunto facas, contrafacas e veios.

No projeto preliminar, o sistema de corte é composto por uma estrutura secundária acoplada à estrutura principal, de modo a fornecer apoio e rigidez aos veios e aumentar a segurança de

utilização do equipamento. Esta estrutura (Figura 17) é constituída por quatro perfis metálicos, duas chapas e acrílicos.

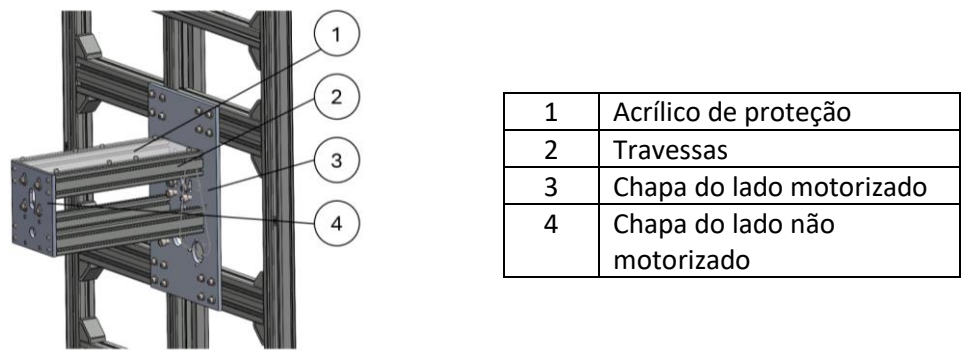


Figura 17 - Estrutura do sistema de corte.

Os veios de 25 mm de diâmetro são fixos às chapas através de mancais flexíveis (Figura 18, a). As facas escolhidas no projeto preliminar são da Mario Cotta. Dado que a faca superior carece de um sistema de suporte, optou-se também por adquirir o sistema de suporte de facas (Figura 18, b) constituído pelo próprio suporte, um anel elástico, e uma mola. No caso da contrafaca (Figura 18, c), não se adquiriu nenhum sistema de suporte. O diâmetro interno da contrafaca e do suporte da faca superior são de 60 mm. No projeto preliminar não foi projetado o sistema de acoplamento das facas aos veios. Este sistema deverá ter em consideração a diferença de diâmetros entre os veios e as facas, e a possibilidade de realizar afinação da posição das mesmas.

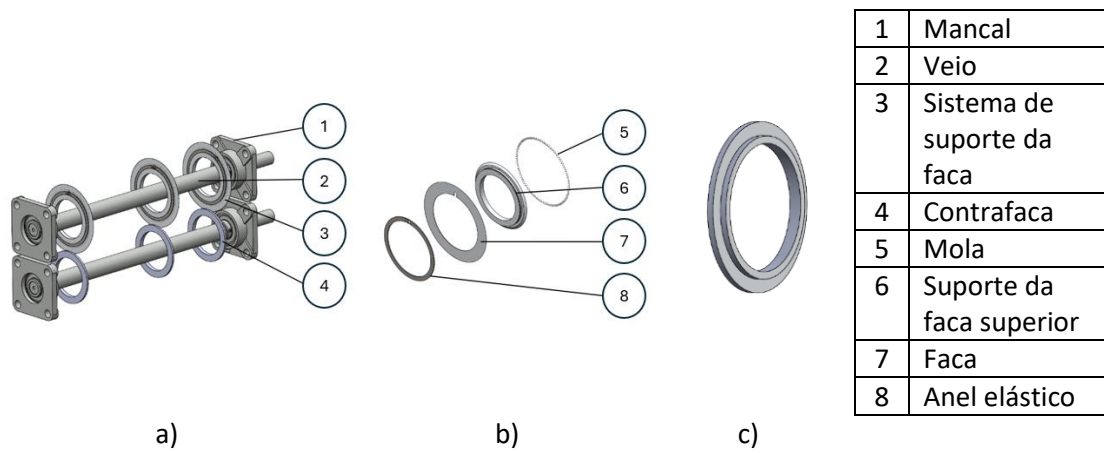


Figura 18 - a) Sistema de corte; b) sistema de suporte da faca; c) contrafaca.

O sistema de transmissão (Figura 19) foi desenvolvido de modo que os veios apresentem movimento de rotação com sentidos contrários. A transmissão é realizada por uma correia de transmissão e um conjunto de polias ligadas diretamente aos veios. De modo a inverter o sentido de rotação do veio inferior, a correia está ligada a uma engrenagem composta por duas rodas dentadas cilíndricas retas em aço, com uma razão de transmissão de 1. A roda dentada superior está solidária ao veio inferior, e a inferior está solidária com a correia. O tensionador é utilizado para manter a tensão da correia. O facto dos furos da chapa que apoiam o mancal

do veio superior serem rasgos verticais, permite afinar a distância entre os dois veios, e como tal, afinar a sobreposição das facas.

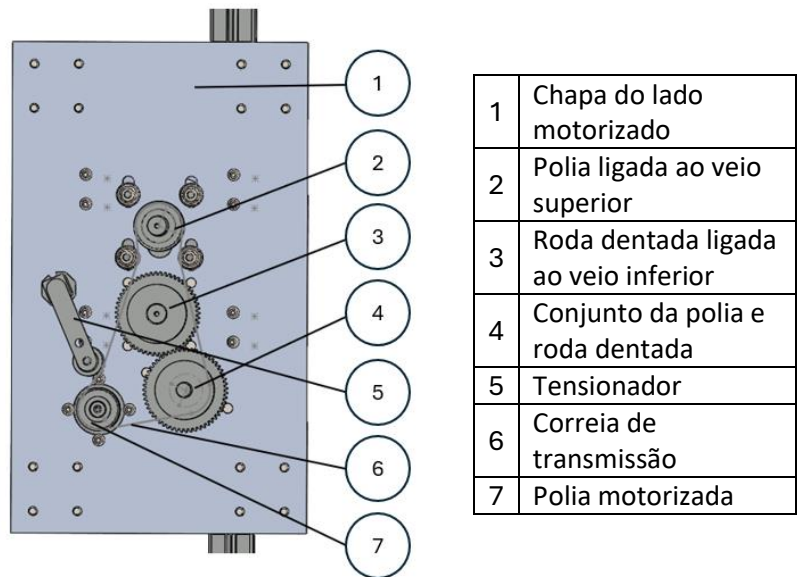


Figura 19 - Sistema de transmissão.

3.3. Caracterização da proposta atual

O equipamento preliminar trata-se de uma máquina com a funcionalidade exclusiva de rebobinagem de fitas compósitas, de bobines de enrolamento helicoidal para bobines em disco (Figura 20). Este equipamento tem dois servomotores, uma HMI que possibilita a definição da velocidade de rebobinagem, e um sistema de correção de desvios laterais da fita. A máquina tem dois interruptores físicos: um de corte geral que permite ligar e desligar a máquina, e um botão de emergência que, quando atuado, desliga os motores, mas mantém os restantes subsistemas em funcionamento. Os dois servomotores giram em direções opostas e aplicam um diferencial de binário de forma a criar tensão na fita.

A Figura 20 é apresentada novamente no subcapítulo 3.2.4 com mais detalhe.



Figura 20 - Equipamento de rebobinagem.

Este sistema de rebobinagem pode ser dividido em cinco subsistemas diferentes:

1. Suporte das bobines;
2. Estrutura (base rolante);
3. Controle;
4. Correção dos desvios laterais da fita;
5. Elétrico;

3.3.1. Sistema de suporte de bobines

O **sistema de suporte de bobines** é composto por um veio/suporte da bobine, um bloqueador, uma flange de apoio, e dois suportes de bobine com adaptador de diâmetro (Figura 21). A flange é colocada entre o veio do redutor e o veio/suporte das bobines. A base da flange é ligada ao suporte das bobines, que funciona também como adaptador de diâmetro entre a bobine e o veio. Após montagem da bobine e acoplamento com pinos no suporte, é colocado um adaptador de diâmetro e por fim o bloqueador, que bloqueia movimentos axiais do conjunto. A flange permite que o veio do redutor e o veio/suporte da bobine permaneçam solidários, e bloqueia rotações relativas entre o veio e o suporte das bobines, resultando também em peças solidárias.

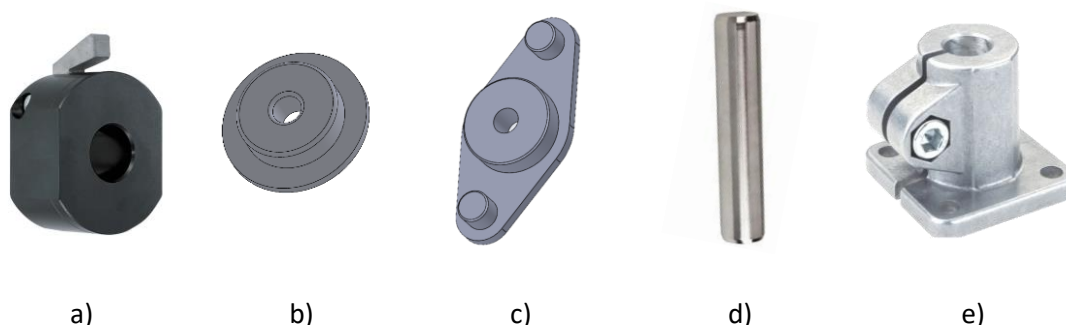


Figura 21 - a) bloqueador; b) adaptador de diâmetro; c) suporte da bobine; d) veio/suporte da bobine; e) flange.

3.3.2. Estrutura

A **estrutura** da máquina é composta pelo armário, ou bastidor elétrico, pela base com rodas e pelos elementos de reforço estrutural (Figura 22). Os perfis e cantoneiras utilizadas como reforço são da NORELEM (Figura 23), e o material é alumínio EN AW-6063 T66 (AlMgSi0,5 F25). A base do equipamento tem quatro rodas de modo a facilitar o transporte do equipamento em caso de necessidade. O armário da Rittal é em aço e tem, para além da função estética, a função de proteger os componentes elétricos. Devido à reduzida rigidez das chapas que compõem o armário, produziu-se também uma estrutura de reforço do mesmo com a função de suportar os servomotores, os rolos de guiamento e o sistema de corte. Os perfis e cantoneiras utilizadas como reforço são da NORELEM (Figura 23), e o material é alumínio EN AW-6063 T66 (AlMgSi0,5 F25). Esta estrutura é constituída também por perfis em alumínio da NORELEM.

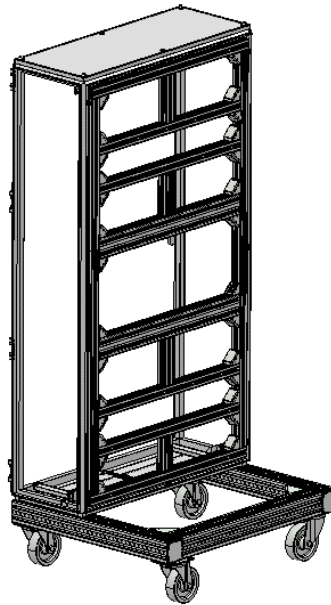


Figura 22 – Modelo 3D da estrutura do equipamento de *slitting*.

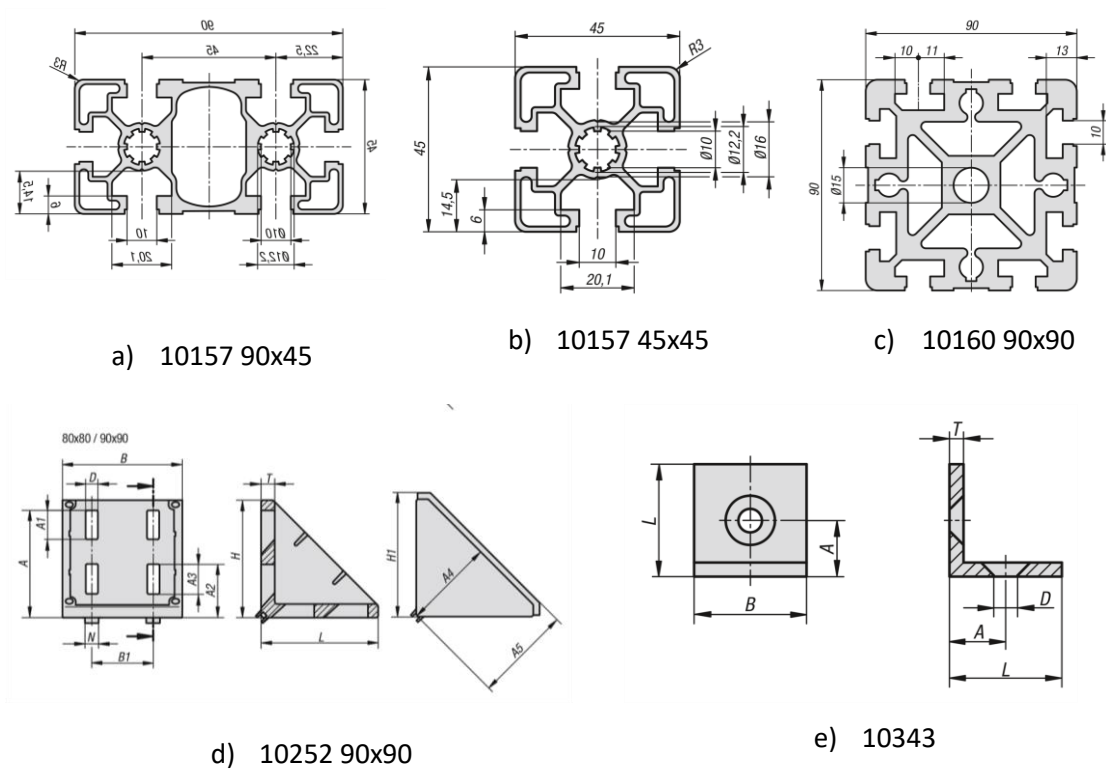


Figura 23 - a) perfil utilizado nas travessas do sistema de corte; b) perfil utilizado nos reforços do armário; c) perfil utilizado na base da estrutura; d) cantoneiras utilizadas na base; e) cantoneiras utilizadas na estrutura.

3.3.3. Sistema de Controlo

O hardware do **sistema de controlo** do equipamento de bobinagem é constituído maioritariamente por componentes da SIEMENS. Este sistema inclui dois servomotores SIMOTICS S-1FL6 (Figura 24 a), dois redutores da NEUGART (Figura 24 b), dois servo drives para controlo dos motores (Figura 24 c), um PLC S7-1200 para programação do sistema (Figura 24 d) e uma HMI 7” .

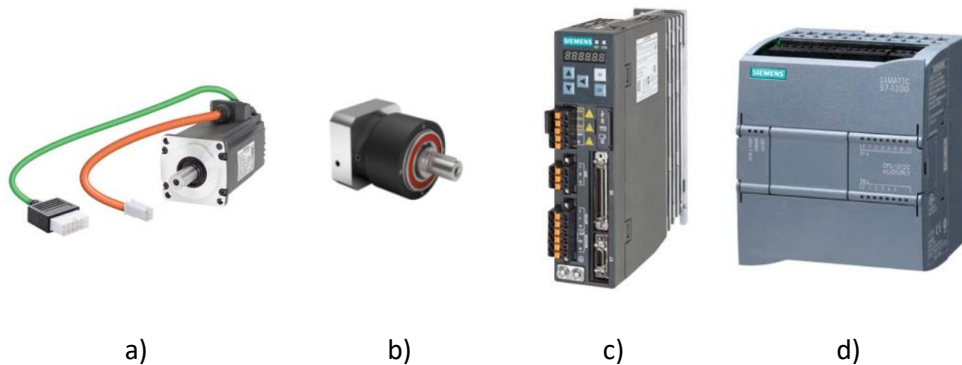


Figura 24 - a) Motor; b) Redutor; c) Drive; d) PLC.

A programação do sistema de controlo foi realizada no software de automação da SIEMENS, TIA Portal. Neste código, é possível observar um *main organizational block* com 6 *networks* diferentes, e dois *function blocks* “CalcLength” e “SinaSpeed Speed Control” (Figura 25). Na Tabela 10 é possível observar a função de cada uma das *Networks* presentes no *main organizational block*.

No *function block* “SinaSpeed Speed Control”, foi usado um bloco da SIEMENS chamado “SinaSpeed”. Este tem o propósito de permitir a troca de informação entre o PLC e o servo *drive*. O PLC envia a velocidade angular pretendida pelo utilizador, e o *drive* devolve a velocidade angular real ocorrida no redutor.

No *function block* “CalcLength”, foi usado o conjunto de funções “CALCULATE”, “TONR”, “CONV”, “MUL”, “ADD” e “DIV”. O propósito deste function block é exclusivamente calcular o número de rotações realizadas pelo rolo de fita compósita inicial durante a rebobinagem. Para isso, é utilizado um temporizador para obter a duração da ação, relacionar a mesma com a velocidade de rotação do rolo, e assim obter-se o número de rotações em tempo real.

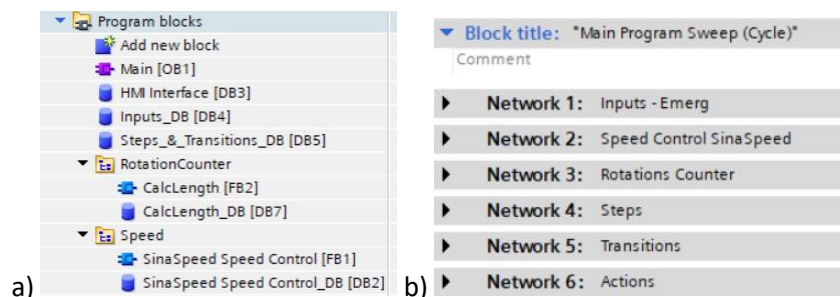


Figura 25 - a) Program blocks; b) Networks do main organizational block.

Tabela 6 - *Networks* do *main organizational block*

Network 1	A <i>Network 1</i> é a <i>network</i> responsável por associar a <i>tag</i> do botão de emergência a uma variável. Deste modo, quando o botão de emergência é ativado, a variável de <i>input</i> de emergência assume o valor <i>TRUE</i> .
Network 2	A <i>Network 2</i> é responsável pelo controlo da velocidade de rotação das bobines. A <i>Network 2</i> recorre ao <i>function block</i> " <i>SinaSpeed Speed Control</i> " para devolver valores como a velocidade real de atuação dos motores, detetar possíveis erros e interromper a ação do equipamento.
Network 3	A <i>Network 3</i> recorre ao <i>function block</i> " <i>CalcLength</i> " para calcular o número de rotações efetuadas pela bobine de alimentação em tempo real.
Network 4 Network 5	As <i>Networks 4</i> e <i>5</i> são <i>networks</i> com transições para garantir o funcionamento do <i>start/stop</i> , do sistema de <i>reset</i> e do sistema de emergência.
Network 6	A <i>Network 6</i> realiza ações como o <i>reset</i> do sistema, o acionamento do <i>LED</i> de <i>reset</i> da HMI e a interrupção da ação e alteração da velocidade para 0 na caixa de texto da HMI.

De modo a adaptar o código da máquina rebobinadora para um equipamento de *slitting*, é necessário considerar a existência de duas bobines recetoras, logo mais um motor, redutor e *drive*. Também é necessário acrescentar o sistema de *slitting*, que também carece de um motor, redutor e *drive*, e o sistema de deteção de desvios da fita com o sensor ultrassónico.

O **sistema Interface/HMI** é constituído pelo ecrã da SIEMENS HMI 7" (Figura 26). O *software* específico para o equipamento de *slitting* não foi desenvolvido, no entanto, pretende-se que este seja semelhante ao *software* do equipamento de rebobinagem já desenvolvido. Os requisitos deste sistema de interface humano-máquina são os seguintes:

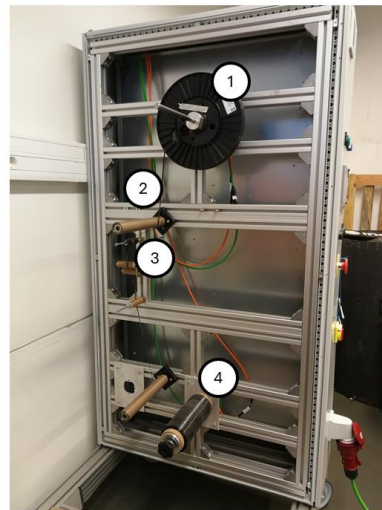
- 1- Indicadores de funcionamento,
- 2- Definição da velocidade de funcionamento,
- 3- Velocidade real de funcionamento,
- 4- Botão *start*, botão *stop* e botão *reset*.



Figura 26 - ecrã HMI 7" da SIEMENS

3.3.4. Sistema de correção dos desvios da fita

Na rebobinagem de uma bobine helicoidal para uma bobine em disco (Figura 28), é necessário garantir o alinhamento da fita de modo que esta entre na bobine em disco com o mínimo de desvios possível. Como tal, foi desenvolvida uma disposição de rolos perpendiculares entre si (Figura 28) com vista a minimizar os deslocamentos laterais da fita que resultam do enrolamento da bobine helicoidal.



1	Bobine em disco motorizada
2	Rolos de guiamento
3	Sistema de correção de desvios da fita
4	Bobine helicoidal motorizada

Figura 27 - Equipamento de rebobinagem.

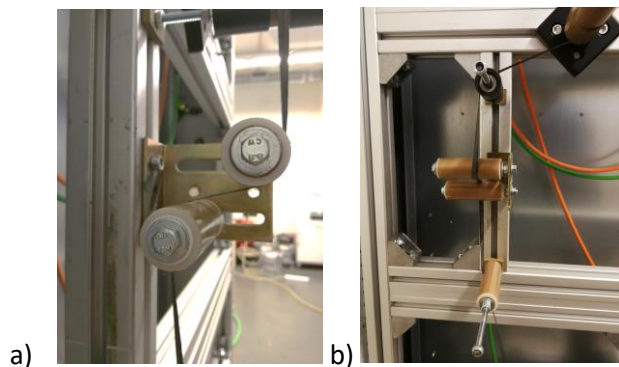


Figura 28 – Sistema de correção de desvios da fita: a) vista lateral; b) vista frontal.

Este sistema é composto pelo rolo 1, pelos rolos perpendiculares 2 e 3, e pelo rolo 4 (Figura 29). Os rolos 2 e 3 apresentam a particularidade de estarem perpendiculares aos rolos 1 e 4 através de uma peça de fixação. Como estes rolos se encontram perpendiculares aos desvios da fita que se pretendem corrigir, estes acabam por os anular. O rolo 4 apresenta uma ranhura central que acopla a fita durante o processo de rebobinagem, também com a função de corrigir os seus desvios.

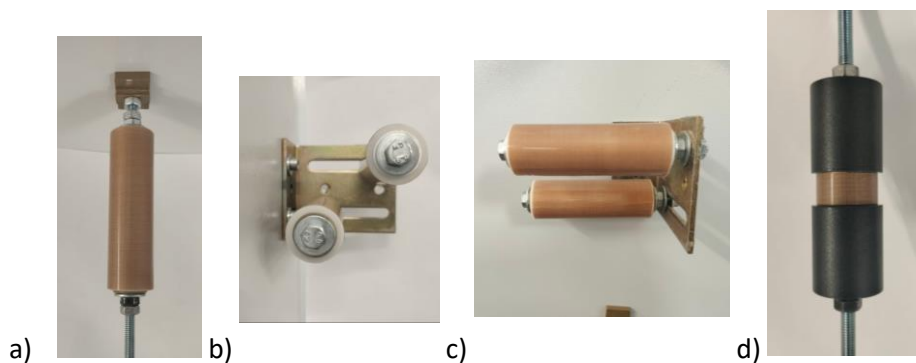


Figura 29 - a) rolo 1; b) rolos 2 e 3, vista lateral; c) rolos 2 e 3, vista frontal; d) rolo 4.

3.3.5. Sistema elétrico

O sistema elétrico do equipamento de rebobinagem é um sistema simples, sem sinalizadores luminosos ou botões físicos, e com apenas um botão de emergência associado ao PLC como sistema de segurança. Os componentes são 2 servomotores monofásicos com 0,2 kW de potência, 2 *drives* que controlam os acionadores, um interruptor de corte geral, um botão de emergência, um disjuntor trifásico, 4 disjuntores monofásicos, um PLC, uma fonte de alimentação de 24V DC, um *switch* de rede e um ecrã HMI.

As ligações do sistema elétrico do equipamento preliminar estão representadas no fluxograma da Figura 30.

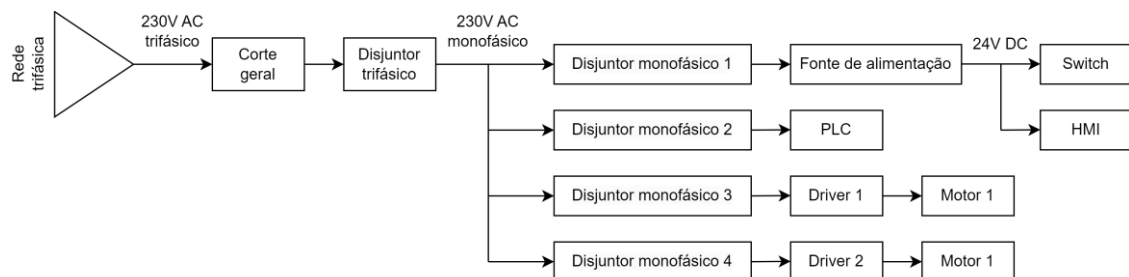


Figura 30 - Fluxograma do sistema elétrico.

Na Tabela 7 é possível identificar as intensidades de corrente e potências dos componentes elétricos integrados no equipamento de rebobinagem. Pela soma dos valores dos diferentes componentes, verifica-se que o equipamento de *slitting* tem uma potência total de 651 W e uma corrente total de 4,84 A.

Tabela 7 - Componentes do sistema elétrico.

Componentes	Corrente [A]	Potência [W]	Quantidade	Corrente Total [A]	Potência Total [W]
Fonte de alimentação	2	240	1	2	240
PLC	0,04	11	1	0,04	11
Servomotores	1,4	200	2	2,8	400

3.4. Objetivos específicos do trabalho

Após analisar a proposta atual, é possível enumerar os objetivos específicos do trabalho:

1. Projeto mecânico do subsistema de corte com o acoplamento das facas;
2. Desenvolvimento de uma solução para fixação do sensor ultrassônico;
3. Projeto mecânico e elétrico do equipamento;
4. Desenvolvimento e integração do sistema de controle adequado ao equipamento de *slitting*;
5. Montagem do equipamento;
6. Validação experimental do equipamento;
7. Elaboração de um manual do equipamento.

3.5. Requisitos da empresa e limitações

De modo a cumprir com os objetivos do projeto, foram definidos requisitos por parte da empresa, a satisfazer no decorrer do desenvolvimento que estão numerados a seguir:

1. Cortar fitas compósitas de fibra de carbono e matriz termoplástica;
2. Fitas com 6,35 mm ($\frac{1}{4}$ "), 12,70 mm ($\frac{1}{2}$ ") ou 25,4 mm (1") de largura admissível;
3. Suportar bobines com diâmetro interno de 56 mm, diâmetro externo de 600 mm e 5 kg;
4. Sistema de emergência de acordo com a norma ISO 12100;
5. Desenho intuitivo da HMI para controlar as ações do equipamento.

3.6. Anteprojeto

3.6.1. Método da matriz de seleção

O método da matriz de seleção de Ashby é uma ferramenta que permite a comparação de várias soluções alternativas de projeto em diferentes dimensões, de modo a perceber qual a alternativa que melhor satisfaz os requisitos do projeto. No desenvolvimento de um projeto, as várias soluções são caracterizadas por um conjunto de atributos que incluem propriedades mecânicas, térmicas, elétricas, químicas, as suas características de processamento, custo, disponibilidade e as consequências ambientais decorrentes do seu uso. Este conjunto de atributos tem o nome de perfil de propriedades. A seleção envolve definir a melhor correspondência entre os perfis de propriedades das soluções e selecionar a que tem melhor desempenho [54].

Para elaborar uma matriz de seleção, é necessário definir os parâmetros de avaliação das soluções. De acordo as especificações do projeto, o perfil de propriedades é elaborado com as propriedades consideradas mais relevantes para o modelo a ser desenvolvido. Após definido, é

necessário avaliar a importância de cada propriedade. Como estas têm relevâncias diferentes para a decisão da solução, são calculados os índices de importância para cada uma das soluções, ω_i . Este índice de importância é obtido através de uma tabela de cálculo, cujas linhas correspondem aos diferentes parâmetros definidos. Nas colunas da tabela, são colocadas todas as combinações de pares possíveis entre os parâmetros. Pretende-se então preencher a tabela com os valores “1”, “0” ou “0,5”, de forma a comparar a importância dos parâmetros aos pares. O valor de “1” é aplicado ao parâmetro mais importante, “0” ao parâmetro menos importante e “0,5” aos parâmetros igualmente importantes, como demonstra a Tabela 8. O índice de desempenho de cada parâmetro é calculado através da razão entre o somatório dos valores do parâmetro com o somatório de todos.

Tabela 8 - Tabela de cálculo de índices de importância.

Parâmetros	1-2	1-3	2-3	Somatório	Índices de importância, ω_i
Parâmetro 1	0	0		0	0
Parâmetro 2	1		0,5	1,5	0,5
Parâmetro 3		1	0,5	1,5	0,5
Σ				3	1

Após calculados os índices de importância, calculam-se os índices de desempenho, γ (Tabela 9). Estes índices avaliam o desempenho das soluções, e concluem qual o modelo a selecionar. Para este efeito, é elaborada a matriz de seleção com as propriedades das soluções, V , o índice ponderado das propriedades, β , e os índices de importância dos parâmetros, ω .

Tabela 9 - Exemplo de matriz de seleção.

	1		2		3		Índices de desempenho, γ_i
	ω_1		ω_2		ω_3		
Solução 1	V_{1-1}	$\beta_{1-1} * \omega_1$	V_{1-2}	$\beta_{1-2} * \omega_2$	V_{1-3}	$\beta_{1-3} * \omega_3$	γ_1
	β_{1-1}		β_{1-2}		β_{1-3}		
Solução 2	V_{2-1}	$\beta_{2-1} * \omega_1$	V_{2-2}	$\beta_{2-2} * \omega_2$	V_{2-3}	$\beta_{2-3} * \omega_3$	γ_2
	β_{2-1}		β_{2-2}		β_{2-3}		
Solução 3	V_{3-1}	$\beta_{2-1} * \omega_1$	V_{2-3}	$\beta_{3-2} * \omega_2$	V_{3-3}	$\beta_{3-3} * \omega_3$	γ_3
	β_{3-1}		β_{3-2}		β_{3-3}		

O índice ponderado das propriedades é calculado utilizando a Equação 5.

$$\beta = \frac{\text{valor numérico da propriedade}}{\text{valor máximo da propriedade nas diferentes soluções}} \quad (5)$$

O índice de desempenho de uma solução é calculado somando os produtos dos índices ponderados das propriedades com os índices de importância de cada parâmetro, segundo a Equação 6.

$$\gamma = \sum (\beta_i \times \omega_i) \quad (6)$$

3.6.2. Sistema de acoplamento das facas

Solução 1

Para a solução 1 (Figura 31), nas facas superiores, optou-se por descartar os suportes das facas da Mario Cotta e projetar um suporte com dimensões semelhantes (Figura 32Figura **32 a**), porém com um diâmetro interior de 25 mm, um escatel para uma chave de 8 mm de largura, e espessura de 6,35 mm de forma a ser possível produzir fitas com largura de 6,35 mm (mínimo pretendido) com dois suportes em contacto. O anel elástico e a mola são reaproveitados neste modelo. Projetou-se também um suporte (Figura 32 b) que funciona como adaptador de diâmetro das contrafacas para o veio, sendo preciso um anel elástico para veios de 60 mm. Nos veios, pretendem-se maquinar três escatéis de 90 mm de comprimento (máximo admissível para chaves de 8 mm) e espaçadores com comprimentos específicos que permitam ao sistema cortar fitas com diferentes larguras de acordo com as suas diferentes combinações de posições. São colocados colares de fixação nas pontas dos veios de modo a bloquear o movimento axial das facas e dos espaçadores. As chaves garantem que o binário dos veios seja transmitido para as facas, com deslizamento nulo.

Nesta solução, as peças são fabricadas em aço e são produzidas através de processos de maquinação, como torneamento para os suportes das facas superiores, fresagem para realizar os escatéis dos veios, e brochagem para realizar os escatéis dos espaçadores e dos suportes. Esta solução apresenta a vantagem de não permitir escorregamento entre os veios e os suportes.

A vantagem de fabricar suportes novos, em comparação com a utilização dos suportes da Mario Cotta, é que se consegue reduzir a largura total do conjunto de facas. Isso permite garantir uma distância mínima de 6,35 mm entre as facas, cumprindo assim este requisito. Ao desenvolver um sistema de acoplamento para o suporte da marca das facas, a largura aumentaria, dificultando o cumprimento do requisito.

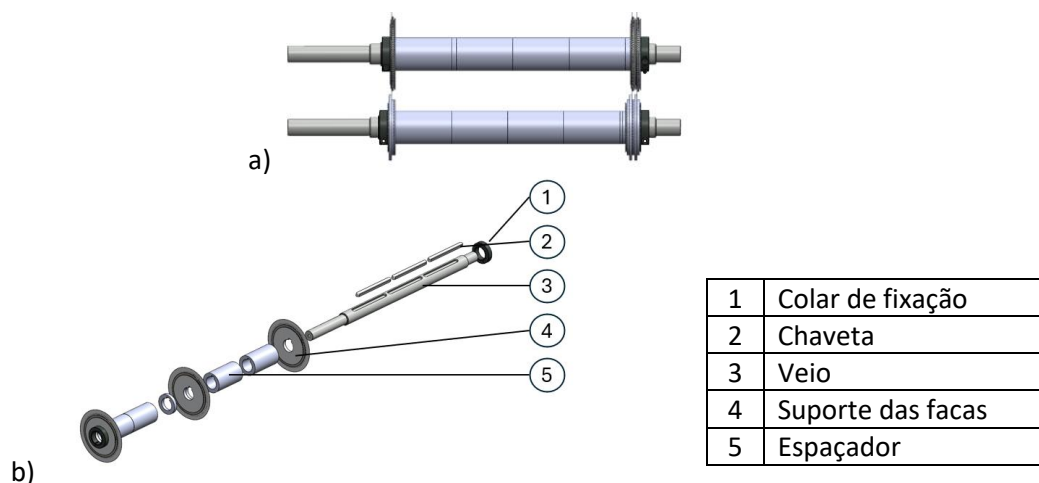


Figura 31 – Solução 1: a) vista frontal; b) vista explodida.

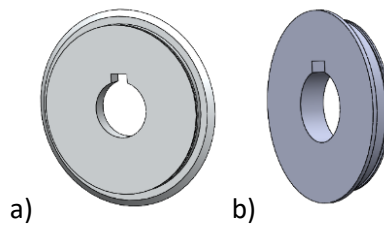


Figura 32 - a) Suporte das facas; b) Suporte das contrafacas.

Solução 2

Na solução 2 (Figura 33) utilizam-se dois tubos com diâmetro exterior de 60 mm, roscado na superfície exterior em todo o seu comprimento. A rosca deve ser compatível com as porcas M60 previamente adquiridas. Os tubos são fixos aos veios através de dois casquilhos com dois pernos cada (Figura 34). Os conjuntos das facas superiores são colocados no tubo roscado com espaçadores de 60 mm de diâmetro interno, para definir a distância entre as facas e a largura das fitas. As porcas M60 nas pontas do conjunto permitem realizar pressão axial entre os espaçadores e as facas, criando atrito suficiente para transmitir o binário do tubo roscado para as facas. A transmissão do veio para o tubo é realizada pelos pernos presentes nos casquilhos.

Esta solução tem a vantagem de utilizar todos os componentes obtidos da Mario Cotta sem modificação, e a utilização das porcas M60 já presentes em stock. Este sistema, por estar adequado à aplicação das facas diretamente da fábrica, tem a vantagem de permitir aumentar o número de facas, caso necessário. Para além disto, as peças seriam produzidas por fabrico aditivo, recorrendo a uma impressora 3D.

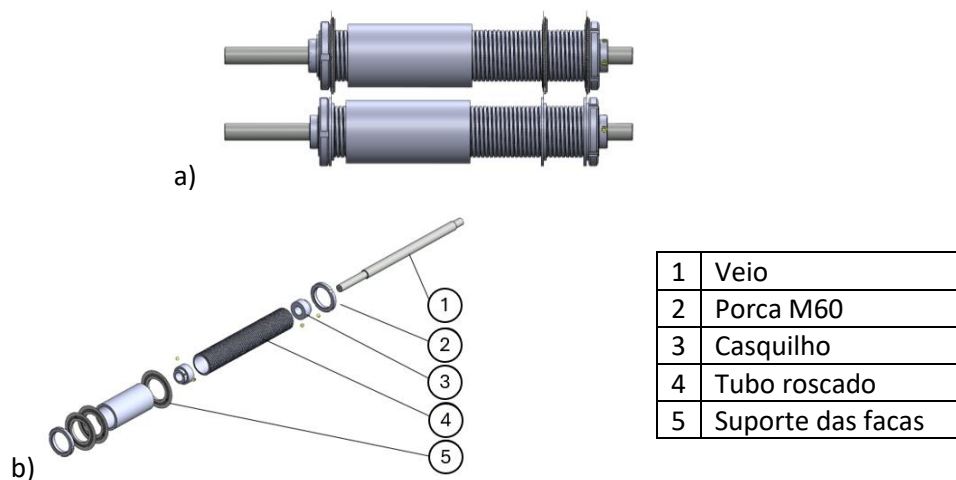


Figura 33 - Solução 2: a) vista frontal; b) vista explodida.

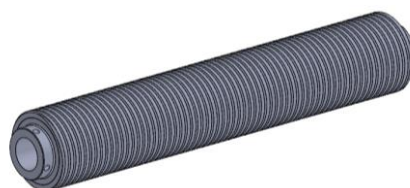


Figura 34 - Tubo roscado com dois casquilhos.

Solução 3

Para a solução 3 (Figura 35), desenvolveram-se adaptadores de diâmetro que permitem fixar os suportes e as contrafacas aos veios (Figura 36). Nos adaptadores da solução 3, existe uma reentrância com um furo roscado para colocar pernos. Esta reentrância funciona como colar de fixação, e bloqueia movimentos axiais e de rotação relativos ao veio, de modo a transmitir o binário dos veios diretamente para os adaptadores. Para garantir que não ocorrem movimentos relativos entre os suportes e os adaptadores, desenvolveu-se um sistema de fixação por pressão (Figura 37 a). Ao desenvolver esta solução, concluiu-se que, dada a reduzida dimensão da largura mínima admissível das fitas, não seria possível utilizar dois adaptadores independentes para as duas contrafacas no corte da fita de 6,35 mm. Como tal, foi necessário desenvolver um adaptador específico para o caso do corte de fitas de 6,35 mm (Figura 37 b), e dois adaptadores para as mesmas contrafacas em situações de *slitting* de fitas com larguras superiores (Figura 37 c). De modo a evitar a desmontagem da estrutura do sistema de *slitting* durante a afinação das facas, estes adaptadores foram divididos em duas peças independentes, o que possibilita assim a sua montagem e desmontagem do veio.

Pretende-se que estas peças sejam todas fabricadas por impressão 3D, o que constitui uma vantagem desta solução devido ao reduzido custo de produção e facilidade de fabrico. Esta solução também beneficia de não necessitar de desmontar a estrutura onde o sistema de corte está incorporado para afinar a posição das facas. Para além disto, esta solução garante uma grande versatilidade na escolha da largura pretendida para o corte das fitas. Apesar disto, a falta de precisão da afinação apresenta-se como desvantagem, e pode resultar em imprecisões superiores na largura das fitas em comparação com as soluções que utilizam espaçadores. A desvantagem deste sistema encontra-se relacionada com a limitação de apenas permitir o corte de uma fita de 6,35 mm de cada vez, o que impede possíveis evoluções do equipamento para o corte de várias fitas em simultâneo, com a adição de mais facas.

Esta solução implica adquirir componentes de catálogo, tais como 6 pernos M5 com 5 mm de comprimento, e 24 parafusos M5 de 12 mm de comprimento.

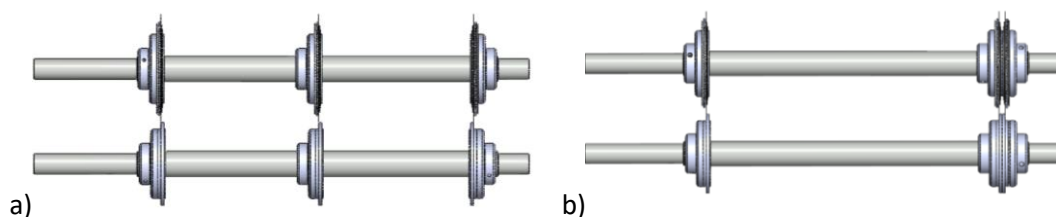


Figura 35 - Solução 3: a) posição das facas para corte de fitas de 150 mm; b) posição das facas para corte de fitas de 6,35 mm.

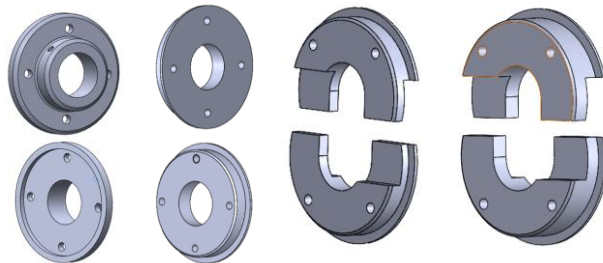


Figura 36 - Peças a fabricar.

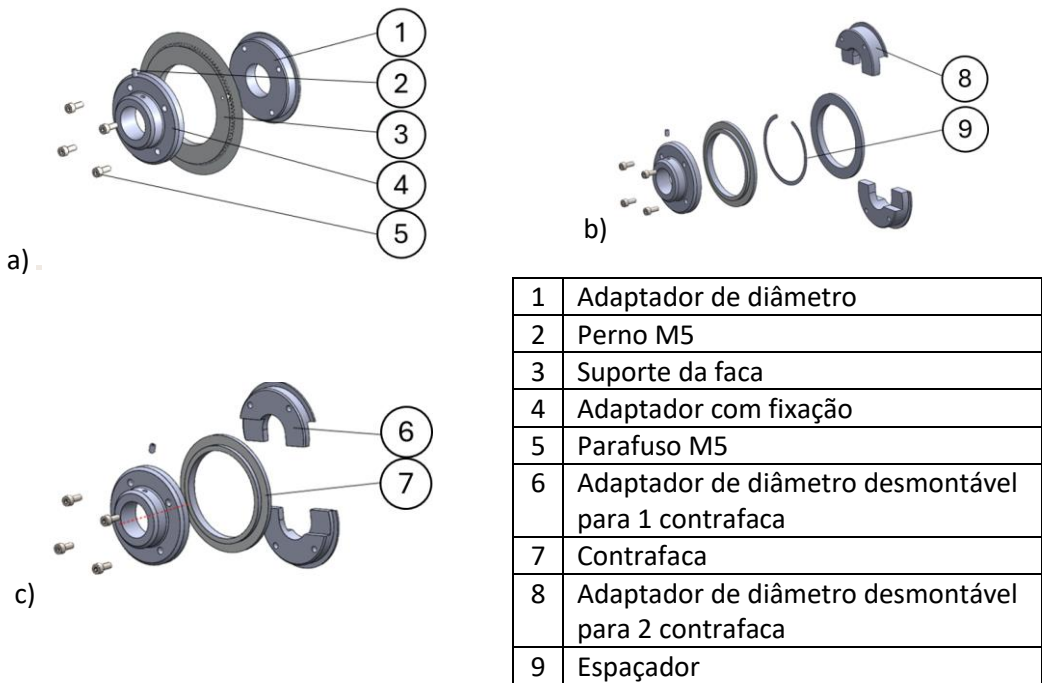


Figura 37 - a) Adaptador do suporte das facas; b) adaptador de uma contrafaca; c) adaptador de duas contrafacas.

Solução 4

A solução 4 (Figura 38) aplica o mesmo sistema de acoplamento das contrafacas da solução 3. No entanto, as contrafacas são fresadas para reduzir a sua largura de 6 mm para 3 mm (Figura 39 c) e projetaram-se suportes de facas compatíveis com o veio do sistema de corte, que acoplam diretamente ao veio com um perno (Figura 39 a e b). Estas modificações permitem obter três adaptadores de diâmetro independentes mesmo numa situação de corte de fitas de 6,35 mm.

Esta solução permite obter uma largura inferior do sistema de acoplamento das facas, e possibilita o posicionamento das facas na mesma orientação, sem que estas interfiram no corte de fitas de 6,35 mm de largura. Para além disto, esta solução tem a vantagem de simplificar o

sistema de acoplamento dos suportes das facas superiores, e reduzir o risco de escorregamento entre as facas e o veio. No entanto, esta solução apresenta a desvantagem da necessidade de maquinar as contrafacas e os suportes das facas em aço.

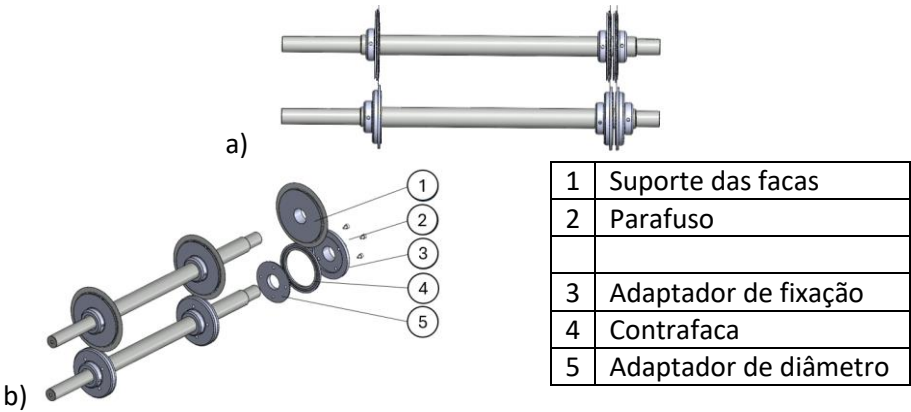


Figura 38 - Solução 4: a) vista frontal; b) vista explodida.

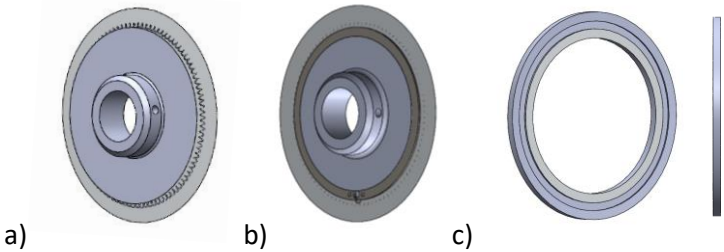


Figura 39 - a) Adaptador para suporte das facas esquerdo; b) adaptador para suporte das facas direito; c) contrafaca maquinada.

Solução 5

Por fim, a solução 5 (Figura 40) combina o sistema da solução 4, para as facas superiores, com a solução 2, para as contrafacas. Este sistema é bastante comum neste tipo de equipamentos, por apresentar a vantagem de os espaçadores terem o diâmetro exterior igual ao das contra facas, servindo de apoio às fitas durante o *slitting*, e durante a colocação de uma fita nova no equipamento. O apoio das fitas, para além de facilitar na montagem da fita no equipamento, também reduz os possíveis desvios que a mesma possa sofrer, e consequentemente reduz os desvios geométricos da largura da fita. Apesar deste sistema apresentar a desvantagem da utilização de vários espaçadores, o facto de se utilizar em apenas um dos veios reduz substancialmente o número espaçadores necessários quando comparado com o da solução 2.

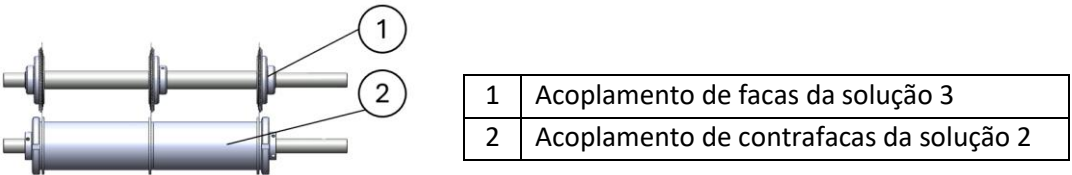


Figura 40 - Solução 5.

Seleção da Solução

Para a elaboração da matriz de seleção, optou-se por utilizar uma avaliação qualitativa das soluções com uma escala de 1 a 5 em cada parâmetro. Os parâmetros definidos para elaboração da matriz de seleção foram:

1. **Precisão do posicionamento das facas**, que depende do método de afinação da posição das facas. Dado que o equipamento é projetado para produzir fitas com larguras diferentes, é necessário realizar a calibração da posição das facas de acordo com a largura pretendida. O método de afinação influencia a precisão da largura do produto final, pelo que a respetiva afinação apresenta elevado índice de importância;
2. **Facilidade de calibração**. Como referido no parâmetro anterior, a calibração é fundamental para se obter elevada precisão na largura das facas. No entanto, é importante que o método de calibração, para além de preciso, seja prático e de fácil execução, de modo a simplificar a ação do operador no caso de necessidade de alterar o posicionamento das facas;
3. **Durabilidade**. O sistema deve apresentar elevada durabilidade de modo a garantir um tempo de vida útil elevado. Este parâmetro depende do material e da própria geometria das peças;
4. **Facilidade de manutenção**, que depende, por exemplo, da complexidade do sistema e do material das peças;
5. **Custo**. Apesar de os custos de fabrico das soluções construtivas serem, em geral, reduzidos, este é um parâmetro a ter em consideração;
6. **Peso do sistema**. Pretende-se com este parâmetro evitar esforços desnecessários nos veios e estrutura do sistema de corte.

De modo a calcular os índices de importância de cada um dos parâmetros definidos, foi elaborada a Tabela 10, que avalia a importância de cada um dos parâmetros em todas as combinações de pares. Na Figura 41 é possível analisar a importância de cada parâmetro.

Tabela 10 - Índices de importância.

	Combinações															Σ	ω
	1-2	1-3	1-4	1-5	1-6	2-3	2-4	2-5	2-6	3-4	3-5	3-6	4-5	4-6	5-6		
Parâmetros	1	0,5	1	1	1	1										4,5	0,300
	2	0,5				1	1	1	1							4,5	0,300
	3		0			0				0,5	1	1				2,5	0,167
	4			0			0			0,5			1	1		2,5	0,167
	5				0			0			0		0		0,5	0,5	0,033
	6					0			0			0		0	0,5	0,5	0,033

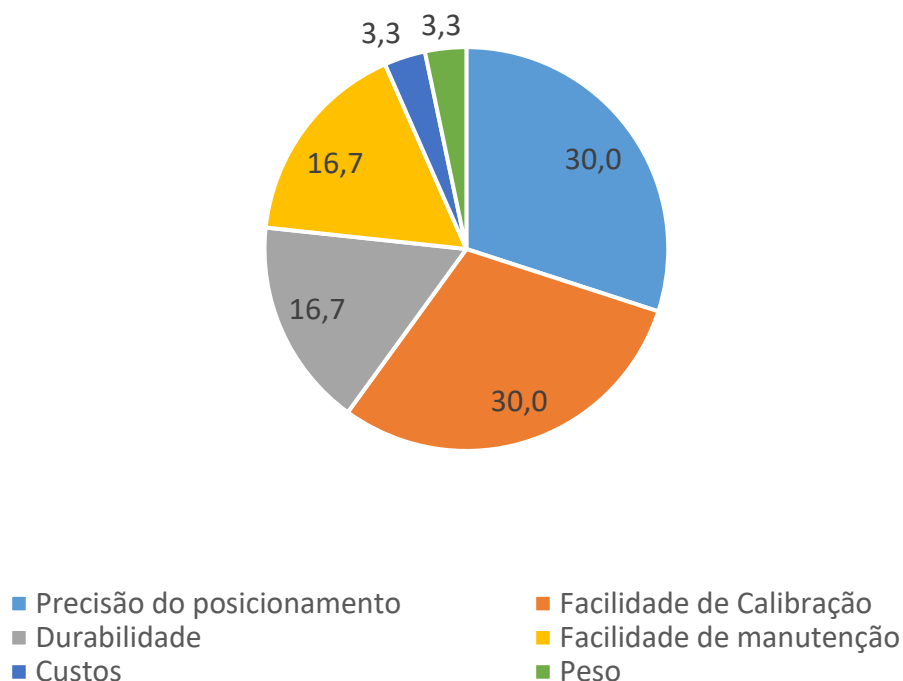


Figura 41 - Esquema de representação dos índices de importância (em %).

A avaliação das soluções para cada um dos parâmetros é apresentada na Tabela 36 do Apêndice C.

Por fim, é possível observar o resultado da matriz de seleção na Tabela 11 e no gráfico da Figura 42. Ao analisar o gráfico, é possível concluir que a solução com maior índice de desempenho é a solução 3. Como tal, será a solução construtiva 3 a avançar para a fase de projeto.

Tabela 11 - Matriz de seleção.

	1ª		2ª		3ª		4ª		5ª		6ª		γ
	0,300		0,300		0,167		0,167		0,033		0,033		
solução 1	5	30	1	6	5	16,7	1	3,3	1	0,7	1	0,7	57
	1		0,2		1		0,2		0,2		0,2		
solução 2	3	18	2	12	1	3,3	2	6,7	4	2,7	2	1,3	44
	0,6		0,4		0,2		0,4		0,8		0,4		
solução 3	2	12	4	24	2	6,7	5	16,7	5	3,3	5	3,3	66
	0,4		0,8		0,4		1		1		1		
solução 4	1	6	5	30	4	13,3	3	10,0	1	0,7	4	2,7	62,7
	0,2		1		0,8		0,6		0,2		0,8		
solução 5	4	24	3	18	3	10	2	6,7	3	2	3	2	62,7
	0,8		0,6		0,6		0,4		0,6		0,6		

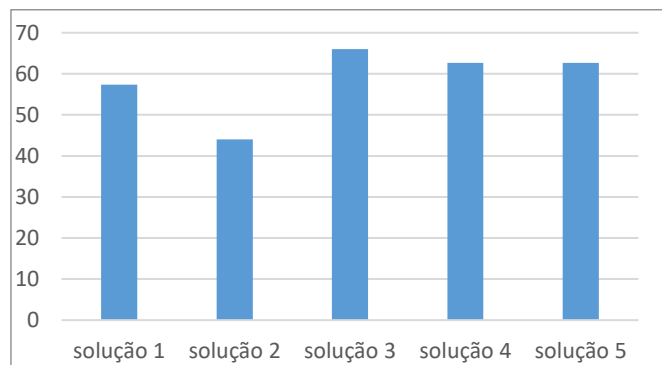


Figura 42 - Índices de desempenho das soluções.

3.6.3. Sistema de fixação do sensor ultrassônico

Solução 1

A solução construtiva 1 foi desenvolvida exclusivamente para apoiar o sensor durante a ação de *slitting*. Esta solução trata-se de uma peça única, fixada ao perfil da estrutura do sistema de corte através de dois parafusos e duas porcas próprias para aplicar ao perfil. A solução 1 permite o movimento longitudinal do sistema de fixação ao perfil, de modo a afinar a posição do sensor nesse eixo. Este é um sistema de reduzida complexidade, mas que não permite afinações na altura do sensor, e na sua inclinação.

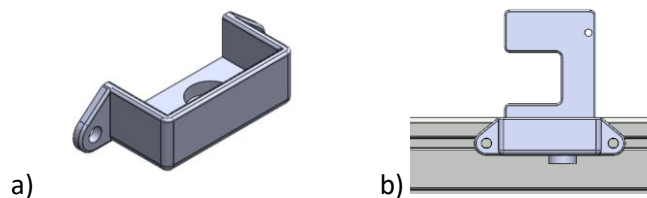


Figura 43 - a) Modelo CAD da peça; b) modelo CAD da montagem da peça no sistema.

Solução 2

A solução construtiva 2, tal como a solução 1, trata-se de uma peça única fixada ao perfil da estrutura do sistema de corte. A peça apresenta um conjunto de ranhuras ou *slots* que permitem o ajuste da posição do sensor no eixo vertical. Para este efeito, são utilizados dois parafusos e porcas para fixar o sensor ao suporte. Esta solução, face à primeira, apresenta a vantagem da afinação da posição do sensor no eixo vertical e horizontal, mas não a sua inclinação.

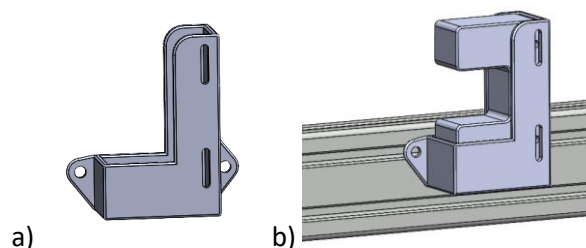


Figura 44 - a) Modelo CAD da peça; b) modelo CAD da montagem da peça no sistema.

Solução 3

A solução construtiva 3 é constituída por duas peças principais, designadamente um suporte para o sensor e uma peça de apoio para fixar o sistema de fixação ao perfil da estrutura do sistema de corte. O suporte do sensor é uma peça semelhante à da solução 2, com ranhuras que permitem ajustar a altura do sensor. No entanto, esta solução permite afinar a inclinação do sensor. O suporte está ligado ao apoio com dois parafusos laterais que permitem o movimento de rotação livre entre as duas peças. De modo a fixar a posição do sensor, existe um outro parafuso e porca, ligado a uma ranhura curva, que aplica pressão entre as duas peças, fixando-as. Como tal, esta solução permite afinação da posição horizontal e vertical do sensor e da inclinação do mesmo.

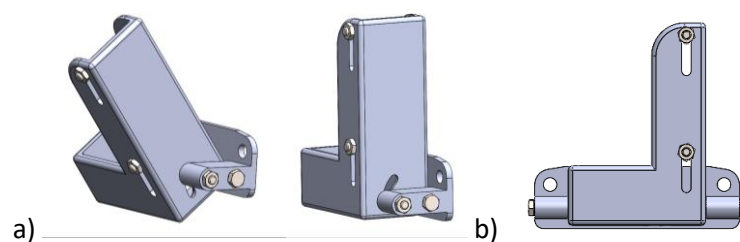


Figura 45 - a) Modelo CAD do sistema em duas posições distintas, b) vista frontal do sistema.

Solução 4

A solução construtiva 4 é constituída por uma flange, dois veios, uma peça de fixação entre dois veios, uma peça de fixação entre um veio e o suporte do sensor, e o suporte do sensor. Esta solução permite afinar a posição do sensor nos três eixos, bem como a sua inclinação. As peças de fixação utilizam a pressão por conjuntos de parafusos – porcas para bloquear movimentos nos veios e no suporte.

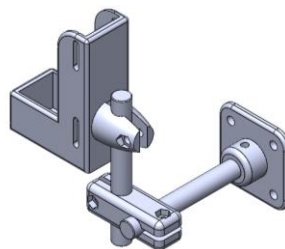


Figura 46 - Modelo CAD do sistema de fixação.

Seleção da solução

Para a elaboração da matriz de seleção, optou-se por utilizar uma avaliação qualitativa das soluções. Nos três primeiros parâmetros, a avaliação é entre 0 e 1, sendo que 1 significa “a solução é munida deste parâmetro”, e 0 “a solução não é munida deste parâmetro”. No último, a avaliação é feita numa escala de 0 a 3. Os parâmetros definidos para elaboração da matriz de seleção foram:

1. **Movimento horizontal.** Este parâmetro refere-se à possibilidade de o sistema conseguir mover o sensor no eixo horizontal;

2. **Movimento vertical.** Este parâmetro refere-se à possibilidade de o sistema conseguir mover o sensor no eixo vertical;
3. **Movimento angular.** Este parâmetro refere-se à possibilidade de o sistema conseguir variar a orientação angular do sensor;
4. **Simplicidade do sistema.** Por fim, o quarto parâmetro avalia a simplicidade do sistema. Um maior número de componentes e conexões resulta na necessidade de manutenção acrescida. Adicionalmente, sistemas mais complexos podem interferir com outros sistemas adjacentes e limitar futuras evoluções do equipamento.

De modo a calcular os índices de importância de cada um dos parâmetros definidos, foi elaborada a Tabela 12, que avalia a importância de cada um dos parâmetros em todas as combinações de pares. Na Figura 47 é possível analisar a importância de cada parâmetro.

Tabela 12 - Cálculo dos índices de importância.

		Combinações						Σ	ω
		1-2	1-3	1-4	2-3	2-4	3-4		
Parâmetros	1	0,5	1	1				2,5	0,417
	2	0,5			1	1		2,5	0,417
	3		0		0		0,5	0,5	0,083
	4			0		0	0,5	0,5	0,083

Índices de Importância (em %)

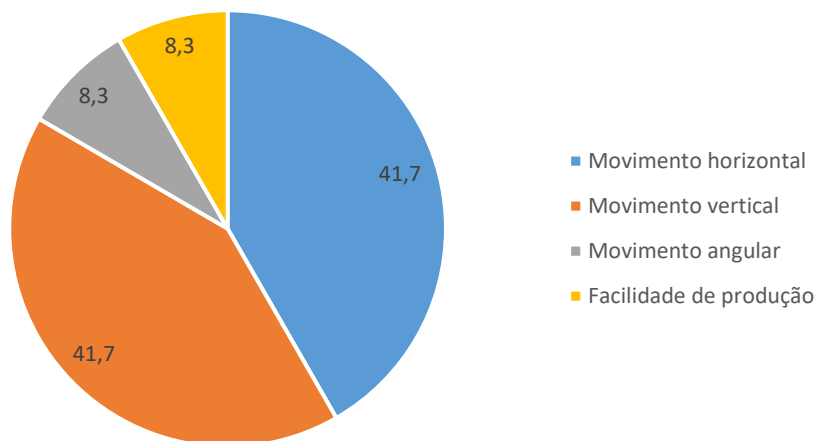


Figura 47 - Gráfico circular dos índices de importância.

A avaliação das soluções para cada um dos parâmetros é apresentada na Tabela 37 do Apêndice C.

Por fim, é possível observar a classificação de cada solução na matriz na Tabela 13, e no gráfico da Figura 48.

Tabela 13 - Matriz de seleção.

parâmetros índice de importância	1↗		2↗		3↗		4↗		Y
	0,417		0,417		0,083		0,083		
solução 1	1	42	0	0	0	0,0	4	8,3	50
	1		0		0		1		
solução 2	1	42	1	41,7	0	0,0	3	6,3	90
	1		1		0		0,75		
solução 3	1	42	1	41,7	1	8,3	2	4,2	96
	1		1		1		0,5		
solução 4	1	42	1	41,7	1	8,3	1	2,1	94
	1		1		1		0,25		

Índices de desempenho

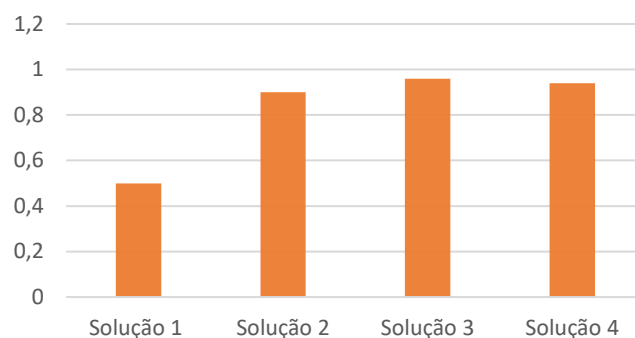


Figura 48 - Gráfico dos índices de desempenho

A solução construtiva para o suporte do sensor ultrassônico selecionada para avançar para a fase de projeto foi a solução 3. Esta solução apresenta maior vantagem em relação às soluções 1 e 2 devido ao facto de permitir afinação da posição do sensor nos três eixos, e proporcionar a inclinação do mesmo. Em relação à solução 4, a solução 3 é uma solução menos complexa, o que implica processos de fabrico mais simples na sua produção. Para além disso, é uma solução de menores dimensões, com menos componentes que podem interferir com os outros sistemas do equipamento. Por estes motivos, a solução 3 foi a solução com maior índice de desempenho, e como tal, a solução escolhida para avançar para a fase de projeto.

3.6.4. Sistema de guiamento das fitas

Para evitar desvios laterais da fita na zona de corte, foram desenvolvidas duas soluções construtivas de sistemas mecânicos que corrigem estas ocorrências, e mantêm a fita na sua orientação horizontal.

Solução 1

A primeira solução envolve a produção de quatro flanges para acoplar veios (Figura 49). As flanges devem ter dimensões adequadas para serem fixadas nas duas ranhuras dos perfis que funcionam como travessas do sistema de corte. Por outro lado, estão acopladas aos veios peças

especialmente produzidas para permitir a fixação de varões roscados. Nestes varões encontram-se rolos verticais de rotação livre que acompanham a velocidade linear da fita.

Este sistema possibilita a calibração da posição dos rolos no eixo paralelo aos perfis metálicos do sistema de corte, permitindo assim a adaptação dos rolos à largura da fita. Um aspecto positivo desta solução é a possibilidade de incorporar o sensor de desvios diretamente no sistema. Contudo, trata-se de um sistema de dimensões consideráveis.

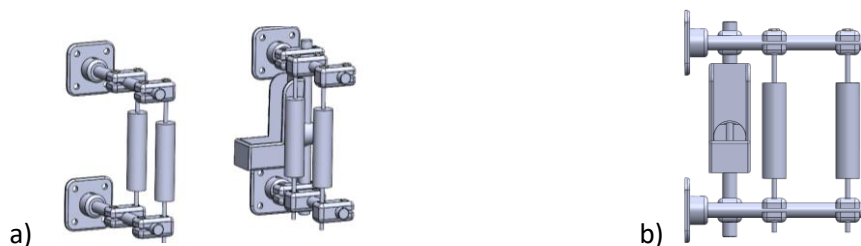


Figura 49 - a) Vista isométrica do modelo CAD do sistema; b) Vista lateral do sistema.

Solução 2

A segunda solução construtiva propõe a fixação de dois perfis BOSCH 30x30 perpendicularmente às travessas do sistema de corte, utilizando cantoneiras (Figura 50). A estes perfis são acoplados dois varões roscados, fixos por meio de porcas para perfil. Nas extremidades dos varões encontram-se montado um rolamento com uma ranhura em V, também fixado com porcas. A ranhura no rolamento suporta e guia as arestas da fita. Esta solução permite, igualmente, o ajuste lateral dos rolamentos de acordo com a largura da fita, ao ajustar os perfis 3030 ao longo do sistema de corte.

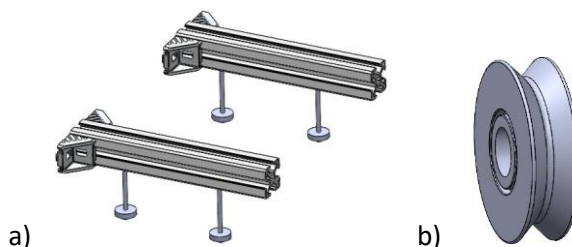


Figura 50 - a) Vista isométrica do sistema; b) rolamento com ranhura em V.

Seleção da solução

Para a elaboração da matriz de seleção, optou-se por utilizar uma avaliação qualitativa das soluções. Os parâmetros desta matriz estão enumerados de seguida. Todos os parâmetros são avaliados de 1 a 3:

1. **Funcionamento:** Este parâmetro avalia qual das duas soluções oferece melhores resultados em termos de minimização dos desvios laterais sem enrugamento da fita;
2. **Complexidade:** A simplicidade do sistema é considerada uma vantagem, pelo que, quanto mais complexo for o sistema, menor será o seu índice de desempenho. Uma maior complexidade implica uma necessidade de manutenção mais frequente e uma maior probabilidade de ocorrência de erros e maiores custos;

3. **Dimensões:** É vantajoso que o sistema seja o mais compacto possível, de modo a ocupar menos espaço. Esta característica evita interferências com outros componentes do equipamento e oferece maior flexibilidade para futuras modificações ou expansões.

Dado que, após avaliar as soluções nos diferentes parâmetros estabelecidos, se concluiu que a solução 2 tem avaliação superior em todos, deu-se por terminado o processo de seleção do sistema, sendo a solução 2 a avançar para a fase de projeto.

3.6.5. Sistema de controlo

Requisitos

Antes de desenvolver o anteprojeto deste sistema, foram definidos os seguintes requisitos:

1. Controlo de quatro servomotores;
2. Sinalizadores luminosos de funcionamento;
3. Dois botões de emergência;
4. Existência de um sistema de interface Homem-máquina;
5. Monitorização e controlo da velocidade de corte através da HMI;
6. Monitorização contínua dos desvios da fita e do diâmetro das bobines durante a ação de *slitting*;
7. Velocidade linear da fita de 1 m/s.

Em função dos requisitos apresentados, foi definido o sistema de controlo da máquina de *slitting*, dividido em controlo de tensão e velocidade, *hardware* e em *software*. No fim, são apresentadas as normas às quais se recorreu para a elaboração deste sistema.

Controlo de tensão e velocidade

No desenvolvimento de sistemas de rebobinagem, um dos aspetos cruciais a considerar é o controlo da tensão da fita ao longo de todo o processo. A revisão bibliográfica identificou diversos tipos de defeitos que podem ocorrer nas bobines durante a rebobinagem, resultado do perfil de variação de tensão ao longo do raio. Para mitigar estes defeitos, foram propostos diferentes perfis de controlo de tensão da fita ao longo do processo, entre os quais se destacam o perfil de binário constante, o perfil de diminuição linear de tensão e o perfil de diminuição hiperbólica de tensão.

De acordo com os estudos realizados, os perfis linear e hiperbólico demonstraram melhores resultados, apresentando menor incidência de defeitos nas bobines. Como tal, o perfil de variação de tensão selecionado foi o perfil de diminuição de tensão linear (Equação 3). Neste perfil, a tensão é linearmente reduzida ao longo do aumento do raio, o que reduz a probabilidade de ocorrência de defeitos do tipo *starring* nas bobines. Um dos parâmetros deste perfil é o *taper*, um parâmetro que define a diferença relativa entre as tensões inicial e final da rebobinagem. Este parâmetro é especialmente importante porque garante que não ocorre uma diminuição excessiva da tensão, fator que pode influenciar a qualidade do corte e a ocorrência

de defeitos do tipo *telescoping* nas bobines. Na Figura 51 é possível observar a variação da tensão em função da razão dos raios. Verifica-se que a tensão diminui de forma linear. Para a elaboração deste cálculo, consideraram-se os parâmetros de *taper* de 60%, T_0 de 0,074 N/mm, raio do núcleo da bobine de 80 mm e raio máximo de 270 mm.

$$T_{linear}(r) = T_0 \left[1 - \left(\frac{taper}{100} \right) \times \left(\frac{r-1}{r_M-1} \right) \right] \quad (3)$$

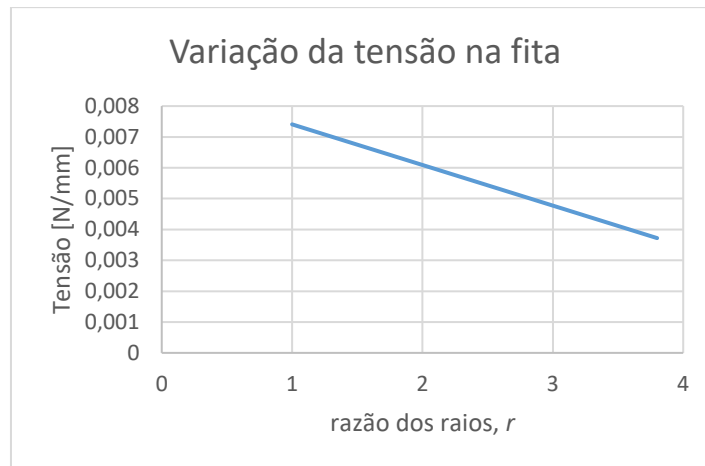


Figura 51 - Variação da tensão na fita com a razão dos raios.

No esquema da Figura 52 é possível observar as diferentes forças e velocidades envolvidas no equipamento.

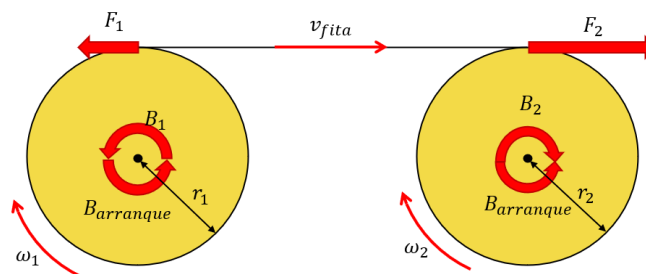


Figura 52 - Esquema de funcionamento do equipamento.

Os valores F , B , $B_{arranque}$, r , v_{fita} e ω são referentes à força aplicada na fita pelas bobines, o binário aplicado pelo servomotor, binário de arranque, o raio da bobine, a velocidade linear da fita e a velocidade angular da bobine, respetivamente. A bobine 1 é a bobine de alimentação e a bobine 2 a bobine recetora. De modo a garantir o correto funcionamento do equipamento, é necessário garantir-se que o valor de F_1 é inferior ao valor de F_2 . Como tal, optou-se por aplicar controlo de velocidade nos servomotores recetores e definir o binário no servomotor da bobine de alimentação.

O valor de binário da bobine de alimentação exerce a função de binário resistivo, que resulta na tração da fita, de acordo com a Equação 7. Para isso, o binário é aplicado no sentido oposto ao do movimento de rotação. O binário do servomotor da bobine de alimentação é determinado pela Equação 8. O valor de B_1 corresponde ao binário imposto à bobine de

alimentação. O valor de $B_{arranque}$ representa o binário mínimo necessário para que a velocidade angular da bobine de alimentação seja diferente de zero. Este binário também gera tensão na fita, pelo que deve ser considerado nos cálculos. Se o servomotor estiver desativado e B_1 for igual a zero, a força de tração na fita é equivalente à razão entre o binário de arranque e o raio da bobine de alimentação. O valor de F_{fita} é o produto da tensão desejada, obtida pela Equação 3, com a largura inicial da fita, L . O valor de r_1 corresponde ao raio atual das bobines recetoras, lido pelos sensores óticos de distância.

$$B_{total} = F_{fita} \times r_1 \quad (7)$$

$$B_{total} = B_1 + B_{arranque} \quad (8)$$

$$B_1 = F_{fita} \times r_1 - B_{arranque}$$

$$B_1 = T_{fita} \times L \times r_1 - B_{arranque}$$

$$B_1 = T_0 \times \left[1 - \left(\frac{taper}{100} \right) \times \left(\frac{r-1}{r_M-1} \right) \right] \times L \times r_1 - B_{arranque}$$

Os *drivers* seleccionados para o controlo dos servomotores no sistema em questão não possuem a capacidade de controlo direto do binário, sendo apenas possível controlar a velocidade. Diante desta limitação, o controlo do binário dos motores é realizado ajustando os parâmetros de binário mínimo e máximo dos *drivers*.

Na Figura 53 é possível observar um gráfico de variação do binário da bobine 1. O binário máximo corresponde ao inicial. Os parâmetros para a elaboração deste gráfico foram os mesmos aplicados no gráfico da Figura 51, considerando uma largura da fita de 300 mm e um binário de arranque de 0,05 N·m.

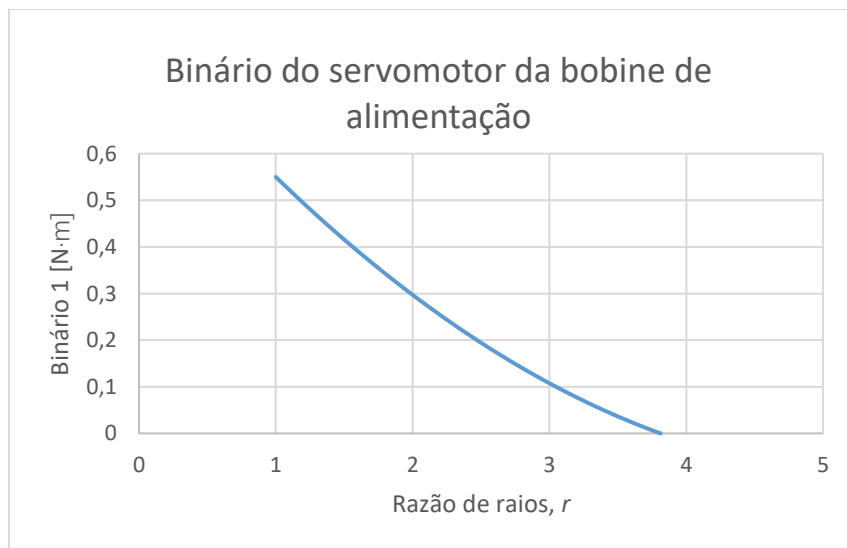


Figura 53 - Variação do binário do servomotor correspondente à bobine de alimentação com a razão dos raios.

Quanto ao controlo de velocidade, definiu-se que a velocidade linear da fita é constante ao longo do processo, de modo a garantir mais estabilidade do sistema de corte. O servomotor responsável pelo controlo de velocidade é o servomotor da bobina recetora. Como os *drivers* escolhidos possibilitam o controlo de velocidade, estes permitem definir um valor, aplicando o binário necessário para cumprir com a velocidade imposta. Como tal, apesar do binário resistivo provocado pela bobine de alimentação, o *driver* do servomotor da bobine recetora altera o binário de modo a cumprir com a velocidade de enrolamento desejada. Para determinar a velocidade angular das bobines, aplicou-se a Equação 9, na qual v_{linear} é a velocidade linear da fita imposta pelo operador, e r o raio atual das bobines recetoras obtido através das leituras do sensor ótico de distância.

$$\omega = \frac{v_{linear}}{r} \quad (9)$$

Hardware

Os requisitos de funcionamento do equipamento definem os componentes a utilizar para o controlo do equipamento:

1. **PLC.** Este dispositivo é utilizado no sistema de controlo para gerenciar o funcionamento da máquina de forma automática. Este recebe os sinais de entrada dos sensores e dos botões, processa estes sinais de acordo com a lógica programada e aciona saídas para os *drivers* e sinalizadores.
2. **Botões de emergência.** De modo a cumprir com o requisito, é necessário adquirir dois botões de emergência. Estes devem ser instalados em locais distintos no equipamento, e de forma estratégica para facilitar a sua atuação e minimizar as obstruções ao seu acionamento.
3. **Botão Start.** Este botão é o que comanda o acionamento da máquina.
4. **Botão Stop.** Este botão interrompe a ação da máquina.
5. **Botão Reset.** Este botão realiza o rearme do equipamento.
6. **Sensor de medição de distância.** De modo a garantir a monitorização contínua dos raios das bobines, é essencial adquirir sensores de distância com comunicação analógica para possibilitar a leitura dos dados pelo PLC.
7. **Sensor de medição de desvios.** De modo a garantir a monitorização contínua dos desvios das bobines, é essencial utilizar um sensor de medição de desvios de fitas, ou filmes, com comunicação analógica para possibilitar a leitura dos dados pelo PLC.
8. **HMI.** Segundo o requisito número 4, o equipamento deve ser munido de um ecrã HMI para definição de parâmetros, leitura de dados do equipamento e para interface com o operador.
9. **Servo drivers.** Para garantir o controlo adequado da velocidade e tensão da fita, os servomotores utilizados no equipamento, tanto para as bobines como para o sistema de corte, necessitam de oferecer controlo tanto da velocidade como de binário. Para

tal, é fundamental a utilização de *drives* que possibilitem estas funcionalidades e assegurem uma operação precisa e estável do sistema.

10. **Torre luminosa.** O equipamento deve ser munido de uma torre de sinalização, utilizando os códigos de cores segundo a norma EN IEC 60073.
11. **Luz *Enable*.** Este LED informa se o equipamento está em funcionamento.
12. **Luz *Reset*.** Este LED informa a necessidade de rearme.

Na Figura 54 é apresentado um fluxograma da montagem do *hardware* do sistema de controlo, com os respetivos tipos de comunicação.

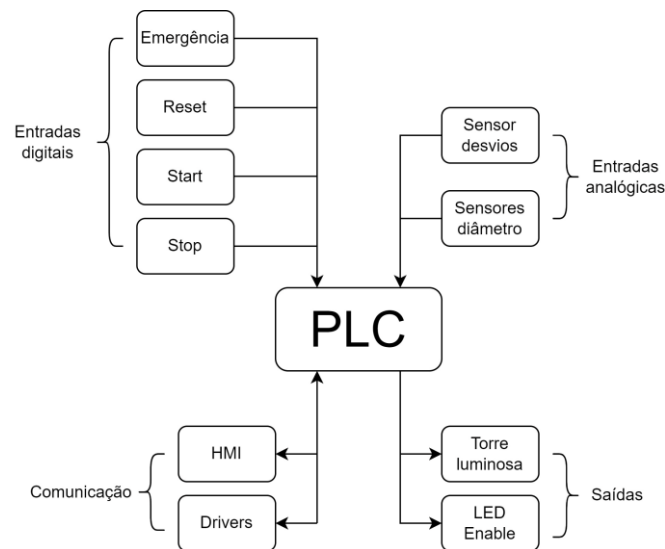


Figura 54 - Esquema de montagem do sistema de controlo.

Software

Para o funcionamento do equipamento, é necessário desenvolver um *software* a ser executado pelo PLC. Para este fim, foram inicialmente definidos os estados de operação do equipamento e as respetivas ações a serem realizadas em cada um deles:

1. ***Standby*, 10.** O estado 10 é o estado inicial e o estado de emergência. Para sair deste estado, é necessário realizar o rearme e garantir que nenhum dos botões de emergência está acionado. Em qualquer fase da operação, caso algum dos botões de emergência seja acionado, o equipamento regressa a este estado. Como tal, este estado deve desligar todas as ações do equipamento, ligar o LED vermelho da torre de sinalização, e ligar o LED de *Reset*.
2. ***Pronto para fita*, 11.** No estado 11, o equipamento já foi rearmado. Este é um estado de aviso de existência de anomalia na colocação da fita. Neste estado, os LEDs verde e amarelo da torre de sinalização estão ativos. O botão de *Start* não pode iniciar o funcionamento dos motores.
3. ***Pronto a funcionar*, 12.** Após se verificar que a fita está corretamente colocada no equipamento, o estado 12 deve ser ativado automaticamente. No entanto, a leitura da colocação da fita deve ser contínua e, caso ocorra alguma anomalia, o equipamento

deve regressar de forma automática ao estado 11. Nesta fase, o botão de *Start* inicia o funcionamento dos motores. O LED amarelo da torre de sinalização é desativado, permanecendo apenas o LED verde ativo.

4. **Em funcionamento, 13.** Por fim, o estado 13 ativa os motores e o LED de *Enable*. Durante este estado, é realizada a monitorização contínua da colocação da fita. Caso ocorra alguma anomalia, esta etapa é automaticamente interrompida, e o estado 11 é retomado. Se for necessário interromper a operação, o botão de *Stop* executa essa função, e o equipamento retorna ao estado 11.

Para além destes estados, o equipamento é munido de dois modos de funcionamento, *slitting* e rebobinagem. O modo de funcionamento deve ser selecionado pela interface do equipamento, e tem a função de estabelecer quais os servomotores e sensores que se encontram ativos durante os estados:

1. O modo ***slitting*** ativa todos os servomotores, designadamente o da bobine de alimentação, os das duas bobines recetoras e o do sistema de corte. Este modo deve também ativar a leitura de todos os sensores, os três sensores que medem os raios das bobines e o sensor de desvios.
2. O modo de **rebobinagem** deve ativar somente o servomotor da bobine de alimentação e o da bobine recetora. Quanto à monitorização dos raios, este modo deve somente ativar a leitura dos dois sensores das bobines em funcionamento. O sensor de desvios não é utilizado neste modo.

Para além dos dois modos de funcionamento, o equipamento tem um modo **administrador**, ou “admin”. O modo administrador tem exclusivamente a função de desativar a monitorização dos raios e da posição da fita. Com este modo ativo, o equipamento permite o acionamento dos motores, mesmo que na ausência de bobines ou fita.

Por fim, existe um sistema de segurança ativado pelos botões de emergência. Caso um dos botões de emergência seja acionado, o equipamento deve regressar para o estado de *standby*, desativar todos os motores, e ativar o LED vermelho da torre de sinalização.

Na Figura 55 é possível observar os diferentes *grafcets* associados ao *software* do equipamento. O *grafcet* da Figura 55 a) é associado à definição do modo de funcionamento do equipamento. O da Figura 55 b) corresponde à passagem de estados de equipamento, e o da Figura 55 c) corresponde ao sistema de emergência. Na Tabela 14 é apresentada a legenda dos *grafcets*.

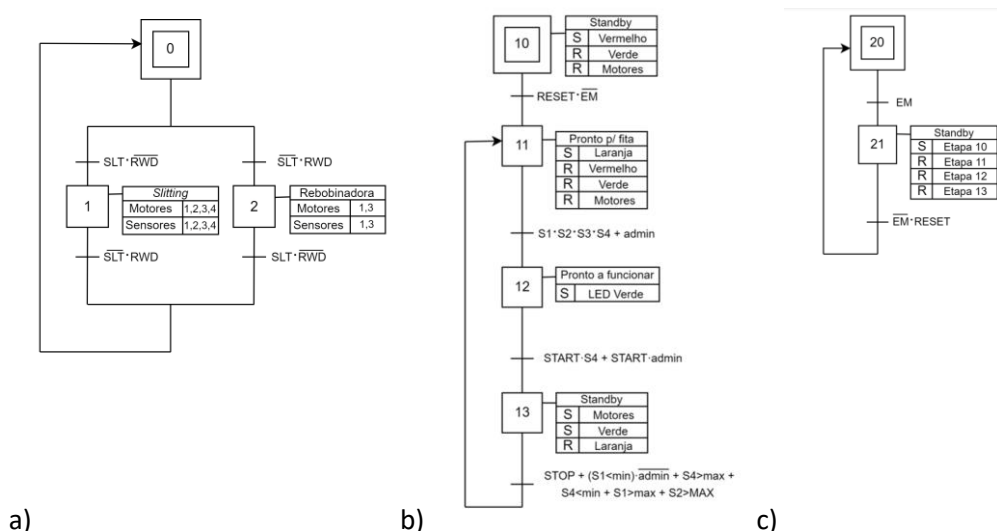


Figura 55 - *Grafset* do funcionamento do equipamento: a) definição do modo de funcionamento; b) passagem entre estados; c) ativação do modo de emergência.

Tabela 14 - Legenda dos *grafcets*

Ref.	Descrição	Ref.	Descrição
SLT	Modo <i>slitting</i>	LED Verde	LED verde do painel de controlo
RWD	Modo rebobinagem	LED Azul	LED azul do painel de controlo
Vermelho	Luz vermelha da torre de sinalização	S1	Sensor ótico 1
Verde	Luz verde da torre de sinalização	S2	Sensor ótico 2
Laranja	Luz laranja da torre de sinalização	S3	Sensor ótico 3
RESET	Botão de <i>reset</i> do painel de controlo	S4	Sensor ultrassónico
START	Botão de <i>start</i> do painel de controlo		
STOP	Botão de <i>stop</i> do painel de controlo		

Normas e regulamentação

Para a elaboração do projeto do sistema de controlo foi necessário ter em conta algumas normas. A norma **IEC 60073** estabelece o código de cores das luzes de sinalização. A norma **ISO 13850** define os requisitos de um dispositivo de paragem de emergência em máquinas e sistemas de controlo. Esta última define, por exemplo, o design e posição de um botão de emergência, bem como os requisitos de uma ação de rearme.

3.6.6. Sistema elétrico

Descrição do equipamento e requisitos operacionais

A elaboração do sistema elétrico implica a análise dos requisitos operacionais. O requisito principal é alimentar 4 servomotores com tensão de alimentação de 230V AC, e potência nominal de 0,2 kW. No entanto, definiram-se também requisitos adicionais que garantem a segurança na utilização do equipamento, e o correto funcionamento do mesmo. Os requisitos são:

1. Existência de um sistema de emergência com dois botões;
2. Utilização de disjuntores magnetotérmicos;
3. Uso de sistema de ligação à terra;
4. Monitorização do consumo energético do equipamento;
5. Dotação de um sistema de controlo com sistema HMI integrado.

O esquema da Figura 56 representa o sistema elétrico primário, com os componentes básicos essenciais e os componentes de controlo. Este diagrama descreve a alimentação trifásica de 230V AC, um interruptor geral que controla a entrada desta tensão no equipamento e um disjuntor trifásico que garante a proteção contra sobrecargas ou curtos-circuitos. Após o disjuntor trifásico o sistema utiliza diferentes fases para alimentar os sistemas monofásicos, de modo balancear as cargas.

A corrente é distribuída por diferentes disjuntores monofásicos, que permitem o isolamento dos vários subsistemas. Esta abordagem não só facilita a manutenção, como também protege individualmente cada parte do sistema contra sobrecargas e curtos-circuitos.

A fonte de alimentação, o PLC, o ventilador e os motores requerem uma tensão de 230V AC. Na saída da fonte de alimentação, a tensão é convertida para 24V DC, adequada para alimentar os componentes de controlo, como *switch*, *gateway*, HMI, sensores, PLC e *drivers*. Na Figura 56 observa-se o esquema representativo do sistema com os componentes essenciais.

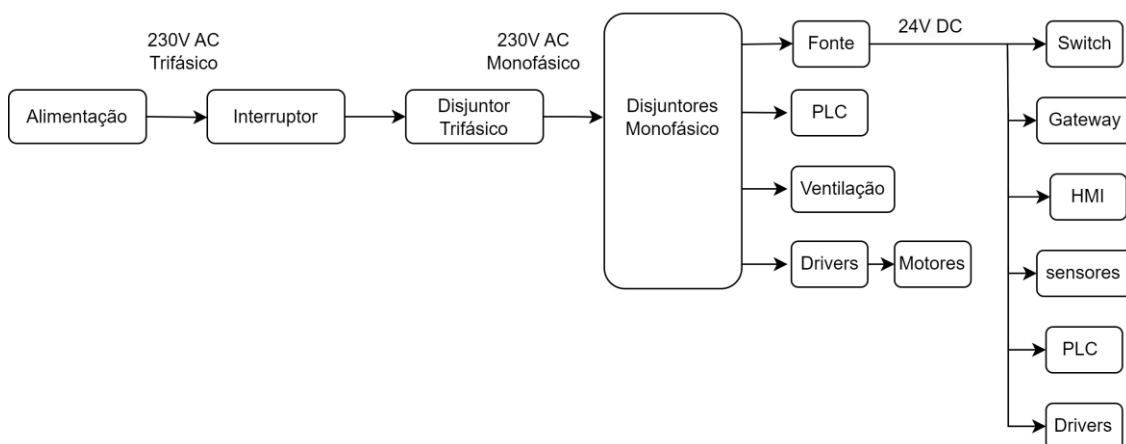


Figura 56 – Esquema do circuito com os componentes essenciais.

Na divisão da corrente em diferentes disjuntores monofásicos, optou-se por dividir o sistema da forma descrita na Figura 57. O disjuntor 1 distribui corrente para a fonte, o disjuntor 2 para o PLC, o disjuntor 3 para o ventilador e os disjuntores 4 e 5 distribuem para dois motores cada, passando primeiro pelos respectivos *servo drivers*. Os disjuntores utilizados são disjuntores magnetotérmicos, pois oferecem maior segurança tanto em situações de curto-circuito como de sobrecarga.

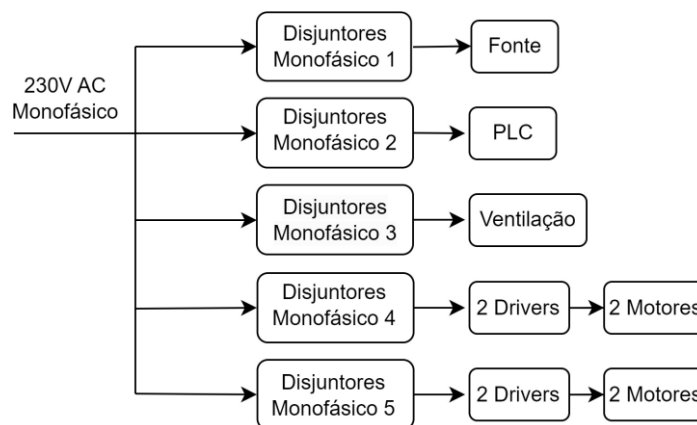


Figura 57 – Divisão do sistema elétrico pelos disjuntores.

De modo a cumprir com os requisitos de segurança, foram adicionados ao esquema primário elementos como indicadores luminosos de funcionamento e botões de emergência. Na Figura 58, os componentes adicionados estão sinalizados a cinzento. Foi adicionado um LED branco de 230V para indicar a entrada de energia no equipamento e um *energy meter* que mede os consumos energéticos da máquina, para ações de monitorização e registo de dados. Foram acrescentados dois contactores, controlados por um relé de segurança e associados aos botões de emergência. Na ligação aos disjuntores 4 e 5, que conduzem energia para os *drivers*. Deste modo, ao pressionar um dos botões de emergência, a corrente para os motores é automaticamente cortada, e os mesmos são desativados. A utilização de dois contactores em série aumenta a confiabilidade, a redundância e a conformidade com normas de segurança, de forma a garantir uma proteção mais robusta contra falhas do sistema. Foi acrescentado também um módulo de seletividade nas entradas do *switch*, do *gateway* e da HMI. Para fins de sinalização do funcionamento, utilizou-se uma torre luminosa com três cores (verde, laranja e vermelho), um LED *Enable* e um LED *Reset*.

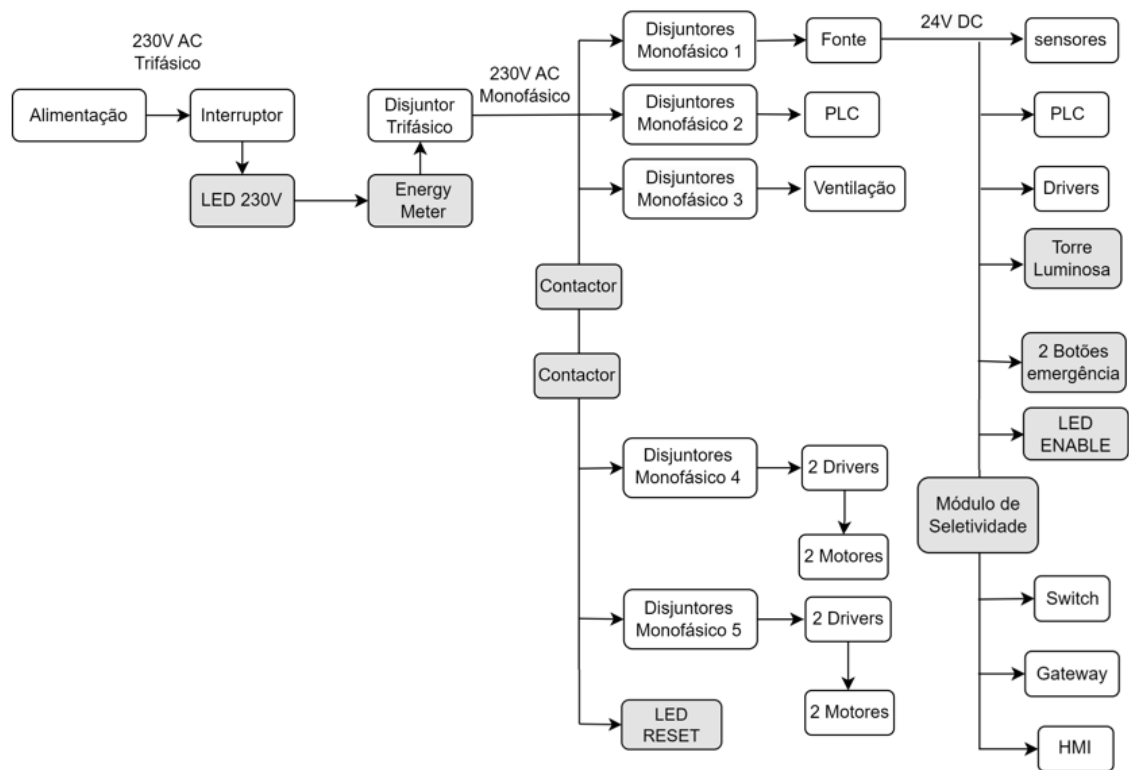


Figura 58 – Esquema geral do sistema.

Como são previstos trabalhos futuros para o equipamento, que visam a otimização e desenvolvimento de novos subsistemas, optou-se por acrescentar também uma tomada fêmea de corrente alternada monofásica à saída do disjuntor 3, e uma fonte de alimentação com relés livres à saída do disjuntor 4. A inclusão de uma fonte de alimentação conectada a relés livres facilita futuras expansões do sistema e permite a adição de atuadores ou sinalizadores de forma rápida e eficiente. Na Figura 59 observa-se o esquema de representação da instalação destes componentes.

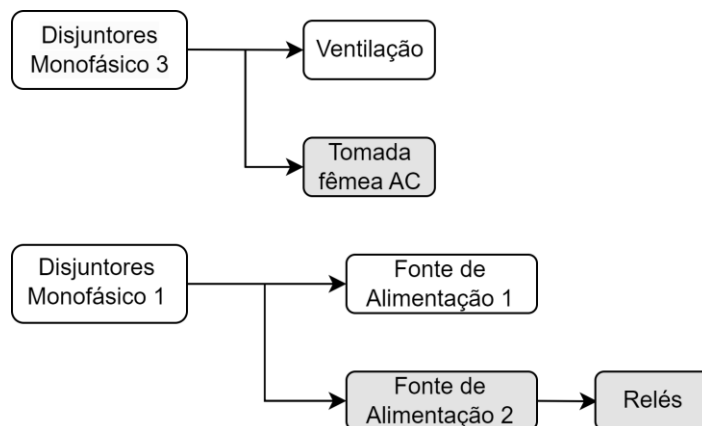


Figura 59 – Elementos adicionais acrescentados ao sistema elétrico.

Norma de regulamentação

Para a elaboração do projeto do sistema elétrico do equipamento é necessário recorrer à norma **IEC 60204-1 – Segurança de Máquinas - Equipamento Elétrico de Máquinas**. Esta norma aborda a integração da paragem de emergência no sistema elétrico e estabelece diretrizes para fiação e código de cores.

3.7. Projeto

3.7.1. Equipamento final

Neste subcapítulo, é apresentado o equipamento final e uma descrição dos princípios de funcionamento dos diferentes sistemas desenvolvidos nos subcapítulos seguintes.

De modo a cumprir com os objetivos desta dissertação, desenvolveu-se um equipamento de *slitting* (Figura 60) para cortar fitas de pré-impregnado de fibras de carbono e matriz termoplástica. Para este efeito, foi necessário realizar o projeto mecânico de um sistema de acoplamento das facas aos veios, um sistema de fixação de um sensor detetor de desvios, um sistema de guiamento da fita à entrada do sistema de corte e o projeto elétrico do equipamento, bem como desenvolver o código de programação da máquina e a interface HMI.

O equipamento tem dois modos de funcionamento, *slitting* e bobinagem. O modo *slitting* permite cortar fitas de até 300 mm de largura em fitas de larguras mais pequenas, que posteriormente são rebobinadas. O modo bobinagem permite transferir uma fita de uma bobine helicoidal para uma bobine em cassete. Esta funcionalidade é restringida apenas a fitas com 6,35 mm de largura. O equipamento tem uma base com rodas que facilitam o transporte do mesmo.

O equipamento final é uma máquina com as dimensões 992 x 828 x 2080 mm³, é alimentado por uma tomada trifásica, com 9,2 A de corrente e potência de 1,3 kW.

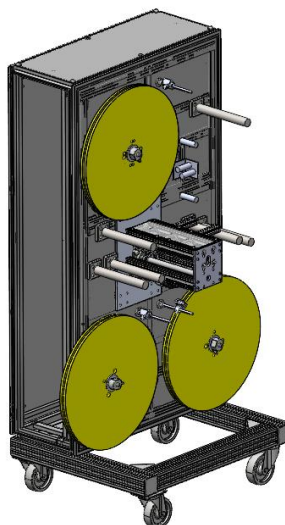


Figura 60 - Modelo CAD do equipamento final.

De seguida, são apresentados os princípios de funcionamento de cada um dos sistemas desenvolvidos nesta dissertação.

Sistema de Acoplamento de Facas

O sistema de acoplamento de facas foi desenvolvido para permitir a calibração da posição das facas nos veios do sistema de corte, permitindo o ajuste da largura das fitas. A solução adotada inclui adaptadores de diâmetro para as contrafacas e suportes das facas, que são fixados aos veios através de pernos roscados. As facas e contrafacas são fixadas por atrito às duas metades dos adaptadores, através da compressão provocada ao conjunto por quatro parafusos. As peças possuem cavidades para inserção de componentes metálicos, para a inclusão de roscas metálicas e elementos de fixação, e são fabricadas com materiais poliméricos que garantem resistência aos esforços envolvidos.

Sistema de Fixação do Sensor

O sistema de fixação do sensor desenvolvido é constituído por duas peças principais: uma para o suporte do próprio sensor e outra para fixação na estrutura. Como o sistema é fixado à travessa do sistema de corte, o sensor pode ser posicionado para ler os desvios da fita independentemente da largura. O sistema permite também ajustar a altura e inclinação do sensor.

Sistema de Guiamento das fitas

O sistema de guiamento das fitas é composto por perfis e varões roscados com rolamentos com ranhura em V, que estabilizam a fita à entrada e suportam a fita durante o corte. Este sistema é projetado especificamente para impedir desvios laterais à entrada do sistema de corte.

Sistema Elétrico

O sistema elétrico alimenta o sistema de potência, composto por quatro servomotores de 230V AC e inclui sistemas de segurança, como um relé de segurança, botões de emergência e disjuntores magnetotérmicos. Este sistema é dividido em cinco disjuntores, um que conduz corrente para a fonte de alimentação, um para o PLC, um para o ventilador e tomada, e dois para os *drives* e servomotores. O sistema elétrico também possui uma torre de sinalização com LEDs para indicar o estado operacional.

Sistema de Controlo

O controlo do equipamento é realizado por um PLC da Siemens. O princípio de funcionamento baseia-se no controlo da velocidade pelos servomotores das bobines recetoras, enquanto o servomotor da bobine de alimentação regula a tensão da fita, aplicando um binário resistivo. A monitorização dos raios das bobines é efetuada através de sensores óticos, e o controlo dos desvios laterais da fita é assegurado por um sensor ultrassónico.

Estes sistemas trabalham em conjunto para garantir o bom desempenho do equipamento.

3.7.2. Princípio de funcionamento

Para entender o processo de funcionamento do equipamento, é necessário distinguir os dois modos de funcionamento, *slitting* e bobinagem.

No modo de *slitting* (Figura 61 a), a bobine com a fita original é colocada no suporte ligado ao servomotor 1. De seguida, o operador atravessa a fita pelo sistema de corte, rodando as facas manualmente através da manivela, e fixa as fitas resultantes nas bobines nos servomotores 2 e 3. Depois, o sensor de deteção de desvios e o sistema de guiamento são colocados nas posições adequadas, e liga-se o equipamento. Antes de realizar a ação de *slitting*, o operador deve selecionar o modo *slitting* na HMI e preencher os parâmetros de operação necessários. Depois de terminado o processo, existem duas opções para retirar as bobines: ou o corte da fita é finalizado manualmente com a manivela, ou a fita presente no sistema de corte é colada a uma de outra bobine e o processo é concluído operando o equipamento.

No modo de bobinagem (Figura 61 b), a bobine de alimentação também é colocada no servomotor 1. Este modo serve exclusivamente para rebobinar fitas de 6,35 mm de largura de bobines helicoidais para bobines em cassette. Nesta situação, a fita é passada pelos rolos transversais e colocada diretamente na bobine do servomotor 3. Estes rolos permitem corrigir os desvios laterais acentuados provocados pelo enrolamento helicoidal na bobine de alimentação, e bobinar novamente numa cassette. Para terminar a operação, basta retirar as bobines e terminar o enrolamento manualmente.

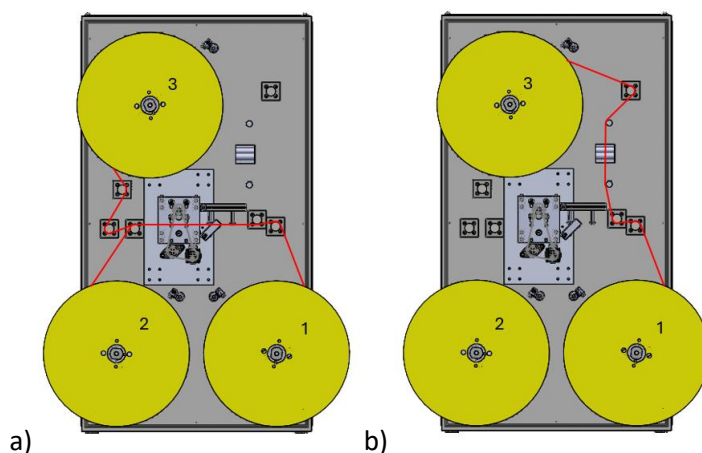


Figura 61 - Disposição dos rolos: a) montagem da fita em modo *slitting*; b) montagem da fita em modo rebobinagem.

Em ambos os casos, o servomotor ligado à bobine de alimentação exerce um binário resistivo que resulta na tração da fita, enquanto os servomotores ligados às bobines recetoras controlam a velocidade de enrolamento da fita.

O equipamento é munido de um sistema de emergência com dois botões de emergência e, através da HMI, permite a monitorização dos binários e velocidades dos servomotores e dos raios das bobines, bem como a deteção de erros e avisos por parte do sistema de controlo.

3.7.3. Sistema de acoplamento das facas

Solução construtiva

A solução construtiva selecionada para o sistema de acoplamento de facas foi a solução 3. Esta solução é constituída por adaptadores de diâmetro para as contrafacas e para os suportes das facas, que são fixados ao veio através de pernos. Para o desenvolvimento do projeto, existem vários aspetos a ter em consideração:

- **Insertos metálicos.** Dado que as peças projetadas são fabricadas em material polimérico, e produzidas com processo de fabrico aditivo, considera-se a utilização de insertos metálicos para garantir maior durabilidade e melhores propriedades mecânicas nos elementos de fixação e aperto das facas. Como tal, é necessário ter em consideração que a geometria da peça deve ser munida de espaços compatíveis para os insertos. Na Figura 62 é possível observar as cavidades para acoplar os insertos nos modelos CAD das peças.

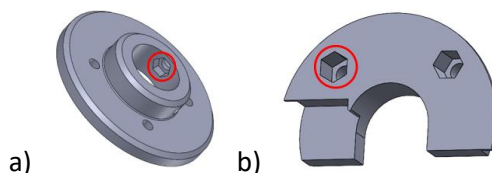


Figura 62 - a) Inserto para fixar os adaptadores no veio; b) Inserto para fixar os componentes.

- **Suporte da fita.** Uma das desvantagens identificadas para esta solução consiste na falta de suporte da fita durante o processo de *slitting*. Esta solução pode ser otimizada com o desenvolvimento de suportes simples ao longo do veio, com a função única de suportar a fita durante o processo de *slitting* (Figura 63 a). Também, a otimização da geometria dos adaptadores garante mais apoio à fita (Figura 63 b).

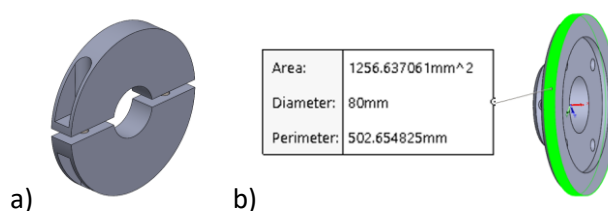


Figura 63 - a) Suporte da fita; b) diâmetro externo da peça de 80 mm.

- **Precisão do posicionamento das facas e contrafacas.** A baixa precisão do posicionamento das facas apresenta-se como uma desvantagem na escolha desta solução. No entanto, esta desvantagem é amenizada através da otimização da geometria dos adaptadores e dos suportes da fita, de modo que ao colocar as peças em contacto umas com as outras, se garanta a distância necessária entre as facas para obter a largura de fita pretendida. Para isso, optou-se por aumentar a espessura dos batentes dos adaptadores para 3,35 mm (Figura 64 a), de modo que ao colocar dois adaptadores em contacto, a distância entre as facas seja 12,7 mm. A largura dos suportes foi ajustada para 12,7 mm (Figura 64 b), de modo que, ao colocarmos um suporte entre os adaptadores, garantimos uma distância entre as facas de 25,4 mm.

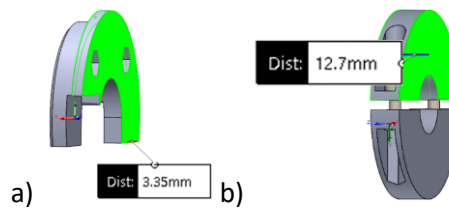


Figura 64 - Espessura dos batentes dos adaptadores modulares de 3,35 mm; b) espessura dos suportes de 12,7 mm.

Dimensionamento mecânico

De modo a dimensionar o sistema de acoplamento das facas, começou-se por calcular a força de atrito necessária entre as facas e os adaptadores em PETG necessária para que não ocorra movimento de rotação relativo entre os dois componentes durante a ação de *slitting*. A Figura 65 é um esquema da ação de corte da máquina de *slitting*. Nesta situação, existe uma força de tração da fita, e um binário nas facas. Para a situação em estudo, optou-se por considerar apenas a força de tração da fita, dado que o binário produzido pelo veio motorizado é aplicado nos adaptadores, no mesmo sentido que o binário resultante da força de arrastamento da fita, que é aplicado nas próprias facas. Como tal, a abordagem utilizada é uma abordagem conservativa, dado que, ao considerar que não existe binário nos adaptadores, tem-se em conta a situação que implica maior força de atrito entre os componentes.

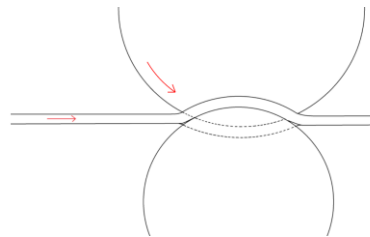


Figura 65 - Esquema de funcionamento do sistema de *slitting*.

De modo a interpretar o problema, optou-se por se representar a disposição das forças na zona de contacto entre as facas e a fita da forma ilustrada na Figura 66. A força aplicada na fita pela bobine recetora, $\vec{F}$, ao entrar em contacto com as duas facas, é dividida em $\vec{F}_1$ e $\vec{F}_2$, que apresentam o mesmo sentido, direção e metade da intensidade de $\vec{F}$. Ao dividir as forças nas suas componentes axiais e tangenciais, obtém-se $\vec{F}_1^a, \vec{F}_2^a, \vec{F}_1^t$ e $\vec{F}_2^t$. Considerando o sistema como sendo um sistema estacionário, são consideradas as reações $\vec{R}_1^a, \vec{R}_2^a, \vec{R}_1^t$ e $\vec{R}_2^t$, com cargas simétricas às componentes de $\vec{F}$. A força de atrito resultante da pressão entre os adaptadores e a faca, exercida pelos parafusos, deve suportar o binário provocado pela força de tração da fita. As variáveis r_1 e r_2 são referentes aos raios da faca e contrafaca, respetivamente, δ_1 e δ_2 aos ângulos entre os pontos de aplicação e o eixo vertical, com centro nos centros das facas, e y_1^f e y_2^f às distâncias verticais entre os centros das facas e os pontos de aplicação.

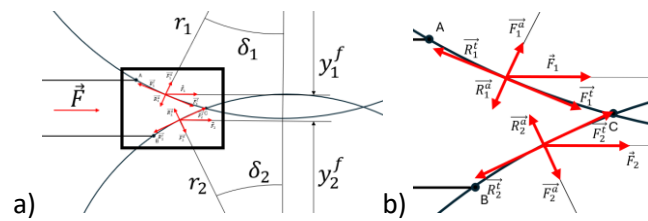


Figura 66 – Representação esquemática das forças geradas no sistema de corte: a) esquema com facas e fita; b) ampliação para observação do esquema da distribuição de forças.

De modo a calcular a força de corte necessária para cortar a fita, é necessário calcular a área de secção de corte. Segundo Meissner [55], em casos de corte, a área de corte a considerar para o cálculo da força de corte é a área da secção do material que se encontra em contacto com ambas as facas em simultâneo, como demonstra a Figura 67.

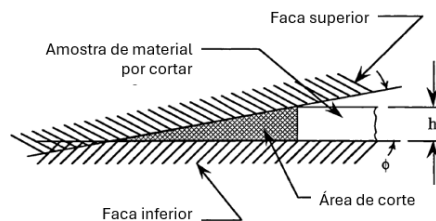


Figura 67 - Representação da área de corte [55].

No caso em estudo, foi considerado área de corte o triângulo ABC observado na Figura 68. De modo a obter as dimensões do triângulo, recorreu-se a uma análise trigonométrica para calcular os ângulos necessários. Foi considerada uma sobreposição das facas de 0,5 mm. As características mecânicas da fita foram retiradas da ficha técnica da mesma. Para os cálculos, considerou-se uma espessura de fita de 0,16 mm e uma tensão de cedência ao corte de 2,8 GPa. O cálculo da área do triângulo é de seguida descrito da Equação 10 à 22. Na Tabela 15 são apresentados os resultados dos cálculos.

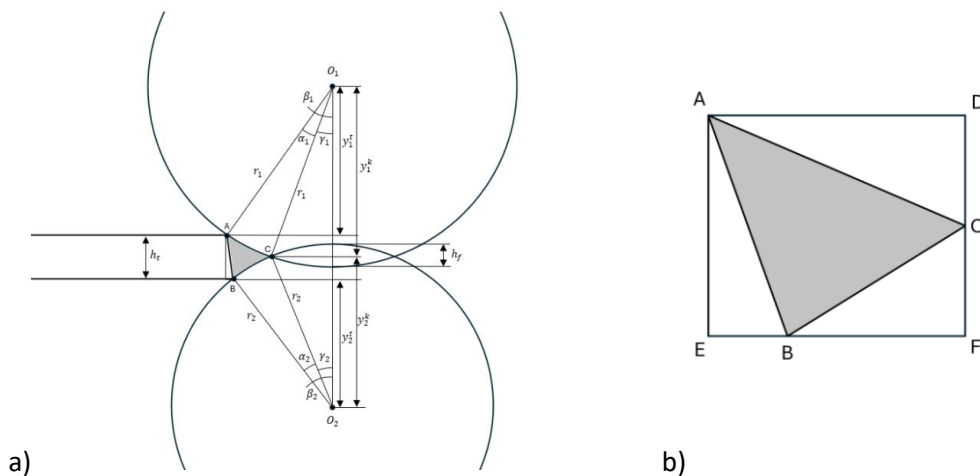


Figura 68 - a) Esquema de representação do sistema de corte; b) secção de corte.

$$y^t = r - \frac{h_t}{2} - \frac{h_k}{2} \quad (10)$$

$$y^k = r - \frac{h_k}{2} \quad (11)$$

$$\beta = \arccos\left(\frac{y^t}{r}\right) \quad (12)$$

$$\gamma = \arccos\left(\frac{y^k}{r}\right) \quad (13)$$

$$\alpha = \beta - \gamma \quad (14)$$

$$CAO_1 = \frac{180^\circ - \alpha_1}{2} \quad (15)$$

$$CBO_2 = \frac{180^\circ - \alpha_2}{2} \quad (16)$$

$$\overline{BC} = \frac{r_2 \times \sin(\alpha_2)}{\sin(CBO_2)} \quad (17)$$

$$\overline{AC} = \frac{r_1 \times \sin(\alpha_1)}{\sin(CAO_1)} \quad (18)$$

$$\overline{AD} = \sqrt{\overline{AC}^2 - \left(\frac{h_y}{2}\right)^2} \quad (19)$$

$$\overline{BF} = \sqrt{\overline{BC}^2 - \left(\frac{h_t}{2}\right)^2} \quad (20)$$

$$\overline{EB} = \overline{AB} - \overline{BF} \quad (21)$$

$$A = \overline{AD} \times h_t - \frac{\overline{AD} \times \frac{h_t}{2} - \overline{BF} \times \frac{h_t}{2} - \overline{EB} \times h_t}{2} \quad (22)$$

Tabela 15 - Tabela de resultados.

r_1 [mm]	52,5	β_1 [°]	6,428	$\overline{BC}$ [mm]	0,6672
r_2 [mm]	40	β_2 [°]	7,365	$\overline{AC}$ [mm]	0,7640
h_t [mm]	0,16	γ_1 [°]	5,594	$\overline{AD}$ [mm]	0,7598
h_k [mm]	0,5	γ_2 [°]	6,409	$\overline{BF}$ [mm]	0,6623
y_1^t [mm]	52,1700	α_1 [°]	0,834	$\overline{EB}$ [mm]	0,0975
y_2^t [mm]	39,6700	α_2 [°]	0,956	A [mm ²]	0,0569
y_1^k [mm]	52,25	$\widehat{CAO}_1$ [°]	89,583		
y_2^k [mm]	39,75	$\widehat{CBO}_2$ [°]	89,522		

Considerando que a tensão de cedência ao corte das fitas é de 2,8 GPa, e sabendo que a força de corte, F_{corte} , é obtida segundo a Equação 23 [55], calculou-se a força de corte.

$$F_{corte} = \tau_{ced} \times A \quad (23)$$

$$F_{corte} = 2,8 \times 10^9 \times 0,0569 \times 10^{-6}$$

$$F_{corte} = 159,28 \text{ N}$$

Considerando que a F_{corte} resultante mínima para realizar o corte da fita corresponde a $\overline{R}_1^a$ e $\overline{R}_2^a$, e utilizando as leis da trigonometria, conclui-se que $\overline{R}_1^t$ e $\overline{R}_2^t$ são iguais a 1509,11 N e 1315,54 N, respetivamente. De modo a calcular o binário nas facas resultante desta componente tangencial, utilizou-se a Equação 24, resultando nos binários M_1 e M_2 , com intensidade de 39,61 N · m e 52,62 N · m respetivamente.

$$M = R^t \times r \quad (24)$$

Para efeito de dimensionamento dos adaptadores, optou-se por utilizar o binário mais elevado, logo, considerou-se o caso da contrafaca. Considerou-se também que o binário provocado pela fita nas facas, M_2 , tem a mesma intensidade que o binário de atrito entre os adaptadores e as facas, T_p . O coeficiente de atrito considerado entre PETG e aço é 0,134 [56]. Os raios da zona de contacto entre as facas e os adaptadores está representado na Figura 69. Considerando a Equação 25, obteve-se uma pressão de 2,21 MPa.

$$T_p = \frac{2 \times \pi \times \mu \times p_0 \times (r_0^2 - r_i^2)}{3} \quad (25)$$

$$\Leftrightarrow p_0 = 2,21 \text{ MPa}$$

$$\mu = 0,134$$

$$r_0 = 0,067 \text{ m}$$

$$r_i = 0,06 \text{ m}$$

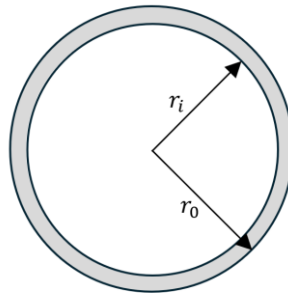


Figura 69 - Esquema de representação da área de contacto entre a faca e o adaptador.

Com o conhecimento da pressão necessária que os adaptadores devem realizar nas facas, para que a força de atrito entre as superfícies seja suficientemente elevada para impedir movimentos de rotação relativos entre os componentes, realizou-se uma análise de elementos finitos, recorrendo ao *software* CAE do Solidworks, para estudar a resistência do adaptador aos esforços a que está submetida. A peça com a zona mais crítica é o adaptador 2.1. Esta peça tem um batente de 1,5 mm de espessura, como demonstra a Figura 70. Este batente deve exercer sobre a contrafaca a pressão calculada anteriormente, de modo a travar deslizamentos entre a contrafaca e a própria peça.

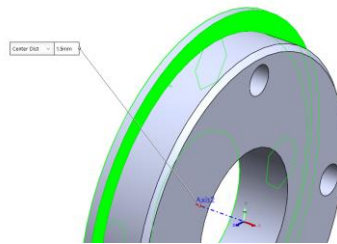


Figura 70 - Zona crítica do adaptador 2.1.

Para desenvolver a simulação, consideraram-se as propriedades mecânicas do PETG descritas na Tabela 16. De modo a definir as condições fronteira do problema, definiram-se as cavidades dos insertos metálicos como fixas (Figura 71 a), dado que os insertos vão compactar o sistema de modo a criar a pressão entre a contrafaca e o adaptador. Depois, submeteu-se a peça a uma pressão com o valor calculado anteriormente, na zona de contacto entre a contrafaca e a peça (Figura 71 b).

Tabela 16 - Propriedades mecânicas do PETG [57].

Propriedade	Valor (MPa)
Módulo de elasticidade longitudinal (E)	1700
Tensão de cedência (σ_{ced})	43,43
Tensão de rotura (σ_{rot})	50,00
Tensão de rotura à compressão (σ_{Crot})	60,00
Tensão de cedência à compressão (σ_{Cced})	35,00

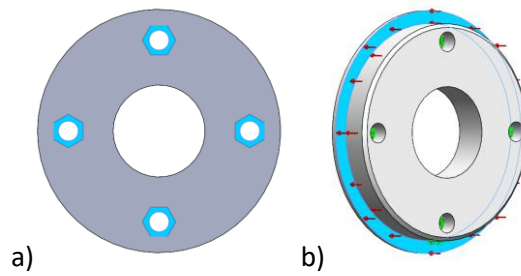


Figura 71 – a) Cavidades dos incertos metálicos; b) zona de contacto entre a contrafaca e o adaptador.

Optou-se por utilizar uma malha de elementos tetraédricos lineares de primeira ordem. O tamanho de aresta máximo dos elementos é de 2 mm e mínimo de 0,67 mm. A malha possui um total de 25058 elementos e 38984 nós. A malha foi gerada utilizando a ferramenta automática de *meshing* do Solidworks. Na Figura 72 é possível observar a malha e os seus parâmetros.

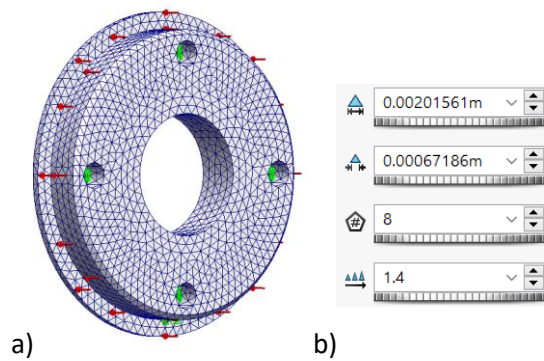


Figura 72 - a) Malha; b) parâmetros da malha.

Os resultados da simulação, na forma de tensão equivalente de von Mises, estão apresentados na Figura 73.

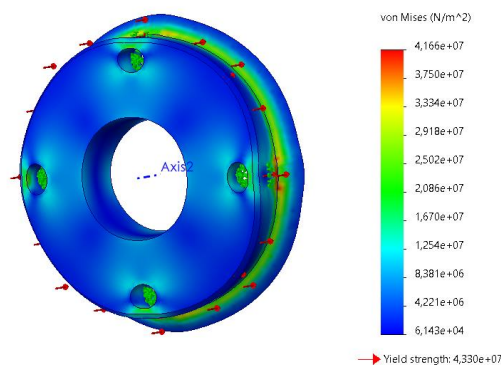


Figura 73 - Distribuição de tensões equivalente de von Mises.

Através do diagrama de distribuição de tensões equivalentes de von Mises, é possível observar que a tensão máxima a que a peça estará submetida é de 41,66 MPa. Dado que a tensão de cedência do PETG é 43,43 MPa, conclui-se que o coeficiente de segurança é de 1,04 (Equação 26). Tendo em conta que se utilizou uma abordagem conservativa no cálculo da força de atrito

necessária para que não ocorresse escorregamento entre os componentes, o coeficiente de segurança real do sistema é superior ao valor calculado, logo o sistema foi validado.

$$C.S. = \frac{\sigma_{ced}}{\sigma_{máx}} = \frac{43,43}{41,66} \approx 1,04 \quad (26)$$

Seleção de componentes de catálogo

Para o desenvolvimento desta solução, foi necessária a seleção de parafusos e porcas através de catálogos de elementos normalizados. Na Tabela 17 é possível observar os componentes utilizados.

Tabela 17 - Componentes de catálogo.

ID	Nome	Descrição	Quantidade
1	ISO 4726 – M5x16 – A2 70	Parafuso M5x16	16
2	ISO 4726 – M5x12 – A2 70	Parafuso M5x12	16
3	DIN 916 – M5xA2	Perno M5x5	12
4	ISO 4032 – M5 – 8	Porca M5	48

Seleção de materiais e processos de fabrico

A solução construtiva 3 prevê que as peças do sistema sejam fabricadas em material polimérico por fabrico aditivo. Dado que o sistema não é submetido a esforços mecânicos significativos, as propriedades mecânicas dos polímeros são suficientes para suportar as cargas envolvidas na ação do equipamento. Optou-se pelo fabrico em impressão 3D pela sua praticidade, custo reduzido e versatilidade das geometrias das peças.

Uma das desvantagens do fabrico aditivo, como a impressão 3D, é a menor precisão das peças, que resultam em tolerâncias mais elevadas quando comparadas com processos de maquinaria. No entanto, a empresa que o INEGI subcontrata atualmente para realizar o corte de fitas compósitas garante uma tolerância geométrica de $\pm 0,3$ mm na largura das fitas. Considerando que uma impressora 3D pode alcançar uma precisão em torno de $\pm 0,2$ mm, é possível obter-se uma tolerância de $\pm 0,3$ mm na distância entre contrafacas utilizando um sistema produzido por fabricação aditiva.

Para a impressão, existia a opção de se utilizar filamentos de PLA ou de PETG. O PLA, apesar de ser um material biodegradável, logo mais sustentável, apresenta elevada rigidez e baixa ductilidade. Para além disso, é um material com baixa resistência à corrosão. O PETG é um material com propriedades mais vantajosas para este sistema, dado que é um material com maior resistência mecânica [58], e pelo facto de não apresentar corrosão à aplicação de acetona para a limpeza do mesmo. Por estes motivos, o material selecionado foi o PETG.

Os desenhos técnicos do sistema encontram-se no Apêndice D.

3.7.4. Sistema de fixação do sensor ultrassónico

A solução selecionada na fase de anteprojecto foi a solução 3. Esta solução confere ao sensor a possibilidade de ser calibrado quanto à sua posição no eixo paralelo aos perfis metálicos do sistema de corte, na vertical e na inclinação do mesmo. A calibração da posição no eixo dos perfis deve coincidir com o comprimento total dos perfis, de modo a possibilitar o controlo dos desvios da fita com qualquer largura. Estabeleceu-se que a amplitude de calibração no eixo vertical deve ser no mínimo 20 mm, de modo a possibilitar a calibração do sensor até 10 mm para baixo ou 10 mm para cima, face à linha de referência da fita. Estabeleceu-se também que a amplitude da calibração da inclinação do sensor deve ser no mínimo 40° . Num equipamento de *slitting*, a fita deve estar posicionada sobre a contrafaca que se encontra no veio inferior e, como tal, a entrada da fita no sistema de corte deve ser ascendente ou horizontal, mas nunca descendente. Posto isto, considerou-se o ângulo de inclinação do sensor no sentido horário superior ao do sentido anti-horário, com valores 37° e 3° , respetivamente.

Esta solução é constituída por duas peças principais, designadamente uma peça em L que integra o sensor (Figura 74 a) e outra que serve de suporte fixado ao perfil da estrutura do sistema de corte (Figura 74 b).

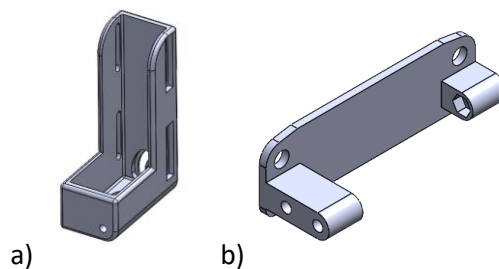


Figura 74 - a) Peça em L integradora do sensor; b) Suporte do sensor.

As ranhuras nas faces laterais da peça em L permitem a fixação e o movimento vertical do sensor ao longo da peça. Como tal, o comprimento das ranhuras define a amplitude de afinação da posição do sensor ao longo da peça. A posição do sensor na Figura 75 a) é a posição ideal caso a fita se apresentasse perfeitamente horizontal e simetricamente alinhada com o sensor. Neste modelo CAD, é possível descer o sensor até 11,35 mm (Figura 75 b), ou subir até 11,05 mm (Figura 75 c). Isto resulta numa amplitude de 22,40 mm, que é superior ao requisito mínimo estabelecido.

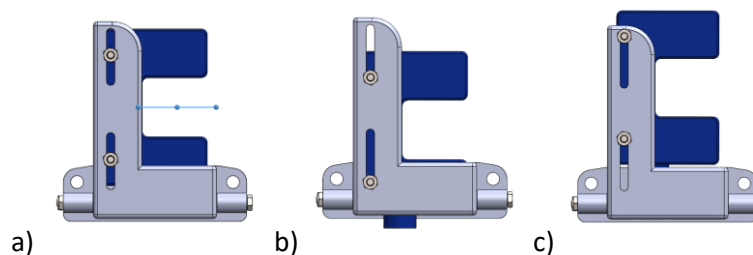


Figura 75 - Posições do sensor no suporte: a) alinhada com a fita; b) mínima; c) máxima.

Quanto à inclinação do sensor, a ranhura em arco permite o movimento de rotação do sensor e o conjunto do parafuso e porca desta ranhura permite o bloqueio da posição do sensor no ângulo pretendido. Neste modelo, é possível inclinar até 45° no sentido horário, como mostra a Figura 76 a), ou até 3° no sentido anti-horário, como mostra Figura 76 b). Isto resulta numa amplitude total de 48°, que é superior ao limite mínimo estabelecido.

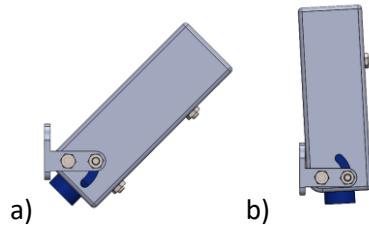


Figura 76 - Inclinação do sensor: a) mínima; b) máxima.

Dimensionamento mecânico

De modo a garantir que esta solução cumpre com os requisitos deste sistema, foi realizado o dimensionamento para avaliar a viabilidade desta solução. Os esforços a que este sistema está sujeito são somente os pesos dos componentes, e os binários resultantes dos mesmos no eixo de rotação. Para tal, considerou-se a posição crítica (posição de ângulo máximo) (Figura 77) e, a partir da massa dos componentes, calculou-se o binário resultante do peso do sistema no eixo de rotação.

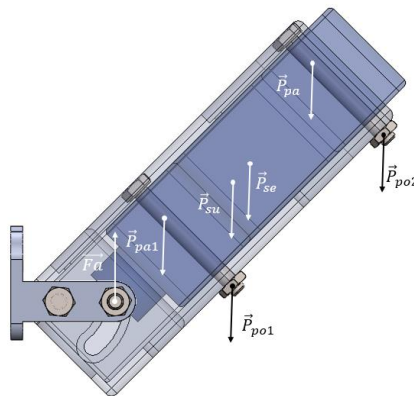


Figura 77 - Diagrama de corpo livre do sistema.

Os binários foram calculados a partir da Equação 27, onde P diz respeito ao peso do componente e r à distância entre o centro de massa e o eixo de rotação. Através do *software* Solidworks, é possível determinar os centros de massa de cada um dos componentes, e assim determinar a distância entre os mesmos e o eixo de rotação, utilizando a ferramenta "Measure". Na Figura 78 a) é possível observar a distância horizontal entre o centro de massa do sensor e o eixo, e na Figura 78 b) a distância entre o centro de massa da peça em L e o eixo. Para efeitos de cálculo, considerou-se o sensor como uma peça maciça.

$$M = P \times r \quad (27)$$

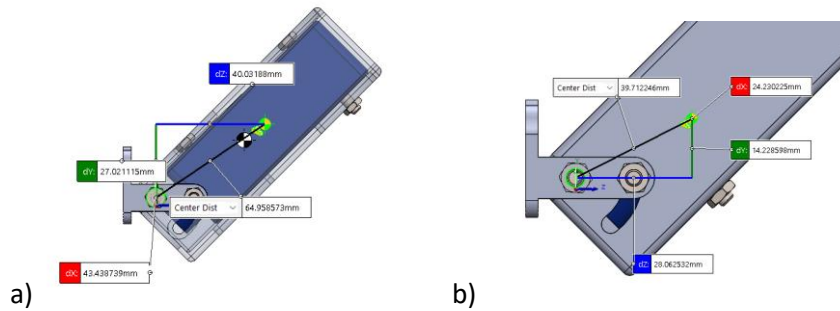


Figura 78 - Ferramenta *Measure* do Solidworks: a) distância entre centro de massa do sensor e eixo; b) distância entre centro de massa da peça em L e eixo.

Na Tabela 18 são enumerados todos os componentes do sistema que aplicam um binário, com as respectivas massas, distâncias horizontais ao eixo e o binário resultante.

Tabela 18 - Elementos que provocam binário.

id	Componente	Massa [g]	Distância horizontal ao eixo de rotação [mm]	Binário [N·m]
su	Suporte	27,1	28,063	- 0,007461
se	Sensor	140,0	40,032	- 0,054980
pa1	Parafuso 1	6,0	21,562	- 0,001269
pa2	Parafuso 2	6,0	59,038	- 0,003475
po1	Porca 1	0,8	35,001	- 0,000275
po2	Porca 2	0,8	72,479	- 0,000569
Total				- 0,068028

Tendo em consideração que o sistema é estático, o somatório dos momentos deve ser nulo (Equação 28). Como tal, conclui-se que o momento provocado pelo elemento fixador deve ser 0,06803 N·m.

$$\sum M = 0 \quad (28)$$

$$\Leftrightarrow M_{su} + M_{se} + M_{pa1} + M_{pa2} + M_{po1} + M_{po2} + M_{Fa} = 0$$

$$\Leftrightarrow M_{Fa} = 0,06803 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Como referido anteriormente, a fixação da posição do sensor é feita através de um conjunto parafuso-porca, que aplica uma pré-carga, ou força de compressão, entre a peça em L e o suporte, de modo a bloquear a posição. Entre as duas peças, existe uma anilha em aço que garante uma folga entre a peça em L e o suporte. A força que provoca o binário resistente necessário é uma força de atrito entre a superfície da anilha e a peça em L, provocada pela pré-carga do conjunto parafuso-porca. Como tal, determinou-se a força de atrito necessária.

Na Figura 79 é possível observar a área de contacto entre a superfície da anilha e a peça em L. Para motivos de medição, aplicou-se uma interseção entre a anilha e a peça em L de 1 mm de espessura. Dado que a ferramenta “Interference Detection” mede o volume de interferência

entre componentes, e considerando que o volume medido pela ferramenta tem uma altura constante de 1 mm, conclui-se que a área de contacto é 35,71 mm².

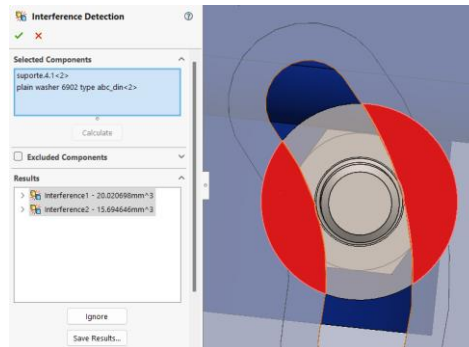


Figura 79 - Área de contacto entre a anilha e a peça em L.

Para determinar a distância entre o eixo de rotação e o ponto de aplicação da força de atrito, considerou-se que a força de atrito era aplicada no eixo do parafuso de fixação (Figura 80).

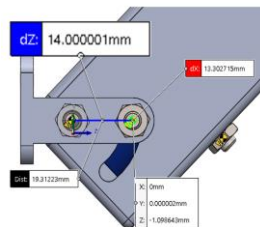


Figura 80 - Distância entre eixo do parafuso de fixação e eixo de rotação.

$$Fa = \frac{M_{Fa}}{r} = \frac{0,06803}{14 \times 0,001} = 4,8592 \text{ N}$$

Tendo em consideração que a força de atrito é calculada através da multiplicação da força normal, N , com o coeficiente de atrito, μ (Equação 29), calculou-se então a força normal necessária para garantir a força de atrito pretendida. A força normal equivale à força de compressão provocada pelo conjunto parafuso-porca. Para isso, considerou-se um coeficiente de atrito entre o aço e o PLA de 0,16 [56].

$$Fa = N \times \mu \quad (29)$$

$$\Leftrightarrow N = \frac{Fa}{\mu} = \frac{4,8592}{0,16} = 30,370 \text{ N}$$

O binário de um parafuso é calculado através da multiplicação do valor de pré-carga, N , com o diâmetro nominal do parafuso, d , e com o coeficiente de binário, K (Equação 30) [59]. Considerou-se um coeficiente de binário de 0,2 por se tratarem de peças zincadas sem lubrificação [59]. Tendo em conta que o binário máximo de um parafuso M4 zincado de classe 8.8 é 2,90 N.m [60], este cálculo permitiu concluir que o binário necessário para garantir a fixação do sensor é inferior ao binário máximo suportado pelo parafuso.

$$T = N \times K \times d \quad (30)$$

$$\Leftrightarrow T = 30,370 \times 0,2 \times 0,004 = 2,4296 \times 10^{-2} \text{ N} \cdot \text{m}$$

De seguida foi analisado o comportamento da peça de suporte face à pré-carga exercida pelo conjunto parafuso-porca (Figura 81). A peça é produzida em fabrico aditivo com *infill* inferior a 100%, pelo que, não se considera a peça como sendo maciça. Após analisar a peça no *software* Bambu Studio, que é um *software* de fatiamento (slicer) da Bambu Lab, projetado para impressoras 3D, verificou-se que o cilindro que acopla o parafuso tem duas camadas de filamento (Figura 82). Dado que o filamento considerado tem 0,2 mm de diâmetro, considerou-se que o tubo que acopla o parafuso tem uma espessura de 0,4 mm. Para calcular a área de secção, recorreu-se à Equação 31, onde r_1 diz respeito ao raio interno do círculo laranja e r_2 ao raio externo do círculo amarelo. O cálculo resultou numa área de secção de 6,157 mm².

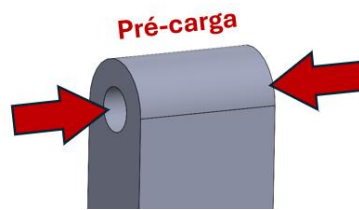


Figura 81 - Esquema de representação da força de compressão na peça em L.

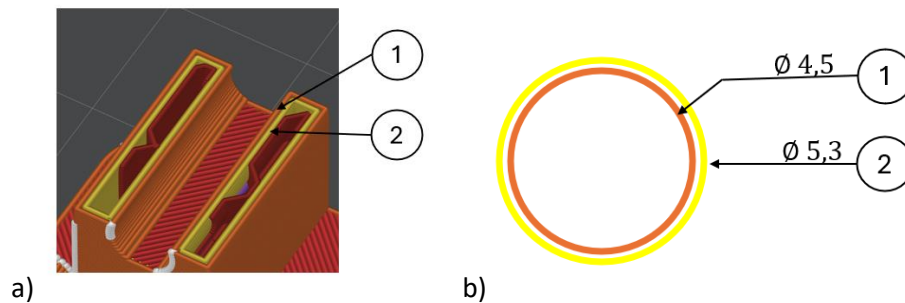


Figura 82 - a) modelo da peça de suporte fatiada, com um corte na zona de acoplamento do parafuso de fixação; b) esquema de representação da secção reta do furo de acoplamento do parafuso.

$$A = \frac{(r_2^2 - r_1^2) \times \pi}{4} \quad (31)$$

$$A = \frac{(5,3^2 - 4,5^2) \times \pi}{4} = 6,157 \text{ mm}^2$$

Considerando que a pré-carga é suportada por um tubo de 6,157 mm² de área de secção reta, e desprezando efeitos de encruamento, calculou-se a tensão de compressão a que o material está sujeito. Comparando o resultado com a tensão de cedência à compressão do PLA, 44,2 MPa [61], verifica-se que a peça consegue suportar em segurança a força de compressão exercida pelo conjunto parafuso-porca com um coeficiente de segurança de 8,97.

$$\sigma_{comp} = \frac{N}{A} = \frac{30,3697}{6,158} = 4,93 \text{ MPa}$$

$$c.s. = \frac{\sigma_{ced}}{\sigma_{máx}} = \frac{44,2}{4,93} \approx 8,97$$

Seleção de componentes de catálogo

Para o desenvolvimento desta solução, foi necessário obter porcas e parafusos de catálogo. Na Tabela 19 é possível observar os componentes utilizados.

Tabela 19 - Componentes de catálogo para o sistema de fixação do sensor ultrassónico.

ID	Nome	Descrição	Quantidade
1	ISO 4017 – M4x35	Parafuso M4x35, cabeça hexagonal	2
2	ISO – 4762 – M4x20	Parafuso M4x20 cabeça cilíndrica	2
3	ISO 4017 – M4x20	Parafuso M4x20, cabeça hexagonal	1
4	ISO 4032 – M4 – 8	Porca M4	5

Seleção de materiais e processos de fabrico

Como referido anteriormente, as peças de suporte e em L são fabricadas por fabrico aditivo. O material selecionado foi o PLA, dada a baixa exigência dos esforços a que o sistema está sujeito. Além disso, a ausência de necessidade de aplicação de óleos neste sistema elimina a necessidade de limpeza com acetona, pelo que a resistência a este composto não constitui um requisito.

Os principais parâmetros da impressão destas peças foram os seguintes:

1. *Infill*: 15%;
2. *Infill pattern*: *Grid*;
3. Altura das camadas: 0,2 mm;
4. Diâmetro do bico de 0,4 mm.

Os desenhos técnicos do sistema encontram-se no Apêndice D.

3.7.5. Sistema de guiamento das fitas

A solução selecionada para o sistema de guiamento das fitas foi a solução 2 (Figura 83). Esta solução tem dois perfis BOSCH 30x30 de 200 mm de comprimento que servem de suporte para quatro varetas roscadas M5. As 4 varetas servem de apoio para os rolamentos com ranhura em V. Estes rolamentos são as peças que, em contacto com a fita, promovem o seu guiamento e evitam desvios laterais da mesma. A própria ranhura dos rolamentos confere suporte vertical à fita. A vareta roscada permite calibrar a posição vertical dos rolamentos na vareta. Na figura observa-se o modelo CAD do sistema, na qual o plano 1 a azul indica a posição da fita durante a ação de *slitting*.

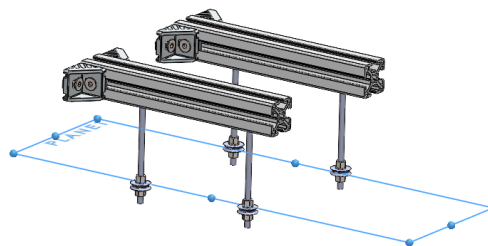


Figura 83 - Vista isométrica do sistema de guiamento.

O sistema de guiamento das fitas não implica o fabrico de nenhuma peça de raiz, sendo os componentes todos que o compõem componentes de catálogo. Os únicos processos de fabrico que a montagem deste sistema implica são o corte dos perfis BOSCH e das varetas roscadas. Na Figura 84 é possível observar a vista explodida do sistema com a legenda das peças na Tabela 20.

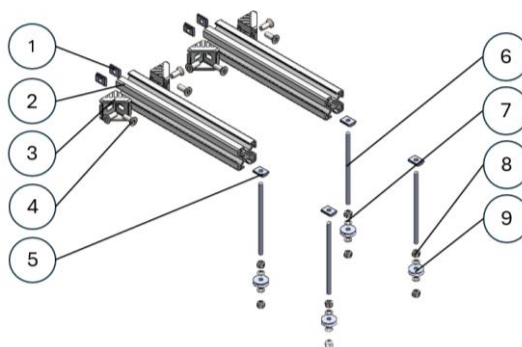


Figura 84 - Vista explodida do sistema de guiamento.

Tabela 20 - Lista de componentes do sistema de guiamento.

ID	Nome	Descrição	Quantidade
1	Porca em T M6	Porca de perfil M6	8
2	Perfil BOSCH 30x30x200	Perfil BOSCH	2
3	Cantoneira BOSCH 30 mm	Cantoneira	4
4	ISO - 4762 - M6x12	Parafuso M6	8
5	Porca em T M5	Porca de perfil M5	4
6	DIN 976-1A x M5 x 80	Vareta roscada	4
7	ISO 7089 x M5 - 200 HV	Anilha M5	8
8	ISO 4032 - M5 - 8	Porca M5	8
9	ORIGIN SS4 - 13 V ZZ	Rolamento com ranhura em V	4

Os desenhos técnicos do sistema encontram-se no Apêndice D.

3.7.6. Sistema de controlo

Hardware

1. **PLC – SIMATIC S7-1200, 1212C da SIEMENS.** Este PLC tem oito entradas digitais, duas entradas analógicas, seis saídas digitais e é compatível com comunicação *ethernet*,

utilizada para controlar os *drives* dos servomotores. Este componente foi reaproveitado do equipamento de rebobinagem anteriormente incorporado na máquina de *slitting*.

2. **Módulo de Entradas Analógicas - SIMATIC S7-1200, Analog input, SM 1231, 8 AI** – O módulo selecionado é munido de 8 entradas analógicas. Para o equipamento atual, são utilizadas 4 entradas, 3 para os sensores óticos e 1 para o sensor ultrassónico. No entanto, as restantes podem ser utilizadas futuramente em possíveis evoluções do equipamento.
3. **Sensor de medição de distância - Sensor ótico de distância OGD592 da IFM.** Este sensor permite a medição de distâncias através de um laser. Este componente permite medir distâncias de 25 mm até 300 mm. No entanto, a interface de comunicação deste componente é IO-Link, e não analógica. Como tal, de modo a existir comunicação entre o PLC e o sensor, é necessário aplicar o componente número 4.
4. **Conversor IO-Link para Analógico - Conversor EIO104 da IFM.** Como referido anteriormente, este componente traduz os dados em comunicação IO-Link para um sinal analógico de corrente de 4 a 20 mV. Desta forma, é possível o PLC ler a distância medida pelo sensor.
5. **Sensor de medição de desvios - bks-3/CIU da Sensor Partners.** Este componente é um sensor ultrassónico em U próprio para ler desvios de filmes ou fitas. A parte inferior do sensor contém um sensor ultrassónico que emite impulsos sonoros, detetados pelo recetor na parte superior. Quando o material cobre o sensor, o sinal é atenuado conforme o nível de cobertura, e a eletrónica interna processa esta informação, gerando um sinal analógico correspondente. Este sensor tem uma amplitude de medição de 6 mm.
6. **HMI - SIMATIC HMI, KTP700 Basic da SIEMENS.** Esta HMI é um ecrã tátil de 7 polegadas. Este componente já estava incorporado na estrutura do equipamento preliminar de rebobinagem.
7. **Drives - SINAMICS V90 da SIEMENS.** Os *drives* selecionados são apropriados para motores de potência 0,2 kW.
8. **Torre Luminosa – Torre de sinalização com LED vermelho, amarelo e verde da Adajusa.** Este componente é munido de três LEDs de sinalização mais sinal sonoro.
9. **LED Enable – Piloto Multiled verde da Adajusa 24 V.** Este componente é um LED de cor verde que funciona a uma tensão de 24 V. Este LED é próprio para ser fixado num painel de controlo.
10. **LED Reset – Piloto Multiled azul da Adajusa 230 V.** Este componente é um LED de cor azul que funciona a uma tensão de 230 V. Este LED é próprio para ser fixado num painel de controlo.

Esquema da rede de comunicação

O esquema da rede encontra-se no Apêndice E.

Software

A programação do equipamento foi realizada utilizando o *software* SIEMENS TIA Portal. O código foi desenvolvido nas linguagens *Ladder* e blocos de função, de forma a cumprir os requisitos de controlo estabelecidos no capítulo “Anteprojeto”. É possível observar o código na íntegra no Apêndice F.

No separador do *software* "Dispositivos e Redes" é apresentada a rede configurada no programa, com conexão via Ethernet (Figura 85). Os *drives* estão interligados, enquanto o PLC, o HMI e o *drive* 1 estão conectados a um *switch*. Para garantir a comunicação entre os componentes, foi atribuído um endereço IP a cada um, conforme descrito na Tabela 21.

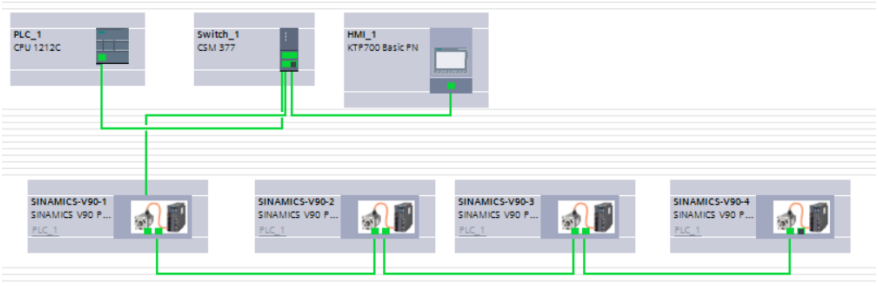


Figura 85 - Rede configurada no TIA Portal.

Tabela 21 - Lista de IP's dos componentes.

Componente	IP.
PLC	192 . 168 . 0 . 1
Driver 1	192 . 168 . 0 . 2
Driver 2	192 . 168 . 0 . 3
Driver 3	192 . 168 . 0 . 4
Driver 4	192 . 168 . 0 . 5
HMI	192 . 168 . 0 . 8

Neste separador, foram adicionados os telegramas *Standard 1* e *Supplementary 750* aos *drives* 1, 2 e 3, permitindo o controlo e a monitorização da velocidade e do binário, respetivamente (Figura 86). No caso do *drive* 4, foi adicionado apenas o telegrama *Standard 1*, visto que apenas é necessário controlar e monitorizar a velocidade.

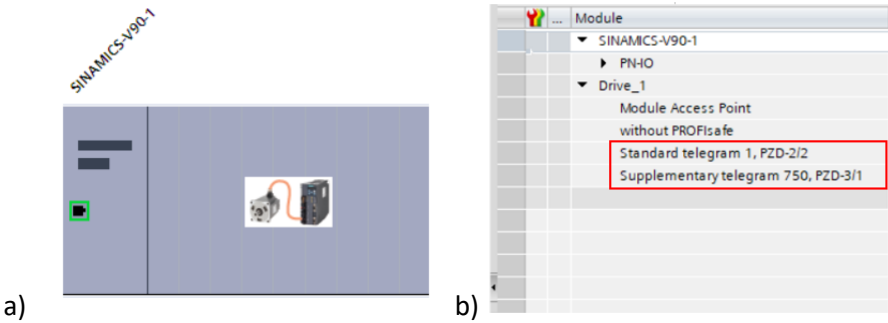


Figura 86 – a) *Drive* selecionado no software TIA Portal; b) telegramas adicionados aos *drives*.

No separador "Blocos do Programa" estão localizados os blocos de função e os blocos de dados utilizados no código da máquina. O bloco de função principal é estruturado em cinco redes: "Rede 1 - Motores", "Rede 2 - Etapas", "Rede 3 - Modo", "Rede 4 - Emergência" e "Rede 5 - Erro". Cada uma destas redes desempenha uma função específica no controlo do sistema, de forma a garantir a gestão eficiente dos motores, a sequência das etapas operacionais, a definição do modo de operação, a resposta a situações de emergência e a deteção e gestão de erros e avisos.

Rede 1 do bloco de função principal - Motores

Na Rede 1 encontra-se o bloco de função responsável pelos motores. Este bloco tem como entradas os parâmetros de funcionamento do equipamento, os valores captados pelos sensores e os sinais de acionamento dos servomotores. As saídas incluem os valores dos raios das bobinas, os sinais de operação dos motores e as referências para possíveis erros dos blocos de controlo.

Este bloco de função está dividido em cinco redes internas: quatro dedicadas a cada um dos servomotores, e uma destinada ao cálculo da tensão da fita e do binário do servomotor 1. Cada uma das redes associadas aos servomotores ligados a uma bobina contém uma linha de cálculo para determinar o raio atual de cada bobina. Para realizar este cálculo, utilizam-se os blocos de função NORM_X, SCALE_X e SUB (Figura 87).

O bloco NORM_X converte o valor de corrente lido pelos sensores numa percentagem. O bloco SCALE_X transforma essa percentagem num valor de distância, com base nos limites de leitura do sensor. Finalmente, o bloco SUB subtrai à distância entre o sensor e o eixo do veio do servomotor o valor lido pelo sensor, obtendo assim o raio atual da bobina.

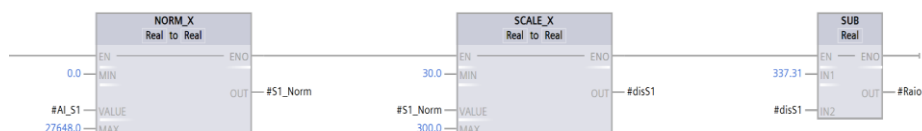


Figura 87 - Cálculo dos raios das bobines.

O acionamento de cada servomotor respeita uma sequência de condições (Figura 88). A condição "EnableAxis" diz respeito ao sinal de acionamento dos motores e as condições "error" dizem respeito à deteção de erros nos controlos de binário ou velocidade dos servomotores. Esta sequência serve para garantir que o servomotor só é acionado se o sinal de acionamento estiver ligado, e se nenhum outro servomotor apresentar um erro.



Figura 88 - Sequência de acionamento dos motores.

Na Rede 1 está implementado o controlo do servomotor 1, que é exclusivamente responsável pelo controlo de binário. O binário é calculado com base nos parâmetros definidos pelo operador, na razão de binário do redutor e nos raios das bobinas, de acordo com a Equação 3. Para este efeito, utiliza-se o bloco de função "TorqueFB_TEL750_3" (Figura 89 a), que foi retirado da biblioteca "TorqueFB_TEL750" fornecida pela SIEMENS. Este bloco permite a manipulação dos parâmetros de binário máximo e mínimo dos servomotores através do PLC.

Adicionalmente, o bloco de função "SinaSpeed" (Figura 89 b) é utilizado exclusivamente para monitorização. Este bloco controla e acompanha a velocidade angular do servomotor. Com o valor de velocidade real da bobina 1 e o raio da bobina 1, é possível calcular a velocidade linear real da fita, justificando assim a presença desta função para assegurar a precisão dos dados monitorizados.

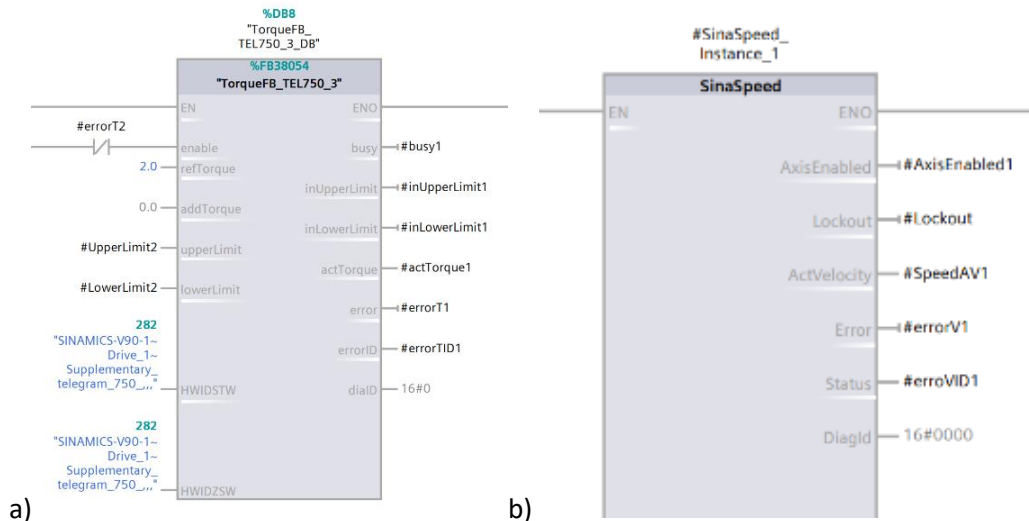


Figura 89 - a) bloco de função de controlo de binário; b) bloco de função de controlo de velocidade.

Na Rede 2 e na Rede 3 do bloco de função "Motores" são realizados os controlos dos servomotores 2 e 3, respetivamente. Ambos os servomotores têm controlo de velocidade e, portanto, utilizam o bloco de função "SinaSpeed". Adicionalmente, para fins de monitorização do binário, é empregue também o bloco de função "TorqueFB_TEL750". A velocidade angular destes servomotores é determinada com base na razão de velocidades do redutor, na velocidade linear definida pelo operador e nos raios das bobinas 2 e 3. O servomotor 2 é acionado apenas quando o equipamento está a operar no modo de *slitting*.

Na Rede 4 do bloco de função "Motores" é efetuado o controlo do servomotor 4, que é responsável pelas facas do sistema de corte. Este servomotor é monitorizado exclusivamente quanto à velocidade, utilizando apenas o bloco de função "SinaSpeed". A velocidade é calculada com base no raio das facas, na velocidade linear definida pelo operador e na razão de velocidades do redutor.

A Rede 5 do bloco de função "Motores" realiza o cálculo da tensão real na fita, da tensão máxima admissível e do binário do servomotor 1. A tensão real (Figura 90 a) é calculada a partir do binário real no servomotor 1, do raio da bobine 1, da razão de binário do redutor e da largura da fita. A tensão máxima admissível (Figura 90 b) é determinada com base no binário máximo que o servomotor 1 pode suportar sem comprometer o funcionamento do equipamento, considerando o raio da bobine 1, a largura da fita, o binário de arranque do servomotor 1 e a razão de binário do redutor. Finalmente, o binário do servomotor 1 (Figura 90 c) é calculado utilizando a equação 3., o binário de arranque do servomotor 1, o raio da bobine 1, a largura da fita e a razão de binário do redutor.

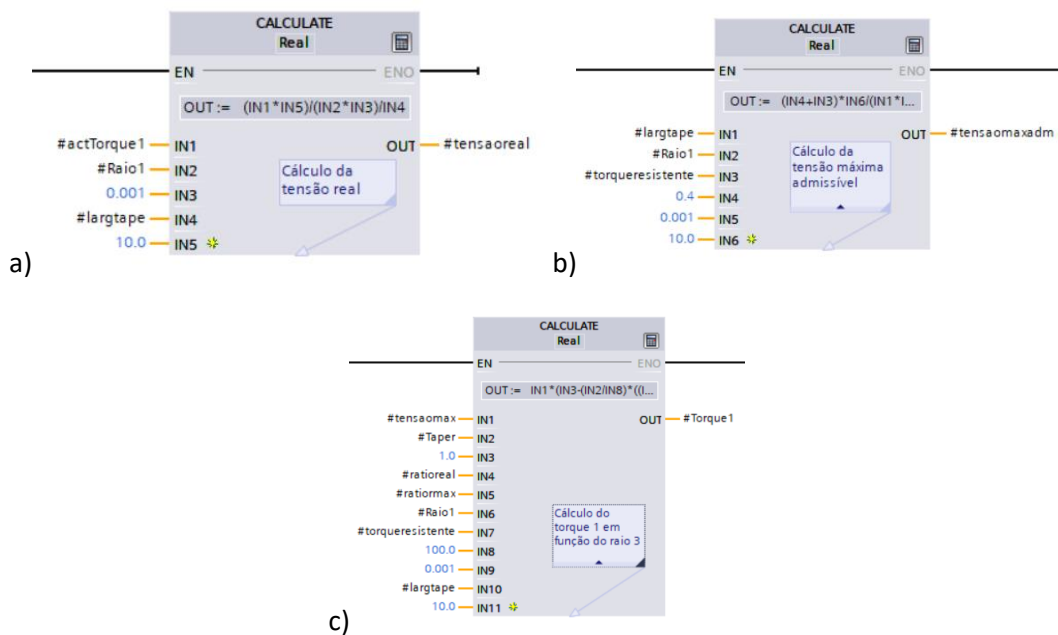


Figura 90 - a) cálculo da tensão real; b) cálculo da tensão máxima admissível; c) cálculo do binário da bobine 1.

Rede 2 do bloco de função principal - Etapas

Na rede 2 do bloco de função principal encontra-se o bloco de função “Etapas”. Este bloco tem como entradas a variável booleana que assinala a emergência, e a variável booleana que assinala o acionamento do modo “Admin”. De saídas, tem o acionamento dos motores, o acionamento do LED azul de *reset* e os sinais que dizem respeito aos erros nos raios das bobines e na colocação da fita no sistema de corte.

O bloco de função “Etapas” respeita o *grafcet* da Figura 55 b). Este bloco de função é constituído por 8 redes diferentes (Figura 91). As redes 1, 2 e 3 dizem respeito à ativação das etapas E11, E12 e E13, respetivamente, a rede 4 diz respeito aos comandos associados a cada uma das etapas, a rede 5 à ativação e desativação do modo “admin”, a rede 6 ao cálculo dos desvios da fita, a rede 7 à comparação entre o raio final e o raio máximo de segurança das bobines e a rede 8 aos erros.

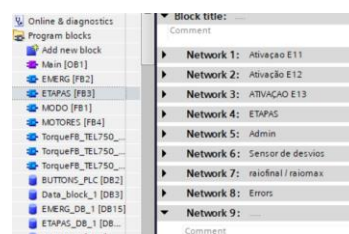


Figura 91 - Lista de redes do bloco de função "Etapas".

Rede 3 do bloco de função principal – Modo

A Rede 3 do bloco de função principal com nome “Modo” está associada ao *grafcet* representado na Figura 55 a). Esta rede contém o bloco de função “Modo”, que possui duas entradas e duas saídas. As entradas correspondem às variáveis booleanas para a seleção dos

modos de *slitting* e rebobinagem, definidos pelo operador na HMI. As saídas referem-se às variáveis das etapas E1 e E2, utilizadas pelo bloco de função “Etapas” para comunicar o modo de funcionamento do equipamento.

O bloco de função “Modo” inclui duas redes: uma destinada à ativação de um modo e outra à alteração de um modo para o outro.

Rede 4 do bloco de função principal – Emergência

Na Rede 4 – Emergência encontra-se o bloco de função “Emerg”, que segue o *grafcet* ilustrado na Figura 55 c). Este bloco possui uma única saída, referente à etapa E21. O bloco de função “Emerg” contém duas redes distintas: uma para a ativação da etapa E21, acionada pelos botões de emergência, e outra para a desativação da etapa E21, controlada pelos botões de emergência e pelo botão de *reset*.

Rede 5 do bloco de função principal – Erro HMI

Na Rede 5 do bloco de função principal – Erro HMI, a função é interromper o equipamento em caso de erro nos controlos dos servomotores, garantindo que nenhum servomotor seja acionado. Além disso, esta rede tem a responsabilidade de armazenar a referência do erro, de modo que a mesma possa ser visualizada na HMI pelo operador, mesmo quando os servomotores estão desativados.

Interface Homem-Máquina

O equipamento de *slitting* é dotado de uma interface Homem-Máquina que foi programada para permitir a definição dos parâmetros de operação e a monitorização das atividades do equipamento. Esta interface é composta por quatro ecrãs principais: o ecrã de definição de parâmetros, o ecrã de monitorização, o ecrã de erros e o ecrã de administrador, sendo este último acessível apenas através de autenticação por palavra-passe.

O primeiro ecrã (Figura 92 a), que é o principal, permite ao operador definir os parâmetros necessários para a operação do equipamento. Na parte inferior deste ecrã encontra-se o interruptor que permite ativar o modo de *slitting* ou o modo de rebobinagem, conforme a finalidade pretendida. Ao clicar no esquema do equipamento, o utilizador é direcionado para o ecrã de monitorização (Figura 92 b). Neste ecrã, é possível visualizar em tempo real os binários dos motores, as velocidades angulares e os raios das bobines, durante o funcionamento do equipamento.

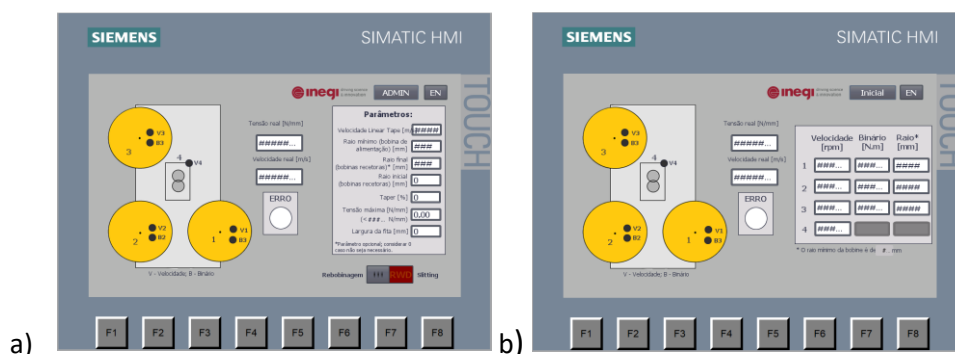


Figura 92 - a) ecrã inicial com parâmetros; b) ecrã de monitorização.

Através do LED identificado como "ERRO", o operador pode aceder ao ecrã de observação dos erros (Figura 93). Neste ecrã, encontra-se uma tabela que lista as referências dos erros identificados, sendo possível consultar no manual de utilização o significado específico de cada referência de erro.

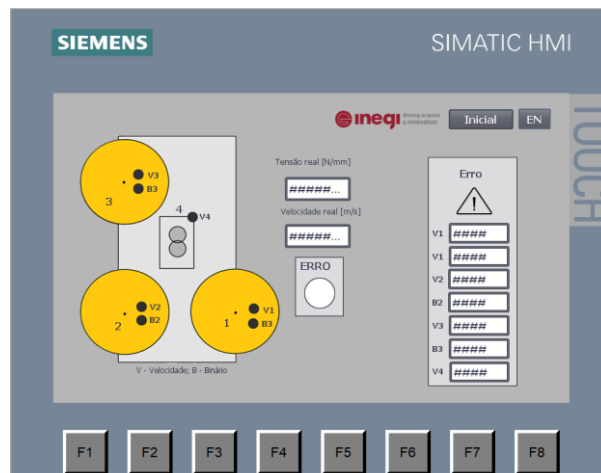


Figura 93 - Ecrã de visualização das referências dos erros.

O quarto ecrã, destinado ao administrador, é acessível após a inserção de um nome de utilizador e uma palavra-passe válidos (Figura 94 a). Este ecrã apresenta parâmetros adicionais que podem ser configurados e inclui um interruptor para ativar o modo "Admin" (Figura 94 b). Neste modo, o equipamento pode ser acionado independentemente das leituras dos sensores, permitindo o seu funcionamento mesmo na ausência de fita.

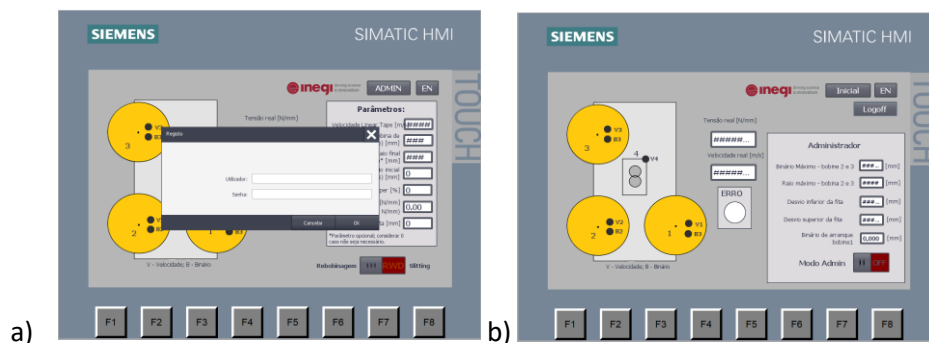


Figura 94 - a) *Pop-up* de inserção de dados para acesso ao ecrã de administrador; b) ecrã do administrador.

De forma consistente, em todos os ecrãs, do lado direito e no centro, existem elementos comuns que facilitam a supervisão do equipamento. O esquema do equipamento, com sinalizadores em cada uma das bobinas, indica o estado de funcionamento dos servomotores (Figura 95 a): verde significa que o controlo de velocidade ou de binário está ativado; vermelho indica um erro no controlo; e preto significa que os servomotores estão desativados. Além disso, o esquema sinaliza quaisquer anomalias nas bobinas ou na colocação da fita através de *pop-ups*. Durante o funcionamento do equipamento, aparecem barras de progresso sobre as bobinas que indicam o nível de material presente em cada uma delas, sendo que quando

preenchidas com vermelho a bobine está completa, e quando preenchidas a cinzento a bobine encontra-se sem material (Figura 95 b).

No centro da interface, encontram-se duas caixas de texto que exibem a velocidade linear real da fita e a tensão real aplicada na fita. Abaixo destas caixas, existe um LED que, quando aceso, indica a presença de um erro no sistema (Figura 95 c). No canto superior direito, existe um botão que define a língua do programa, tendo como línguas disponíveis português e inglês (Figura 95 d).

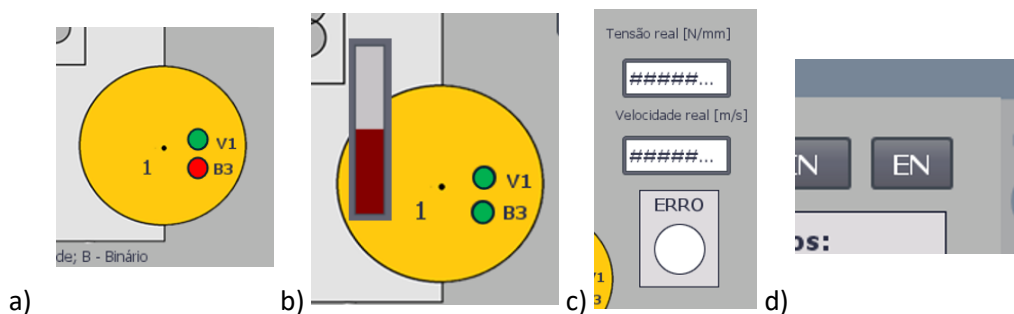


Figura 95 - a) sinalizadores de funcionamento dos servomotores; b) barras de progresso indicadoras da quantidade de material presente nas bobines; c) tensão real da fita, velocidade linear real da fita e LED sinalizador de erros; d) botão de alteração da língua.

Esta configuração da interface HMI não só facilita a operação e monitorização do processo, como também oferece ao administrador a capacidade de intervir diretamente nos parâmetros avançados, garantindo assim uma maior flexibilidade e segurança na gestão do equipamento de *slitting*.

3.7.7. Sistema elétrico

Neste subcapítulo é apresentado o projeto do sistema elétrico, apresentando as etapas essenciais para garantir o funcionamento seguro e eficiente do equipamento. Inicialmente, aborda-se o dimensionamento da fonte de alimentação, considerando as necessidades de corrente e potência dos componentes de corrente contínua utilizados. Em seguida, realiza-se o dimensionamento dos condutores, assegurando a adequação às correntes elétricas envolvidas. Também são abordados o cálculo da corrente e da potência total do sistema, bem como o projeto do sistema de ligação à terra, fundamental para a segurança elétrica. O capítulo inclui ainda uma explicação do sistema de segurança implementado, assim como a descrição dos subsistemas de iluminação e sinalização, garantindo a operacionalidade e a conformidade com as normas vigentes.

Dimensionamento da fonte de alimentação

No sistema elétrico deste equipamento, são utilizados componentes que operam tanto com corrente alternada a uma tensão de 230 V como com corrente contínua a uma tensão de 24 V. Assim, é necessário recorrer a fontes de alimentação de corrente contínua para alimentar esses componentes. Para dimensionar a fonte de alimentação adequada, foi calculada a corrente total e a potência total requeridas pelos componentes de corrente contínua. Na Tabela 22 estão listados os componentes considerados neste cálculo, juntamente com as respetivas

quantidades, correntes nominais e potências. Estes valores foram obtidos a partir das respectivas fichas técnicas.

Tabela 22 - Dimensionamento da fonte de alimentação.

Componente	Corrente [A]	Potência [W]	Nº componentes	Corrente total [A]	Potência total [W]
Sensor desvios	0,050	1,2	1	0,05	1,2
Sensor diâmetro	0,075	1,8	3	0,225	5,4
Torre de sinalização	0,020	0,48	2	0,04	0,96
PLC	0,0025	0,060	1	0,0025	0,060
Gateway	0,63	15,12	1	0,63	15,12
HMI	0,23	5,50	1	0,23	5,5
Switch	0,17	2,5	1	0,17	2,5
Drive	1,6	38,40	4	6,4	153,6
LED enable	0,072	1,73	1	0,072	1,73
Σ				7,82	174,2

Considerando um coeficiente de segurança mínimo de 1,2, a fonte de alimentação deve fornecer, no mínimo, 9,38 A e 209,06 W. Assim, a fonte selecionada foi a SITOP PSU100L 24 V/10 A da SIEMENS, que oferece uma capacidade de alimentação de 240 W de potência e 10 A de corrente.

Cálculo potência total e corrente total

De modo a especificar o equipamento geral no que diz respeito à potência total e à corrente máxima utilizada pelo equipamento, procedeu-se ao cálculo descrito na Tabela 23.

Tabela 23 - Cálculo da corrente total e da potência total do equipamento.

Componentes	Corrente [A]	Potência [W]	Nº componentes	Corrente Total [A]	Potência Total [W]
Power Meter	1,74e-3	0,40	1	1,74e-3	0,40
Fonte de Alimentação 1	2,00	270,00	1	2,00	270,00
Fonte de Alimentação 2	1,30	136,00	1	1,30	136,00
Servomotores	1,40	200,00	4	5,60	800,00
LED's	0,72e-1	16,56	2	1,44e-1	33,12
Ventilador	6,09e-2	14,00	1	6,09e-2	14,00
PLC	0,04	11,00	1	0,04	11,00
Relé de segurança	0,08e-1	2,00	1	0,08e-1	2,00
Σ				9,15	1266,52

O equipamento de *slitting* tem uma corrente nominal total de 9,2 A e uma potência de 1,3 kW.

Dimensionamento de condutores

O equipamento de rebobinagem é munido de um sistema elétrico. Neste subcapítulo são dimensionados os condutores elétricos para as características do equipamento de *slitting*, de modo a confirmar se os condutores do equipamento atual suportam de forma segura a corrente elétrica atual, e dimensionados os condutores a aplicar no equipamento de *slitting*.

Para realizar o dimensionamento, recorreu-se à tabela técnica de condutores elétricos disponibilizada pela Eurocabos (Figura 96) [62], uma empresa de produção e fornecimento de cabos elétricos. Na figura, são apresentadas as correntes máximas para cada uma das secções retas de cabo, para cada tipo de cabo. No caso, considerou-se o cabo como sendo de 1 condutor ao ar livre.

Secção Nominal mm ²	1 Condutor		
	Instalação Subterrânea (2) Intensidade A	Instalação ao Ar (3) Intensidade A	Queda de Tensão $\Delta U = V / AKm$ $\cos \varphi = 0,8$ (4)
0,5	-	12	-
0,75	-	15	-
1	-	18	-
1,5	34	23	20,200
2,5	45	31	12,400
4	60	42	7,770
6	75	52	5,220

Figura 96 - Tabela de dimensionamento de condutores elétricos [62].

Para dimensionar os condutores, optou-se pela sua divisão em três categorias:

1. Os condutores que conduzem a corrente nominal total do equipamento, começando na tomada trifásica e terminando no barramento dos disjuntores monofásicos. A corrente nominal máxima a considerar para o dimensionamento dos condutores é de 9,2 A;
2. A cablagem que conduz corrente alternada à saída dos disjuntores monofásicos. A corrente nominal máxima a considerar para o dimensionamento dos condutores correspondente aos tramos que conduzem corrente para dois servomotores, e tem o valor de 2,4 A;
3. A cablagem que conduz corrente contínua da fonte até aos componentes. A corrente nominal máxima a considerar para o dimensionamento dos condutores correspondentes ao tramo que conduz corrente para o distribuidor tem o valor de 6,79 V.

Na Tabela 24 são apresentadas as secções retas utilizadas na cablagem do equipamento de rebobinagem.

Tabela 24 - Secções retas dos cabos do equipamento de rebobinagem.

	Categoria 1	Categoria 2	Categoria 2
Secção reta [mm ²]	4	1,5	1

Tendo em conta a tabela técnica de condutores elétricos disponibilizada pela Eurocabos e as correntes nominais máximas para cada categoria, conclui-se que a secção reta de 0,5 mm² é suficiente para a cablagem geral do equipamento. Com isto, dado que as secções retas dos cabos são todas superiores a 0,5 mm² com coeficientes de segurança superiores a 2, optou-se por manter as secções retas utilizadas no equipamento de rebobinagem, nas três categorias de cablagem, no equipamento de *slitting*.

No que diz respeito ao código de cores da cablagem, seguiu-se a norma IEC 60204-1. Esta norma exige que o fio terra seja amarelo e verde, que o neutro seja azul-claro e que as fases sejam castanho, preto ou cinza. Dado que o sistema elétrico só distribui uma fase pelos disjuntores, optou-se por utilizar a cor castanho para a fase [57]. Para distinguir a cablagem que conduz corrente alternada e contínua, optou-se por aplicar fiação de cor vermelha para os condutores de corrente contínua positiva e preto para os condutores de corrente contínua negativa. Desta forma facilita-se a identificação e separação dos sistemas de alimentação.

Sistema de aterramento: Barramento de terra

Na chapa de suporte dos componentes elétricos, encontram-se várias calhas DIN que são utilizadas para fixar os componentes ao quadro. Esta calha, para além da função fixadora, apresenta também função de ligação à terra de grande parte dos componentes, que apresentam esta funcionalidade. Foi colocado um borne de terraaterramento (Figura 97 a) no quadro, que distribui cabos para componentes como o PLC, as fontes de alimentação, o relé de segurança e a tomada monofásica, bem como para a tomada trifásica do equipamento (Figura 97 b). Os *drives* (Figura 98), que estão fixos diretamente à chapa, não foram ligados ao borne de aterramento porque apresentam uma estrutura que, ao ser fixada a uma superfície metálica, realiza automaticamente contacto de terra.

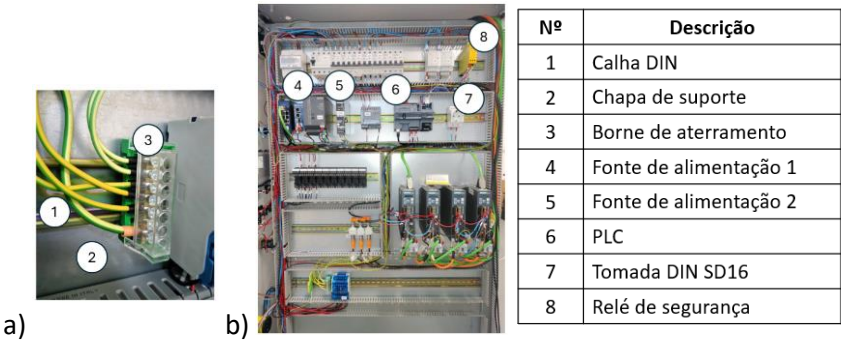


Figura 97 - Sistema de aterramento: a) borne de aterramento; b) quadro elétrico.



Figura 98 - Fixação dos *drives*.

Segurança

Existe um sistema de segurança tanto no circuito elétrico do equipamento como no *software* do PLC. O sistema de segurança no circuito elétrico é constituído por dois contactores, K4 e K5, conectados em série, que, em caso de emergência, interrompem o fornecimento de energia para os *drives* e, conseqüentemente, para os servomotores. A utilização de dois contactores em série em vez de apenas um visa garantir redundância. Caso um deles falhe numa emergência, a energia será ainda assim cortada pelo outro contactor.

As bobines destes contactores estão conectadas a um relé de segurança. Estes relés operam de forma semelhante aos relés comuns, mas possuem um sistema de rearme integrado. Para que o relé feche os seus contactos, a sua bobine deve ser alimentada. Contudo, é necessário primeiro ativar o relé através do sistema de rearme. Assim, os contactos do relé só se fecham se a bobine estiver energizada e a entrada Y2 receber um sinal. Neste sentido, o botão de reset, ou rearme, é conectado a este sistema de rearme do relé. Os botões de emergência estão conectados em série com a bobine do relé, de modo que esta só seja energizada se ambos os botões estiverem na posição fechada, ou seja, se os botões não estiverem acionados.

As bobines dos contactores estão conectadas aos contactos do relé, e são energizadas apenas se ambos os botões de emergência estiverem desativados e o rearme tiver sido realizado. Mais uma vez, verifica-se a redundância nos contactos do relé de segurança.

Iluminação e sinalização

Para efeitos de iluminação e sinalização, o equipamento dispõe de três LEDs na face direita do armário, um verde, um azul e um branco, além de uma torre de sinalização. O LED verde, conhecido como LED *Enable*, indica que o equipamento está em funcionamento, acendendo apenas quando o aparelho está operacional. O LED branco indica que o aparelho está a ser alimentado e liga-se imediatamente após o acionamento do interruptor de corte geral. Após a ativação do botão de emergência, o LED azul sinaliza que é necessário proceder ao rearme do sistema. A torre de sinalização informa sobre o estado de funcionamento do equipamento com três LEDs incorporados. O LED vermelho acende em situações de risco ou antes de ser realizado o rearme, o LED verde acende durante o funcionamento normal do equipamento e o LED laranja indica que a fita e as bobines não estão corretamente posicionadas, impossibilitando o arranque do aparelho.

A montagem dos sinalizadores foi diferente, dado que estes têm especificações e funções diferentes. O LED branco, sendo ele um LED de 230 V, foi diretamente ligado à saída do corte geral. Dado que a função deste LED é exclusivamente informar quando existe energia a entrar na máquina, não é necessário nenhum tipo de controlo associado ao mesmo.

O LED de rearme, também de 230 V, foi ligado ao barramento, imediatamente antes dos disjuntores monofásicos. No entanto, este LED implica que haja um controlo. Como tal, este foi ligado a dois contactos em paralelo de dois relés, um normalmente aberto, K7, e outro normalmente fechado, K6. O primeiro relé está ligado ao PLC, de modo a existir um controlo de acionamento do LED a partir do *software* do PLC K6, e o outro relé está em paralelo com as

bobines dos contactores K6. Deste modo, sempre que estas bobines não estejam a ser energizadas, o LED de rearme é ativo.

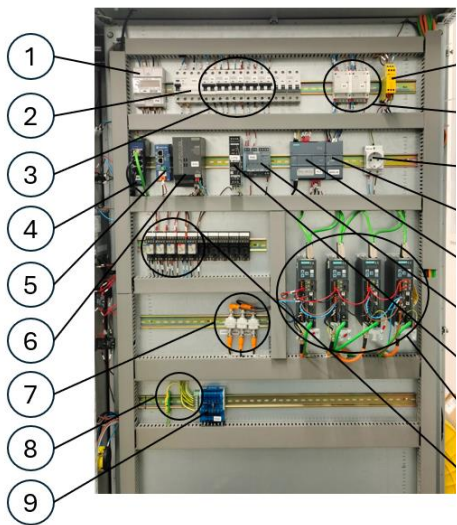
O LED verde de *enable* é um LED de 24 V, pelo que, deve ser alimentado pela fonte de alimentação de corrente contínua. Este LED está ligado a um relé num contacto normalmente aberto, K3, com a bobine ligada ao PLC. Como tal, este LED acende apenas com um comando do PLC.

Esquema elétrico final

O esquema elétrico final do equipamento encontra-se no Apêndice G.

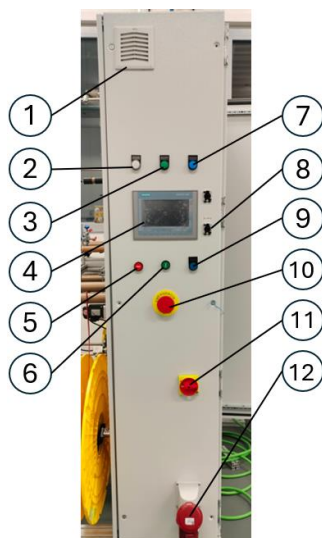
Fotografias do sistema

De seguida, são apresentadas fotografias do sistema elétrico do equipamento de *slitting*. Na Figura 99 é possível observar o quadro elétrico equipamento e a respetiva legenda. Na Figura 100 é apresentado o painel de controlo e a respetiva legenda. Por fim, na Figura 101 observa-se a torre de sinalização fixada à face superior do armário do equipamento.



1	<i>Power meter</i>	10	Relé de segurança
2	Disjuntor trifásico	11	Contactores
3	Disjuntores monofásicos	12	Tomada
4	<i>Sswitch</i>	13	Módulo AI
5	<i>Gateway</i>	14	PLC
6	Fonte de alimentação principal	15	Módulo de seletividade
7	Conversores IO-Link para analógico	16	Fonte de alimentação secundária
8	Barramento terra	17	<i>Drivers</i>
9	Distribuidor	18	Relés

Figura 99 – Quadro elétrico.



1	Ventilador	7	LED reset
2	LED branco	8	Entrada Ethernet
3	LED <i>enable</i>	9	Botão <i>reset</i>
4	HMI	10	Botão de emergência
5	Botão <i>stop</i>	11	Corte geral
6	Botão <i>start</i>	12	Entrada de corrente

Figura 100 – Painel de controlo.



Figura 101 - Torre de sinalização.

3.7.8. Disposição de Rolos

De modo a garantir o correto guiamento da fita ao longo do sistema, é necessário elaborar uma disposição dos rolos adequada. Esta disposição deve cumprir com os seguintes requisitos:

1. Guiar a fita da bobine de alimentação para as duas bobines recetoras, no caso de operar do modo de *slitting*;
2. Garantir a horizontalidade da fita à entrada e saída do sistema de *slitting*;
3. Dispor os rolos do sistema de correção de desvios da fita desenvolvido para a rebobinadora, de modo a possibilitar que o equipamento funcione nos dois modos.

De modo a cumprir com os requisitos, foi elaborado um *layout* da disposição dos rolos. Este *layout* implica que a fita é montada no equipamento de duas formas diferentes, consoante a ação que se pretende realizar.

No modo de *slitting*, a fita deve ser colocada de acordo com o esquema da Figura 102 a. Desta forma, a fita passa pelo sistema de corte e, à saída, esta é guiada para as duas bobines de enrolamento. No modo de rebobinagem, a fita deve ser colocada de acordo com o esquema da

Figura 102 b. Desta forma, a fita não passa pelo sistema de corte, mas sim pelo sistema de correção de desvios da rebobinadora, e entra diretamente na bobine de enrolamento.

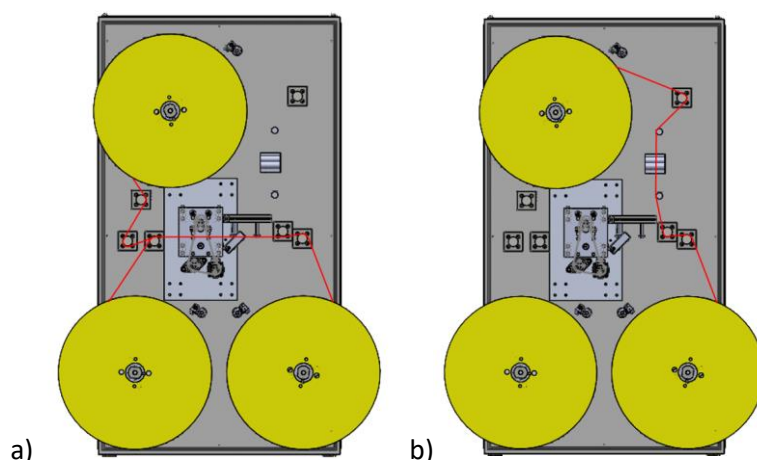


Figura 102 - Disposição dos rolos: a) montagem da fita em modo *slitting*; b) montagem da fita em modo rebobinagem.

Na Figura 103 é possível observar a fixação dos rolos ao equipamento. Neste *layout*, apenas os rolos 1, 3 e o conjunto 4 estão fixos aos perfis da estrutura da máquina. Assim, os conjuntos de rolos 2 e 5 são fixos exclusivamente à chapa do armário, que, devido à sua espessura reduzida, não apresenta a mesma rigidez dos perfis ou da chapa de suporte do sistema de corte. No entanto, os pontos de fixação dos outros componentes do equipamento aos perfis da estrutura também contribuem para a fixação da chapa aos perfis. Este fator resulta num aumento significativo da rigidez da chapa, o que reduz potenciais oscilações ou desvios nos rolos fixados a ela. Ainda assim, sugere-se, para trabalhos futuros, o aumento da rigidez do suporte dos rolos 2 e 5.

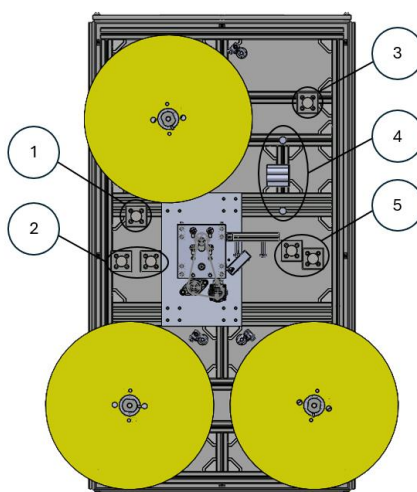


Figura 103 - Fixação dos rolos.

Para proceder à fixação dos rolos, foi necessário maquinar a chapa do armário. Para além dos furos para a fixação dos rolos, foram criadas tomadas em consideração as aberturas para acoplamento dos servomotores (Figura 104) e do sistema de corte (Figura 105). Estas aberturas

foram dimensionadas de modo a possibilitar a desmontagem dos servomotores e do sistema de corte do equipamento, sem necessidade de desmontagem da chapa. Para além disso, foram também realizadas as furações para a fixação das flanges dos sensores e para passagem de cablagem.

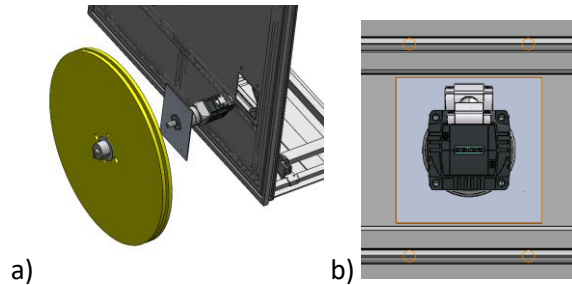


Figura 104 – a) Montagem do servomotor; b) abertura na chapa para acoplamento do servomotor.

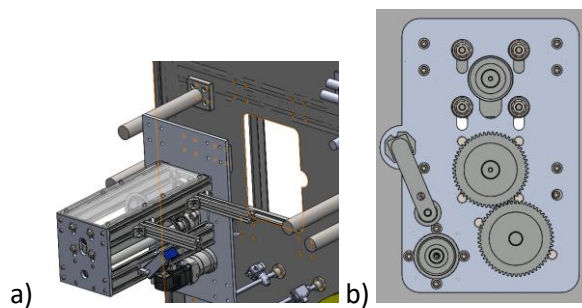


Figura 105 - a) Montagem do sistema de corte; b) abertura na chapa para acoplamento do sistema de corte.

O desenho técnico da chapa encontra-se no Apêndice D

3.7.9. Manual de operação

O manual do equipamento encontra-se no Apêndice H

4. Integração e Validação

4.1.1. Integração dos sistemas no equipamento

Após concluído o projeto mecânico do acoplamento das facas, da fixação do sensor, do guiamento das fitas, o projeto elétrico e o projeto do sistema de controlo, e a disposição dos rolos no equipamento, prosseguiu-se com a integração dos subsistemas no equipamento geral. É possível observar os desenhos técnicos da montagem do equipamento no Apêndice D.

Começando pelo sistema de acoplamento de facas (Figura 106), este foi integrado durante a montagem do sistema de corte. Durante a montagem, concluiu-se que a reduzida folga entre as peças fixadoras e os veios permite garantir a perpendicularidade com maior precisão entre o plano das facas e o veio. Como desvantagem, uma folga mais reduzida resulta num contacto deslizante justo, que dificulta a movimentação das facas ao longo do veio quando é necessário alterar o seu posicionamento. Para além disso, o espaço entre as travessas do sistema de corte disponível para manipular a posição das facas é reduzido, dificultando também o este processo.

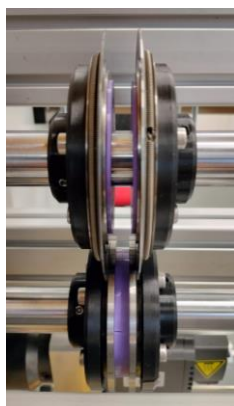


Figura 106 - Acoplamento das facas ao veio.

Na integração do próprio sistema de corte no equipamento final, desenvolveram-se dois elementos, um manípulo e um acrílico de proteção. O manípulo (Figura 107 a) acoplado ao veio superior, permite a rotação manual das facas, e é útil para a fase de preparação da máquina e colocação da fita. Através deste elemento, o operador consegue rodar as facas de forma segura e com risco reduzido, para colocar a fita no equipamento. O acrílico de proteção (Figura 107 b) foi idealizado de modo a diminuir o índice de risco de utilização do equipamento, segundo a norma ISO 12100. Este acrílico realiza a função de barreira física, uma vez que impede o acesso às facas durante a operação. Os desenhos técnicos destes elementos estão nos Apêndices D.

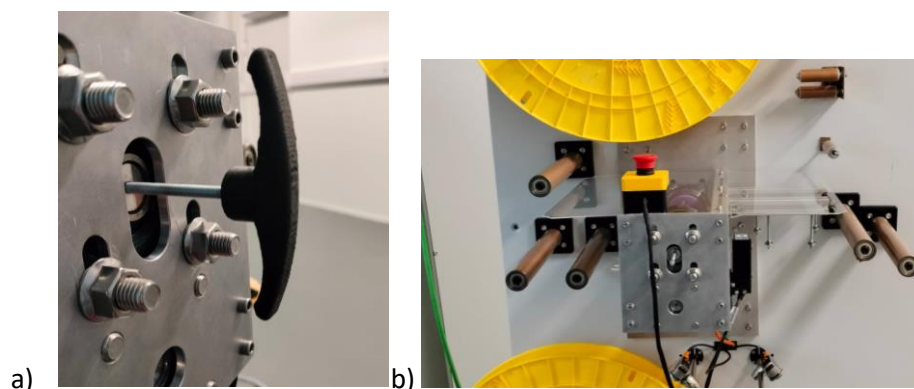


Figura 107 - a) Manípulo do sistema de corte; b) acrílico de proteção.

O sistema de fixação do sensor e o sistema de guiamento das fitas foram integrados na travessa do sistema de corte com porcas de ranhura para perfis BOSCH (Figura 108).

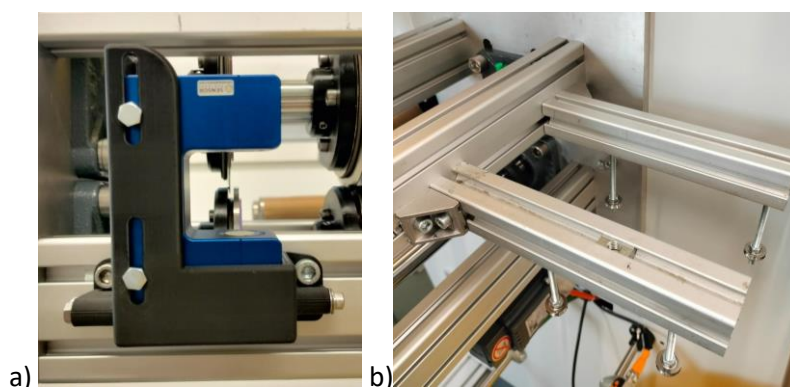


Figura 108 - a) Sistema de fixação do sensor; b) Sistema de guiamento da fita.

De seguida, o sistema elétrico do equipamento foi maioritariamente organizado no quadro elétrico (Figura 109), localizado no interior do armário. Os componentes foram fixados em calhas DIN, que estavam fixas à chapa do armário com rebites. De modo a organizar a disposição da cablagem, utilizaram-se calhas técnicas. Durante o processo de implementação da cablagem, foram utilizadas etiquetas autocolantes que identificam a origem e destino de cada um dos cabos.



Figura 109 - Quadro elétrico do equipamento.

O sistema de controlo foi programado a partir de uma porta Ethernet no painel de controlo do equipamento (Figura 110) que, como está ligada ao *switch*, permite o acesso do computador à rede da máquina. O programa TIA Portal da SIEMENS, utilizado para desenvolver o código e a interface do equipamento, permitiu descarregar os programas diretamente para o PLC.



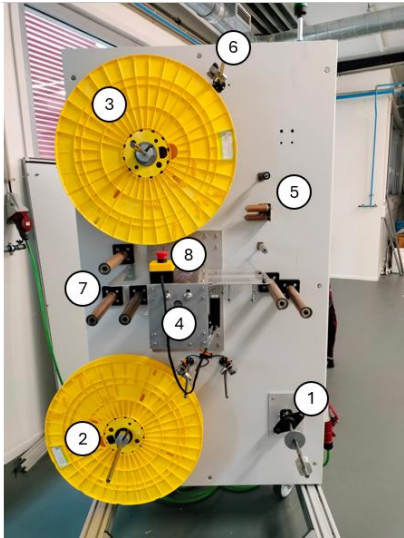
Figura 110 - Porta Ethernet em utilização no equipamento.

Para proceder à montagem do equipamento, foi necessário modificar a chapa do armário. Este processo foi realizado com as ferramentas manuais berbequim e rebarbadora na oficina do INEGI. A Figura 111 corresponde a uma fotografia da chapa maquinada.



Figura 111 - Fotografia da chapa maquinada.

Na Figura 112 é possível observar uma fotografia do equipamento legendada.



1	Servomotor da bobine 1 de entrada	5	Rolos referentes à rebobinagem
2	Servomotor da bobine 2 de saída	6	Sensor de medição dos raios das bobinas
3	Servomotor da bobine 3 de saída	7	Rolos referentes ao <i>slitting</i>
4	Sistema de corte	8	Botão de emergência 2

Figura 112 - Fotografia do equipamento.

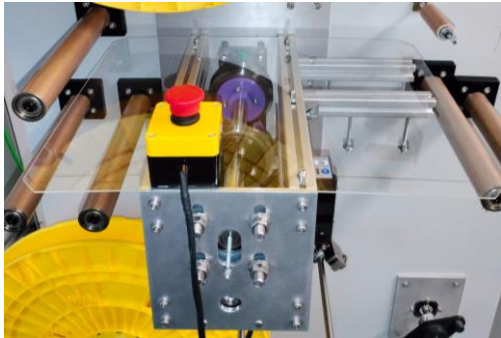


Figura 113 - Fotografia do sistema de corte.

4.1.2. Estabelecimento de protocolos de validação

A validação individual dos subsistemas e da máquina totalmente integrada constitui uma etapa crucial para garantir a qualidade e a eficácia do processo produtivo. Este subcapítulo descreve os protocolos de validação implementados, detalhando os testes e as metodologias utilizadas para assegurar o correto funcionamento dos componentes críticos. A validação encontra-se dividida nas seguintes áreas: sistema de fixação das facas, sistema de fixação do sensor, sistema de correção de desvios, sistema de rebobinagem e validação da qualidade do produto final.

Validação do sistema de fixação das facas

A validação do sistema de fixação das facas é essencial para garantir a precisão do corte e a qualidade do produto final. Os seguintes testes foram realizados:

1. **Medição da distância entre as contrafacas:** Este teste visa confirmar que as distâncias entre as contrafacas nas diferentes configurações correspondem às estabelecidas no projeto. Utilizando um paquímetro, foram realizadas 8 medições das distâncias entre as contrafacas ao longo do seu perímetro, para determinar as tolerâncias da distância entre as facas, e verificar o paralelismo entre os dois elementos. Este procedimento é

crítico para garantir que o corte seja uniforme e de acordo com as especificações das configurações das peças.

2. **Observação de defeitos após corte da fita:** Para avaliar a qualidade do corte realizado, foi utilizada uma análise microscópica da aresta da fita cortada. O objetivo deste teste é determinar se a fita foi cortada ou rasgada, garantindo que a aresta esteja limpa e sem defeitos, o que é essencial para a integridade do produto final.

Validação do sistema de fixação do sensor

O sistema de fixação do sensor foi projetado para permitir o ajuste preciso da posição vertical e do ângulo do sensor, de forma a assegurar a sua correta calibração e funcionamento durante o processo de produção. A validação deste sistema foi realizada através do seguinte teste:

- **Verificação das posições do sensor:** O sistema foi testado para garantir que permite a colocação do sensor em todas as posições previstas no projeto. Foram realizados ajustes e medições para confirmar que o sensor pode ser posicionado de acordo com as especificações de projeto, sem restrições ou desvios. Este teste é essencial para assegurar que o sistema de fixação proporciona a flexibilidade necessária para uma calibração precisa, garantindo que o sensor esteja corretamente orientado e alinhado em todas as etapas do processo produtivo.

Validação do produto final

A última etapa da validação é a avaliação da largura da fita cortada e das suas bordas ao longo do processo, o que é fundamental para garantir a consistência e a qualidade do produto final. Este processo foi realizado com a seguinte metodologia:

- **Avaliação das variações de largura e dos desvios da fita com perfilômetro:** Foi utilizado um perfilômetro da IFM para medir as variações de largura da fita cortada durante o processo. O teste foi realizado com duas facas, e os dados obtidos foram analisados para garantir que a largura da fita se mantém dentro das especificações ao longo de toda a produção. Este teste é essencial para assegurar a uniformidade e a qualidade do produto final, evitando desvios que possam comprometer o seu desempenho.

Cada uma destas etapas de validação é crucial para garantir que o sistema de produção funciona de forma eficiente e que o produto final atende aos padrões de qualidade exigidos. A implementação rigorosa destes protocolos assegura a fiabilidade e a consistência do processo de corte e rebobinagem, contribuindo para a excelência do produto final.

4.1.3. Validação de funcionamento dos subsistemas

Validação do sistema de fixação das facas

1. **Medição da distância entre as facas**

O sistema de acoplamento das facas foi projetado para que o posicionamento das peças de acoplamento respeite distâncias específicas entre as facas. Foram definidas três configurações,

cada uma correspondente a uma distância diferente entre facas: 6,35 mm ($\frac{1}{4}$ de polegada), 12,70 mm ($\frac{1}{2}$ polegada) e 25,4 mm (1 polegada) (Figura 114).

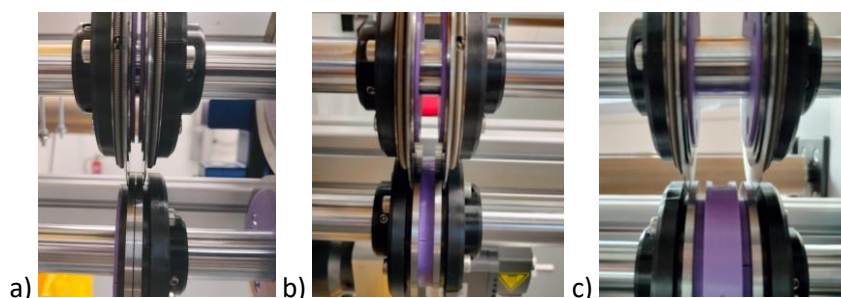


Figura 114 - a) Configuração $\frac{1}{4}$ ''; b) configuração $\frac{1}{2}$ ''; c) configuração 1''.

Para a realização deste teste, utilizou-se um paquímetro digital com erro de 0,01 mm, através do qual foram medidas as distâncias entre as facas em cada uma das configurações. Para cada configuração foram realizadas 8 medições com espaçamento de 45° entre cada uma (Figura 115). Na Tabela 25 estão apresentados os resultados destas medições.



Figura 115 - Medições entre as contrafacas com paquímetro: a) configuração $\frac{1}{4}$ ''; b) configuração $\frac{1}{2}$ ''; c) configuração 1''.

Tabela 25 - Resultados das medições.

Configuração $\frac{1}{4}$ '' (6,35 mm)	Configuração $\frac{1}{2}$ '' (12,7 mm)	Configuração 1'' (25,4 mm)
6,33	12,68	25,32
6,35	12,70	25,22
6,35	12,73	25,23
6,32	12,73	25,30
6,31	12,70	25,35
6,36	12,67	25,40
6,35	12,66	25,35
6,34	12,65	25,29

De seguida foi realizado o cálculo da média dos valores, do desvio absoluto e do desvio máximo em relação à referência. Para o cálculo da média utilizou-se a Equação 32.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (32)$$

Tabela 26 - Média, valor mínimo e máximo, desvio absoluto, valor de referência e desvio máximo em relação à média das medições.

	Configuração ¼"	Configuração ½"	Configuração 1"
	[mm]	[mm]	[mm]
Média	6,339	12,696	25,310
Valor mínimo	6,31	12,65	25,22
Valor máximo	6,36	12,73	25,40
Desvio absoluto	0,05	0,08	0,18
Referência	6,35	12,70	25,40
Desvio máximo em relação ao valor referência	- 0,04	- 0,05	- 0,18

O aumento dos desvios absolutos da configuração ¼" para a configuração 1" é justificado pelo acréscimo do número de peças utilizadas nas diferentes configurações. À medida que o número de peças aumenta, os desvios geométricos acumulam-se, o que resulta, naturalmente, num aumento do desvio em relação à referência. Este efeito é ainda mais acentuado pelo facto de as peças serem fabricadas por impressão 3D, um processo que apresenta tolerâncias maiores devido à sua menor precisão em comparação com a maquinaria tradicional. Assim, é expectável um aumento significativo no desvio absoluto à medida que o número de peças no sistema aumenta. No entanto, é importante destacar que todos os valores obtidos nas medições estão dentro da tolerância de largura de fitas exigidas pela empresa. Com base nos resultados obtidos, o sistema foi validado e aprovado para as três configurações.

2. Observação de defeitos após corte da fita

Para este teste, procedeu-se ao corte de um excerto de fita com 620 mm de comprimento (Figura 116). Utilizou-se a configuração de 1" das facas, a qual resulta numa fita com 25,4 mm de largura (Figura 116). Este excerto diz respeito à amostra do teste, que tendo em conta que foram cortadas duas arestas de 620 mm, apresenta uma dimensão de 1240 mm. A rotação das facas foi efetuada manualmente, com o objetivo de avaliar a qualidade do corte produzido pelo conjunto de facas, verificando se este provoca um efeito de corte ou rasgo na fita. Esta operação manual é igualmente necessária durante a fase de montagem inicial da fita no equipamento, para a realização do processo de *slitting*. O acionamento eletromecânico das facas exige que a fita esteja montada em todas as bobinas simultaneamente, pelo que o operador, ao montar a fita no sistema, deve utilizar a manivela do sistema de corte para acionar manualmente a rotação das facas. Considera-se que esta é a situação de corte mais crítica, pelo que se decidiu verificar a qualidade do corte nestas condições.

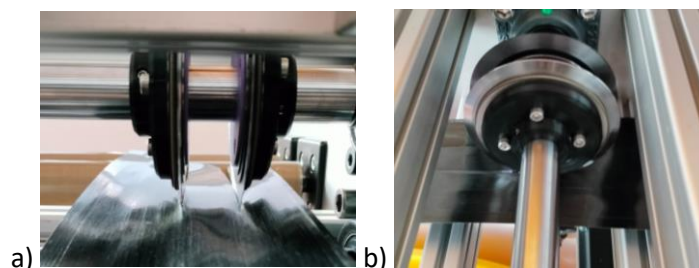


Figura 116 - Fotografias do corte da fita de pré-impregnado: a) perspectiva à entrada do sistema de corte; c) perspectiva de frente para o equipamento.

Para a observação das arestas, utilizou-se o microscópio digital RS Pro (Figura 117). Realizaram-se observações com ampliações de 50x e de 230x, nas duas arestas da fita resultantes do processo de *slitting*.

A observação através do microscópio digital tem como objetivo detetar defeitos na aresta da fita, de modo a perceber se a qualidade do corte das facas é satisfatória. Na Figura 117 é possível observar zonas de aresta sem defeitos.

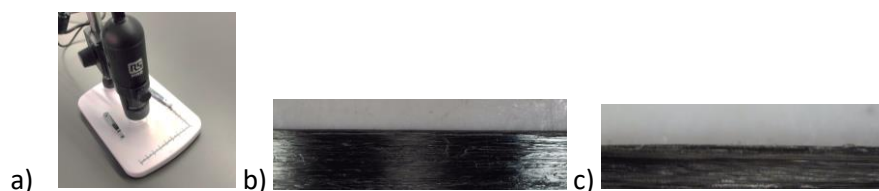


Figura 117 – a) Microscópio digital RS Pro; b) zona de aresta sem defeitos com ampliação de x50; c) zona de aresta sem defeitos com ampliação de x230.

De modo a clarificar o teste, estabeleceram-se dois tipos de defeitos:

1. Defeitos Tipo I, como fibras soltas ou leves ondulações (Figura 118 a);
2. Defeitos Tipo II, como zonas de aresta com pior acabamento, ou zonas de rasgo (Figura 118 b).

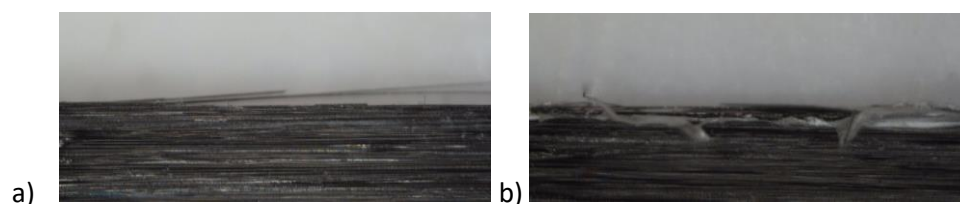


Figura 118 - Exemplos de defeitos: a) defeito Tipo I; b) defeito Tipo II.

Dado que a amostra foi retirada nas condições mais críticas do corte, estes defeitos podem resultar da falta de tensão na fita ou da instabilidade na velocidade e aceleração do corte.

De seguida, prosseguiu-se à observação das arestas com o microscópio a uma ampliação de x230 de modo a quantificar os defeitos Tipo I e Tipo II em cada uma das arestas. Na Tabela 27 é possível observar o número de defeitos encontrados.

Tabela 27 - Número de defeitos nas arestas de corte.

Aresta	Defeitos Tipo I	Defeitos Tipo II
Aresta 1	6	2
Aresta 2	4	2

Observa-se que o número de defeitos Tipo I e Tipo II é bastante similar em ambas as arestas. Tendo em conta o comprimento de 620 mm por aresta e o facto de os defeitos descritos serem de natureza microscópica, a quantidade de defeitos registada é bastante reduzida. Em função dos resultados obtidos, confirma-se que a qualidade do corte nas condições mais críticas é considerada satisfatória, e os sistemas de manípulo e corte são considerados válidos.

Validação do sistema de fixação do sensor

Verificação das posições do sensor:

Para a elaboração deste teste, começou-se por medir a distância entre a base do suporte do sensor e a face superior do sensor nas posições de altura máxima e mínima. Subtraindo estes valores é possível obter a amplitude de alturas que o sistema permite calibrar o sensor. Como é possível observar nas Figura 119 a) e b), a distância medida pelo paquímetro para a posição máxima é 105,00 mm, e para a posição mínima é 82,79 mm. Como tal, o sistema tem uma amplitude de calibração da altura do sensor de 22,21 mm. No projeto deste sistema, previa-se uma amplitude de 22,40 mm. Esta diferença pode dever-se à contração do material, fator comum na utilização de processos de fabrico aditivo.

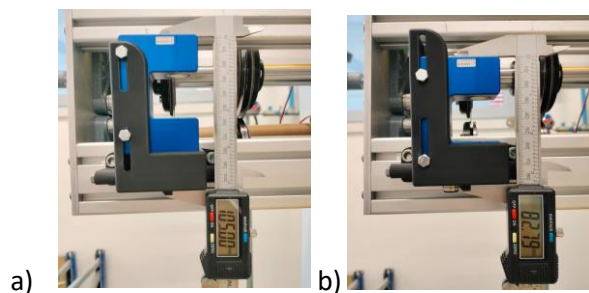


Figura 119 - a) Posição de altura máxima do sensor; b) posição de altura mínima do sensor.

Para medir as inclinações máximas do sistema de fixação do sensor utilizou-se um transferidor, um goniómetro e um esquadro de precisão (Figura 120).

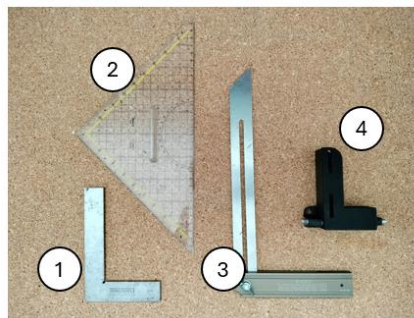


Figura 120 - Instrumentos utilizados para a medição dos ângulos máximos do sistema de fixação do sensor: 1 – esquadro de precisão; 2 – transferidor; 3 – goniómetro; 4 – Sistema de fixação do sensor.

Para medir os ângulos do sistema, colocaram-se as ferramentas nas posições descritas nas Figura 121 a) e b). Na posição de inclinação máxima no sentido horário, utilizou-se apenas o goniómetro para medir o ângulo. Colocou-se a pega do goniómetro em contacto com a base da peça fixadora, e a lâmina do goniómetro em contacto com a face lateral da peça de suporte do sensor. Na posição de inclinação máxima no sentido anti-horário, utilizou-se também o esquadro de precisão. Este componente foi utilizado para garantir a perpendicularidade entre o tampo da mesa e a base da peça fixadora. Depois, com o goniómetro, marcou-se o ângulo entre a mesa e a face lateral da peça de suporte do sensor. Com o goniómetro, marcou-se o ângulo entre o tampo da mesa e a face lateral da peça de suporte do sensor. Para calcular o ângulo da inclinação do sensor neste sentido, subtrai-se 90° ao valor marcado pelo goniómetro.

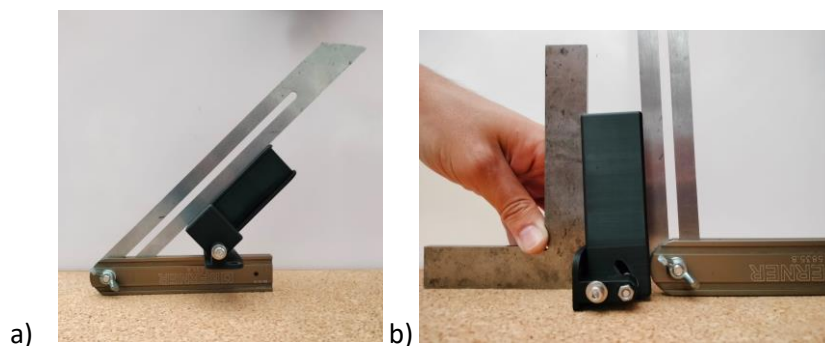


Figura 121 – Posição de inclinação máxima no sentido horário; b) Posição de inclinação máxima no sentido anti-horário.

Ao medir com o transferidor os valores dos ângulos marcados pelo goniómetro, obteve-se os resultados de 3° no sentido anti-horário e $43,5^\circ$ no sentido horário. Como tal, conclui-se que a amplitude real de calibração da inclinação do sensor é de $46,5^\circ$.

Tendo em conta que os valores de amplitude de calibração do sistema de fixação do sensor no projeto são 22,4 mm e 48° , e os valores obtidos no teste de validação são 22,21 mm e $46,5^\circ$, concluímos que ocorreu um desvio absoluto de 0,19 mm e $1,5^\circ$ na amplitude de calibração da altura e de inclinação, respetivamente. Estes desvios podem ser justificados pela contração do material ao arrefecer, que é um fenómeno comum em processos de fabrico aditivo com deposição de material fundido. Ao analisar os dados, conclui-se que existiu um desvio absoluto da amplitude de calibração, no entanto não apresentam ser valores prejudiciais para a

calibração do sensor, tendo em conta que os requisitos estabelecidos de amplitudes mínimas são inferiores às reais. Posto isto, considerou-se este sistema validado.

4.1.4. Validação de qualidade do produto final

1. Avaliação das variações de largura e desvios laterais da fita com perfilómetro:

Para a realização deste teste, foi utilizado um perfilómetro, um cabo IO-Link, um conversor para ligação do sensor com função IO-Link a um computador e um cabo de micro-USB para USB. O perfilómetro é um instrumento de medição utilizado para analisar o perfil ou a topografia de uma superfície, permitindo medir irregularidades, rugosidades e variações em diferentes materiais. Neste caso, foi utilizado o sensor OPD100 da IFM para medir a largura da fita ao longo do processo de corte, bem como os seus desvios laterais (Figura 122).



Figura 122 - Posicionamento do sensor face à fita.

O sensor foi ligado através de um cabo IO-Link ao conversor E30390 da IFM, que possibilita a leitura dos dados no computador (Figura 123 a). Para a leitura e análise dos dados, recorreu-se ao software Vision Assistant da IFM, que permite descarregar os perfis obtidos pelo sensor. O princípio de funcionamento do teste baseia-se na aquisição de um perfil da fita a cada período de tempo, sendo posteriormente analisada a variação da largura e os desvios laterais ao longo do processo.

Para fixação do sensor, utilizou-se um suporte e uma garra de fixação (Figura 123 b).

a)

b)

1	Perfilómetro OPD100
2	Cabo IO-Link
3	Conversor E30390
4	Cabo micro-USB para USB
5	Suporte
6	Garra

Figura 123 - Componentes utilizados no teste de validação do produto final.

Os parâmetros de operação estabelecidos para a realização deste teste estão discriminados na Tabela 28.

Tabela 28 - Parâmetros da operação.

Parâmetro	Valor
Velocidade linear da fita [m/s]	0,010
Raio mínimo da bobine de alimentação [mm]	50
Raio máximo da bobine recetora [mm]	85
Raio mínimo da bobine recetora [mm]	80
<i>taper</i> [%]	30
Tensão máxima no núcleo da bobine [N/mm]	0,020
Largura da fita inicial [mm]	100

Foi realizado o corte de uma fita de papel, dado que a operação foi exclusivamente considerada para fins de teste, e por este material apresentar custo mais reduzido. Utilizou-se um excerto de 1 metro de comprimento. Para a montagem da fita e das bobines no equipamento, seguiram-se os passos de preparação da operação descritos no manual do utilizador. Na Figura 124 é possível observar uma fotografia do equipamento de *slitting* durante o decorrer do teste. O teste foi conduzido com as facas na configuração de 1'', destinada ao corte de larguras de 25,4 mm. O sensor capturou um total de 146 *frames*, o que permitiu a medição da largura e do desvio lateral em intervalos de 6,8 mm, aproximadamente.



Figura 124 - Fotografia do equipamento durante o teste de validação.

O teste resultou no gráfico da Figura 125, que é possível observar as variações de largura e desvios laterais da fita por *frame* durante a ação de *slitting*.

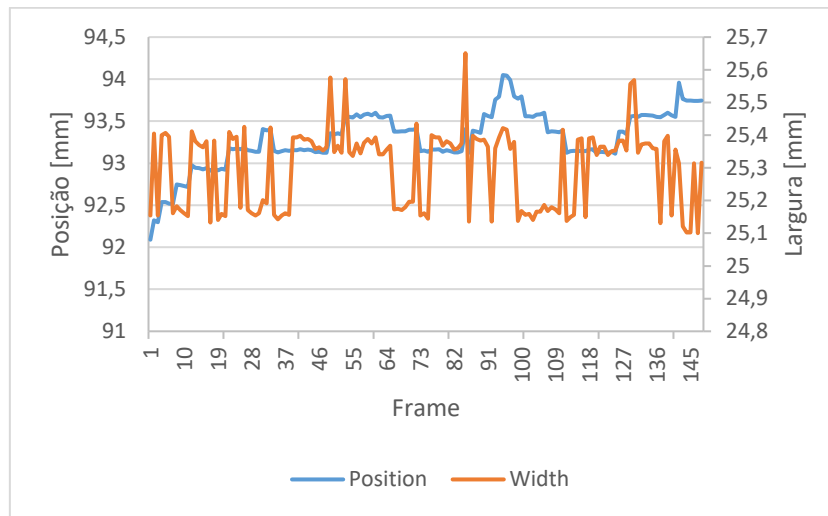


Figura 125 - Gráfico de variação de posição e largura da fita.

Ao analisar o gráfico, constata-se a presença de *outliers* acentuados, decorrentes de erros de leitura do perfilômetro. Para permitir uma análise mais precisa e realista dos dados, foi aplicado um filtro passa-baixo de primeira ordem (Equação 33)[57], utilizando um fator de filtragem de 0,9. Para este efeito, aplicou-se a equação 33, na qual y diz respeito ao *output* no instante $k-1$, α diz respeito ao coeficiente de filtragem, e u ao *input* no instante k . Com os resultados obtidos, foi gerado o gráfico apresentado na Figura 126.

$$y_k = \alpha \times y_{k-1} + (1 - \alpha) \times u_k \quad (33)$$

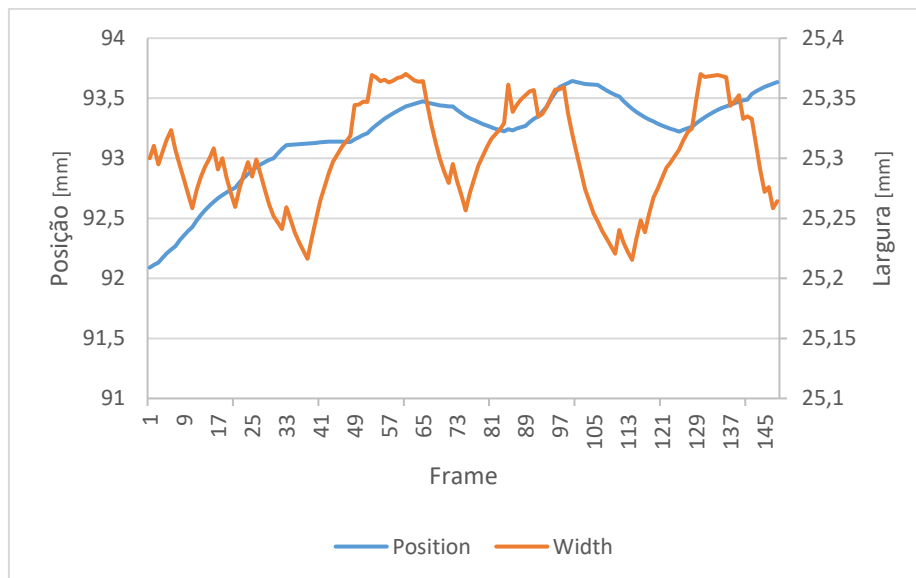


Figura 126 - Gráfico de variação da posição e largura da fita sem *outliers*.

Na Tabela 29 é possível observar as médias dos parâmetros de avaliação, os valores mínimos, os valores máximos, e os desvios absolutos dos mesmos.

Tabela 29 - Média, valor mínimo, valor máximo e desvio absoluto das medições.

	Largura da fita [mm]	Posição [mm]
Média	25,259	93,038
Valor mínimo	25,172	91,929
Valor máximo	25,326	93,481
Desvio absoluto	0,155	1,551

Ao analisar o gráfico, verifica-se que a linha de valores de medição da largura revela uma tendência para um perfil sinusoidal constante. Este comportamento pode ser justificado por erros no paralelismo das facas, devido às baixas tolerâncias associadas ao fabrico aditivo, em comparação com as tolerâncias mais restritas da maquinaria. No entanto, considerando o desvio absoluto de 0,155 mm, conclui-se que a precisão do corte está dentro do intervalo de tolerância pretendido. Tendo em conta que o valor mínimo registado foi de 25,259 mm, o desvio em relação à referência de 25,4 mm é de 0,231 mm. Embora o desvio obtido também se encontre dentro das margens de tolerância, este pode ser facilmente reduzido através da correção da largura do espaçador entre as duas contrafacas. Desta forma, reduz-se o desvio entre o valor de referência e o valor médio medido, aumentando a precisão do sistema.

Na linha de variação da posição da fita, observa-se um aumento acelerado na fase inicial do teste. Este comportamento pode ser explicado pelo facto de, numa fase inicial, a fita se mover autonomamente para estabilizar a dispersão das tensões. Após esta subida acentuada, a linha de posição aparenta manter uma tendência de crescimento, embora de forma mais lenta. Este fenómeno pode resultar do desalinhamento dos rolos à entrada e saída do sistema de corte. Estes rolos, ao serem submetidos aos esforços gerados pela tensão da fita, tendem a desalinhar devido à reduzida rigidez da chapa do armário onde estão fixados. Este fator explicaria a tendência de desvio constante, e no mesmo sentido, da fita durante a operação. Adicionalmente, a linha de variação dos desvios laterais apresenta um perfil sinusoidal. Esta variação pode ser causada pela combinação entre a variação da largura da fita - uma vez que a leitura da posição é feita a partir da aresta da mesma - e as flutuações na tensão de enrolamento da bobina de alimentação.

Devido à tendência de desvio da fita, resultante do desalinhamento dos rolos, não foi possível utilizar o sistema de guiamento da fita durante o teste. Este problema foi identificado antes da realização do teste, o que levou à decisão de não aplicar o sistema de guiamento durante a operação. Quando a fita tende a desviar sempre no mesmo sentido, o sistema de guiamento pode resultar no encurvilhamento da aresta, que resulta em defeitos na fita. Tendo em conta que o sistema foi projetado para mitigar desvios reduzidos e sem uma tendência a aumentar, prevê-se que, ao ser implementado, consiga corrigir os desvios menos acentuados causados pelas variações na tensão de enrolamento da bobina de alimentação.

4.1.5. Estudo económico e ROI

Para realizar o estudo económico do equipamento, compararam-se os custos associados ao uso do equipamento de *slitting* do INEGI com os custos de subcontratar uma empresa externa para o corte de fitas de pré-impregnado. Posteriormente, foi realizado um estudo ROI (*return on investment*) para avaliar a viabilidade de realizar esta operação internamente e calcular o tempo necessário para que o investimento no equipamento fosse amortizado.

O INEGI utiliza os serviços da empresa alemã Lösing, especializada em soluções de corte de materiais, tal como o *slitting*, para cortar fitas de pré-impregnado em larguras menores. De acordo com um orçamento de 2019, o custo de uma operação de *slitting* de uma fita compósita com largura original de 150 mm e comprimento de 255 m, dividida em três fitas de larguras mais reduzidas, é de 191 €.

Considerando uma velocidade de corte de 0,8 m/s, o equipamento de *slitting* demora 318 segundos (ou 5,31 minutos) a cortar 255 m de fita. Considerando a potência de 1,3 kW e um custo de eletricidade de 0,197 €/kWh, concluiu-se que o custo energético para produzir essa quantidade de fita é de 0,02 €. Além disso, somando o tempo necessário para a preparação da máquina (20 minutos), o tempo de operação (5,31 minutos) e o tempo de remoção do material (10 minutos), e assumindo um salário de 10 € por hora para o operador, o custo total do corte de 255 m de fita com o equipamento de *slitting* foi estimado em 6,1 €.

Ao comparar estes valores, verificou-se que houve uma redução de custos de 96,8 % face à subcontratação.

Para além da vantagem de custos de produção mais reduzidos, a utilização do equipamento de *slitting* tem a vantagem de possibilitar o corte de comprimentos mais curtos, dado que as empresas de *slitting* apresentam um comprimento mínimo como requisito da operação. Para além disso, garante maior customização nas larguras de corte.

Para realizar o estudo ROI, foi calculado o custo total do equipamento. Na Tabela 30 estão descritos apenas os custos dos diferentes subsistemas do equipamento.

Tabela 30 - Custo do equipamento de *slitting*.

Subsistemas	Preço [€]
Estrutura do equipamento	2428,51
Sistema elétrico e de controlo	7208,54
Sistema de corte	2580,23
Componentes adicionais	3866,68
Σ	16083,96

Tende em conta que a necessidade de realizar uma ação de *slitting* ocorre duas vezes por mês, conclui-se que os custos de produção do equipamento são abatidos ao fim de 44 meses, ou seja, 3 anos e 8 meses.

5. Conclusão

5.1. Conclusões finais

Este trabalho teve como objetivo o desenvolvimento do projeto mecânico e elétrico de um equipamento de *slitting*, incluindo a programação do seu sistema de monitorização e controlo, bem como a validação dos sistemas desenvolvidos. Inicialmente, foi analisada uma proposta existente de um sistema de *slitting*, desenvolvida pela equipa de Automação da unidade de materiais e estruturas compósitas do INEGI. De seguida, caracterizou-se o equipamento onde este seria integrado e identificou-se os sistemas em falta, o que possibilitou a elaboração de um anteprojecto dos mesmos.

Após a identificação dos sistemas necessários, foram desenvolvidas propostas de soluções construtivas para os componentes mecânicos em falta e a escolha das soluções a serem implementadas foi feita através de uma matriz de selecção. No caso do sistema de controlo, foram identificados os componentes necessários para o hardware e definido o tipo de controlo a aplicar à operação. O esquema *grafcet* para a programação do equipamento foi também desenvolvido. O circuito eléctrico foi desenhado de acordo com os requisitos técnicos e de segurança. Durante a fase de projecto, os diversos sistemas foram elaborados e dimensionados para posterior integração no equipamento. A dissertação culmina com os testes de validação, que verificaram o correcto funcionamento do equipamento.

Um dos principais sistemas mecânicos desenvolvidos foi o de acoplamento das facas. O sistema permite a fixação e calibração da posição das facas sem necessidade de desmontagem da estrutura. Através de adaptadores modulares, é possível garantir qualquer distância superior a 12,7 mm entre as contrafacas, bem como a distância de 6,35 mm, conforme exigido pela empresa. Além disso, foi desenvolvido um sistema de fixação para um sensor e um sistema de guiamento da fita.

O sistema eléctrico e o sistema de controlo foram projetados para cumprir os requisitos da empresa e as normas de segurança. O controlo de tensão da fita foi implementado no equipamento baseado no estado da arte. Também foi desenvolvida uma interface que permite ao operador ajustar parâmetros operacionais, monitorizar a acção dos servomotores e os raios das bobinas, além de consultar as referências dos erros em caso de erro de funcionamento.

Por fim, foram realizados os testes de validação para verificar o desempenho dos sistemas. Foram realizados dois testes para validar o funcionamento do sistema de acoplamento de facas: o primeiro teste verificou que as configurações do sistema garantiam que a distância entre as

contrafacas cumpria com as tolerâncias especificadas e garantiam a precisão do corte; no segundo teste, utilizou-se um microscópio para observar as arestas cortadas de uma fita, de forma a identificar eventuais defeitos do corte. Ambos os testes demonstraram que o sistema resulta numa boa qualidade de corte, com um número reduzido de defeitos. Adicionalmente, foi realizado um teste ao equipamento, realizando uma operação de *slitting* num filme de papel para avaliar a variação da largura e os desvios laterais da fita. Concluiu-se que o sistema de corte garante fitas com precisão e exatidão adequadas, embora os desvios laterais tenham sido considerados significativos, tendo a causa sido atribuída ao desalinhamento dos rolos à entrada e saída do sistema, causado pela falta de rigidez das superfícies onde estão montados. Durante os testes, constatou-se que o sistema elétrico e o sistema de controlo funcionam de forma correta e sem problemas.

Em suma, o equipamento oferece um corte de alta qualidade, com a largura da fita ajustada dentro dos requisitos estabelecidos. O sistema elétrico e de controlo operam sem anomalias e cumprem os requisitos de segurança. Como tal, considera-se que estes objetivos da dissertação foram concluídos com sucesso.

Adicionalmente, apesar dos avanços significativos no desenvolvimento do equipamento, não foi possível alcançar a plena operacionalização da máquina. Para assegurar o desempenho ideal do equipamento, é essencial desenvolver uma nova estratégia para a fixação dos rolos na entrada e saída do sistema de corte. Esta melhoria visa reduzir os desvios laterais da fita, e garantir uma operação mais estável, de forma a minimizar o desperdício de material e assegurar o paralelismo entre as fibras da fita de pré-impregnado ao longo do seu comprimento.

5.2. Limitações e trabalhos futuros

Para trabalhos futuros, é necessário definir uma nova estratégia de fixação dos rolos ou desenvolver um sistema de controlo da posição lateral da fita. O principal problema identificado na utilização do equipamento é o desvio lateral da fita durante o corte, provocado pelo desalinhamento dos rolos quando estes são submetidos aos esforços resultantes da tensão da fita. Uma possível solução para este problema consiste em reforçar a face interior da chapa do armário com uma chapa de maior espessura, de modo a aumentar assim a rigidez estrutural. Desta forma, as deformações na chapa são reduzidas, e garante-se um alinhamento mais preciso dos rolos. Além disso, é vantajoso desenvolver um sistema de calibração que assegure o correto alinhamento dos rolos, de modo a melhorar assim a estabilidade do processo de corte.

Embora a exatidão da largura das fitas resultantes do corte esteja dentro das tolerâncias estabelecidas, esta pode ser facilmente aprimorada com a impressão de espaçadores, que apresentem desvios geométricos menores em relação às referências, ou o fabrico dos mesmo em metal.

No âmbito do controlo do equipamento, é sugerida a implementação de um rolo com célula de carga na entrada da bobina recetora para assegurar um controlo de tensão da fita mais eficiente. Atualmente, o controlo e monitorização da tensão da fita são feitos através do binário do servomotor da bobina de alimentação, sem considerar os ganhos de tensão causados pela

Conclusão

passagem da fita pelos rolos defletores ou pelo sistema de corte, o que introduz um erro na tensão calculada. Com a integração de um rolo com célula de carga na bobina recetora, é possível desenvolver um sistema de controlo ativo de tensão mais eficaz, resultando em bobinagens de qualidade superior.

Referências

1. Nagavally, R.R., *Composite Materials - History, Types, Fabrication Techniques, Advantages, and Applications*. International Journal of Current Research, 2016. **8**(09): p. 37763-37768.
2. William D. Callister, J.D.G.R., *Materials Science and Engineering - An Introduction*. 10 ed. 2018.
3. Godara, S.S., et al., *Review on history and characterization of polymer composite materials*. Materials Today: Proceedings, 2021. **44**: p. 2674-2677.
4. Bhagwan D. Agarwal, L.J.B., K. Chandrashekhara *ANALYSIS AND PERFORMANCE OF FIBER COMPOSITES* 3ed. 2015: John Wiley & Sons, Inc.
5. Marcelo F.S.F. de Moura, A.B.d.M., Antônio G. de Magalhães, *Materiais Compósitos - Materiais, Fabrico e Comportamento Mecânico*. Vol. 2ª Edição.
6. EUGENE A. AVALLONE, T.B.I., *Marks' - Standard Handbook for Mechanical Engineers*. 10 ed. 2006: McGRAW-HILL.
7. Mazumdar, S., *Composites Manufacturing: Materials, Product, and Process Engineering*. 1 ed. 2001: CRC Press.
8. Al-Furjan, M.S.H., et al., *A review on fabrication techniques and tensile properties of glass, carbon, and Kevlar fiber reinforced polymeric composites*. Journal of Materials Research and Technology, 2022. **19**: p. 2930-2959.
9. Raji, M., et al., *3 - Prediction of the cyclic durability of woven-hybrid composites, in Durability and Life Prediction in Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composites*, M. Jawaid, M. Thariq, and N. Saba, Editors. 2019, Woodhead Publishing. p. 27-62.
10. Ltd, E.C.P. *Spray lay-up Process*.
11. Minchenkov, K., et al., *Pultrusion of thermoplastic composites with mechanical properties comparable to industrial thermoset profiles*. Composites Communications, 2023. **44**: p. 101766.
12. Wang, J., et al., *A fast and precise filament winding path planning method based on discrete non-iterative semi-geodesic algorithm for all applicable mandrel*. Composites Communications, 2023. **40**: p. 101620.
13. Sánchez, F., et al., *Fast and reliable gate arrangement pre-design of resin infusion processes*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2015. **77**: p. 285-292.
14. Moretti, L., et al., *Behavior of perforated flexible impermeable interlayers during VARTM processes*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2023. **173**: p. 107691.
15. Mitschang, P. and K. Hildebrandt, *8 - Polymer and composite moulding technologies for automotive applications, in Advanced Materials in Automotive Engineering*, J. Rowe, Editor. 2012, Woodhead Publishing. p. 210-229.
16. Islam, F., et al., *An approach for process optimisation of the Automated Fibre Placement (AFP) based thermoplastic composites manufacturing using Machine Learning, photonic sensing and thermo-mechanics modelling*. Manufacturing Letters, 2022. **32**: p. 10-14.
17. Yadav, N. and R. Schledjewski, *Review of in-process defect monitoring for automated tape laying*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2023. **173**: p. 107654.
18. Zhang, P., et al., *Modeling and Analyzing Layup Gaps in the Trajectory Planning for Automated Tape Placement*. Computer-Aided Design, 2023. **164**: p. 103595.

Referências

19. Kozaczuk, K., *Automated fiber placement systems overview*. Transactions of the Institute of Aviation, 2016. **245**: p. 52-59.
20. Lukaszewicz, D.H.J.A., C. Ward, and K.D. Potter, *The engineering aspects of automated prepreg layup: History, present and future*. Composites Part B: Engineering, 2012. **43**(3): p. 997-1009.
21. Asundi, A. and A.Y. Choi, *Fiber metal laminates: an advanced material for future aircraft*. Journal of Materials processing technology, 1997. **63**(1-3): p. 384-394.
22. Fan, S., et al., *A deep learning method for fast predicting curing process-induced deformation of aeronautical composite structures*. Composites Science and Technology, 2023. **232**: p. 109844.
23. Quilter, A., *Composites in aerospace applications*. IHS White Paper, 2001. **444**(1): p. 264.
24. Beardmore, P. and C.F. Johnson, *The potential for composites in structural automotive applications*. Composites Science and Technology, 1986. **26**(4): p. 251-281.
25. Kretschmer, J., *Composites in automotive applications—state of the art and prospects*. Materials science and technology, 1988. **4**(9): p. 757-767.
26. Rubino, F., et al., *Marine application of fiber reinforced composites: A review*. Journal of Marine Science and Engineering, 2020. **8**(1): p. 26.
27. Vinson, J.R. and R.L. Sierakowski, *Introduction to Composite Materials*. The Behavior Of Structures Composed Of Composite Materials, 2008: p. 1-38.
28. Mohanty, A.K., M. Misra, and L.T. Drzal, *Sustainable Bio-Composites from Renewable Resources: Opportunities and Challenges in the Green Materials World*. Journal of Polymers and the Environment, 2002. **10**(1): p. 19-26.
29. Yang, C., et al., *3D printing for continuous fiber reinforced thermoplastic composites: mechanism and performance*. Rapid Prototyping Journal, 2017. **23**(1): p. 209-215.
30. Demiroglu, S., et al., *13 - The use of nanotechnology for fibre-reinforced polymer composites*, in *Fiber Technology for Fiber-Reinforced Composites*, M.Ö. Seydibeyoğlu, A.K. Mohanty, and M. Misra, Editors. 2017, Woodhead Publishing. p. 277-297.
31. Carlsson, A. and B. Tomas Åström, *Experimental investigation of pultrusion of glass fibre reinforced polypropylene composites*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 1998. **29**(5): p. 585-593.
32. Ltd, P.; Available from: <https://pultrex.com/pultrusion/>.
33. Potter, K., et al. *Automating the manufacture of very complex composite structures*. in *ICCM International Conferences on Composite Materials*. 2017.
34. Reeves, J., et al., *Automation and high-speed forming of thin layer composite*. International Journal of Engineering Science Invention, 2022. **11**(3): p. 34-54.
35. Ahrens, M., V. Mallick, and K. Parfrey. *Robotic based thermoplastic fibre placement process*. in *Proceedings. 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No.98CH36146)*. 1998.
36. Kanso, K., *Formal verification of ladder logic*. 2008, Citeseer.
37. Welch, J.T., *An event chaining relay ladder logic solver*. Computers in Industry, 1995. **27**(1): p. 65-74.
38. Papazoglou, I.A., *Functional block diagrams and automated construction of event trees*. Reliability Engineering & System Safety, 1998. **61**(3): p. 185-214.
39. Aggarwal, S., B. Bhushan, and N. Katsube, *Three-dimensional finite element analysis of the magnetic tape slitting process*. Journal of Materials Processing Technology, 2005. **170**(1): p. 71-88.
40. Meehan, R.R. and S.J. Burns, *Mechanics of slitting and cutting webs*. Experimental Mechanics, 1998. **38**(2): p. 103-109.
41. Ghosh, S., M. Li, and A. Khadke, *3D modeling of shear-slitting process for aluminum alloys*. Journal of Materials Processing Technology, 2005. **167**(1): p. 91-102.

42. Wisselink, H., *Analysis of guillotining and slitting*. Finite Element Simulations, PhD Thesis, Twente, Netherlands, 2000.
43. Roman, J., K. Bruggeman, and M. Juwet, *Control system for film processing and rewinding equipment*. Procedia Manufacturing, 2020. **51**: p. 236-242.
44. SIEMENS SIMATIC winding and tension control S7-1200. **V3.1**.
45. Lee, C., et al., *Effect of taper tension profile on the telescoping in a winding process of high speed roll to roll printing systems*. Journal of mechanical science and technology, 2009. **23**: p. 3036-3048.
46. Lee, J. and C. Lee, *Model-Based Winding Tension Profile to Minimize Radial Stress in a Flexible Substrate in a Roll-to-Roll Web Transporting System*. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2018. **23**: p. 2928-2939.
47. Lee, C., H. Kang, and K. Shin, *Advanced taper tension method for the performance improvement of a roll-to-roll printing production line with a winding process*. International Journal of Mechanical Sciences, 2012. **59**(1): p. 61-72.
48. ZONTER. *High Speed Label Slitting and Rewinding Machine, FQ-320/450*. Available from: <http://ztprintingmachine.com/4-1-label-slitting-rewinding-machine.html>.
49. Equipment, A.C. *Diamond TWide-Web Duplex Turret Slitter Rewinder*. Available from: <https://www.ashe.co.uk/slitter-rewinders/wide-web/duplex-turret-slitter-rewinders/duplex-turret-slitter-rewinder-diamond-t>.
50. Priya, V.P. and R. Mukunth, *Automatic Paper Slitter and Rewinding Machine*. NVEO-NATURAL VOLATILES & ESSENTIAL OILS Journal| NVEO, 2021: p. 2995-3007.
51. Zhu, Y., Q. Yan, and J. Lu, *Fault diagnosis method for disc slitting machine based on wavelet packet transform and support vector machine*. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 2020. **33**(10-11): p. 1118-1128.
52. *Sobre o INEGI*. 19/04/2024]; Available from: <https://www.inegi.pt/pt/sobre-o-inegi/o-inegi/>.
53. INEGI. Available from: <https://www.inegi.pt/pt/>.
54. Edition, F. and M.F. Ashby, *Material Selection in Mechanical Design*. 2011, Elsevier Ltd.: Burlington, MA, USA.
55. Meissner, S., *Mechanics of a shear cutting process*. 1997.
56. BRAILEANU, P.I., et al., *Comparative Examination of Friction Between Additive Manufactured Plastics and Steel Surface*. Materiale Plastice, 2023. **60**(3).
57. Valvez, S., A.P. Silva, and P.N. Reis, *Compressive behaviour of 3D-printed PETG composites*. Aerospace, 2022. **9**(3): p. 124.
58. Kadhum, A.H., S. Al-Zubaidi, and S.S. Abdulkareem, *Effect of the Infill Patterns on the Mechanical and Surface Characteristics of 3D Printing of PLA, PLA+ and PETG Materials*. ChemEngineering, 2023. **7**(3): p. 46.
59. Kaiser, R.S. and G.S. Venter, *ANÁLISE NO COMPORTAMENTO DO TORQUE VS FORÇA DE APERTO DE UMA JUNTA PARAFUSADA RÍGIDA NA VARIAÇÃO DO TRATAMENTO SUPERFICIAL DA PEÇA BASE*.
60. Mart, F., *METRIC BOLTS, SCREWS & NUTS TIGHTNING TORQUES*.
61. Mercado-Colmenero, J.M., et al., *A numerical and experimental study of the compression uniaxial properties of PLA manufactured with FDM technology based on product specifications*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019. **103**: p. 1893-1909.
62. ifm. A ifm num olhar. Available from: https://www.ifm.com/pt/pt?gad_source=1&gclid=CjwKCAjw_4S3BhAAEiwA_64YhIBcgV4QU60MTzc0eqqyT8MVhVgBn2My7VAgztbCgI8wkB1PsL-VexoCPn4QAvD_BwE.
63. Completo, A. and F.Q. De Melo, *Introdução Ao Projeto Mecânico*. PUBLINDUSTRIA.

Referências

64. Sarcar, M., K.M. Rao, and K.L. Narayan, *Computer aided design and manufacturing*. 2008: PHI Learning Pvt. Ltd.
65. Inc., A. 2023; Available from: <https://www.autodesk.pt/>.
66. ANSYS, I. 2023; Available from: <https://www.ansys.com/>.
67. Corporation, S. 2023; Available from: <https://www.solidworks.com/>.
68. Kohnke, P., *Ansys*, in *Finite Element Systems: A Handbook*. 1982, Springer. p. 19-25.
69. Budynas, R.G., J.K. Nisbett, and J.E. Shigley, *Shigley's mechanical engineering design*. 9th ed ed. McGraw-Hill series in mechanical engineering. 2011, New York: McGraw-Hill New York.
70. SHARMA, C.P., *ENGINEERING MATERIALS: PROPERTIES AND APPLICATIONS OF METALS AND ALLOYS*. 2003: PHI Learning.
71. Chiaverini, V., *Aços e ferros fundidos*. 1977: Abm.
72. Veiga, C., J.P. Davim, and A. Loureiro, *Properties and applications of titanium alloys: a brief review*. Rev. Adv. Mater. Sci, 2012. **32**(2): p. 133-148.
73. Ezugwu, E.O. and Z.M. Wang, *Titanium alloys and their machinability—a review*. Journal of Materials Processing Technology, 1997. **68**(3): p. 262-274.
74. Ozsarac, U., F. Findik, and M. Durman, *The wear behaviour investigation of sliding bearings with a designed testing machine*. Materials & Design, 2007. **28**(1): p. 345-350.
75. Lascoe, O.D., *Handbook of fabrication processes*. 1988: Asm International.
76. Swift, K.G. and J.D. Booker, *Process selection: from design to manufacture*. 2003: Elsevier.
77. Jagota, V., A.P.S. Sethi, and K. Kumar, *Finite element method: an overview*. Walailak Journal of Science and Technology (WJST), 2013. **10**(1): p. 1-8.
78. Azevedo, Á.F., *Método dos elementos finitos*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2003. **1**(7).
79. Campilho, R., *Método de Elementos Finitos*. Ferramentas para Análise Estrutural. 2012.
80. Belytschko, J.F.T., *A first course in finite elements*. 2007.
81. Groover, M.P., *Automation, production systems, and computer-integrated manufacturing*. 2016: Pearson Education India.
82. de Moraes, C.A.A. and C.J.J. Pecegueiro, *Curso Técnico em Mecatrônica-Robótica*. CEP, 2003. **1311**: p. 923.
83. Ribeiro, M.I., *Sensores em robótica*. Enciclopédia Nova Activa Multimédia, Volume de Tecnologias, pags, 2004: p. 228-229.
84. Parr, A., *Hydraulics and pneumatics: a technician's and engineer's guide*. 2011: Elsevier.
85. Gupta, A.K. and S.K. Arora, *Industrial Automation and Robotics*. 2009: University Science Press.
86. SIEMENS. Available from: <https://www.siemens.com/br/pt/produtos/software/industria/automacao/tia-portal.html>.
87. Anand, A., R.A. Khan, and M.F. Wani, *Development of a sustainability risk assessment index of a mechanical system at conceptual design stage*. Journal of Cleaner Production, 2016. **139**: p. 258-266.
88. Veiga, N.F.M., et al., *Design of automated equipment for the assembly of automotive parts*. Procedia Manufacturing, 2019. **38**: p. 1316-1323.
89. Santos, P.M.M., R.D.S.G. Campilho, and F.J.G. Silva, *A new concept of full-automated equipment for the manufacture of shirt collars and cuffs*. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2021. **67**: p. 102023.
90. Veiga, N., et al., *Design of automated equipment for the assembly of automotive parts*. Procedia Manufacturing, 2019. **38**: p. 1316-1323.
91. Mikrosam. *About us*. Available from: <https://www.mikrosam.com/about-us/>.

92. Engineering, T.-M. *About us*. 2022; Available from: <https://www.tme-composites.com/en/home/>.
93. Coriolis. *About us*. Available from: <https://www.coriolis-composites.com/company/>.

Referências

Declaração de Integridade

Declaro ter conduzido este trabalho académico com integridade. Não plagiei ou apliquei qualquer forma de uso indevido de informações ou falsificação de resultados ao longo do processo que levou à sua elaboração.

Declaro que o trabalho apresentado neste documento é original e de minha autoria, não tendo sido utilizado anteriormente para nenhum outro fim.

Declaro ainda que tenho pleno conhecimento do Código de Conduta Ética do P.PORTO.

NOME: ANTÓNIO MANUEL SALVADOR ALVES

ISEP, Porto, 26 de fevereiro de 2024

Apêndice A

Projeto de equipamentos mecânicos

O projeto de equipamentos mecânicos é todo o processo de elaboração de um equipamento, desde o planeamento até ao arranque do seu funcionamento [63]. Neste capítulo são abordadas as ferramentas que existem para auxiliar na elaboração de um projeto. Também é abordado o método dos elementos finitos e a sua utilidade neste ramo, os diferentes sistemas de acionamento e uma breve síntese acerca de automação e controlo. Por fim, é apresentado o estado-da-arte do projeto mecânico, com artigos recentes acerca do tópico.

Contextualização ao projeto mecânico

Um projeto é um conjunto de atividades que tem um ponto inicial e um estado final definidos, persegue metas estabelecidas e usa um conjunto de recursos sempre limitados [63]. Um projeto tem sempre o objetivo final definido, e tipicamente são estabelecidos os custos, qualidade, âmbito e prazos. A fim de atingir o ou os objetivos do projeto, é necessário estabelecer e organizar as variadas tarefas referentes ao mesmo.

O projeto de um órgão mecânico envolve incertezas e riscos devido à sua complexidade e competências técnicas necessárias. A tecnologia a empregar ou o processo de fabrico são exemplos de decisões cruciais que devem ser tomadas no início do projeto, quando as incertezas são maiores, dado que é na fase inicial do projeto que são definidos os maiores custos em questão. Um dos grandes desafios na elaboração de um projeto é a mudança de decisões tomadas inicialmente, pois alterações posteriores podem conduzir a um aumento dos custos e dos prazos. O ciclo básico do projeto envolve: planear, conceber, construir, testar, otimizar e produzir. Este ciclo é um processo iterativo e pode ter de ser repetido várias vezes em determinadas fases até o produto cumprir com o objetivo inicial [63].

O tempo de desenvolvimento de um projeto é repartido em diferentes fases. Muitas vezes, algumas destas fases desenrolam-se em paralelo. Um projeto de um órgão mecânico, de uma forma genérica, desenvolve-se em 6 fases:

- O **planeamento**, também conhecido por “fase 0”, é o desenvolvimento antes da aprovação do arranque do projeto em si. Esta fase trata essencialmente do estudo do mercado alvo, dos objetivos financeiros, das limitações e das oportunidades.
- O **desenvolvimento do conceito**, como o nome indica, é a fase na qual são desenvolvidas e avaliadas várias alternativas de conceito de produto, e ocorre a seleção de um ou mais conceitos. Nesta fase são analisadas as vantagens e desvantagens dos conceitos que são comparadas com as da concorrência.
- Na **definição da arquitetura** desenvolve-se o produto em si. É a fase em que se elabora o produto, se definem os principais subsistemas e se realiza o esquema de montagem final.

- A **fase do projeto detalhado** completa a definição em termos geométricos, materiais e adiciona as tolerâncias. Para além disto, esta fase define o que é comprado ou fabricado, elaboram-se as fichas técnicas para fabricação e definem-se as ferramentas e equipamentos para produção.
- O **teste e afinação** trata-se da fase de ensaios. Para isso, devem ser construídas e ensaiadas as diferentes versões de pré-produção. Os protótipos são fabricados segundo as especificações de série, mas não são produzidos nos meios industriais. As amostras iniciais são fabricadas com os equipamentos de produção.
- Por fim, o **arranque de pré-série** consiste no arranque da série, enquanto se identifica falhas e se corrige o processo produtivo.

Ferramentas de projeto

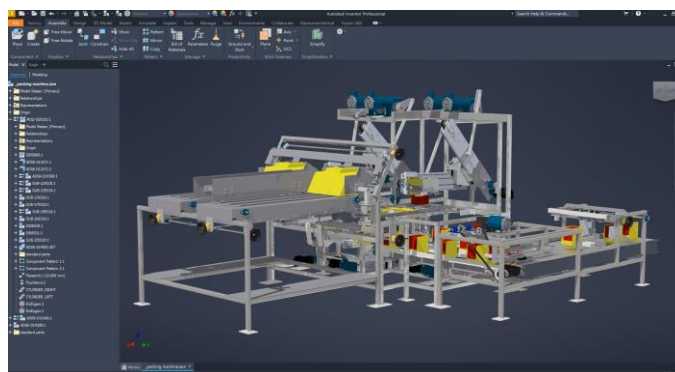
Existem várias ferramentas de projeto mecânico. Estas ferramentas podem ser categorizadas como ferramentas de CAD (*computer aided design*), CAE (*computer aided engineering*) e CAM (*computer aided manufacturing*). Uma ferramenta CAD pode ser definida como um sistema informático com a função de auxiliar na criação, modificação, análise ou otimização de um projeto [64]. Estes *softwares* são utilizados principalmente para a modelação 3D e 2D de objetos. As ferramentas de CAM são especializadas para gestão do fabrico de peças. Os *softwares* de CAE são *softwares* informáticos que realizam simulações de modo a resolver vários problemas da engenharia e otimizar os produtos. Em seguida serão enumerados os programas informáticos mais utilizados neste ramo.

Softwares da Autodesk

A Autodesk é uma empresa que desenvolve *softwares* utilizados em diferentes ramos como arquitetura, engenharia e design. O Revit, o AutoCAD e o Inventor são exemplos dos programas principais da Autodesk na engenharia. O Revit é o *software* que permite modelar formas, estruturas e sistemas em 3D de edifícios. Auxilia também na gestão de projetos com revisões instantâneas de plantas, alçados, tabelas, cortes e folhas. O AutoCAD é um programa da Autodesk especializado em modelação 3D. Permite projetar modelos em 3D e desenhar em 2D sólidos, superfícies e objetos de malha. Este *software* tem também a possibilidade de automatizar tarefas como comparação de desenhos, substituição de blocos, contagem de objetos e criação de planificação. O Inventor é um programa que, tal como o AutoCAD, apresenta a possibilidade de modelação 3D de sólidos, assim como da criação dos respetivos desenhos técnicos. A grande vantagem deste programa na área de projeto são as ferramentas integradas disponibilizadas para chapa metálica, armações, tubagens e canalizações, cabos e ligações e projeto de máquinas. Outra funcionalidade deste *software* é a possibilidade de realizar simulações dinâmicas, para analisar o movimento, a velocidade e a aceleração de um determinado corpo submetido a uma força, e análise de tensões de materiais isotrópicos. O programa permite realizar análise estática para avaliar condições de carga estrutural, ou análise modal para avaliar modos de frequência naturais, recorrendo ao método de elementos finitos. De seguida, na Figura 127, é possível observar o logótipo da empresa e o *workspace* do Inventor, da Autodesk.



a)



b)

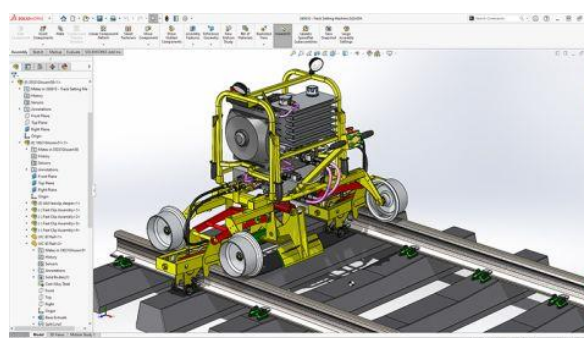
Figura 127 - a) logótipo da Autodesk; b) Workspace do Inventor da Autodesk [65]

SOLIDWORKS

O SOLIDWORKS é um programa utilizado para modelação CAD 3D, para gestão de dados e para análises de elementos finitos. No que toca aos módulos de análise de elementos finitos, este programa é dotado de três soluções. O SOLIDWORKS Flow Simulation é uma solução intuitiva de dinâmica dos fluidos computacional que permite simular o fluxo de líquidos e gases através e ao redor dos designs de modo a calcular o desempenho e as capacidades do produto. No caso do SOLIDWORKS Plastic, este módulo oferece a funcionalidade de simular para analisar peças de plástico e moldes de injeção de modo a prever defeitos relacionados à fabricação. Por fim, o SOLIDWORKS Simulation apresenta várias ferramentas de análise estrutural que utilizam a análise de elementos finitos para prever o comportamento físico de um produto por meio de simulações virtuais. O portfólio oferece capacidades de análise linear, não linear e dinâmica [66]. Na Figura 128 é possível observar o logótipo da marca, e o *workspace* do SOLIDWORKS.



a)



b)

Figura 128 - a) logótipo do SOLIDWORKS; b) Workspace do SOLIDWORKS CAD [67]

Ansys

O Ansys é um software de CAE que usa análise de elementos finitos para obter uma grande variedade de soluções. As capacidades de solução do Ansys incluem: análise estática, elástica, plástica, térmica, análise de tensões, deflexões, análise dinâmica, modal, harmónica, análise de transferência de calor, condução convecção, radiação, análise de fluxos de fluidos, fluxo

elétricos e subestruturas [68]. Por ser uma ferramenta com um leque de soluções tao abrangente, o Ansys é frequentemente utilizado em problemas de mecânica estrutural, fluidodinâmica computacional e de eletromagnetismo. As análises podem ser feitas em uma, duas ou três dimensões, assim como utilizar elementos axissimétricos ou harmônicos [68]. Na Figura 129 é possível observar o logótipo do Ansys e o workspace do programa.

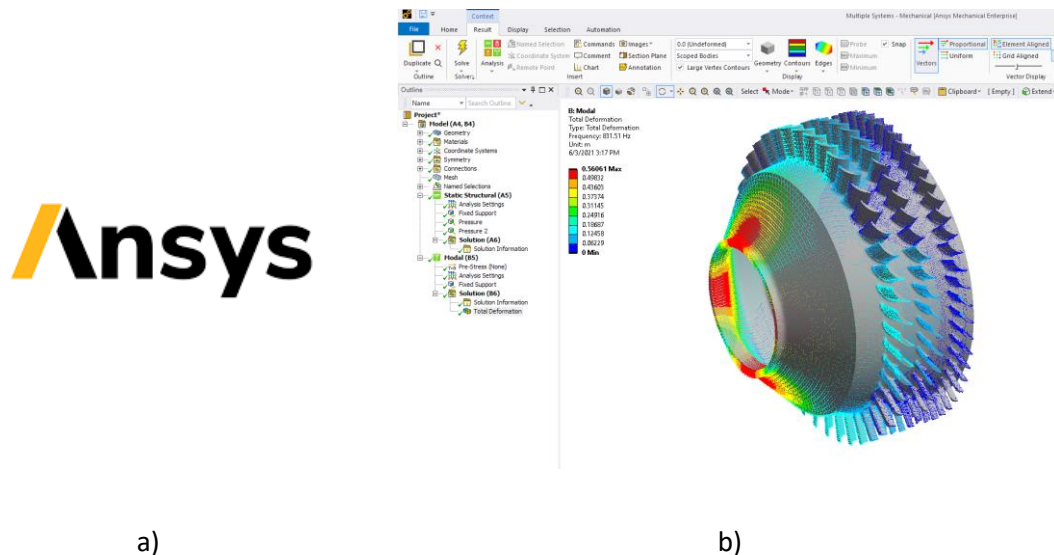


Figura 129 - a) logótipo do Ansys; b) Workspace do Ansys [66]

Materiais e Processos

Neste subcapítulo são apresentados os materiais e os processos de fabrico mais utilizados na área do projeto de equipamentos mecânicos. Para este efeito, são apresentadas duas tabelas, Tabela 31 e Tabela 32, que dizem respeito aos materiais e processos, respetivamente.

Tabela 31 – Materiais mais utilizados em projeto mecânico [2, 69-74]

Família	Tipo de material	Exemplos	Principais Características	Aplicações
Metais	Aços ao carbono	SAE 1045, SAE 1018	Elevada ductilidade e tenacidade. Baixo custo e baixa resistência à corrosão.	Componentes de máquinas, tubagens, cabos.
	Aços ligados	Aço ao níquel-cromo	A adição dos elementos níquel e cromo aumenta o limite de fadiga, a resistência ao desgaste e à	Equipamentos de escavação e construção, cilindros de laminadores e maquinaria de

			tração sem afetar a ductilidade e a resistência ao choque.	exploração de petróleo.
		Aço ao níquel-cromo-molibdênio	Elevada resistência à abrasão e ao desgaste.	Brocas, engrenagens.
		Aço ao cromo-molibdênio	Depois de temperados e revenidos, estes aços apresentam elevados valores de tensão de cedência e excelente resistência ao desgaste.	Tubulações de alta pressão, equipamentos de geração de energia.
		Aços inoxidáveis	Resistência a vários agentes corrosivos.	Parafusos, pinos, porcas, vedantes e anilhas.
	Ligas de alumínio	Série 5000	Baixa densidade, boa resistência à corrosão e boa condução térmica e elétrica.	Componentes de aeronaves, estruturas de autocarros.
		Série 6000		
		Série 7000		
	Titânio	Ti-6Al-4V	Muito boa resistência à corrosão, baixa condutividade térmica, resistência a elevadas temperaturas, elevadas propriedades mecânicas e densidade inferior à dos aços.	Válvulas de escape, retentores, componentes de motores de aeronaves.
	Bronzes	Bronze - alumínio	Elevada resistência à corrosão, alta	Casquilhos, buchas, mancais.

		Bronze-estanho	maquinabilidade, elevada resistência a elevadas temperaturas.	
		Bronze-chumbo		
	Ferro fundido	Cinzentos	Baixo custo, baixa resistência à tração e boa maquinabilidade. Eficiente no amortecimento de energia vibracional.	Bases de equipamentos pesados expostos a elevadas vibrações.
		Nodular ou dúctil	Elevada ductilidade e boa maquinabilidade.	Válvulas, corpos de bombas, engrenagens.
		Branco	Elevada dureza e resistência ao desgaste. Baixa maquinabilidade.	Cilindros laminadores em trens de laminação.
		Maleável	Elevada ductilidade e elevada resistência mecânica.	Barras de ligação, flanges, conexões de tubulações.
Polímeros	Termoplásticos	ABS	Menor resistência à corrosão, e menor estabilidade dimensional quando comparados com outros polímeros.	Vedações, isolamento elétrico, selos e juntas.
		Polícarbonatos	Elevada resistência a altas temperaturas e elevada estabilidade dimensional, transparência.	Elementos com necessidade de transparência.
		Poliamidas	Boa resistência à corrosão, a	Buchas, engrenagens,

			elevadas temperaturas e elevada ductilidade.	cabos, revestimento para fios.
		Teflon	Elevada resistência química	Tubulações para produtos químicos reativos e corrosivos.
	Termoendurecíveis	Epóxis	Elevada resistência ao desgaste e elevada resistência a elevadas temperaturas	Moldes elétricos, adesivos, ligação de componentes.
	Elastômeros	Borracha Natural	Elevada elasticidade, elevada resistência à tração, baixo custo.	Amortecedores de vibração.
		Borracha Sintética	Elevada resistência ao desgaste causado por elevadas temperaturas, oxidação e óleos hidrocarbonetos	Mangueiras, vedante resistente a altas temperaturas, amortecedores de vibração.
Compósitos	Matriz polimérica	Polímero reforçado com fibra de vidro	Boa resistência mecânica, baixa densidade e baixo custo.	Carcaças de equipamentos, recipientes para armazenamento.

Tabela 32 - Processos de fabrico utilizados em projeto mecânico [75, 76]

Processo de Fabrico	Descrição do processo	Exemplos de aplicação
Soldadura	É um processo de ligação de dois metais através de temperatura ou pressão, com ou sem material de adição. Existem vários tipos de soldadura como arco elétrico, eletrodo revestido, TIG (<i>Tungsten Inert Gas</i>), MIG (<i>Metal Inert Gas</i>)/MAG (<i>Metal Active Gas</i>).	Tubagem de diâmetros elevados, montagem de estruturas.
Aparafusamento	Processo de ligação de componentes utilizando parafusos. Existe uma grande variedade de parafusos, adequados às mais diversas aplicações.	Montagem de carcaças, fixações não permanentes de componentes.
Maquinagem	Processo de remoção de material de uma peça bruta, de modo a obter a forma, tamanho e acabamento pretendido. Para tal, utilizam-se ferramentas como por exemplo torno e fresadoras.	Engrenagens, chavetas, ranhuras, entalhes e furos.
Fundição	Processo que visa obter uma peça com a forma desejada pelo vazamento material fundido em moldes. A fundição em areia verde e cera perdida são exemplos de processos de fundição.	Engrenagens, carcaças, ganchos, polias.
Forjamento	Processo que deforma material utilizando elevadas pressões, de modo a alterar a forma do material e alterar as suas propriedades.	Componentes de motor (combotas, árvores de cames), componentes de transmissão (engrenagens, cubos, eixos).
Conformação plástica	Processo que deforma plasticamente o material para obter uma geometria pretendida. Como exemplos deste processo existe a estampagem e quinagem.	Formas profundas e complexas em chapas metálicas, painéis de fuselagem aeroespaciais, carcaças.

Método de Elementos Finitos

O método dos elementos finitos (MEF) é uma técnica de análise numérica que permite obter soluções aproximadas para uma grande variedade de problemas [77]. No âmbito da Engenharia de Estruturas, o MEF tem como objetivo a determinação do estado de tensão e de deformação de um sólido de geometria arbitrária sujeito a ações externas [78]. No MEF, a premissa é que

um domínio complexo pode ser modelado de forma analítica ou aproximada, substituindo-o por conjuntos de domínios menores e equivalentes de dimensões reduzidas – os elementos finitos. Uma vez que estes elementos podem ser agrupados de várias formas, estes podem ser utilizados para representar formas extremamente complexas. Estes elementos estão interconectados entre si ou sujeitos a condições de fronteira pelos nós dos elementos finitos. O MEF permite obter uma aproximação numérica das equações integrais e diferenciais que descrevem o volume total da solução. Além disso, para cada elemento específico, essas equações são transformadas em equações algébricas. Isso permite calcular soluções aproximadas para as variáveis em cada nó dos elementos finitos. No interior do próprio elemento, é possível obter soluções aproximadas através das funções de interpolação [77, 79].

O MEF requer a construção de uma malha de elementos finitos que se ajuste à fronteira da geometria considerada, processo que se descreve como discretização do domínio. De ponto de vista prático, em situações de geometria complexa, as malhas são desenhadas por *softwares* de elementos finitos, no entanto, cabe ao projetista definir o tamanho da malha e a geometria dos elementos mais adequada. Dado que os elementos da malha apresentam tipicamente arestas planas, é impossível desenhar uma malha que englobe por completo um domínio que apresente geometrias curvas. No entanto, como é possível observar na Figura 130, o erro da discretização diminui com o aumento do refinamento da malha e a diminuição do tamanho dos elementos, bem como com a escolha cuidadosa da geometria dos elementos. Em contrapartida, o refinamento da malha e o aumento do número de elementos conduz a um aumento da capacidade de processamento informático necessária do *software*, podendo resultar em simulações demasiado pesadas e demoradas [79].

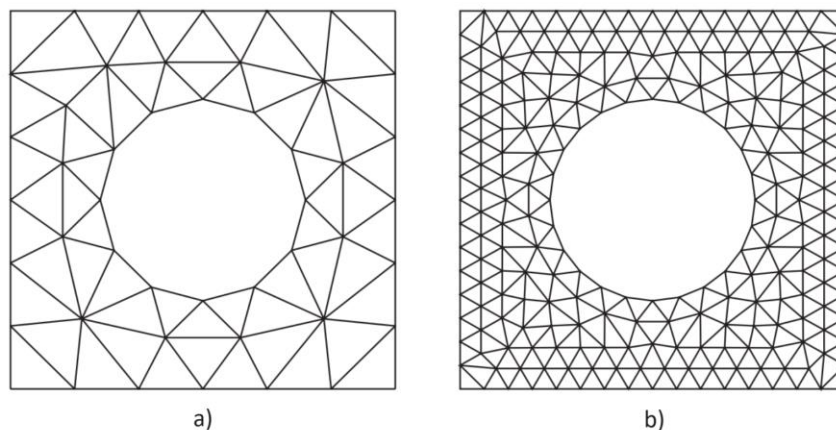


Figura 130 - a) modelo de elementos finitos; b) modelo de elementos finitos refinado [80]

Sistemas de acionamento

Num contexto industrial cada vez mais orientado para a automatização, observa-se uma transição notável. Esforços que antes eram realizados pela força humana ou animal estão agora a ser desempenhados por mecanismos especializados. A mudança para a automação não visa apenas reduzir a dependência da mão-de-obra, mas também otimizar os tempos de ciclo.

Estes mecanismos automatizados são complexos e compostos por diversos elementos, cada um desempenhando funções específicas. Os atuadores têm a tarefa de conferir movimento ao

mecanismo e aplicar esforços direcionados para executar ações específicas. Estes atuadores podem assumir diversas naturezas, como elétrica, óleo-hidráulica ou pneumática. Os sensores desempenham o papel de enviar sinais informativos para a unidade de controlo. Esta, por sua vez, monitoriza e regula a intensidade dos esforços gerados pelos atuadores, ajustando-se de acordo com os sinais dos sensores e os comandos do técnico responsável.

Os sistemas de acionamento permitem controlar uma variedade de sistemas industriais, e conduzem à execução de tarefas de forma mais eficiente em comparação ao acionamento manual [81].

Sensores

Os sensores são transdutores, pelo que têm a capacidade de converter grandezas físicas em sinais elétricos. Os sinais elétricos são depois enviados para a unidade de controlo para a monitorização de velocidades, posições, dimensões e distâncias. Como tal, os sensores são essenciais para o correto funcionamento de uma máquina automatizada [82].

Os sensores podem ser classificados como sensores internos ou externos. Os sensores externos têm a funcionalidade de fornecer informação acerca de fatores externos à máquina, tais como contactos, forças, distâncias, entre outros. Já os sensores internos fornecem informações a respeito da máquina, tais como velocidade de atuação, sentido de giro, entre outros [83].

Atuadores

Os atuadores podem ser de natureza eletromagnética, óleo-hidráulica ou pneumática. O tipo de atuador mais comum na indústria é o eletromagnético, vulgarmente denominado de motor elétrico. Este é um atuador que converte energia elétrica em energia mecânica. Movimentos rotativos são facilmente obtidos com motores simples (de corrente contínua ou de corrente alternada), e movimentos lineares podem ser obtidos com a utilização de parafusos sem fim, cremalheiras ou pinhões [84]. Os atuadores óleo-hidráulicos e os pneumáticos utilizam fluido fechado para transportar energia e induzir movimento no elemento móvel. Embora existam também atuadores com movimentos rotativos, estes elementos são mais utilizados para movimentos lineares através de cilindros. Ao aplicar pressão no pistão do cilindro, este é movido dentro do cilindro. Os atuadores óleo-hidráulicos utilizam água e óleo, enquanto os pneumáticos utilizam ar comprimido ou azoto. Apesar dos pneumáticos apresentarem custos mais reduzidos, e os sistemas serem normalmente menos ruidosos que os óleo-hidráulicos, estes não conseguem atingir forças tão elevadas como os óleo-hidráulicos [81].

Automação e controlo

A automação pode ser definida como a tecnologia através da qual um processo ou procedimento é efetuado sem assistência humana. A automação de um processo ou equipamento é implementada através de um programa de instruções combinado com um sistema de controlo que executa as instruções [81]. Como tal, um sistema automatizado é composto por três elementos básicos:

- energia para realizar o processo e operar o sistema;

- um programa de instruções para dirigir o processo;
- um sistema de controlo para acionar as instruções.

A relação entre estes elementos é ilustrada na Figura 131.

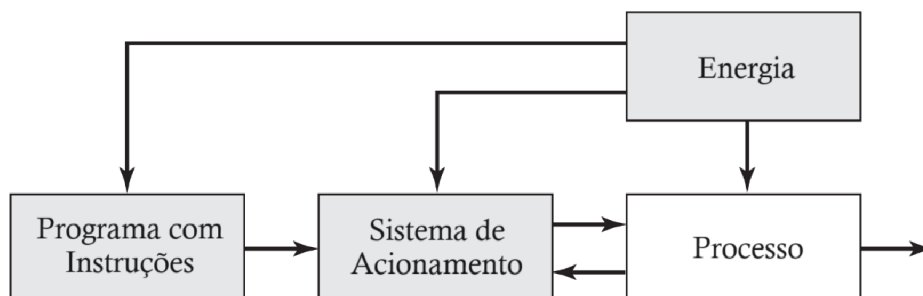


Figura 131 - Distribuição de energia pelos elementos dum sistema automatizado [81]

Dependendo do processo, a energia pode ser obtida de variadas fontes diferentes. Contudo, em sistemas automatizados, a energia necessária é sempre elétrica. Em muitas situações, recorre-se a alternativas como energia térmica ou mecânica, exclusivamente para alimentar o próprio processo, enquanto é alimentada energia elétrica nos sistemas de controlo que automatizam a operação. Por exemplo, em processos de fundição ou tratamento térmico, o aquecimento do forno pode ser realizado através de combustíveis fósseis, mas a regulação da temperatura e do ciclo temporal é realizada por meios elétricos. Noutras circunstâncias, a energia originária destas fontes alternativas é transformada em energia elétrica para sustentar tanto o processo como a sua automação [81]. A energia referente à automação é utilizada para alimentar a unidade de controlo, para acionar os sinais de controlo e para processar informação e aquisição de dados. As unidades de controlo são computadores digitais com a funcionalidade de ler as instruções dadas pelo programa de instruções e transmitir os respetivos comandos aos atuadores. Os sinais de controlo enviados pela unidade de controlo regulam a potência utilizada pelos atuadores. Estes sinais de controlo são de baixa tensão. No entanto, como geralmente os atuadores necessitam de maior potência para realizar as respetivas operações, os sinais são ampliados. Por fim, nos sistemas de controlo, são recolhidos dados durante o processo que são utilizados como entrada nos algoritmos de controlo, e como tal, existe um gasto de energia, embora reduzido [81].

O elemento de controlo do sistema automatizado executa o programa de instruções. O sistema de controlo faz com que o processo cumpra a sua função. Os controlos de um sistema automatizado podem ser de **circuito fechado** ou de **circuito aberto**.

Num **sistema de controlo de circuito fechado** (Figura 132), também conhecido como sistema de controlo de *feedback*, a variável *output* é comparada com um parâmetro de *input*. Um sistema de controlo em circuito fechado é composto por seis elementos básicos: parâmetro de entrada, processo, saída variável, sensor de *feedback*, controlador e atuador. Um sensor é utilizado para medir a variável de saída e fechar o ciclo entre a entrada e a saída. Os sensores desempenham a função de *feedback* num sistema de controlo em circuito fechado. O controlador compara o *output* com o *input* e efetua o ajuste necessário no processo para reduzir

a diferença entre estes. O ajuste é efetuado através de um ou mais atuadores. A maioria dos processos industriais requer múltiplos circuitos, um para cada variável de processo que deve ser controlada [81].

Ao contrário de um sistema de controlo em circuito fechado, um **sistema de controlo em circuito aberto** (Figura 133) funciona sem o circuito de realimentação. Neste caso, os controlos funcionam sem medir a variável de saída, pelo que não é efetuada qualquer comparação entre o valor real do *output* e os parâmetros do *input*. Como tal, o controlador baseia-se num modelo exato e preciso da variável de saída. A desvantagem deste sistema é o risco de o atuador não ter o efeito pretendido no processo. A sua vantagem é o facto de ser geralmente mais simples e menos dispendioso do que um sistema de circuito fechado [81].

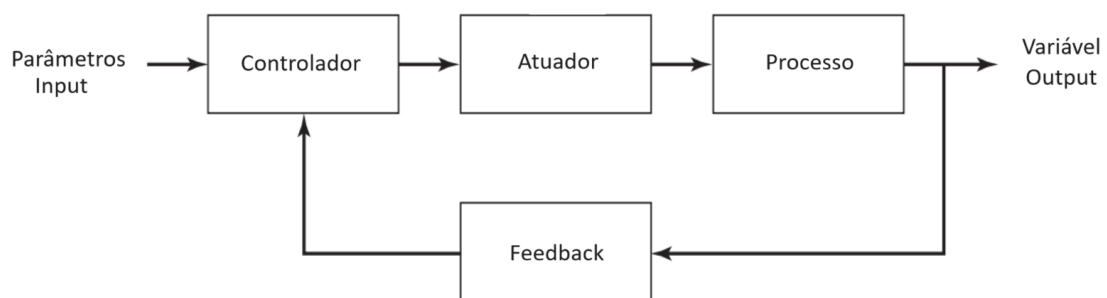


Figura 132 - Esquema de um circuito fechado [81]

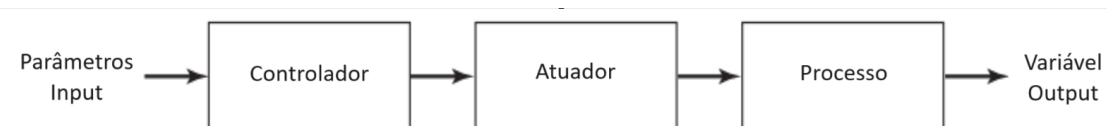


Figura 133 - Esquema de um circuito aberto [81]

O PLC (*programmable logic controller*) é a unidade de controlo utilizada para controlar equipamentos industriais. A utilização do PLC começou nos anos 70, e tornou-se a escolha mais comum para os processos de fabrico. Os PLC's são utilizados, por exemplo, em sistemas de transporte, máquinas de processamento de alimentos e linhas de montagem de automóveis. Os PLC's são frequentemente definidos como computadores industriais em miniatura que contêm *hardware* e *software* utilizados para executar funções de controlo. Ao contrário dos computadores de uso geral, o PLC foi concebido para múltiplas entradas e saídas, intervalos de temperatura alargados, imunidade ao ruído elétrico e resistência à vibração e ao impacto. O PLC é constituído pelo CPU (*central processing unit*) e pelo sistema de *input/output*. O CPU é o que controla a atividade do PLC, enquanto o sistema *input/output* está fisicamente ligado aos dispositivos do equipamento como sensores e atuadores, e fornece a interface entre o CPU e os fornecedores de informação (*input*) e os atuadores (*output*). O CPU lê os dados de *input* dos sensores ligados às entradas e, em seguida, executa o programa de controlo que foi armazenado no seu sistema de memória [85].

Na maioria dos casos, os PLC's são programados com *ladder*, apesar de também se utilizarem linguagens mais tradicionais como o C. A linguagem de diagrama *ladder* é um conjunto de instruções simbólicas que é utilizado para criar um programa de controlo. O objetivo do programa de diagrama *ladder* é controlar as saídas com base nas condições de entrada. Em geral, as linhas de controlo consistem num conjunto de condições de entrada e uma instrução de saída no final. A unidade de controlo do sistema automatizado executa o programa, enquanto os sistemas de acionamento fazem com que o processo execute a sua função definida [85]. A utilização de *grafcet* como linguagem gráfica de programação também é muito comum. Esta linguagem apresenta graficamente as funções sequenciais de um sistema automatizado como uma série de passos e transições de um estado do sistema para o seguinte. O *grafcet* tornou-se um método padrão para documentar o controlo lógico e a sequenciação em grande parte da Europa [81].

O TIA Portal (*Totally Integrated Automation Portal*) é um exemplo de *software* informático desenvolvido para programação e configuração de equipamentos e sistemas de automação. Desenvolvido pela Siemens, este programa é dotado de um ambiente integrado para configurar diferentes componentes de automação, como PLC's ou sistemas HMI (*Human Machine Interface*). A linguagem de programação utilizada neste programa é o *ladder* [86].

Estado-da-arte

Nos últimos anos, tem-se registado um avanço tecnológico considerável nos mais variados ramos da engenharia mecânica. Atualmente, existem diversos trabalhos de investigação na área de projeto mecânico que visam simplificar e otimizar processos industriais, bem como aumentar a sustentabilidade dos mesmos. Na Tabela 33 é possível observar trabalhos de investigação e breves descrições dos mesmos na área de projeto mecânico.

Tabela 33 - Estado-da-arte de projeto de equipamentos mecânicos

Referência bibliográfica	Descrição do trabalho
Anand, A., R.A. Khan, and M.F. Wani [87]	Este estudo apresenta um modelo para avaliar riscos ambientais em sistemas mecânicos durante a fase inicial do projeto. Para isso, identificam-se parâmetros específicos, designados de como Parâmetros de Avaliação de Risco de Sustentabilidade, que são visualizados através de um gráfico de avaliação de risco. Para simplificar a análise, usa-se uma matriz, que permite desenvolver uma expressão de avaliação. Esta é uma abordagem inovadora, dado que o material existente sobre avaliação de risco ambiental em sistemas mecânicos é escasso. No entanto, a complexidade crescente do gráfico à medida que os parâmetros aumentam, e a subjetividade do índice apresentam-se como limitações.
Veiga, N.F.M., et al. [88]	Neste artigo, o foco é projetar um equipamento para montagem automática de componentes automóveis, de modo a superar a produção manual anterior. Segundo os autores, a automação aumenta a produtividade e reduz erros relacionados com tarefas intensivas em mão de obra. O produto a

montar é um conector de cabo, composto por uma caixa de conector, suporte frontal e alavanca. O equipamento desenvolvido foi projetado para automatizar a montagem com base em requisitos operacionais e de segurança. Após análise detalhada, conseguiu-se desenvolver o equipamento, utilizando soluções mecânicas adequadas. Os resultados foram positivos, dado que esta solução reduziu a intervenção manual, necessitando apenas de um operador, e superou a taxa de produção solicitada pela empresa para o equipamento em 19%. Atualmente, existem vários equipamentos destes em funcionamento numa empresa portuguesa, que terá o retorno do investimento dos equipamentos em dois anos.

Santos, P.M.M., R.D.S.G. Campilho, and F.J.G. Silva [89]	Este trabalho trata-se do desenvolvimento de um equipamento para produzir colarinhos e punhos de camisas de forma semi-automática. Os movimentos manuais foram cuidadosamente observados, otimizados e reproduzidos pelo equipamento, que costura e corta golas e punhos para o fabrico de camisas. Os resultados foram positivos, dado que o equipamento resultante reduz a necessidade de operações manuais durante a costura e corte, necessitando apenas de um operador para alimentar os tecidos na estação de costura. A utilização deste equipamento ao invés da produção manual resultou numa redução significativa dos custos operacionais, com retorno do investimento de 22,1 e 11,5 meses para o fabrico independente de golas e punhos, respetivamente. O equipamento garante alta confiabilidade, produzindo peças de elevada qualidade.
Veiga, N., et al. [90]	No que diz respeito à injeção de plástico, a produção é fluida e rápida, e para tirar partido dessa velocidade de produção, é desejável executar os passos de montagem imediatamente após a remoção das peças dos moldes de injeção. Este trabalho proposto na conceção de uma célula robotizada completamente automatizada com a função de inserir clips metálicos em duas peças automóveis distintas após o processo de injeção. Os resultados foram positivos, dado que o equipamento protótipo, após testado com sucesso foi aceite como permanente na linha de produção de um fabricante. Este projeto permitiu a um fabricante de peças automóveis aumentar consideravelmente a produção e eliminar a intervenção humana neste processo.

Apêndice B

Equipamento para processamento de compósitos

Tabela 34 - Fornecedores de equipamentos de processamento de compósitos

Empresa	Características
Mikrosam	A Mikrosam é uma empresa de concepção de soluções automatizadas por encomenda para o fabrico de materiais compósitos, situada na Macedónia. No seu catálogo, é possível encontrar equipamentos de enrolamento filamentar, equipamentos de AFP/ATL, equipamentos de produção, slitting e rebobinagem de pré-impregnados, fornos de cura e equipamentos auxiliares. Para além dos equipamentos, a Mikrosam fornece automação de fábrica para a fabricação moderna de compósitos, através da integração dos seus <i>softwares</i> para simulação e automação de processos, o WindingExpert para enrolamento filamentar, o MikroPlace para AFP/ATL e enrolamento filamentar e o Quality Control System para analisar a qualidade dos produtos produzidos por máquinas da Mikrosam [91].
Techni-Modul Engineering	Techni-Modul Engineering é uma empresa criada em dezembro de 1986, a é especializada na concepção e realização de soluções robotizadas e automatizadas de fabrico de compósitos adaptadas a vários processos. A empresa dispõe de um serviço interno de concepção que projeta e constrói máquinas e prensas padrão ou personalizadas. Nos seus catálogos encontram-se por exemplo, equipamentos de corte, quiltagem, moldação e injeção [92].
Coriolis	A Coriolis Composites é uma empresa fundada em 1996 que desenvolve, produz e comercializa células robóticas e <i>software</i> de valor acrescentado para o fabrico automatizado de compósitos aditivos. Os equipamentos desenvolvidos por este fornecedor são todos AFP's, no entanto a empresa dedica-se também ao desenvolvimento de ferramentas de <i>software</i> para máquinas de fabrico automático de compósitos. As soluções de programação off-line da Coriolis Composites são principalmente dedicadas à AFP, mas também podem ser utilizadas para outros processos de fabrico. Para além disso, sendo as soluções de <i>software</i> independentes da máquina, estas podem ser utilizadas para programar outras máquinas [93].

Tabela 35 - Estratégias de controlo de tensão

Sem feedback	Controlo de alongamento	Neste método, a tensão é calculada através do rácio de velocidades da fita num determinado excerto. A velocidade linear da fita medida na bobine de enrolamento é sempre superior à medida na bobine de desbobinagem. O rácio de velocidades provoca deformação na fita, que permite calcular a tensão na mesma.	- Utilizado essencialmente para controlos simples de tensão; - Baixa precisão.
	Controlo indireto de tensão	Neste método, o valor de tensão pretendido é transcrito no valor de binário nos motores. O regulador de velocidade do atuador é sobrealimentado para que o motor funcione no limite de binário. Este limite de binário é adaptado em função do diâmetro do rolo que está a ser enrolado.	- É necessário garantir o mínimo de perdas mecânicas possíveis; - Boa precisão.
	Controlo v-constante	O motor da bobinagem é regulado de modo que a fita apresente um movimento com velocidade constante (valor de comando da velocidade). Não está ativo qualquer controlo da tensão.	- Utilizado essencialmente para controlos simples de tensão; - Baixa precisão.
Com feedback	Adaptação do binário de controlo da tensão utilizando células de carga	Esta estratégia utiliza uma célula de carga num dos rolos para medir a tensão nas fitas. Tal como no controlo indireto de tensão, o controlador de velocidade do motor é sobrealimentado para operar o motor no limite de binário.	- Utilizado quando a precisão do circuito aberto não é suficiente ou quando existem perturbações no sistema; - Elevada precisão.
	Adaptação da velocidade de controlo da tensão utilizando células de carga	Este método também utiliza uma célula de carga. Porém, esta não opera no valor limite de binário. Neste caso, o valor <i>output</i> do controlador é um valor de velocidade adicional (da velocidade de saída da fita na desbobinagem comparativamente à de entrada na bobinagem). O controlador garante assim a diferença de velocidades na fita necessária para se verificar a tensão pretendida na fita.	- Utilizado quando a precisão do circuito aberto não é suficiente ou quando existem perturbações no sistema; - Elevada precisão.

Adaptação da velocidade de um rolo tensionador	Neste método de controlo, não é utilizada uma célula de carga, mas sim um rolo tensionador. Neste caso, uma alteração da tensão na fita provoca o deslocamento do rolo tensionador. A posição do rolo é determinada pelo controlador utilizando um código de posição adequado e uma posição de referência. O <i>output</i> do controlador é um valor de ajuste de velocidade adicional (ponderado com o diâmetro real da bobine) para manter o rolo na posição de referência.	- Utilizado quando é necessário um controlo constante da tensão da fita e das suas perturbações com elevada precisão; - A tensão da fita advém da força de tração realizada pelo rolo tensionador.
--	--	--

Apêndice C

Tabelas de avaliação das soluções construtivas.

Tabela 36 - Avaliação das soluções construtivas do sistema de acoplamento de facas.

Solução 1		Precisão do posicionamento das facas	● ● ● ● ●
		Facilidade de calibração	● ○ ○ ○ ○
		Durabilidade	● ● ● ● ●
		Facilidade de Manutenção	● ○ ○ ○ ○
		Custos	● ○ ○ ○ ○
		Peso	● ○ ○ ○ ○
Solução 2		Precisão do posicionamento das facas	● ● ● ○ ○
		Facilidade de calibração	● ● ○ ○ ○
		Durabilidade	● ○ ○ ○ ○
		Facilidade de Manutenção	● ● ○ ○ ○
		Custos	● ● ● ● ○
		Peso	● ● ○ ○ ○
Solução 3		Precisão do posicionamento das facas	● ● ○ ○ ○
		Facilidade de calibração	● ● ● ● ○
		Durabilidade	● ● ○ ○ ○
		Facilidade de Manutenção	● ● ● ● ●
		Custos	● ● ● ● ●
		Peso	● ● ● ● ●

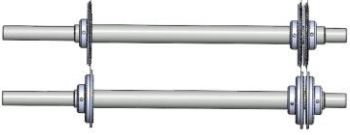
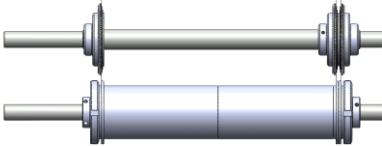
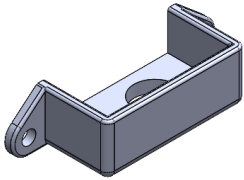
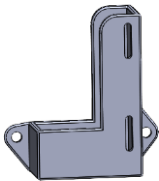
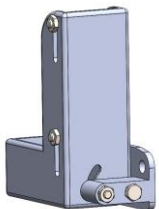
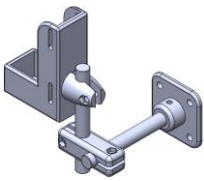
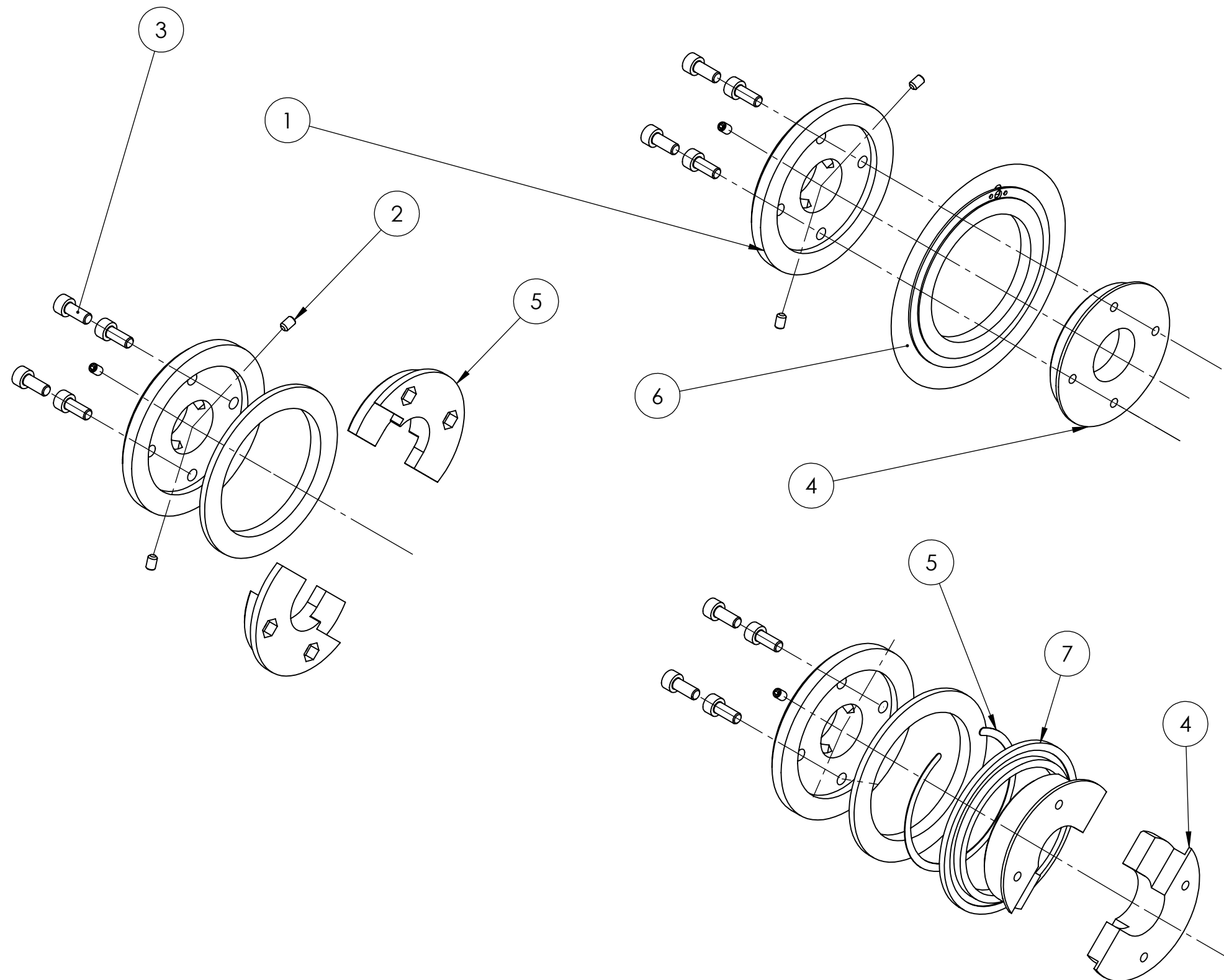
Solução 4		Precisão do posicionamento das facas	● ○ ○ ○ ○
		Facilidade de calibração	● ● ● ● ●
		Durabilidade	● ● ● ● ○
		Facilidade de Manutenção	● ● ● ○ ○
		Custos	● ○ ○ ○ ○
		Peso	● ● ● ● ○
Solução 5		Precisão do posicionamento das facas	● ● ● ● ○
		Facilidade de calibração	● ● ● ○ ○
		Durabilidade	● ● ○ ○ ○
		Facilidade de Manutenção	● ● ● ○ ○
		Custos	● ● ● ○ ○
		Peso	● ● ● ○ ○

Tabela 37 - Avaliação das soluções construtivas do sistema de fixação do sensor.

Solução 1		Movimento horizontal	●
		Movimento vertical	○
		Movimento angular	○
		Facilidade de produção	● ● ●
Solução 2		Movimento horizontal	●
		Movimento vertical	●
		Movimento angular	○
		Facilidade de produção	● ● ●
Solução 3		Movimento horizontal	●
		Movimento vertical	●
		Movimento angular	●
		Facilidade de produção	● ● ○
Solução 4		Movimento horizontal	●
		Movimento vertical	●
		Movimento angular	●
		Facilidade de produção	● ○ ○

Apêndice D

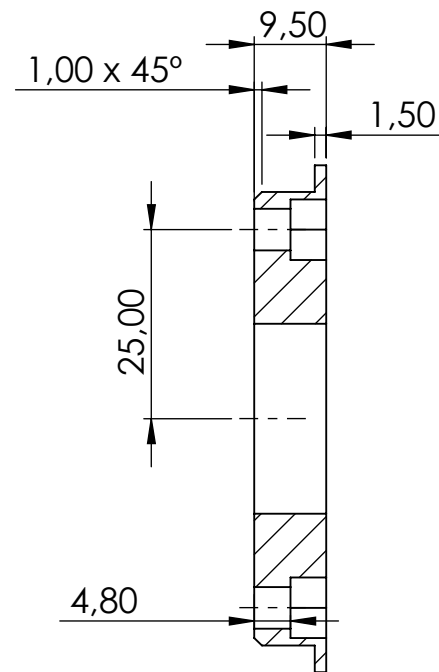
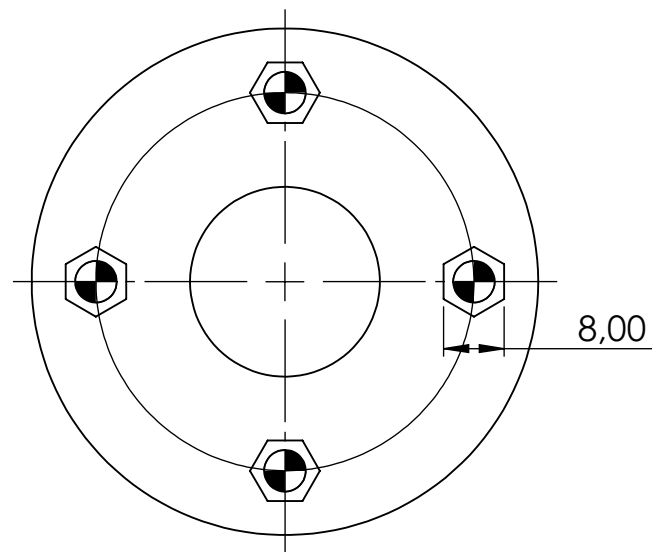
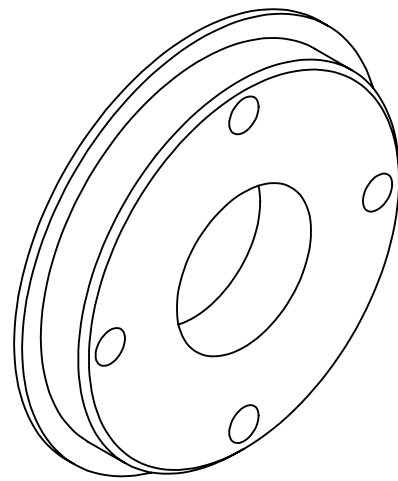
Desenhos técnicos



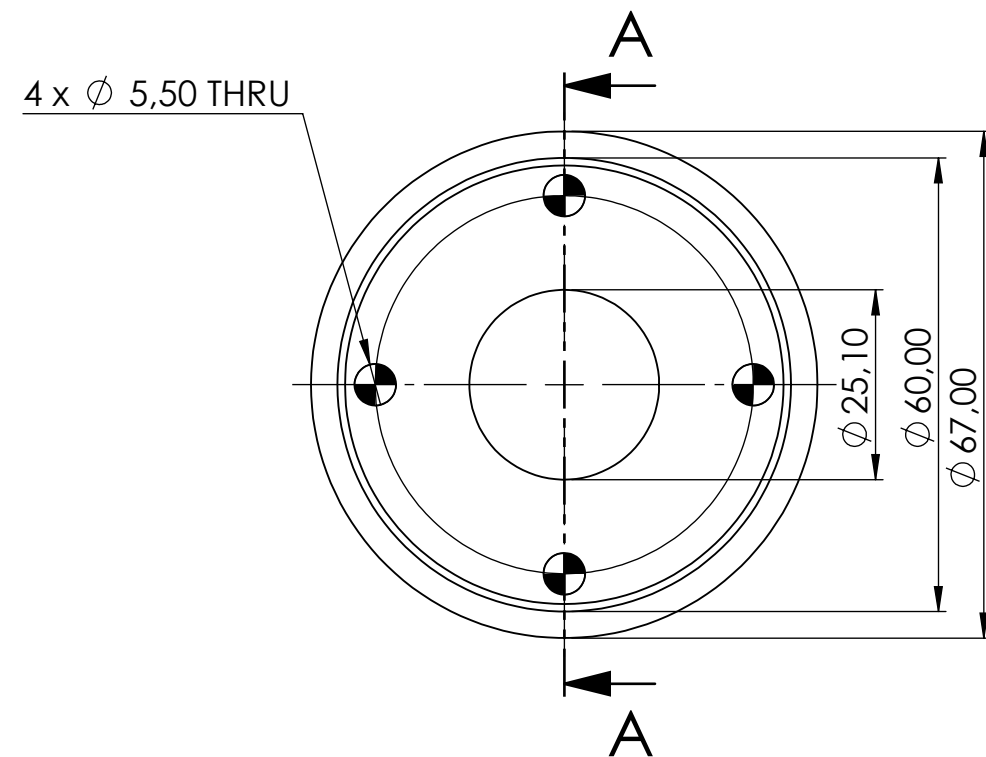
Nº Componente	Descrição	Quantidade
1	Adaptador 1	6
2	Perno DIN 914 - M5 x 5	18
3	ISO 4762 - M5 x 16 - 12.9	24
4	Adaptador 2.1	4
5	Espaçador 2	1
6	Conjunto faca/suporte - Mario Cotta 3802306---C	3
7	Contrafaca - Mario Cota 3501806-303C	3

ESCALA
1:2

Pessoa responsável António Alves	Departamento responsável www.dem.isep.ipp.pt	Tipo de documento Desenho técnico	Estado do documento final			
Proprietário legal <i>DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431 4200-072 Porto</i>		Título Sistema de acoplamento das facas - Montagem	Número			
			Revisão	Data de edição 09/09/2024	Língua PT	Folha 1/8

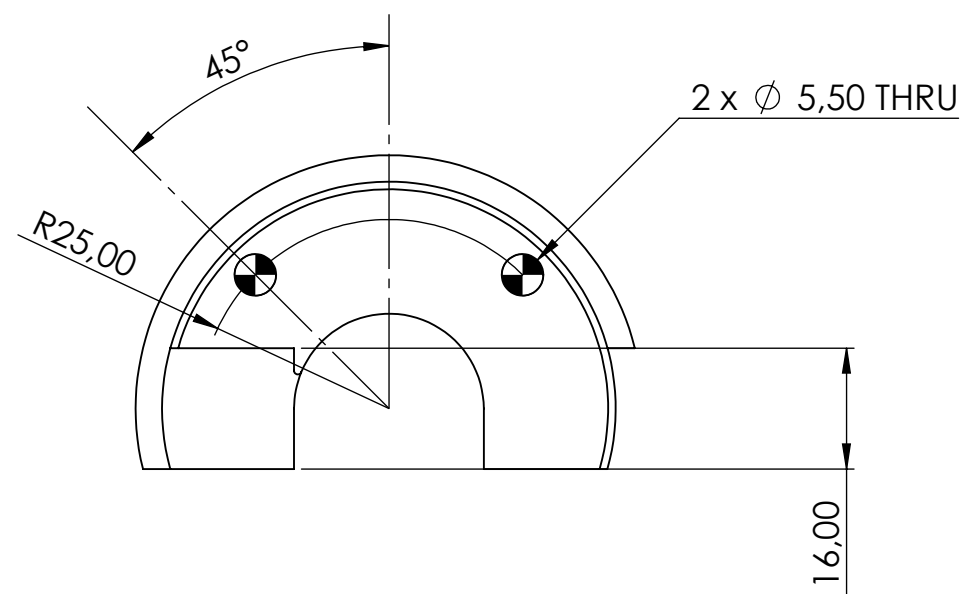
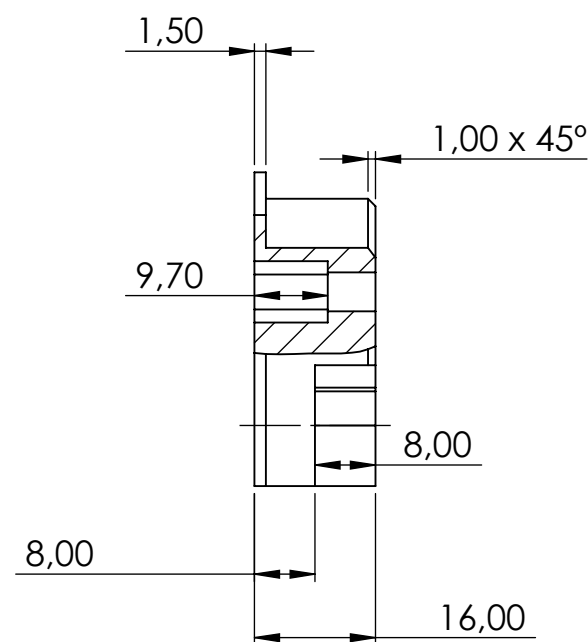
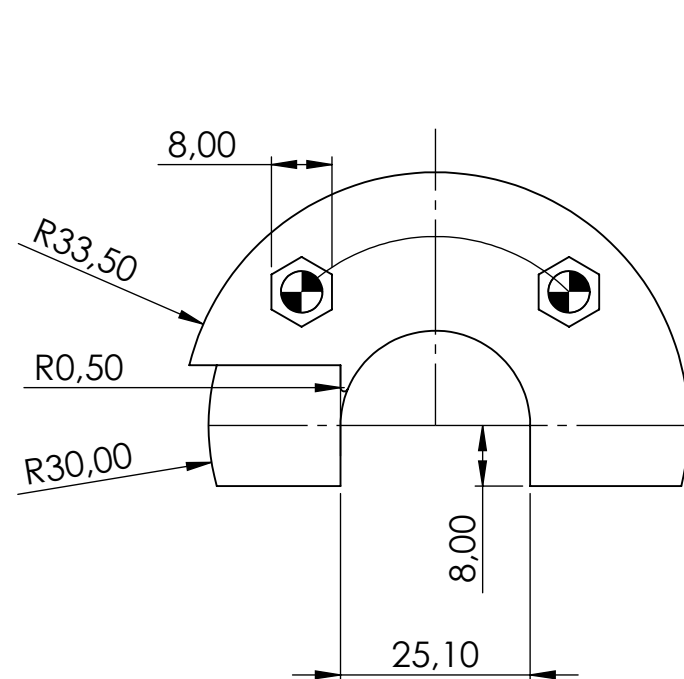
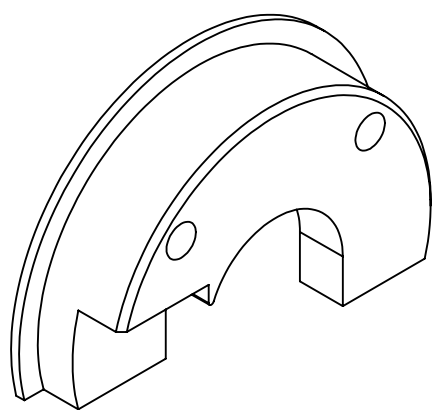


SECTION A-A



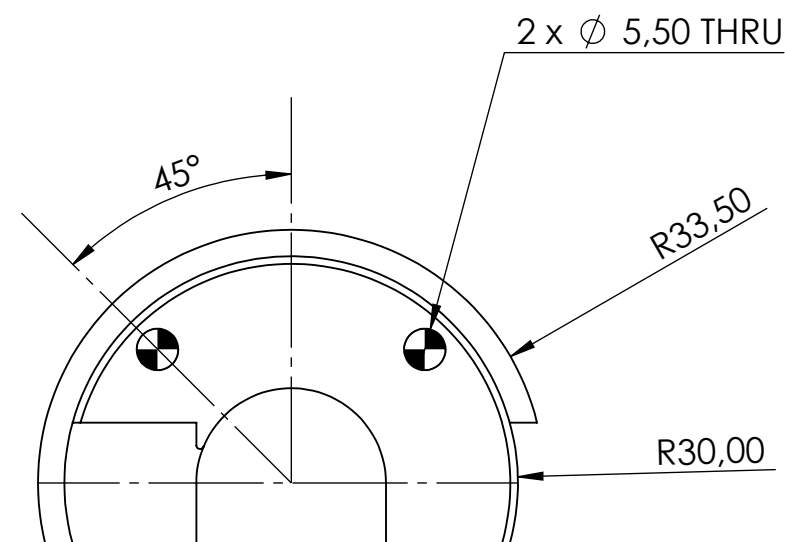
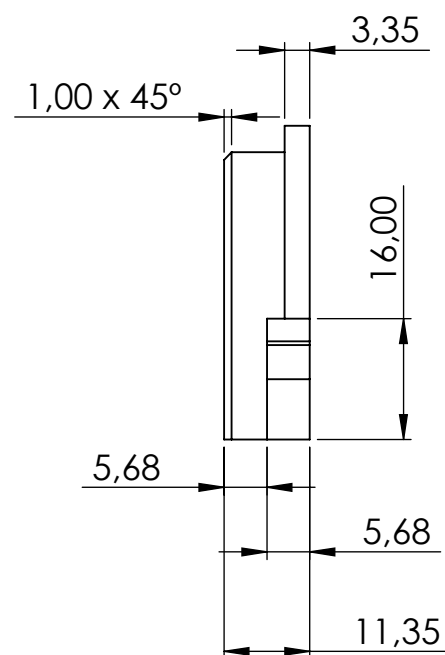
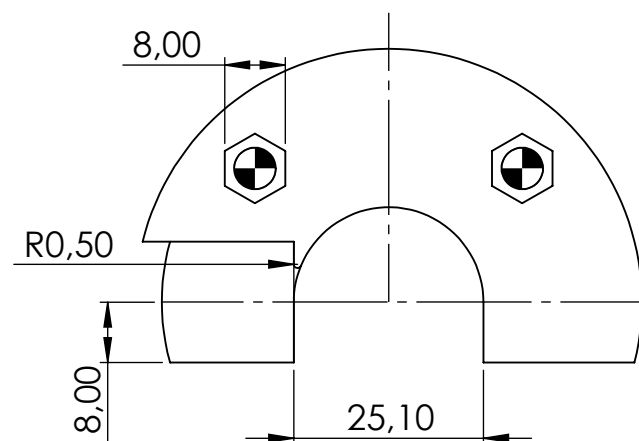
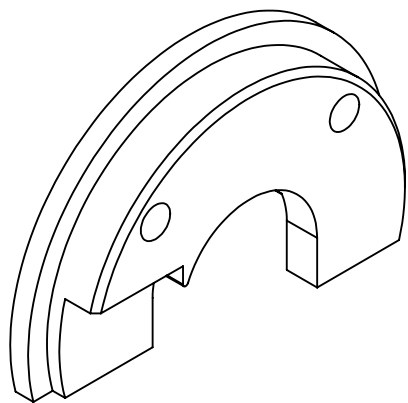
ESCALA
1:1

Pessoa responsável António Alves	Departamento responsável www.dem.isep.ipp.pt	Tipo de documento Desenho técnico	Estado do documento final		
Proprietário legal <i>DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431 4200-072 Porto</i>		Título Sistema de acoplamento das facas - Adaptador 2.1	Número Desenho 2020..		
			Revisão	Data de edição 09/09/2024	Língua PT
					Folha 2/8



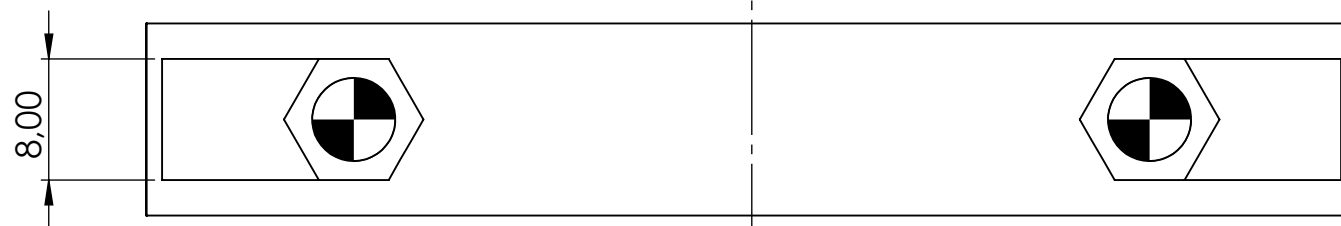
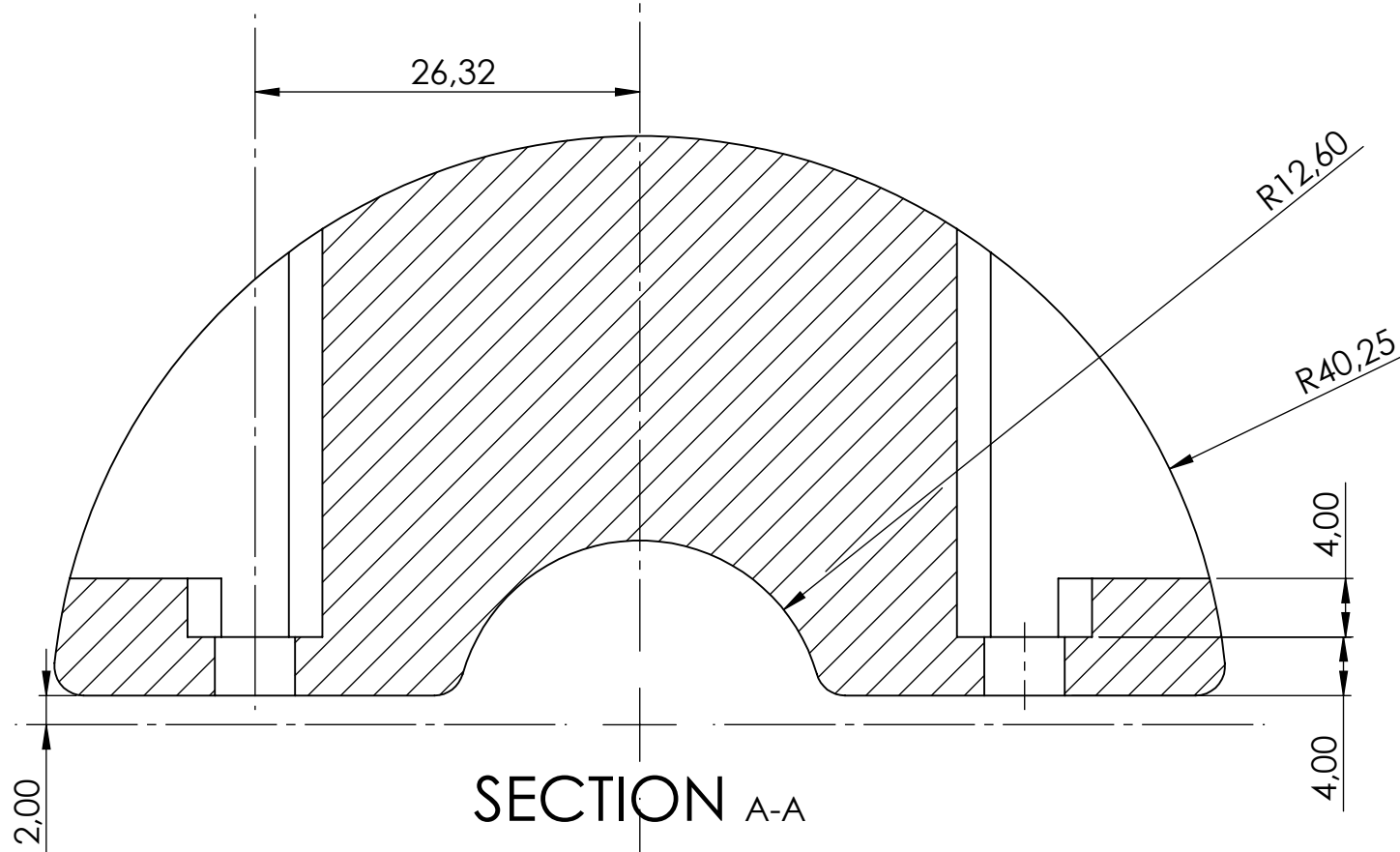
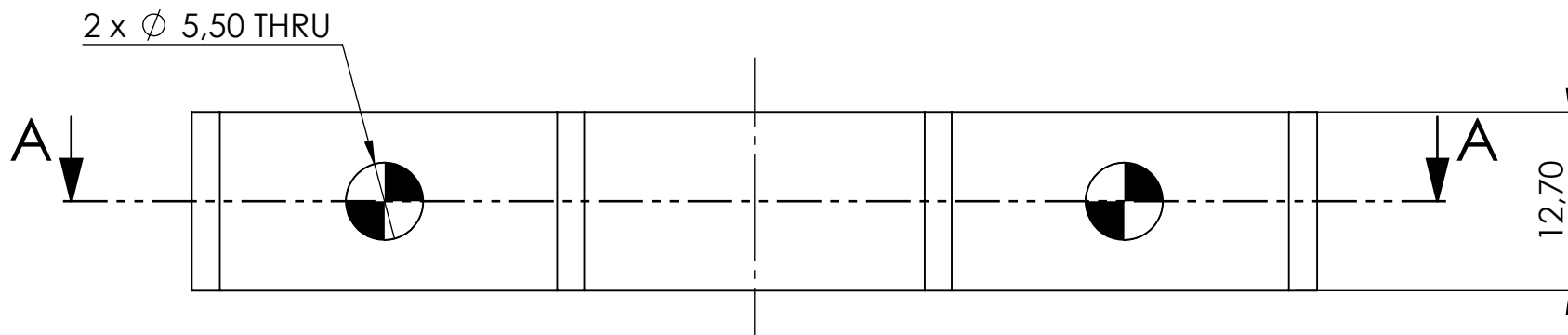
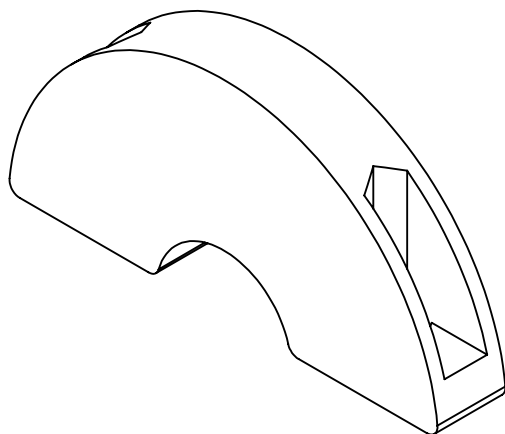
ESCALA
1:1

Pessoa responsável	Departamento responsável	Tipo de documento		Estado do documento	
António Alves	www.dem.isep.ipp.pt	Desenho técnico		final	
Proprietário legal	Título		Número		
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431 4200-072 Porto		Sistema de acoplamento das facas - Adaptador 1		Revisão	Data de edição
					09/09/2024
				Língua	Folha
				PT	3/8



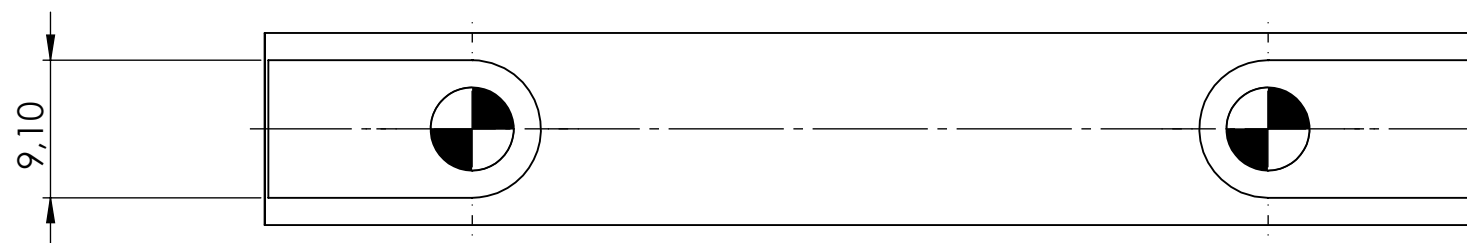
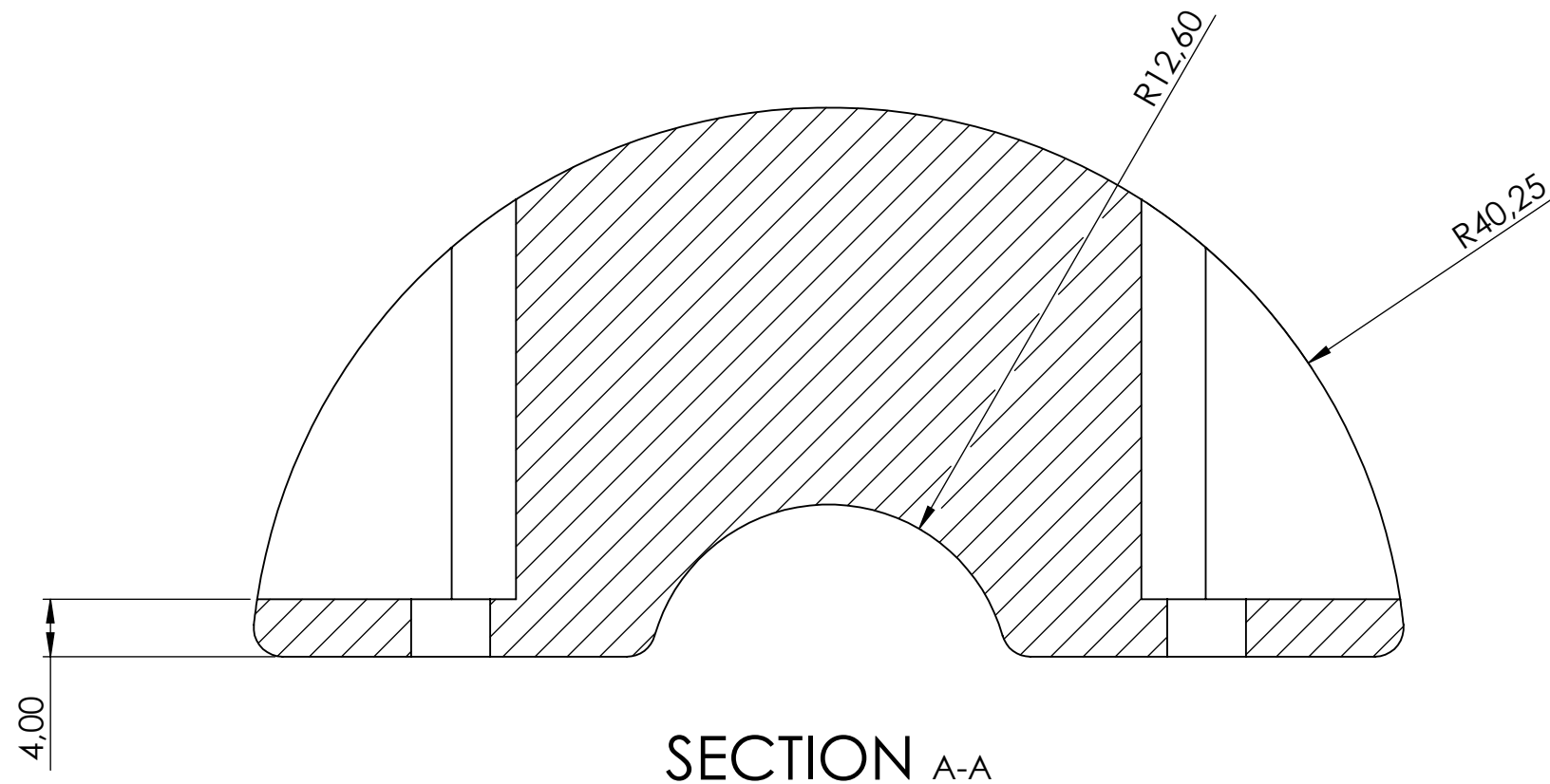
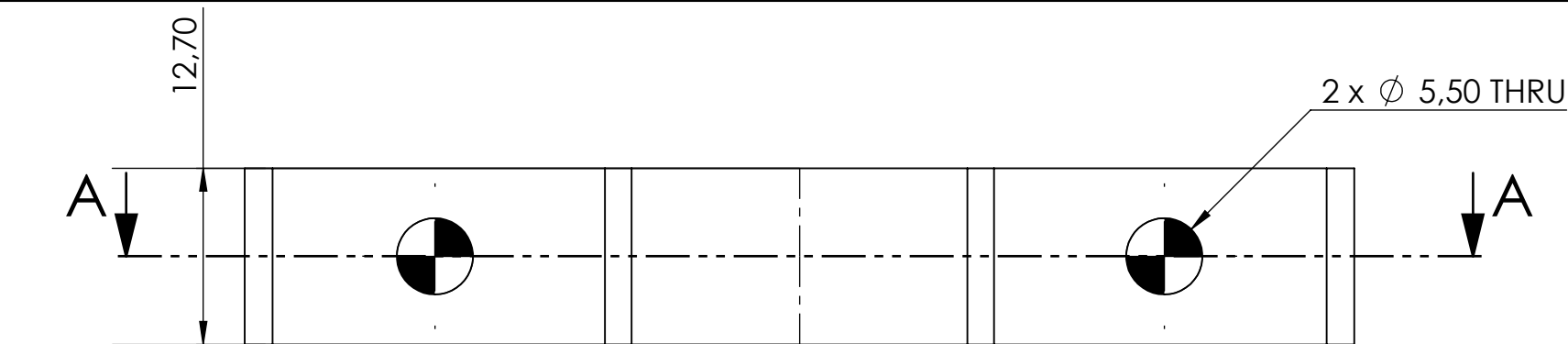
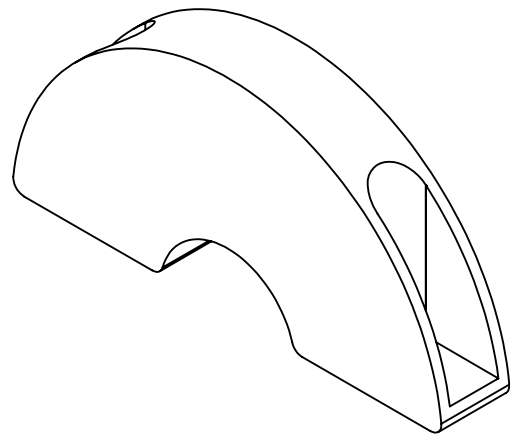
ESCALA
1:1

Pessoa responsável	Departamento responsável	Tipo de documento		Estado do documento			
António Alves	www.dem.isep.ipp.pt	Desenho técnico		final			
Proprietário legal		Título		Número			
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431 4200-072 Porto		Sistema de acoplamento das facas - Adaptador 2.3		Revisão	Data de edição	Língua	Folha
					09/09/2024	PT	4/8



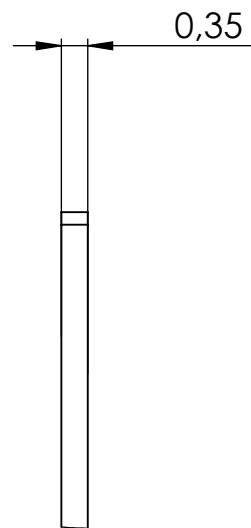
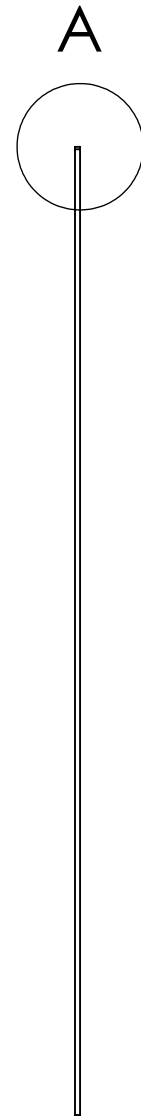
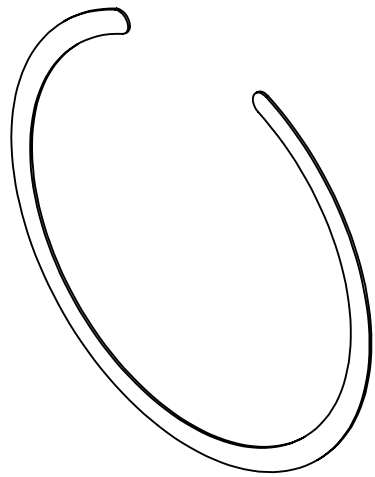
ESCALA
2:1

Pessoa responsável	Departamento responsável	Tipo de documento	Estado do documento			
António Alves	www.dem.isep.ipp.pt	Desenho técnico	final			
Proprietário legal	Título		Número			
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431 4200-072 Porto	Sistema de acoplamento das facas - Espaçador 1.2		Revisão	Data de edição	Língua	Folha
				09/09/2024	PT	6/8

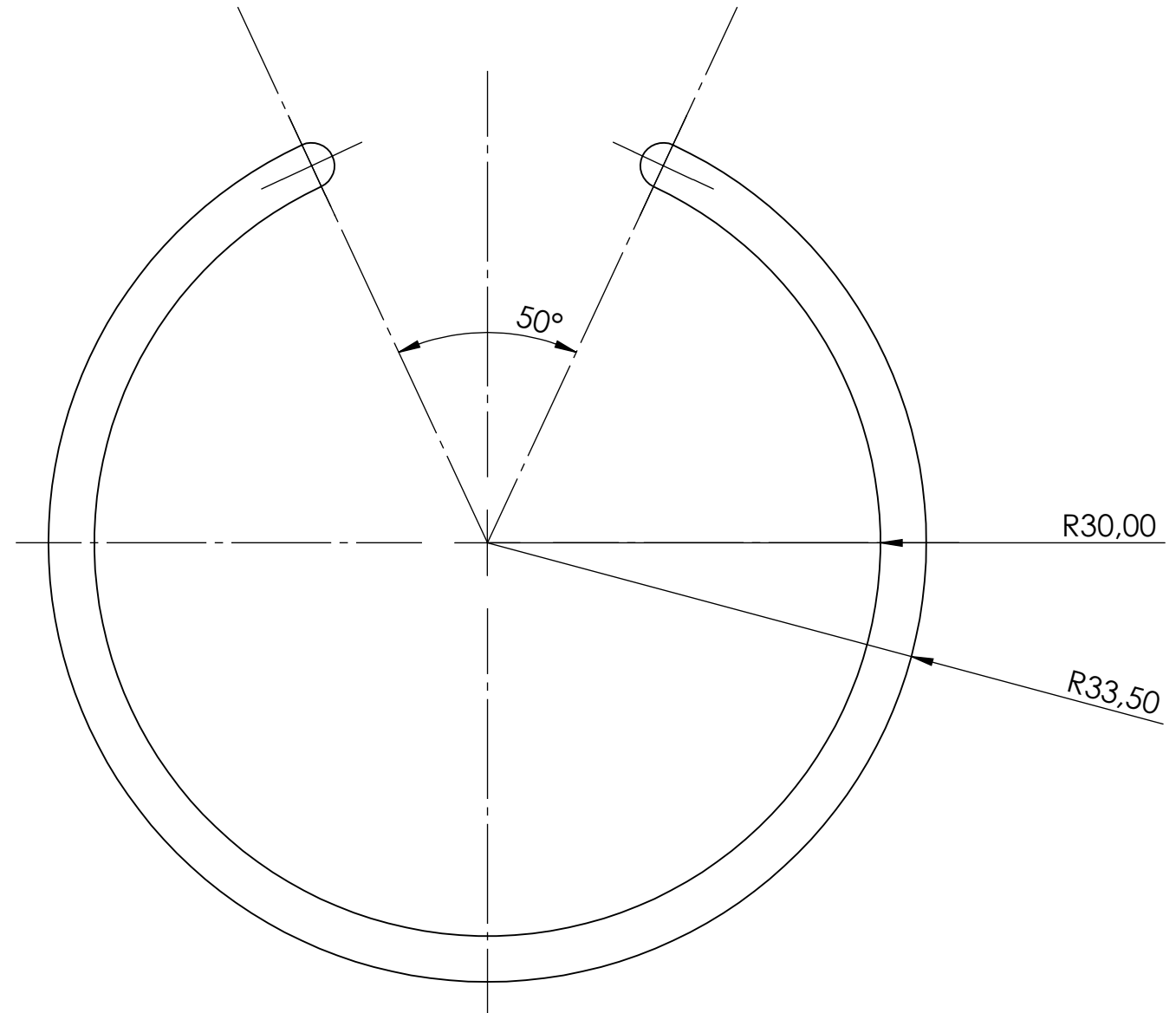


ESCALA
2:1

Pessoa responsável António Alves		www.dem.isep.ipp.pt	Número Desenho técnico	Estado do documento final			
Proprietário legal <i>DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431 4200-072 Porto</i>			Título Sistema de acoplamento das facas - Espaçador 1.1				
Departamento responsável		Tipo de documento		Revisão	Data de edição 09/09/2024	Língua PT	Folha 5/8

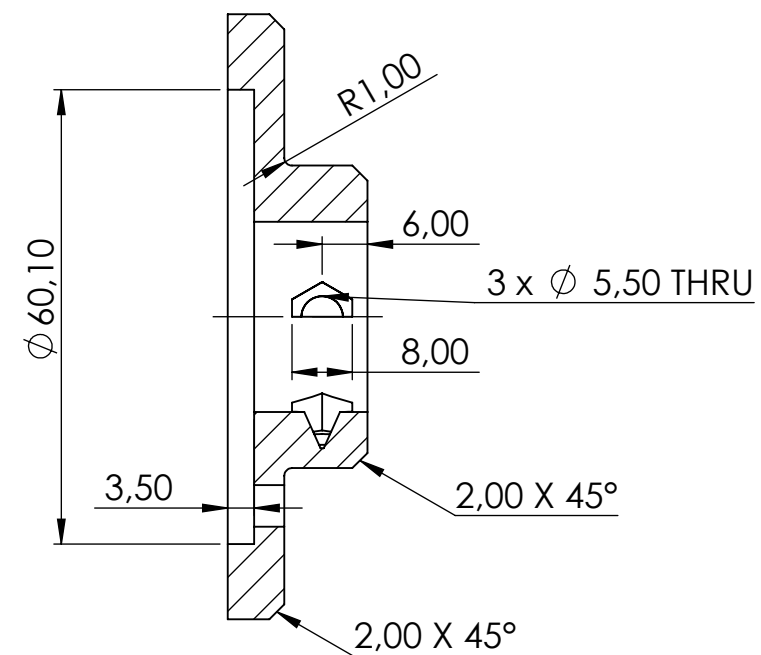
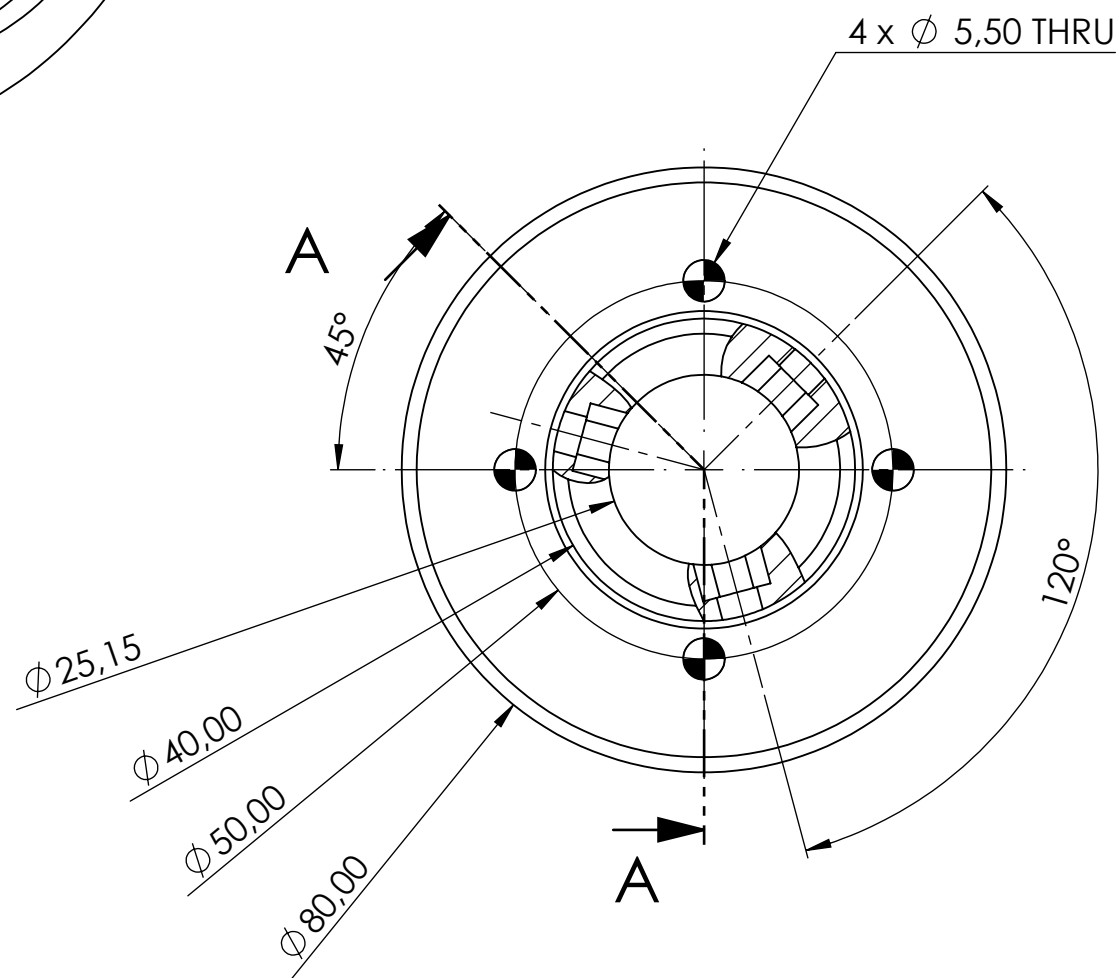
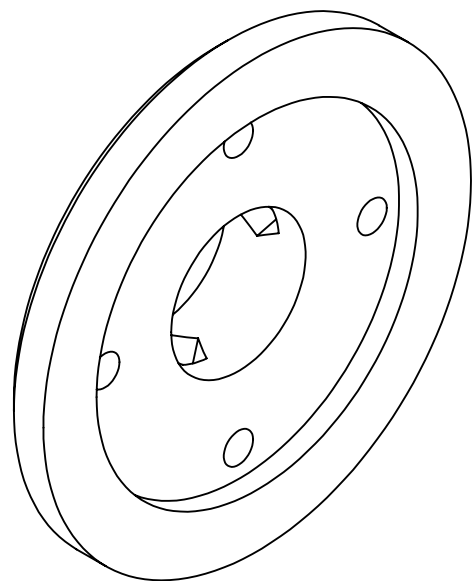


DETAIL A
SCALE 10 : 1



ESCALA
2:1

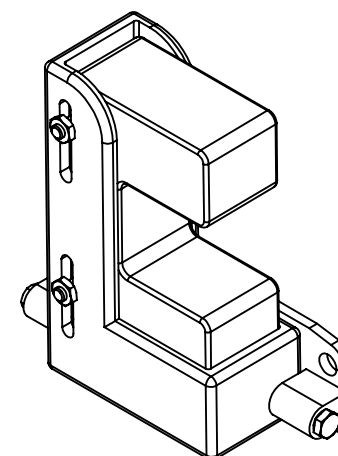
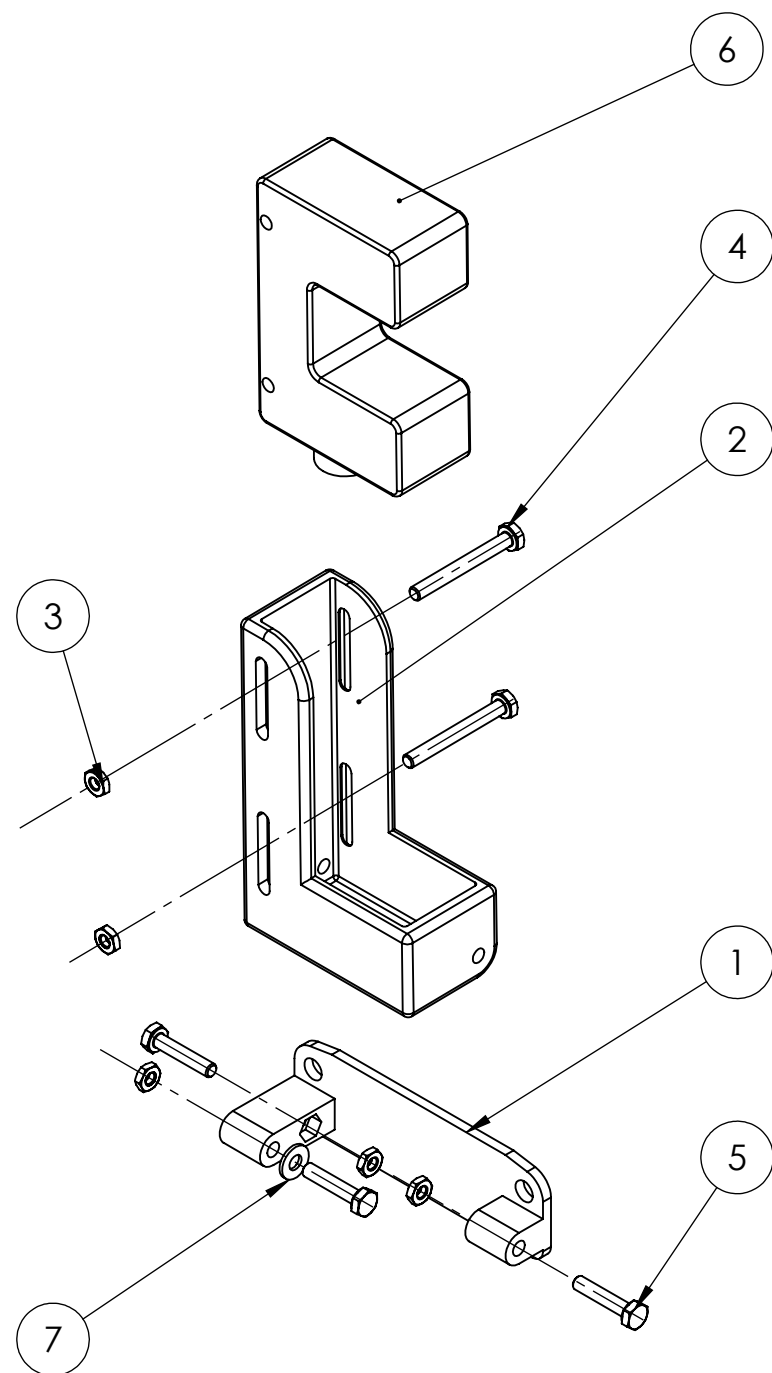
Pessoa responsável	Departamento responsável	Tipo de documento		Estado do documento		
António Alves	www.dem.isep.ipp.pt	Desenho técnico		final		
Proprietário legal		Título		Número		
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431 4200-072 Porto		Sistema de acoplamento das facas - Espaçador 2		Revisão	Data de edição	Língua
					09/09/2024	PT
						Folha
						7/8



SECTION A-A

ESCALA
1:1

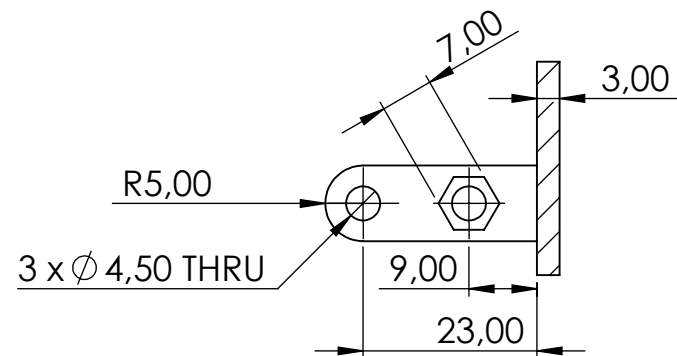
Pessoa responsável António Alves	Departamento responsável www.dem.isep.ipp.pt	Tipo de documento Desenho técnico	Estado do documento final		
Proprietário legal <i>DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431 4200-072 Porto</i>	Título Sistema de acoplamento das facas - Adaptador 1		Número Desenho 2020..		
		Revisão	Data de edição 09/09/2024	Língua PT	Folha 8/8



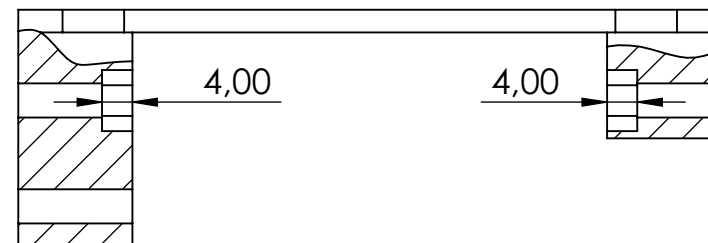
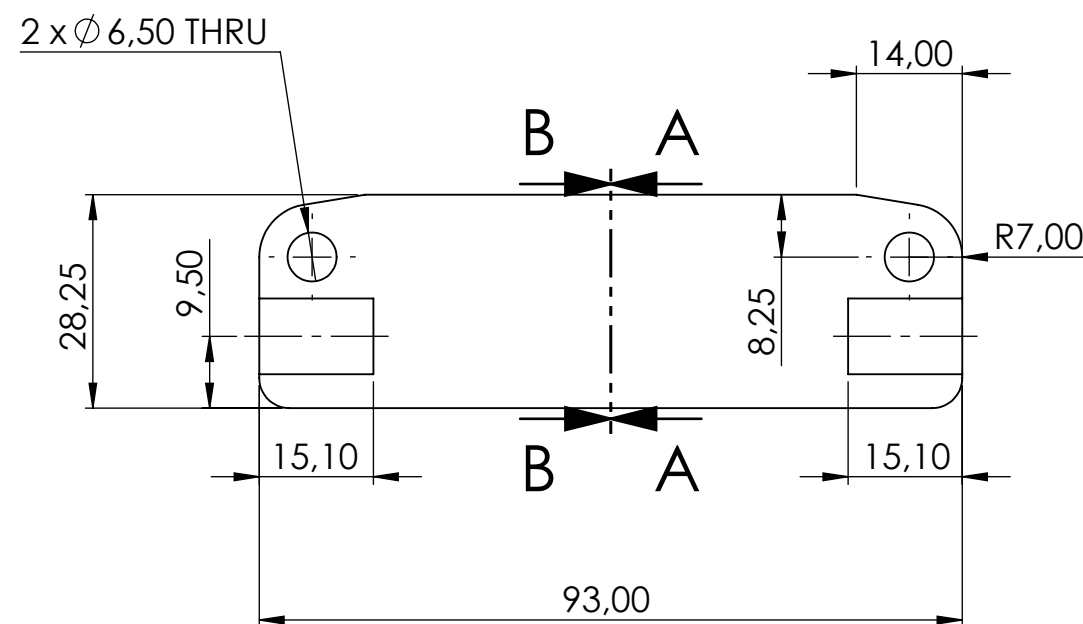
Nº Componente	Descrição	Quantidade
1	Peça fixadora	1
2	Peça suporte	1
3	Porca ISO - 4035 - M4 - 8	5
4	Parafuso ISO 4017 - M4 x 35 - 8.8	2
5	Parafuso 4762 - M4 x 20 - 8.8	3
6	Sensor ultrassónico	1
7	Parafuso ISO 4017 - M4 x 20 - 8.8	1

Pessoa responsável	Departamento responsável	Tipo de documento		Estado do documento			
António Alves	www.dem.isep.ipp.pt	Desenho técnico		final			
Proprietário legal		Título		Número			
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431 4200-072 Porto		Sistema de fixação do sensor - Montagem		Revisão	Data de edição	Língua	Folha
					09/09/2024	PT	1/3

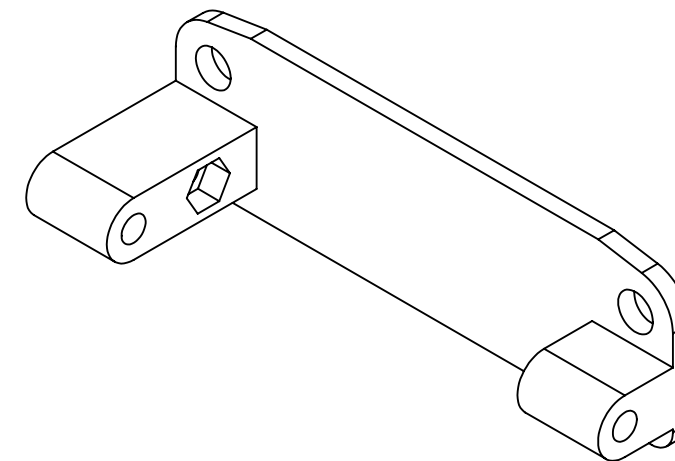
ESCALA
1:2



SECTION A-A

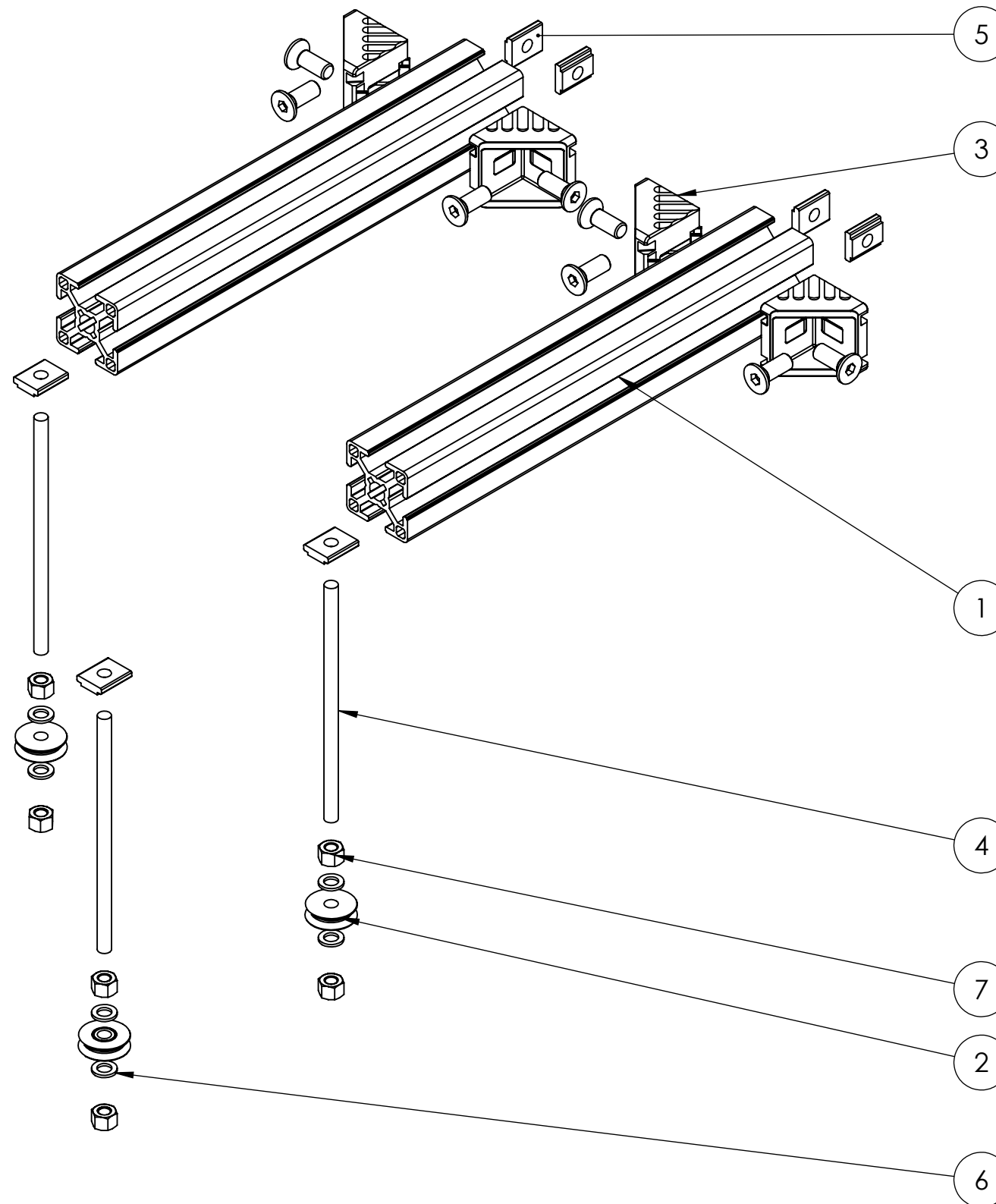
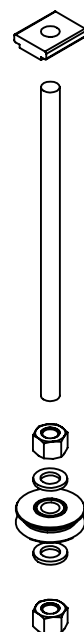
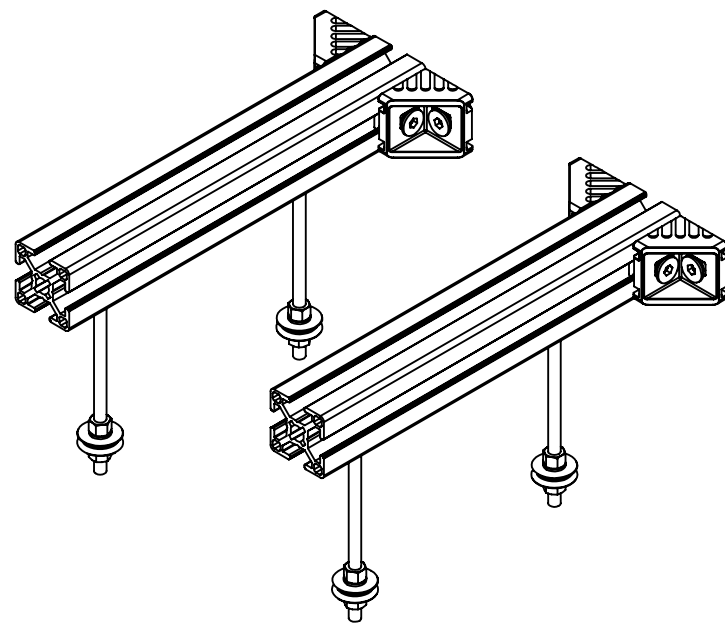


SECTION B-B



ESCALA
1:1

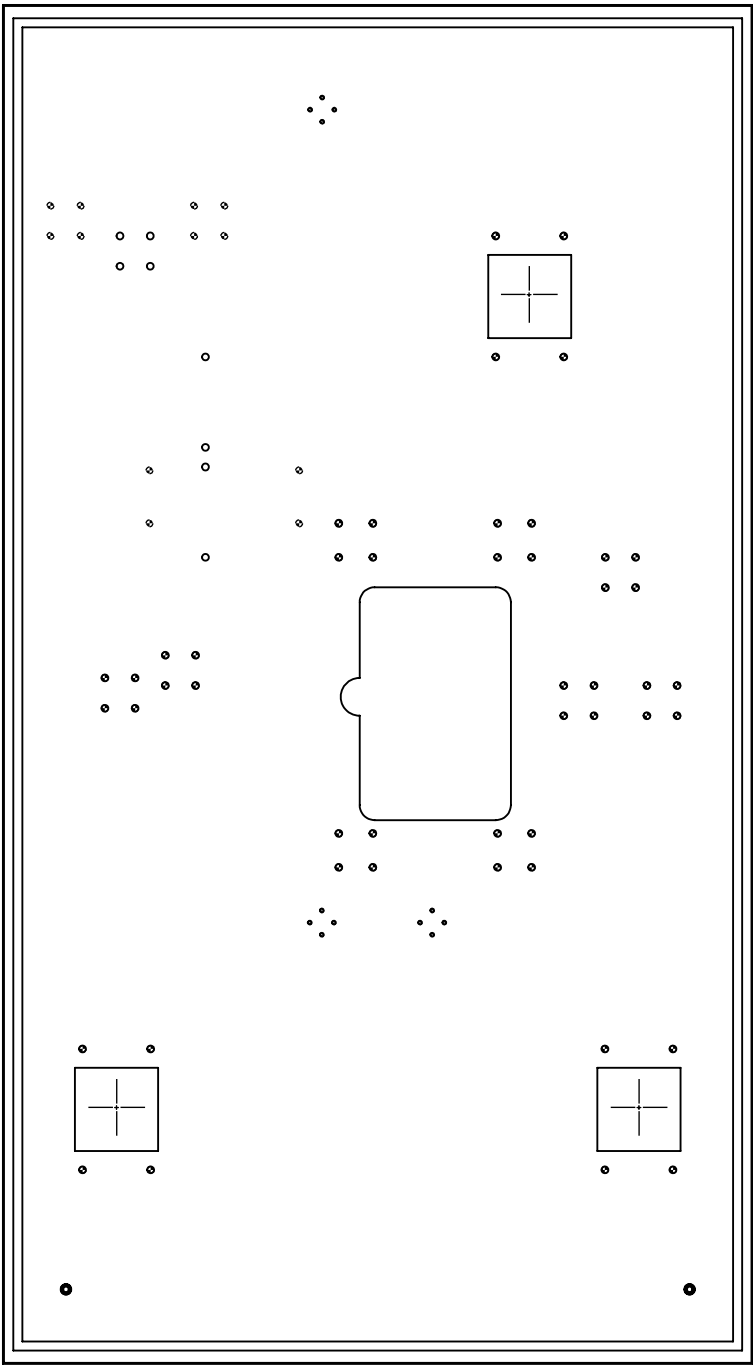
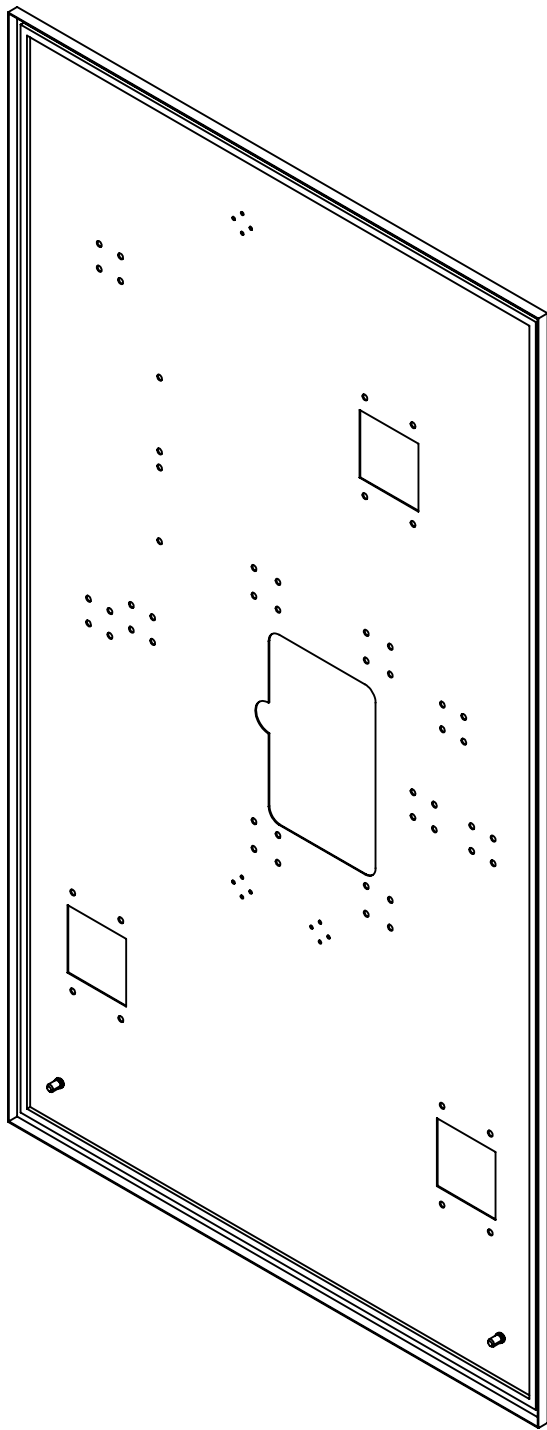
Pessoa responsável António Alves	Departamento responsável www.dem.isep.ipp.pt	Tipo de documento Desenho Técnico	Estado do documento final			
Proprietário legal DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431 4200-072 Porto		Título Sistema de fixação do sensor - Peça fixadora	Número			
			Revisão	Data de edição 09/09/2024	Língua PT	Folha 3/3



Nº componente	Descrição	Quantidade
1	Perfil BOSCH 30 x 30 x 200 mm	2
2	Rolamentos c/ ranhura em V - MISUMI SZV6-16	4
3	Cantoneira de perfil BOSCH 30	4
4	Vareta roscada M5 x 100	4
5	Porca em T M5 - NORELEM 07077-1005	6
6	Anilha ISO 7089 - M5 - A200	8
7	Porca ISO 4032 - M5 - 8	8

ESCALA
1:2

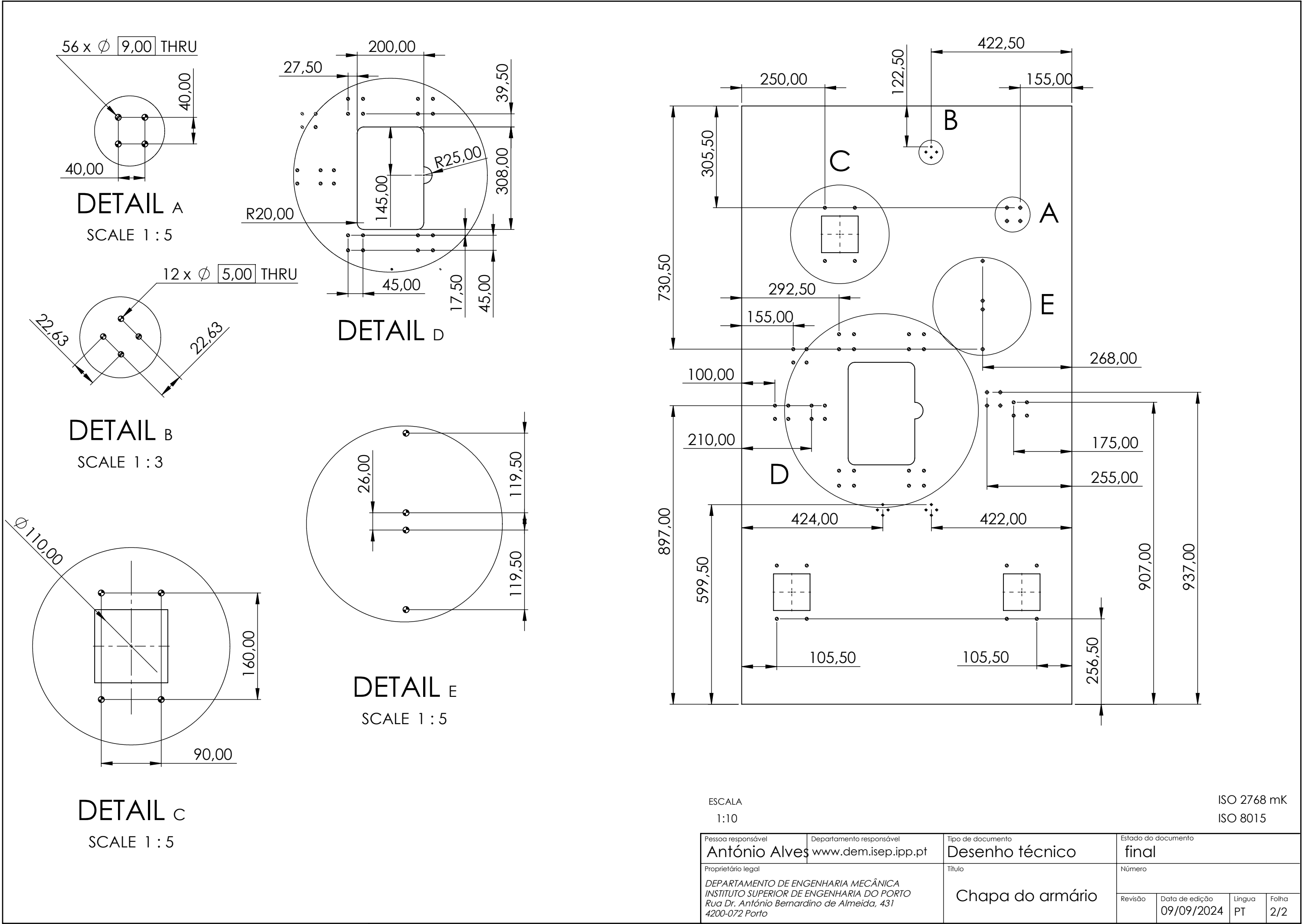
Pessoa responsável António Alves	Departamento responsável www.dem.isep.ipp.pt	Tipo de documento Desenho técnico	Estado do documento final			
Proprietário legal DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431 4200-072 Porto		Título Sistema de guiamento da fita		Número		
		Revisão	Data de edição 09/09/2024	Língua PT	Folha 1/1	

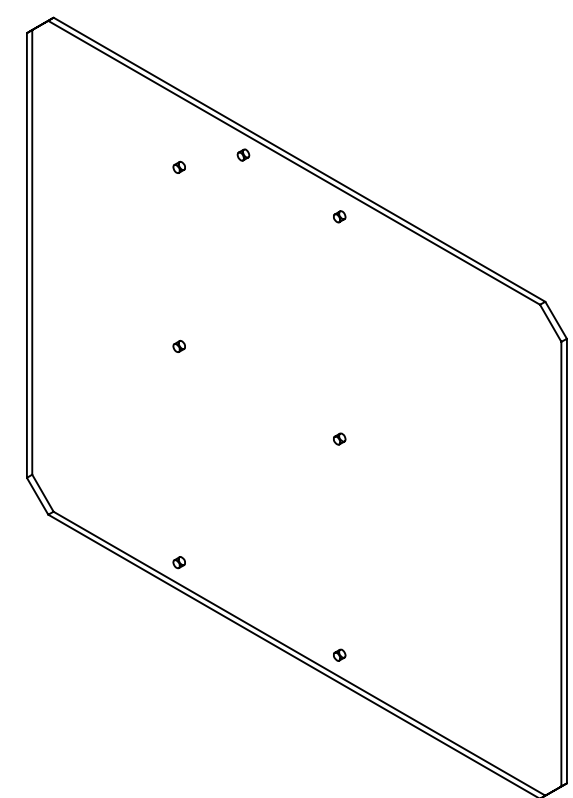
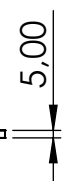
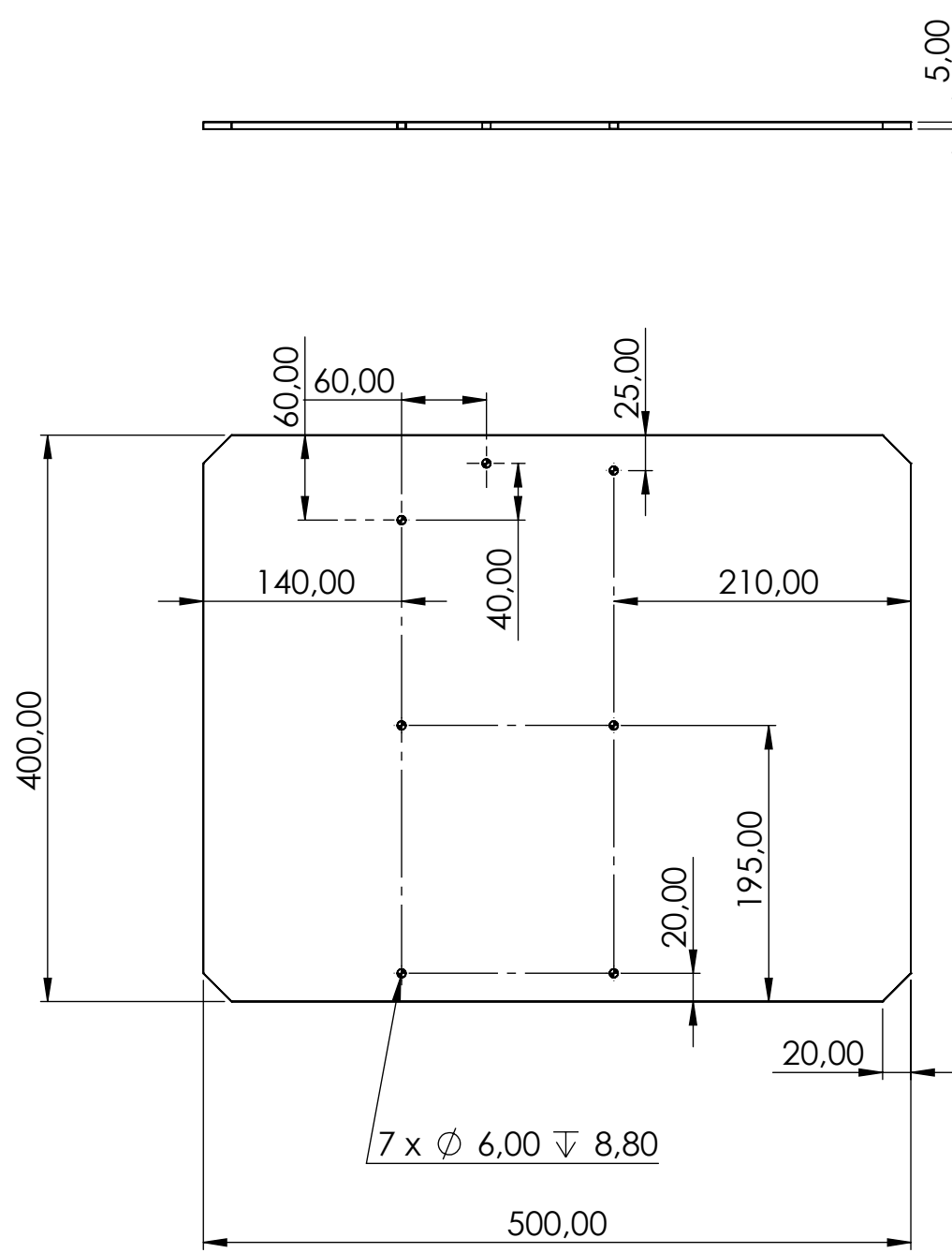


ESCALA
1:10

Tolerâncias gerais: ISO 2768 mK
ISO 8015

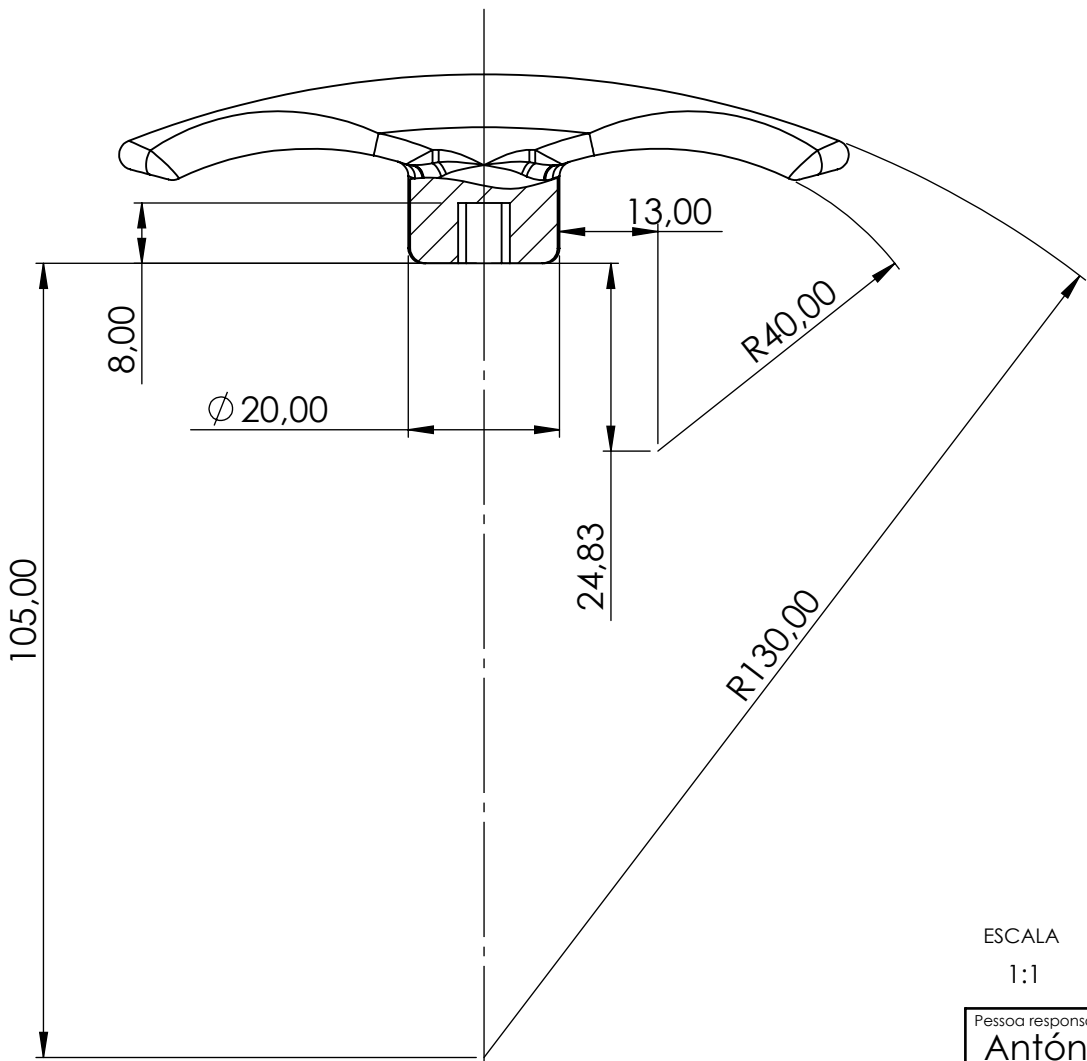
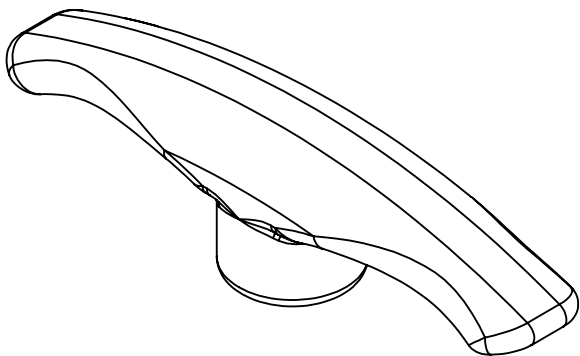
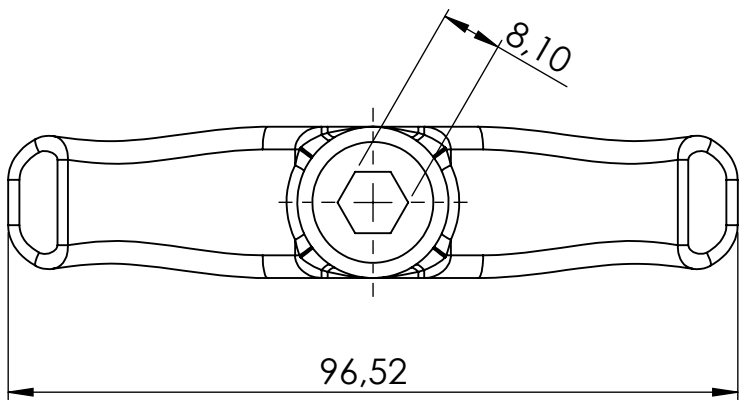
Pessoa responsável António Alves	Departamento responsável www.dem.isep.ipp.pt	Tipo de documento Desenho técnico	Estado do documento final			
Proprietário legal <i>DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431 4200-072 Porto</i>		Título Chapa do armário		Número		
				Revisão	Data de edição 09/09/2024	Língua PT
						Folha 1/2





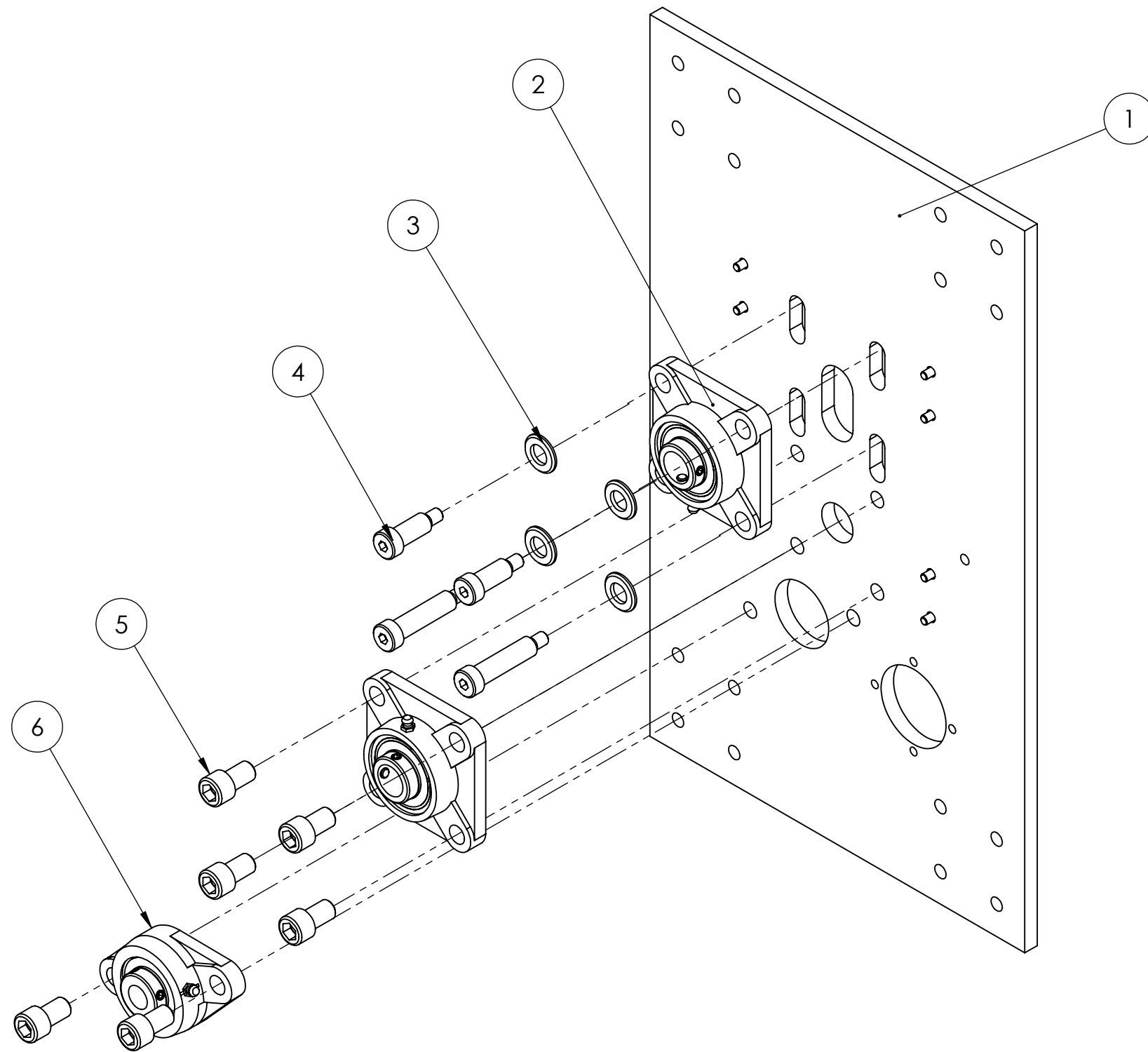
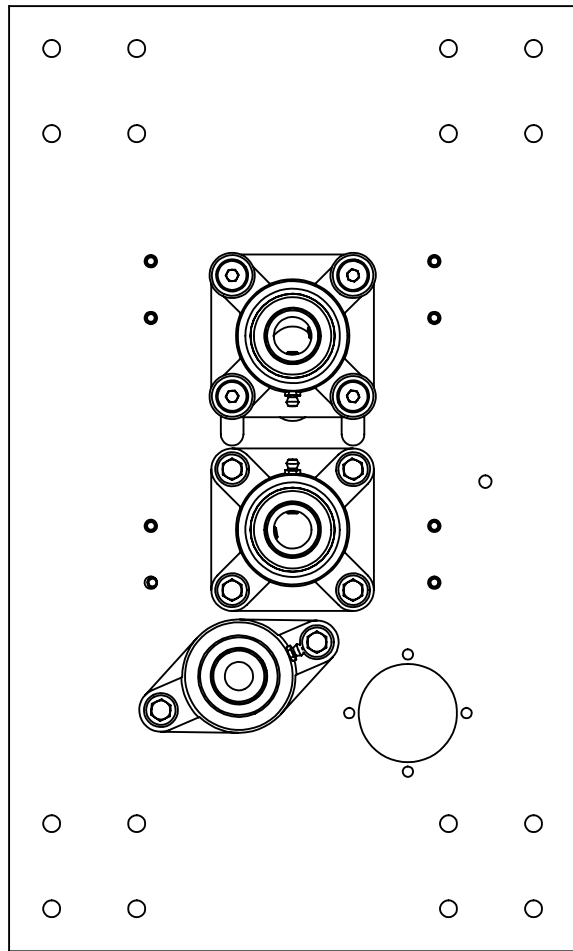
ESCALA
1:5

Pessoa responsável	Departamento responsável	Tipo de documento		Estado do documento	
António Alves	www.dem.isep.ipp.pt	Desenho Técnico		final	
Proprietário legal		Título		Número	
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431 4200-072 Porto		Acrílico de Proteção		Revisão	Data de edição
					09/09
				Língua	Folha
				PT	1/1



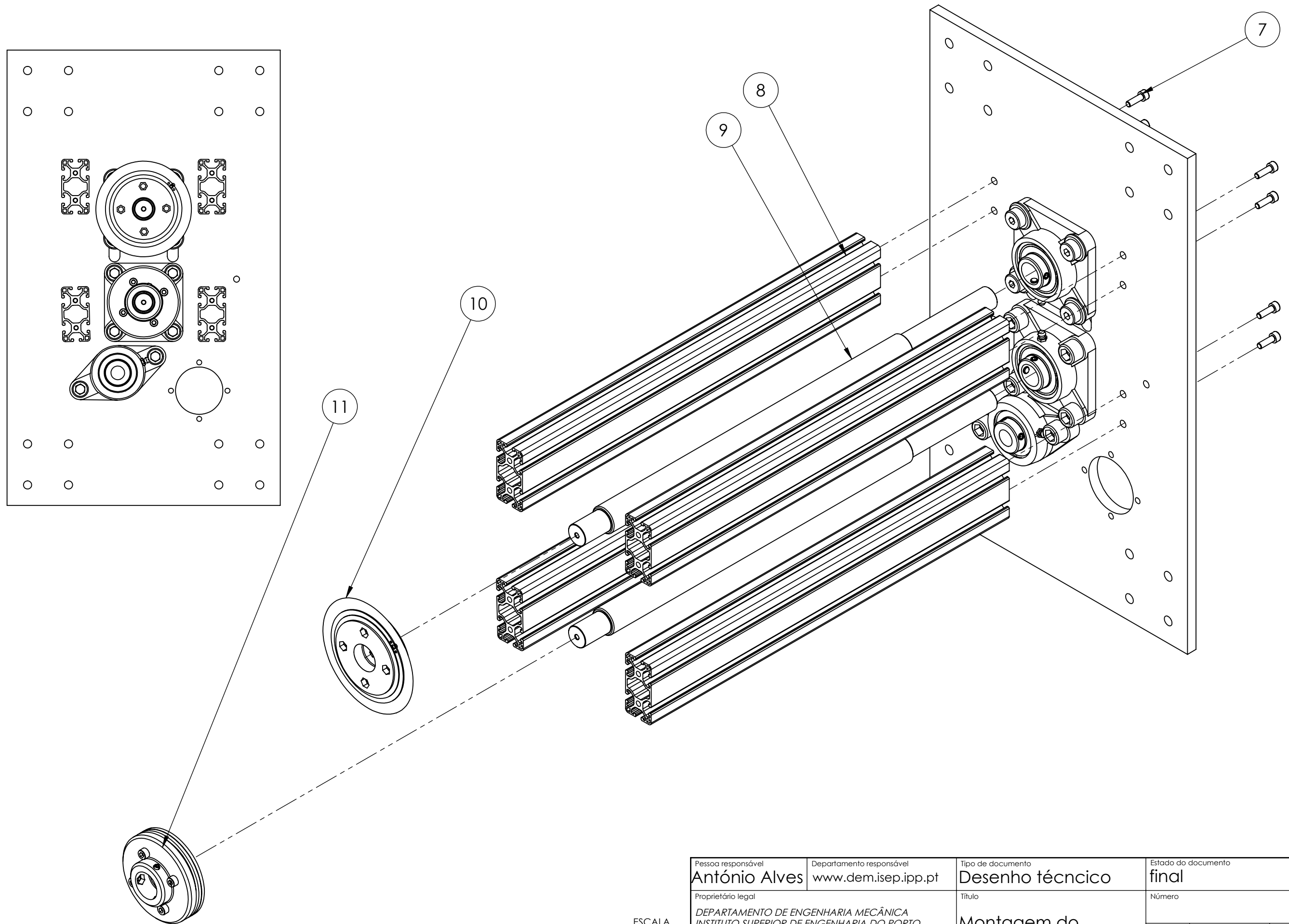
ESCALA
1:1

Pessoa responsável	Departamento responsável	Tipo de documento	Estado do documento			
António Alves	www.dem.isep.ipp.pt	Desenho Técnico	final			
Proprietário legal	DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431 4200-072 Porto		Número			
			Revisão	Data de edição	Língua	Folha
				09/09	PT	1/1



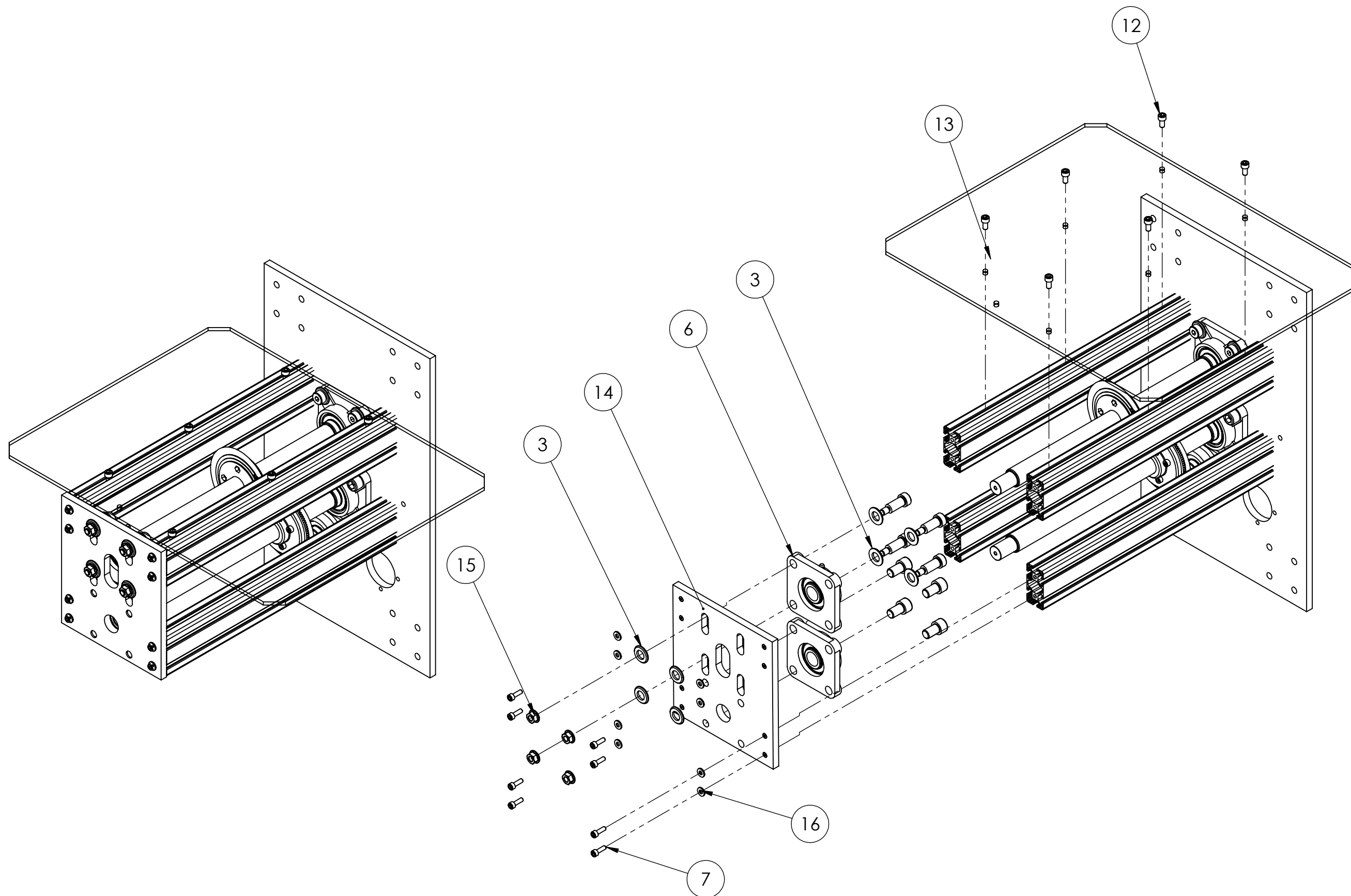
ESCALA
1:10

Pessoa responsável António Alves	Departamento responsável www.dem.isep.ipp.pt	Tipo de documento Desenho técnico	Estado do documento final			
Proprietário legal <i>DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431 4200-072 Porto</i>		Título Montagem do sistema de corte	Número			
			Revisão	Data de edição 09/09/2024	Língua PT	Folha 1/7



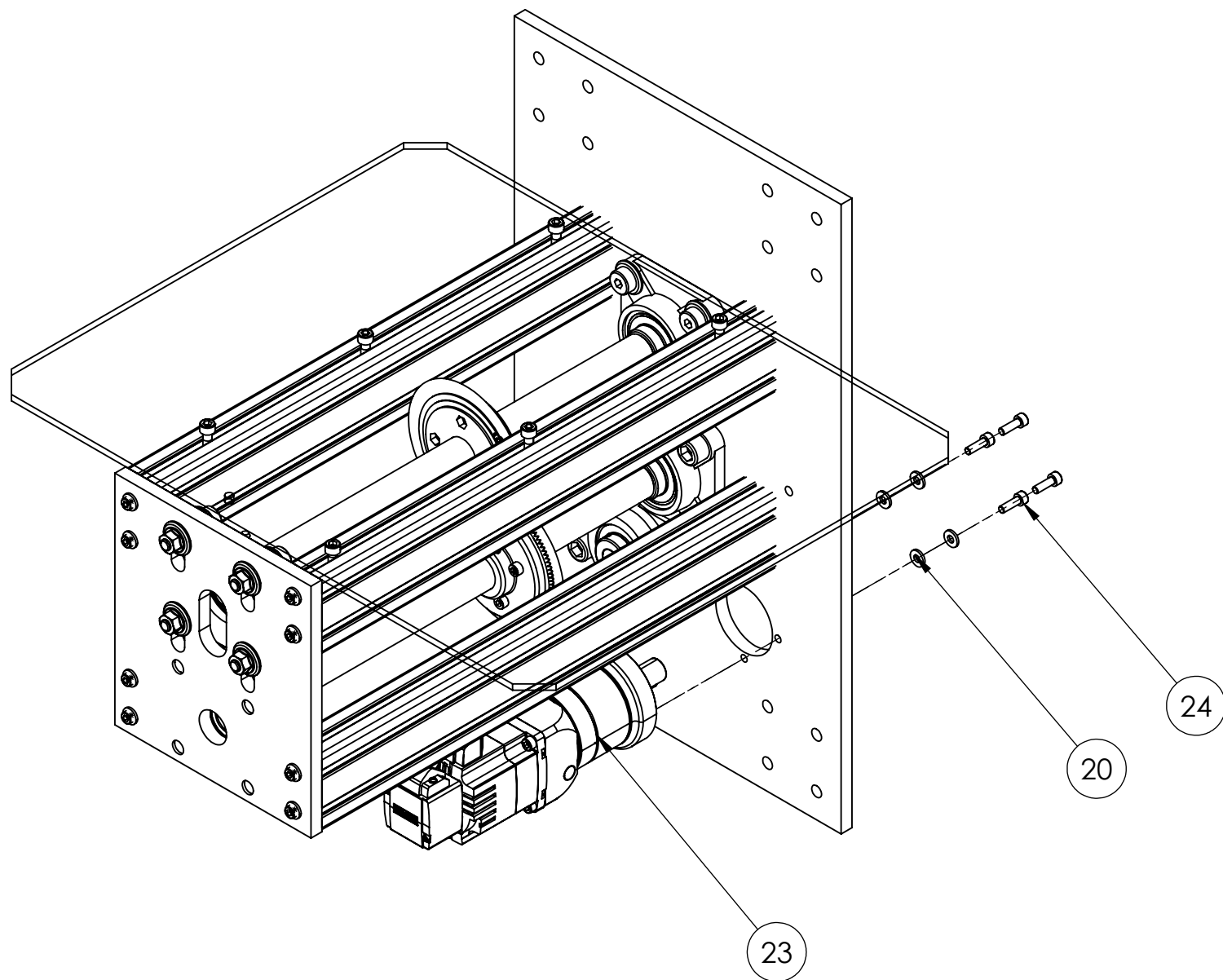
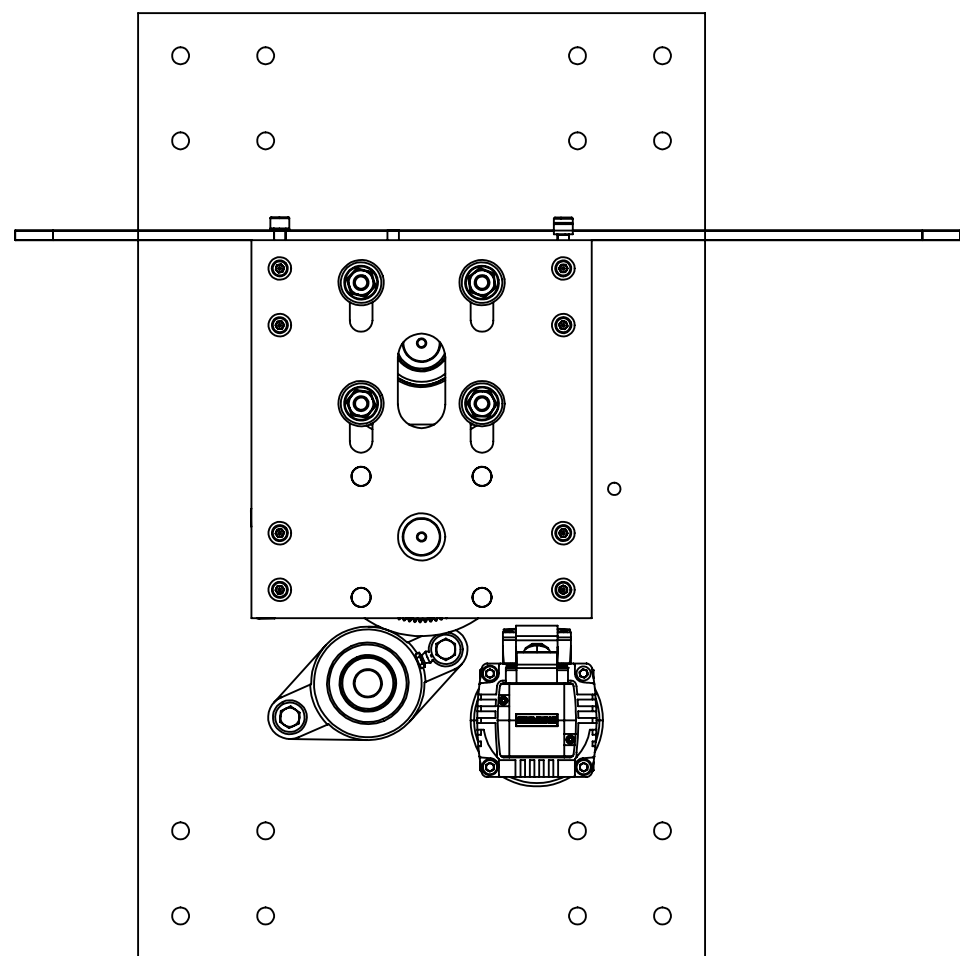
ESCALA
1:2

Pessoa responsável António Alves	Departamento responsável www.dem.isep.ipp.pt	Tipo de documento Desenho técnico	Estado do documento final			
Proprietário legal <i>DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431 4200-072 Porto</i>		Título Montagem do sistema de corte	Número			
			Revisão	Data de edição 09/09/2024	Língua PT	Folha 2/7



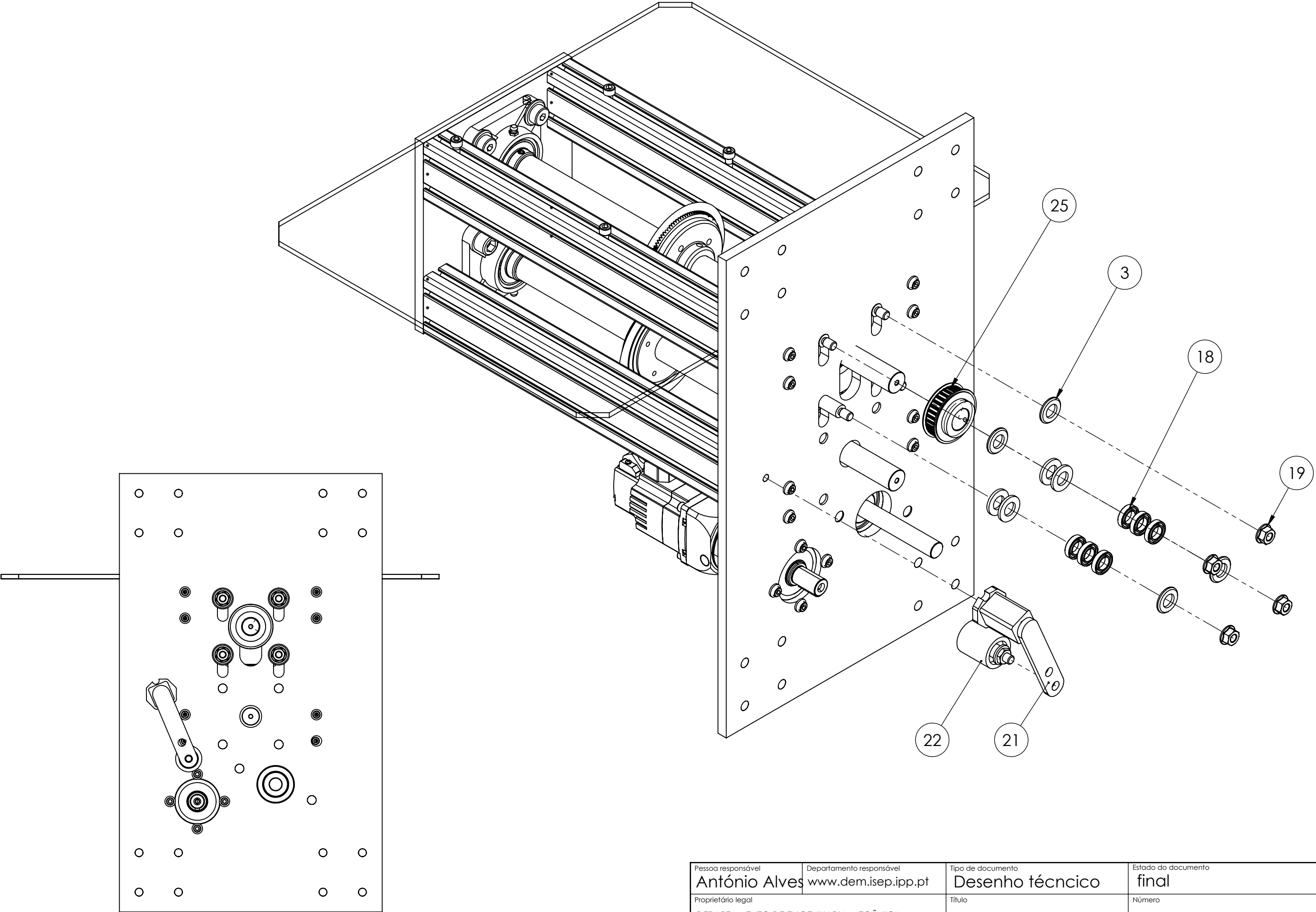
ESCALA
1:5

Pessoa responsável António Alves		Departamento responsável www.dem.isep.ipp.pt	Tipo de documento Desenho técnico		Estado do documento final	
Proprietário legal <i>DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431 4200-072 Porto</i>			Título Montagem do sistema de corte		Número	
					Revisão	Data de edição 09/09/2024



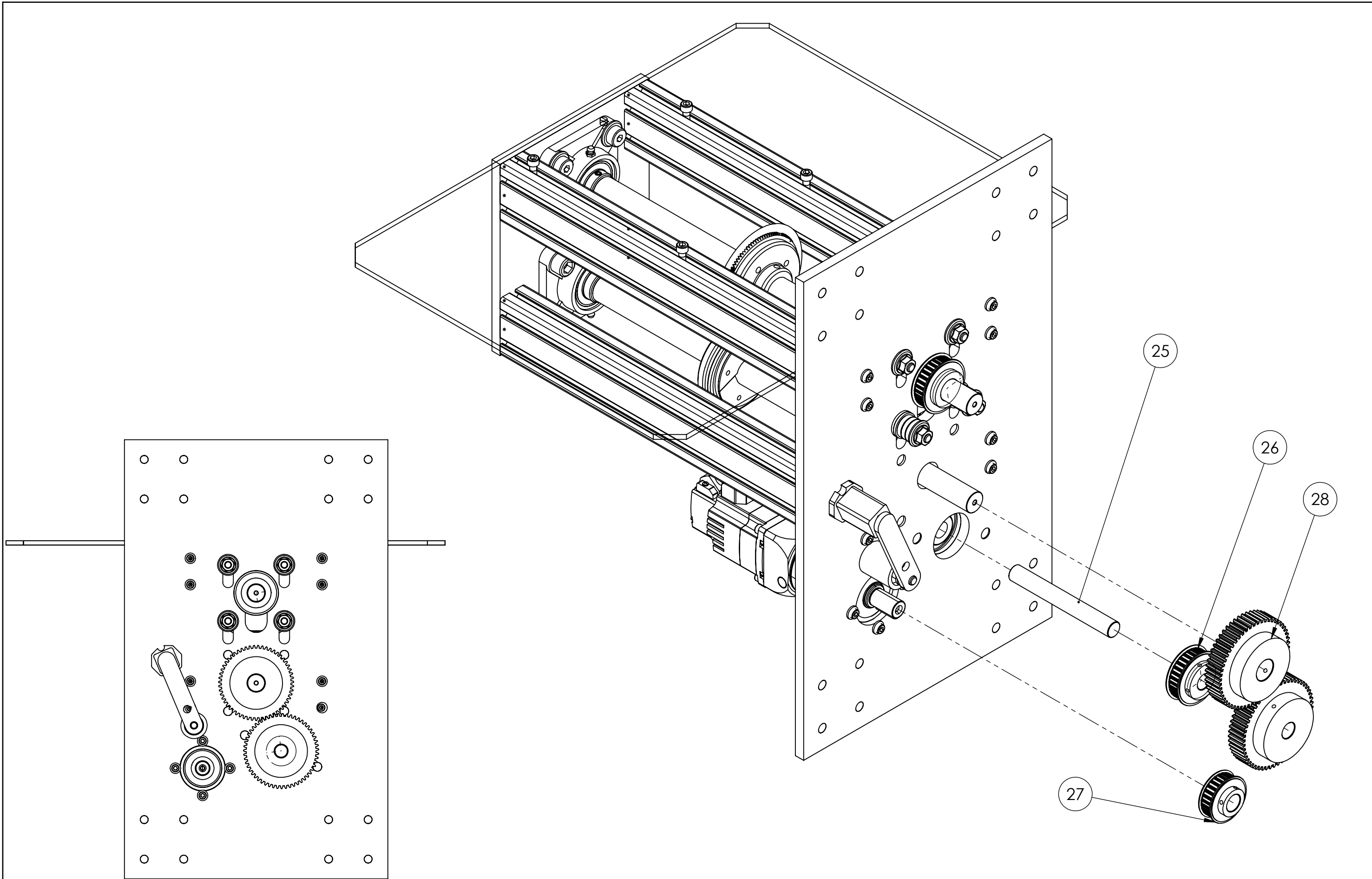
ESCALA
1:5

Pessoa responsável	Departamento responsável	Tipo de documento		Estado do documento			
António Alves	www.dem.isep.ipp.pt	Desenho técnico		final			
Proprietário legal		Título		Número			
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431 4200-072 Porto		Montagem do sistema de corte		Revisão	Data de edição	Língua	Folha
					09/09/2024	PT	4/7



ESCALA
1:5

Pessoa responsável António Alves		Departamento responsável www.dem.isep.ipp.pt	Tipo de documento Desenho técnico		Estado do documento final	
Proprietário legal <i>DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431 4200-072 Porto</i>			Título Montagem do sistema de corte		Número	
					Revisão	Data de edição 09/09/2024



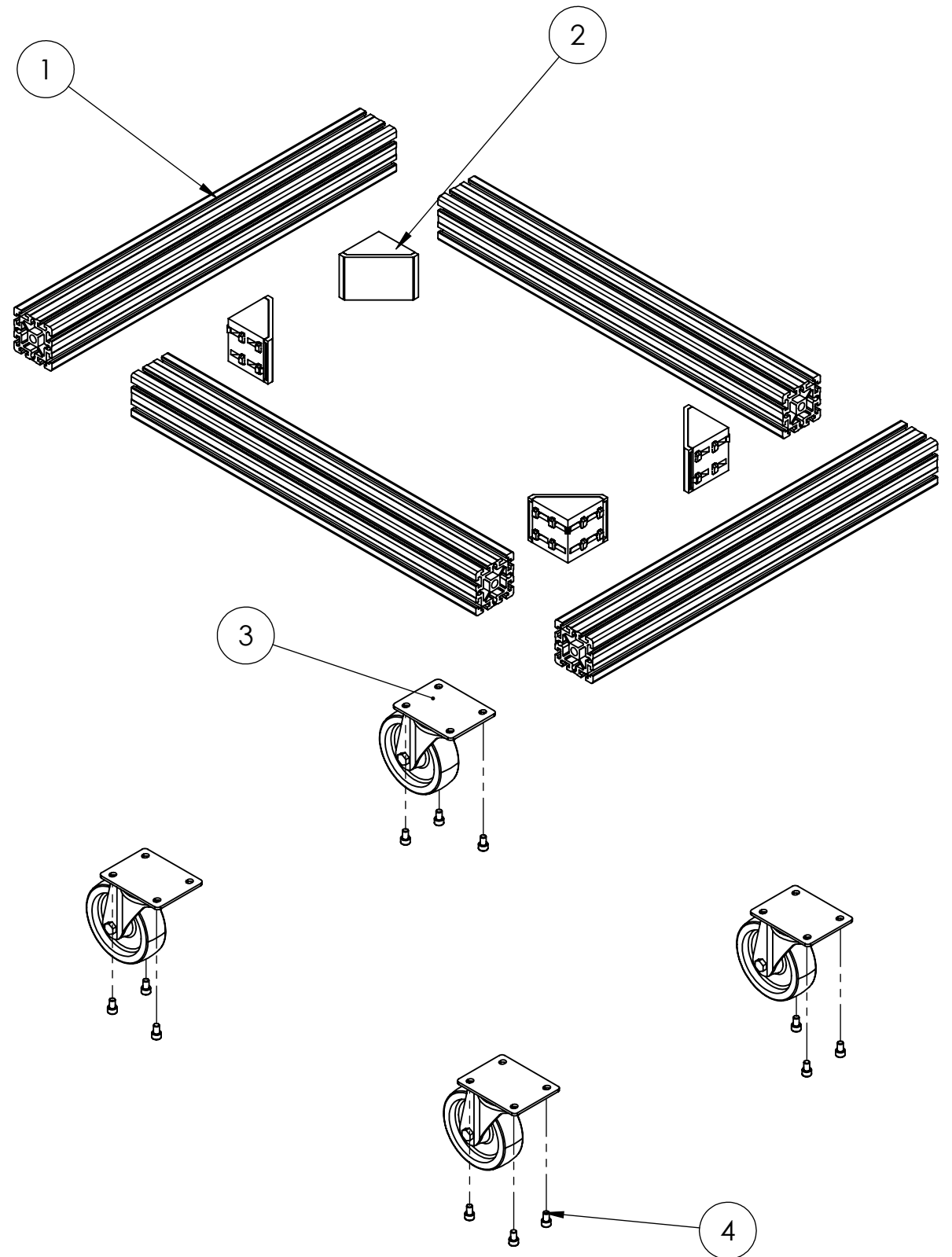
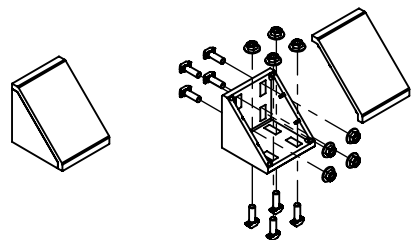
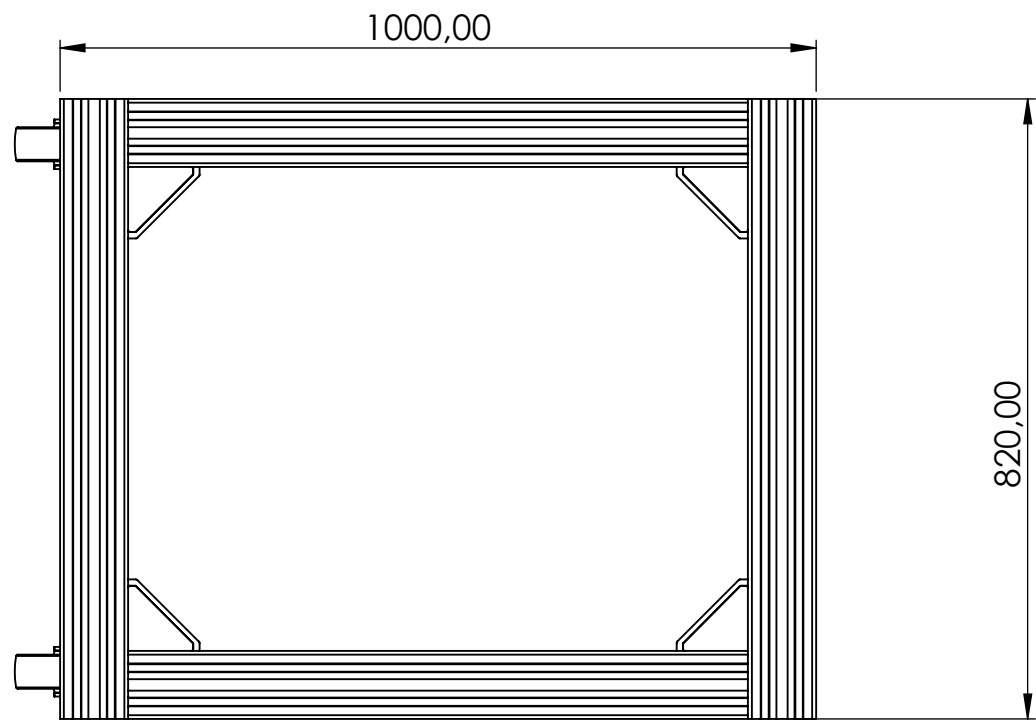
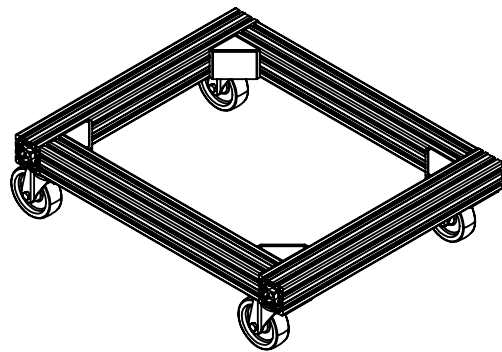
ESCALA
1:5

Pessoa responsável	Departamento responsável	Tipo de documento		Estado do documento			
António Alves	www.dem.isep.ipp.pt	Desenho técnico		final			
Proprietário legal		Título		Número			
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431 4200-072 Porto		Montagem do sistema de corte		Revisão	Data de edição	Língua	Folha
					09/09/2024	PT	6/7

Nº Componente	Descrição	Quantidade
1	Chapa de suporte do lado motorizado	1
2	Mancal - NORELEM 24210-20204	4
3	Anilha ISO 7090 - M12 - A200	16
4	Parafuso NORELEM MSB12 - 45	2
5	Parafuso ISO 4762 - M12 x 20 - 12.9	8
6	Mancal - NORELEM 24215-15202	1
7	Parafuso ISO 4762 - M6 x 12 - 12.9	16
8	Perfil 60 x 30 x 417 mm - NORELEM 10025-063060X417	4
9	Veio das facas - MISUMI FPSSFJEE-D25-L350-F100-M5-T30-N5-P20-Q20	2
10	Conjunto de acoplamento das facas	
11	Conjunto de acoplamento das contrafacas	
12	Parafuso ISO 4762 - M5 x 12 - 12.9	6
13	Acrílico de proteção	1
14	Chapa de suporte do lado não motorizado	1
15	Porcas EN ISO 7 - M12 - 8.8	4
16	Anilha ISO 7089 - M6 - A200	16
17	Anilha ISO 7089 - M12 - A200	8
18	Rolamento - MISUMI 6801VV	6
19	Porcas EN ISO 7 - M8 - 8.8	4
20	Anilha ISO 7089 - M5 - A200	4
21	Tensionador - NORELEM 22281-10-1	1
22	Rolo do Tensionador - NORELEM 22102-30035	1
23	Servomotor com redutor	1
24	Parafuso ISO 4762 - M5 x 16 - 12.9	4
25	Veio da polia M15 x 125 -MISUMI SSFU15-120	1
26	Polia - MISUMI 22003-051030	2
27	Polia - MISUMI 22003-26	1
28	Roda dentada - NORELEM 22400-0115170055	2

ESCALA
1:2

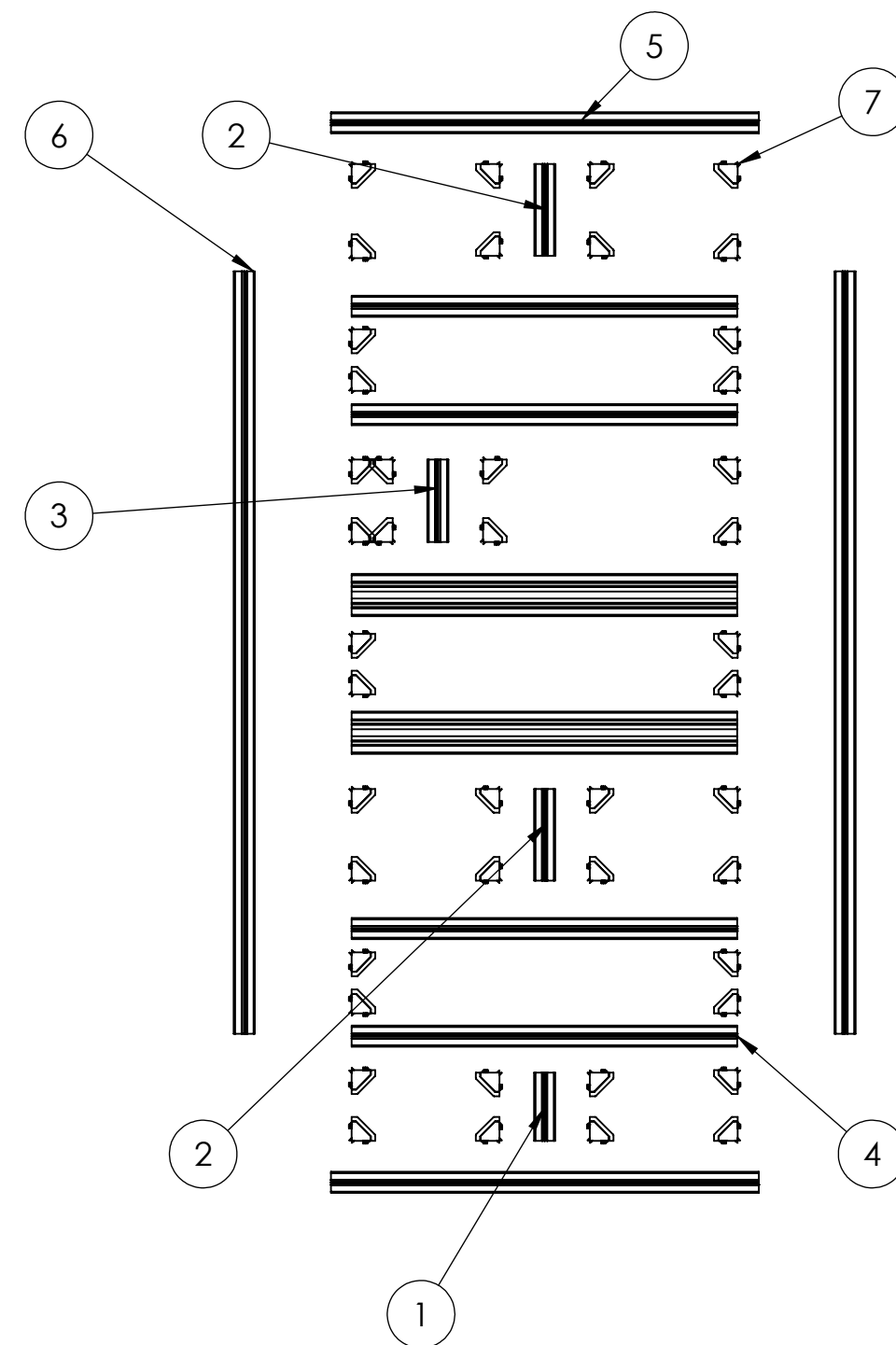
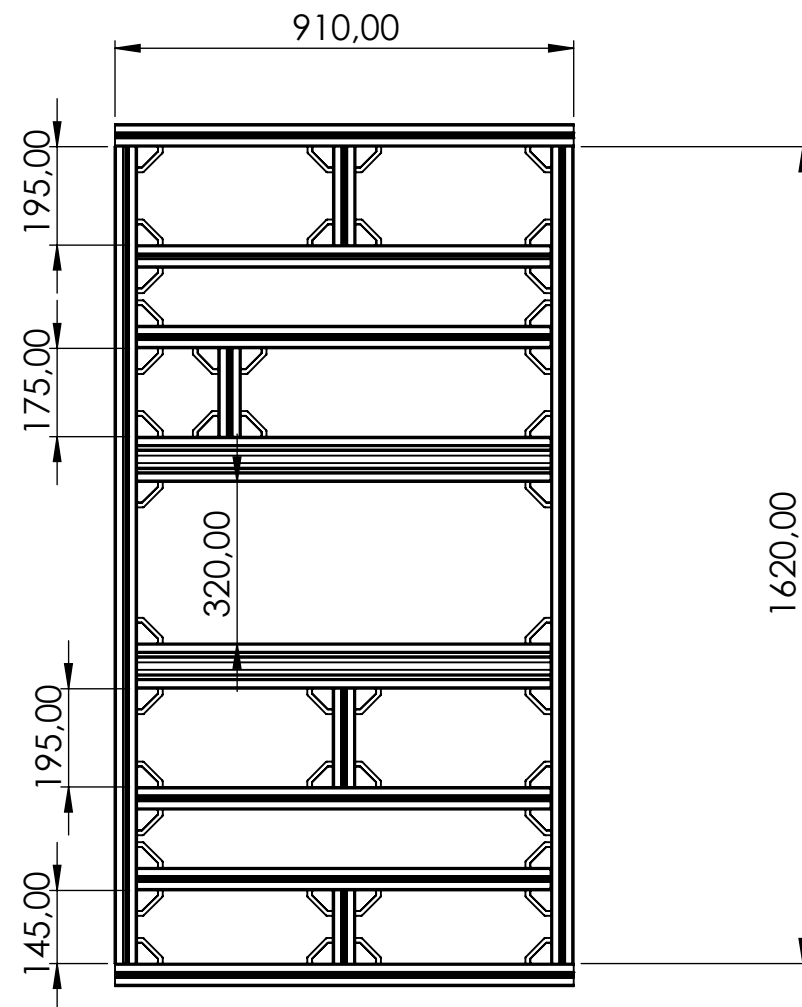
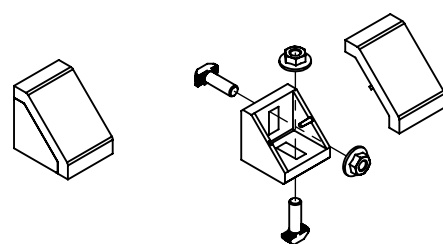
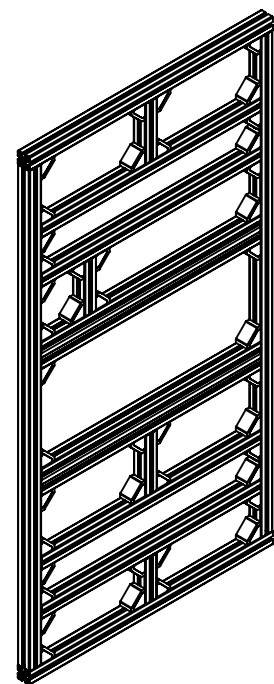
Pessoa responsável	Departamento responsável	Tipo de documento		Estado do documento			
António Alves	www.dem.isep.ipp.pt	Desenho técnico		final			
Proprietário legal		Título		Número			
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431 4200-072 Porto		Montagem do sistema de corte		Revisão	Data de edição	Língua	Folha
					09/09/2024	PT	7/7



Nº Componente	Descrição	Quantidade
1	Perfil 90 x 90 x 820 mm - NORELEM 10160-109090X814	4
2	Cantoneira perfil - NORELEM 10157-104545X1000	4
3	Rodas RS 171-8318	4
4	Parafuso ISO 4762 - M8 x 20 - 12.9	12

ESCALA
1:20

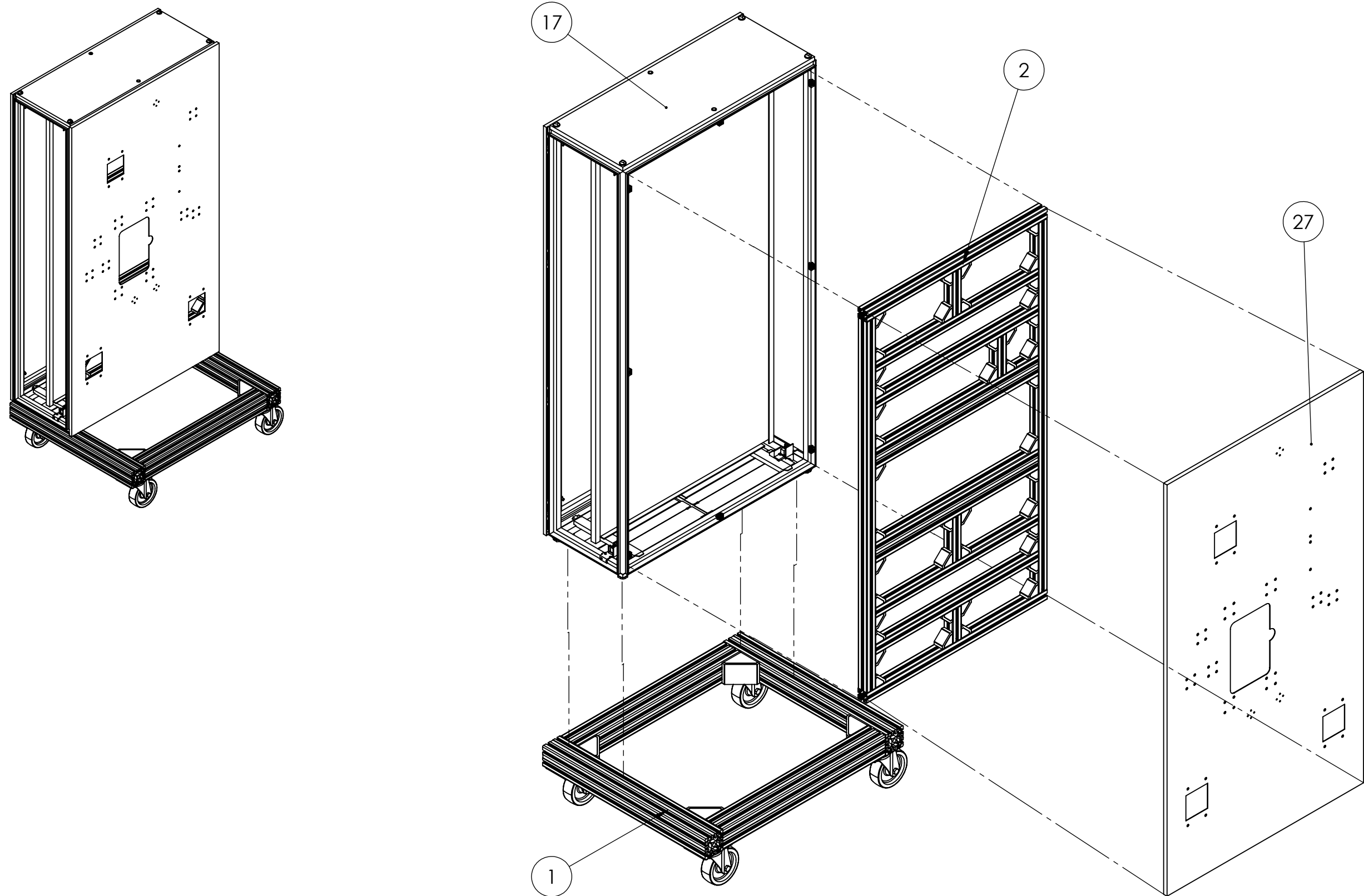
Pessoa responsável António Alves	Departamento responsável www.dem.isep.ipp.pt	Tipo de documento Desenho técnico	Estado do documento final			
Proprietário legal <i>DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431 4200-072 Porto</i>		Título Estrutura do equipamento	Número			
Revisão	Data de edição 09/09/2024	Língua PT	Folha 1/4			



Nº Componente	Descrição	Quant.
1	Perfil 45 x 45 x 145 mm - NORELEM 10157-104545X1000	1
2	Perfil 45 x 45 x 195 mm - NORELEM 10157-104545X1000	2
3	Perfil 45 x 45 x 175 mm - NORELEM 10157-104545X1000	1
4	Perfil 45 x 45 x 820 mm - NORELEM 10157-104545X1000	4
5	Perfil 45 x 45 x 910 mm - NORELEM 10157-104545X1000	2
6	Perfil 45 x 45 x 1620 mm - NORELEM 10157-104545X1000	2
7	Cantoneira para perfis - NORELEM 10252-104545	2

ESCALA
1:10

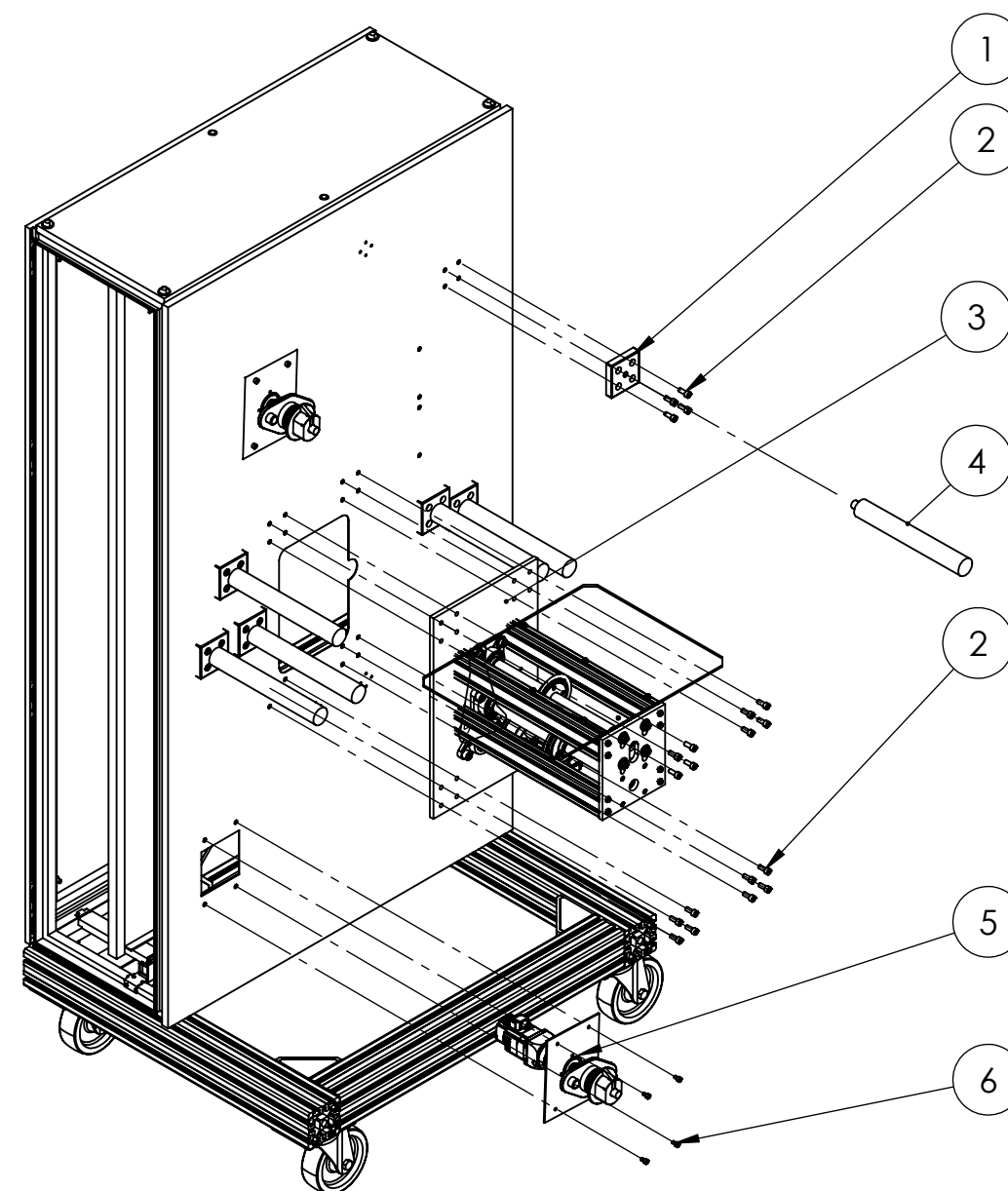
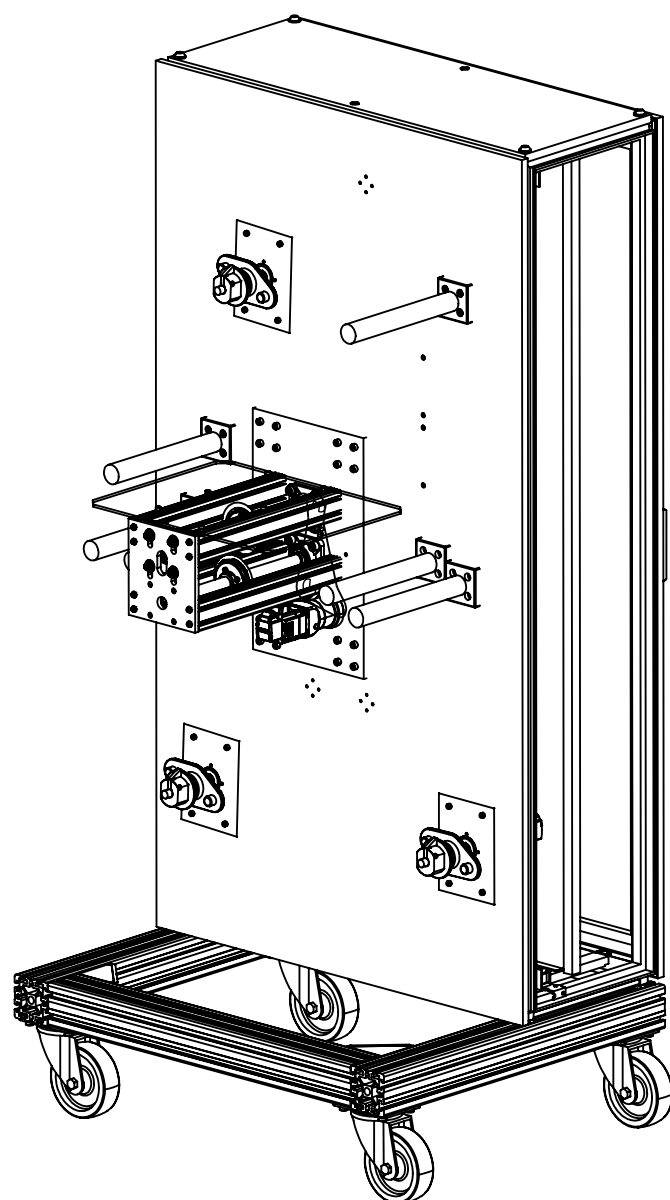
Pessoa responsável António Alves	Departamento responsável www.dem.isep.ipp.pt	Tipo de documento Desenho técnico	Estado do documento final			
Proprietário legal <i>DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431 4200-072 Porto</i>		Título Estrutura do equipamento		Número		
				Revisão	Data de edição 09/09/2024	Língua PT
				Folha 2/4		



Nº Componente	Descrição	Quantidade
1	Base	1
2	Armário - BIFASE 8084000	1
3	Travessas do armário	1
4	Chapa do armário	1

ESCALA
1:15

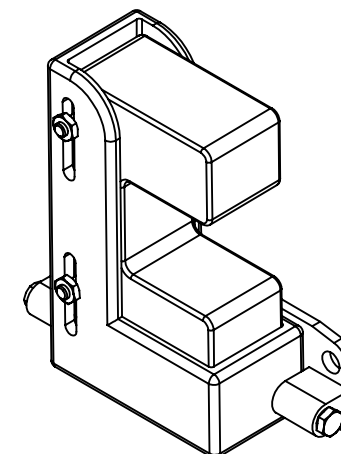
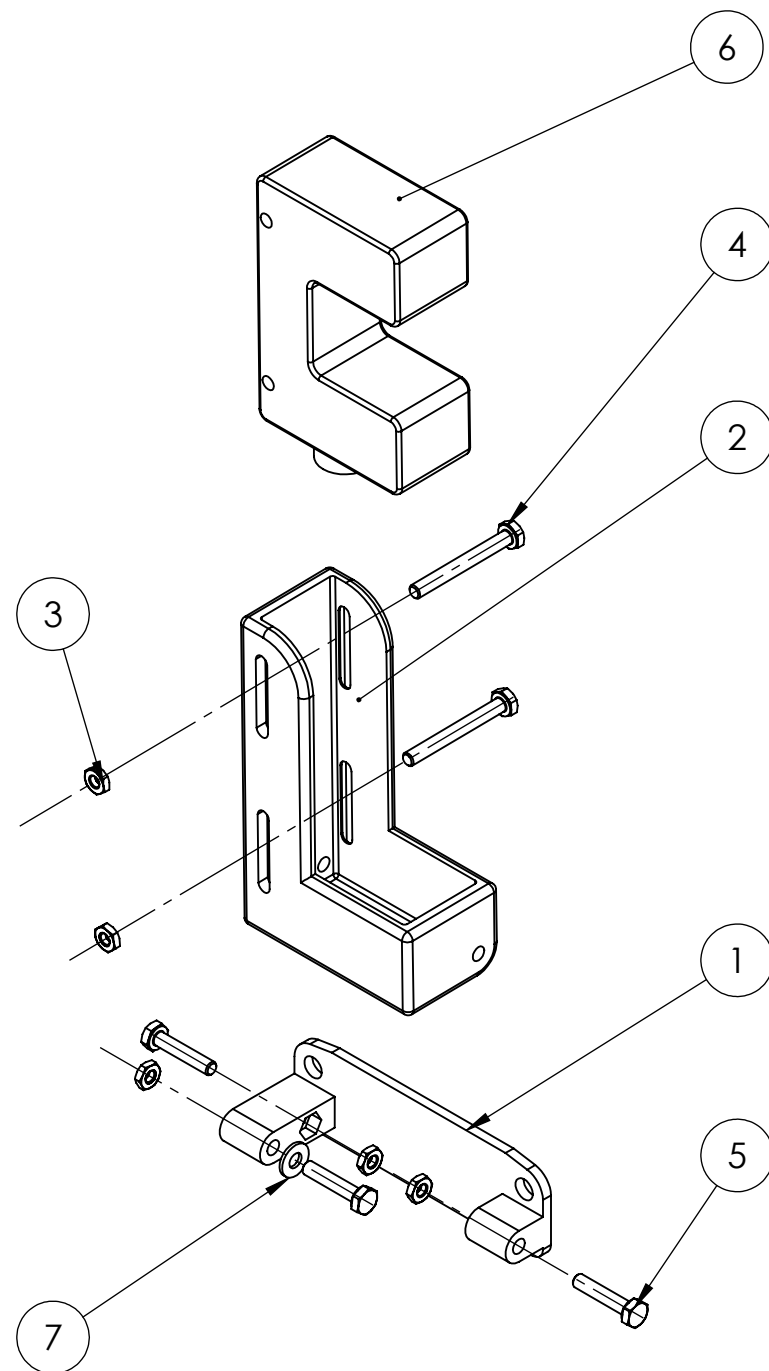
Pessoa responsável António Alves	Departamento responsável www.dem.isep.ipp.pt	Tipo de documento Desenho técnico	Estado do documento final			
Proprietário legal <i>DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431 4200-072 Porto</i>		Título Estrutura do equipamento	Número Desenho 2020..			
Revisão	Data de edição 09/09/2024	Língua PT	Folha 3/4			



Nº Componentes	Descrição	Quantidade
1	Base dos rolos - NORELEM 10347-0880801121	6
2	Parafuso ISO 4762 - M8 x 20 - 12.9	36
3	Sistema de corte	1
4	Rolo - COMETO RU140X300	6
5	Sistema de suporte da bobine	3
6	Parafuso ISO 4762 - M6 x 12 - 12.9	12

ESCALA
1:15

Pessoa responsável António Alves	Departamento responsável www.dem.isep.ipp.pt	Tipo de documento Desenho técnico	Estado do documento final			
Proprietário legal <i>DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431 4200-072 Porto</i>		Título Estrutura do equipamento		Número Desenho 2020..		
		Revisão	Data de edição 09/09/2024	Língua PT	Folha 4/4	

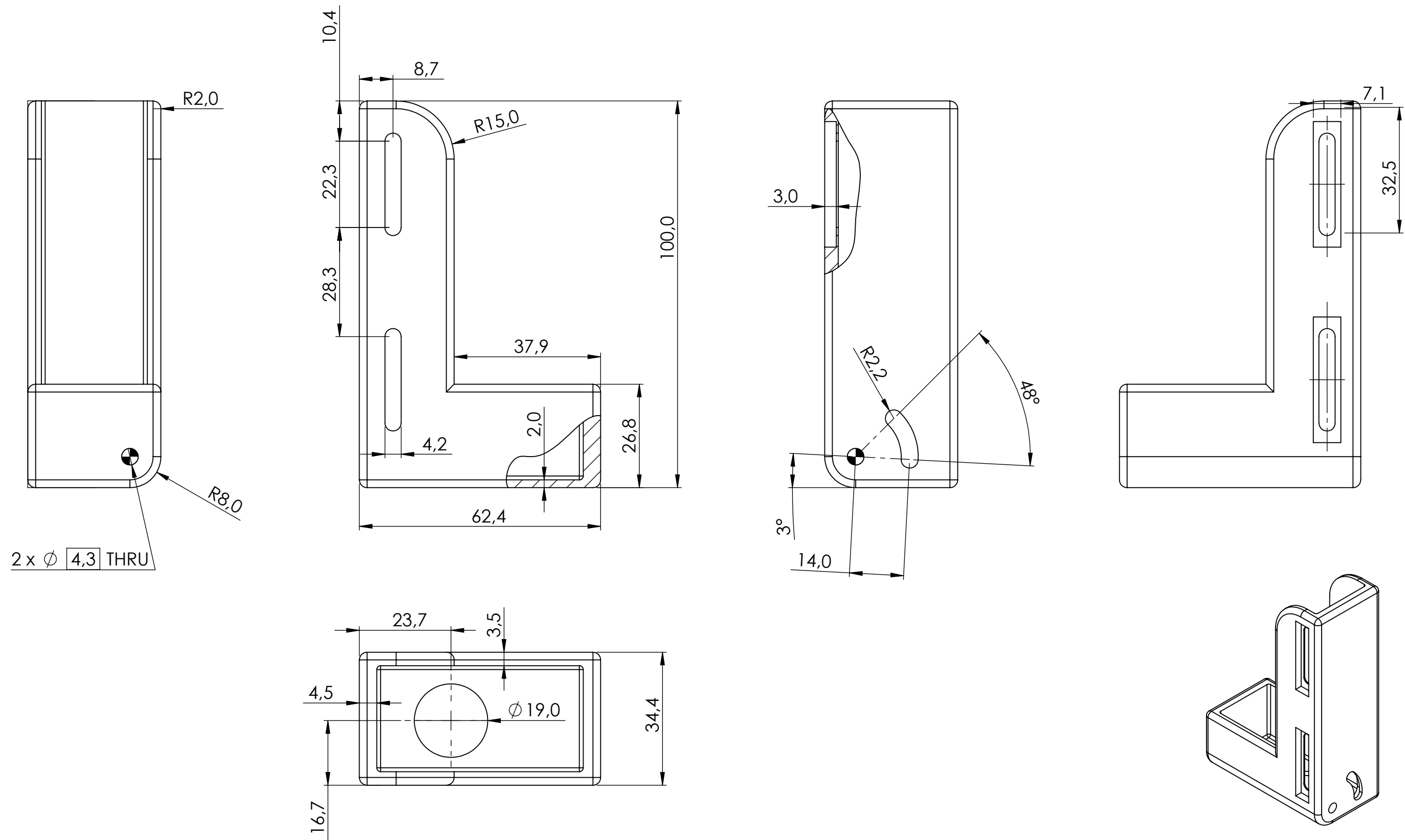


ISO 2768 mK

Nº Componente	Descrição	Quantidade
1	Peça fixadora	1
2	Peça suporte	1
3	Porca ISO - 4035 - M4 - 8	5
4	Parafuso ISO 4017 - M4 x 35 - 8.8	2
5	Parafuso 4762 - M4 x 20 - 8.8	3
6	Sensor ultrassónico	1
7	Parafuso ISO 4017 - M4 x 20 - 8.8	1

Pessoa responsável	Departamento responsável	Tipo de documento		Estado do documento			
António Alves	www.dem.isep.ipp.pt	Desenho técnico		final			
Proprietário legal		Título		Número			
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431 4200-072 Porto		Sistema de fixação do sensor - Montagem		Revisão	Data de edição	Língua	Folha
					09/09/2024	PT	1/3

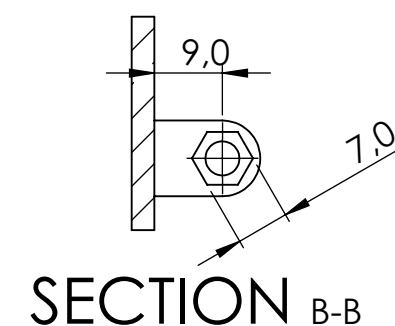
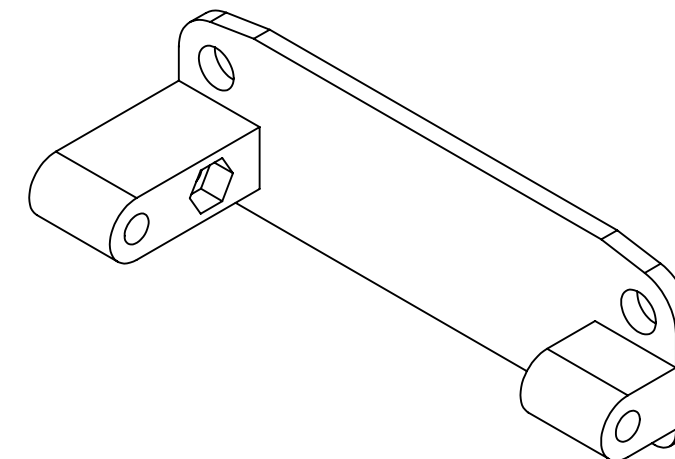
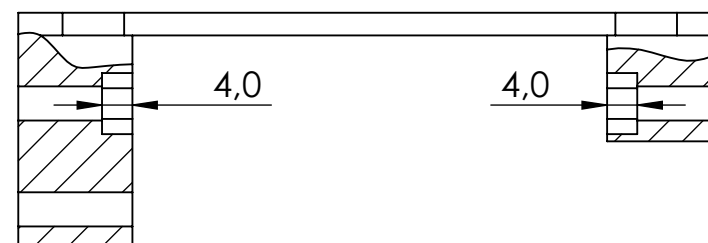
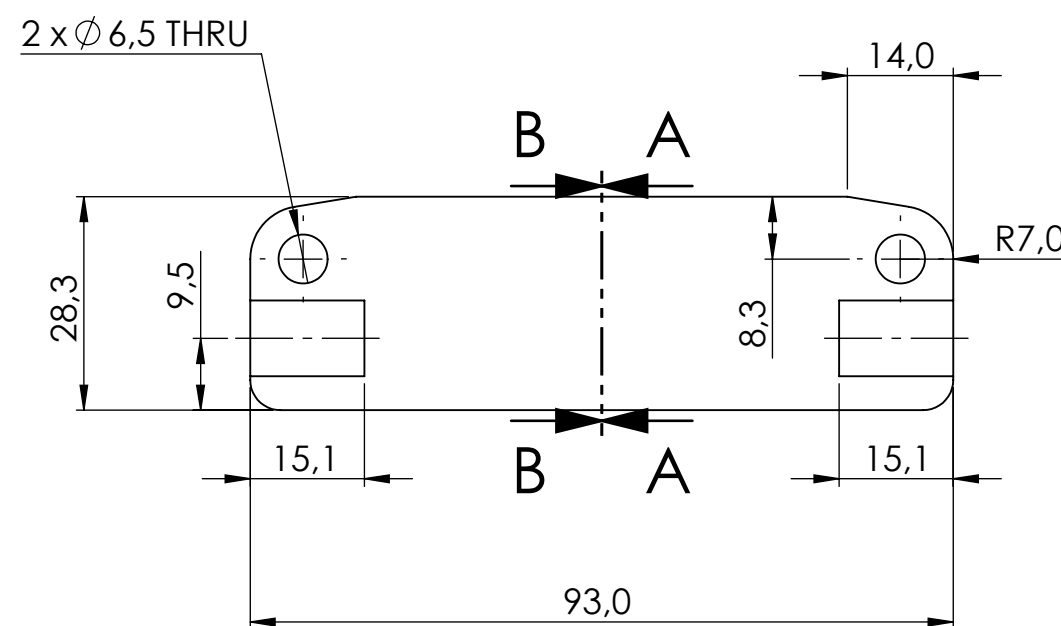
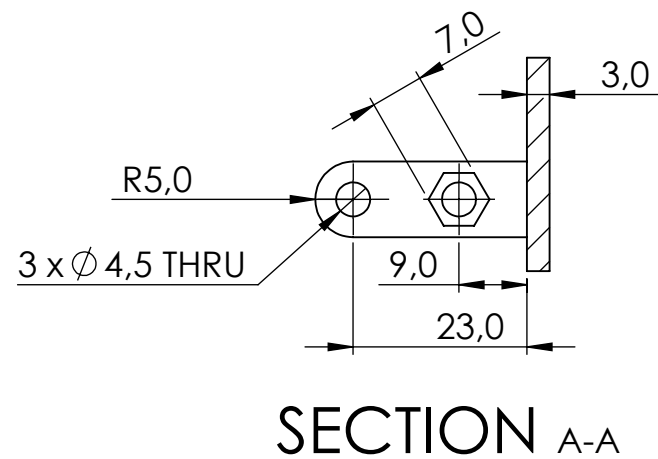
ESCALA
1:2



ESCALA
1:1

ISO 2768 mK

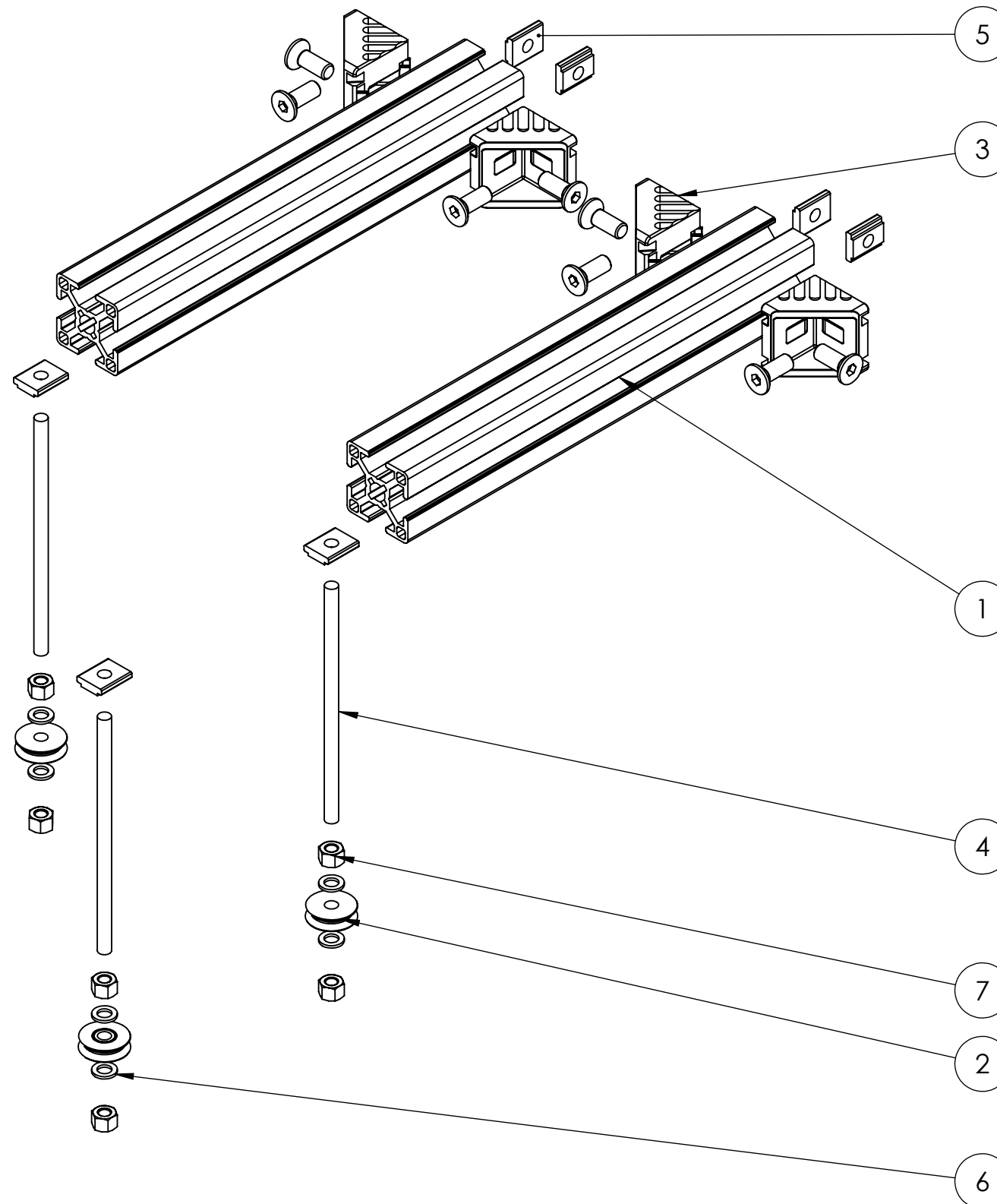
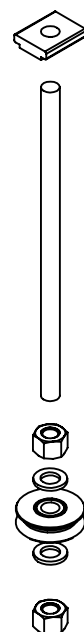
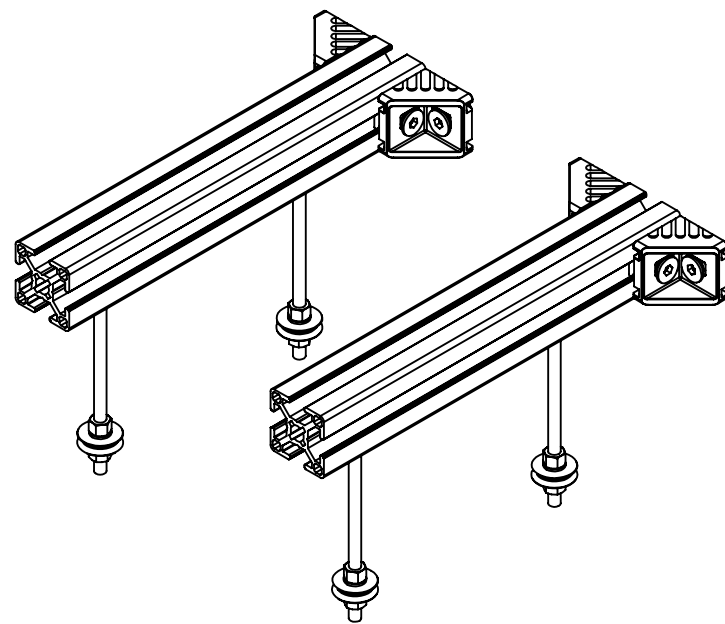
Pessoa responsável António Alves	Departamento responsável www.dem.isep.ipp.pt	Tipo de documento Desenho Técnico	Estado do documento final			
Proprietário legal <i>DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431 4200-072 Porto</i>		Título Sistema de fixação do sensor - Peça suporte		Número		
		Revisão	Data de edição 09/09	Língua PT	Folha 2/3	



ESCALA
1:1

ISO 2768 mK

Pessoa responsável António Alves	Departamento responsável www.dem.isep.ipp.pt	Tipo de documento Desenho Técnico	Estado do documento final			
Proprietário legal <i>DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431 4200-072 Porto</i>		Título Sistema de fixação do sensor - Peça fixadora	Número			
			Revisão	Data de edição 09/09/2024	Língua PT	Folha 3/3

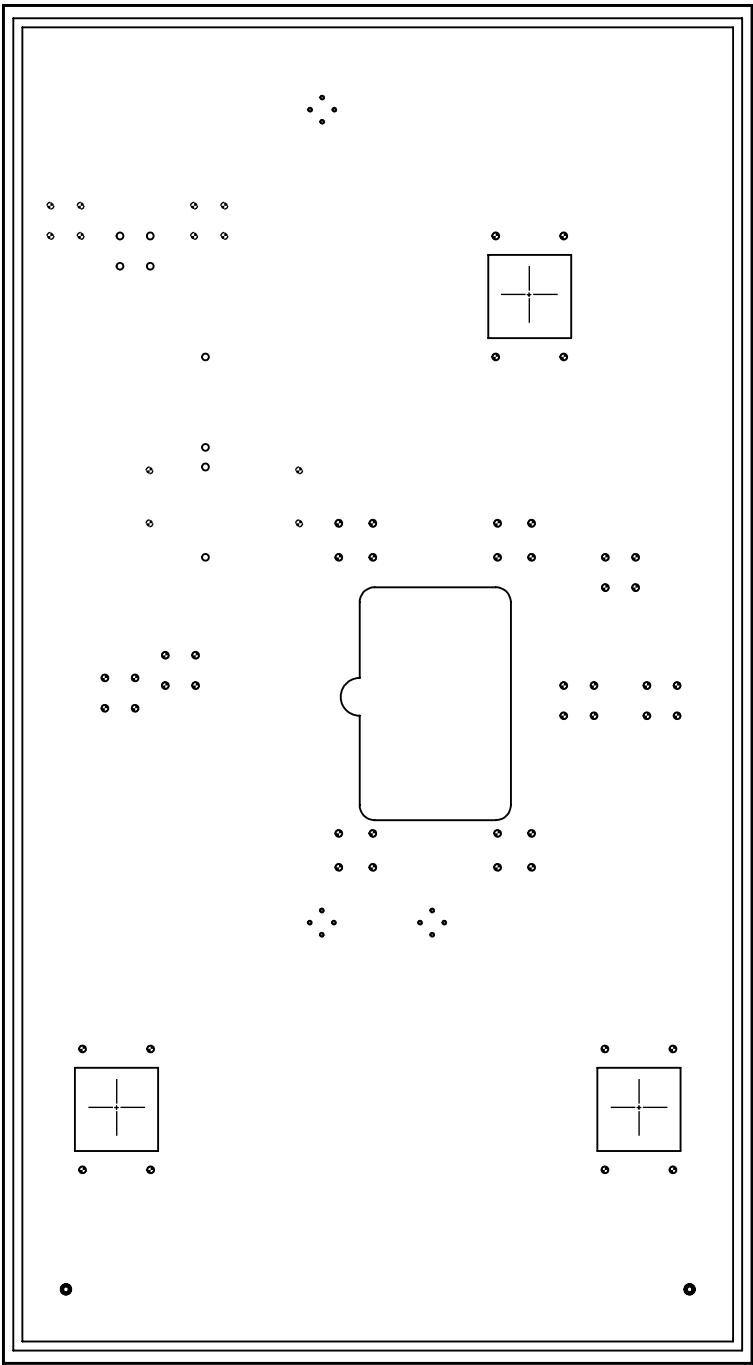
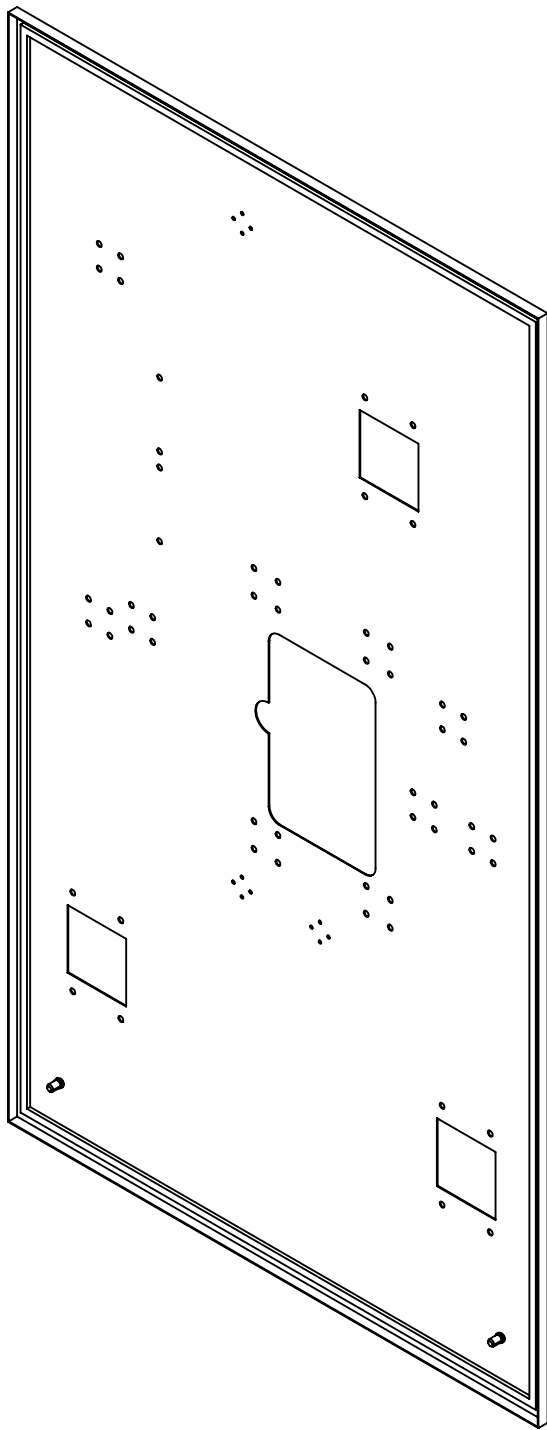


Nº componente	Descrição	Quantidade
1	Perfil BOSCH 30 x 30 x 200 mm	2
2	Rolamentos c/ ranhura em V - MISUMI SZV6-16	4
3	Cantoneira de perfil BOSCH 30	4
4	Vareta roscada M5 x 100	4
5	Porca em T M5 - NORELEM 07077-1005	6
6	Anilha ISO 7089 - M5 - A200	8
7	Porca ISO 4032 - M5 - 8	8

ESCALA
1:2

Pessoa responsável António Alves	Departamento responsável www.dem.isep.ipp.pt	Tipo de documento Desenho técnico	Estado do documento final			
Proprietário legal DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431 4200-072 Porto		Título Sistema de guiamento da fita		Número		
				Revisão	Data de edição 09/09/2024	Língua PT
						Folha 1/1

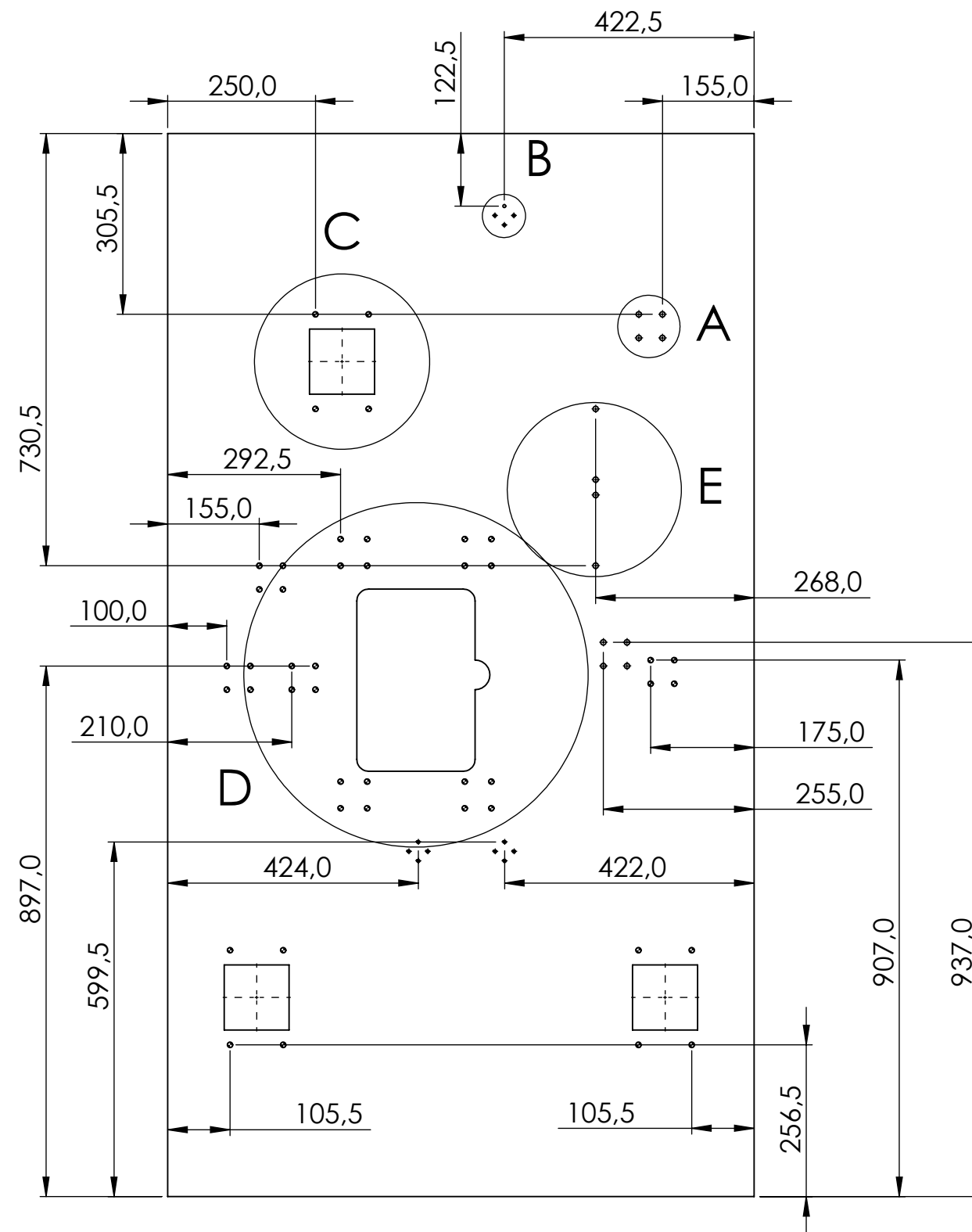
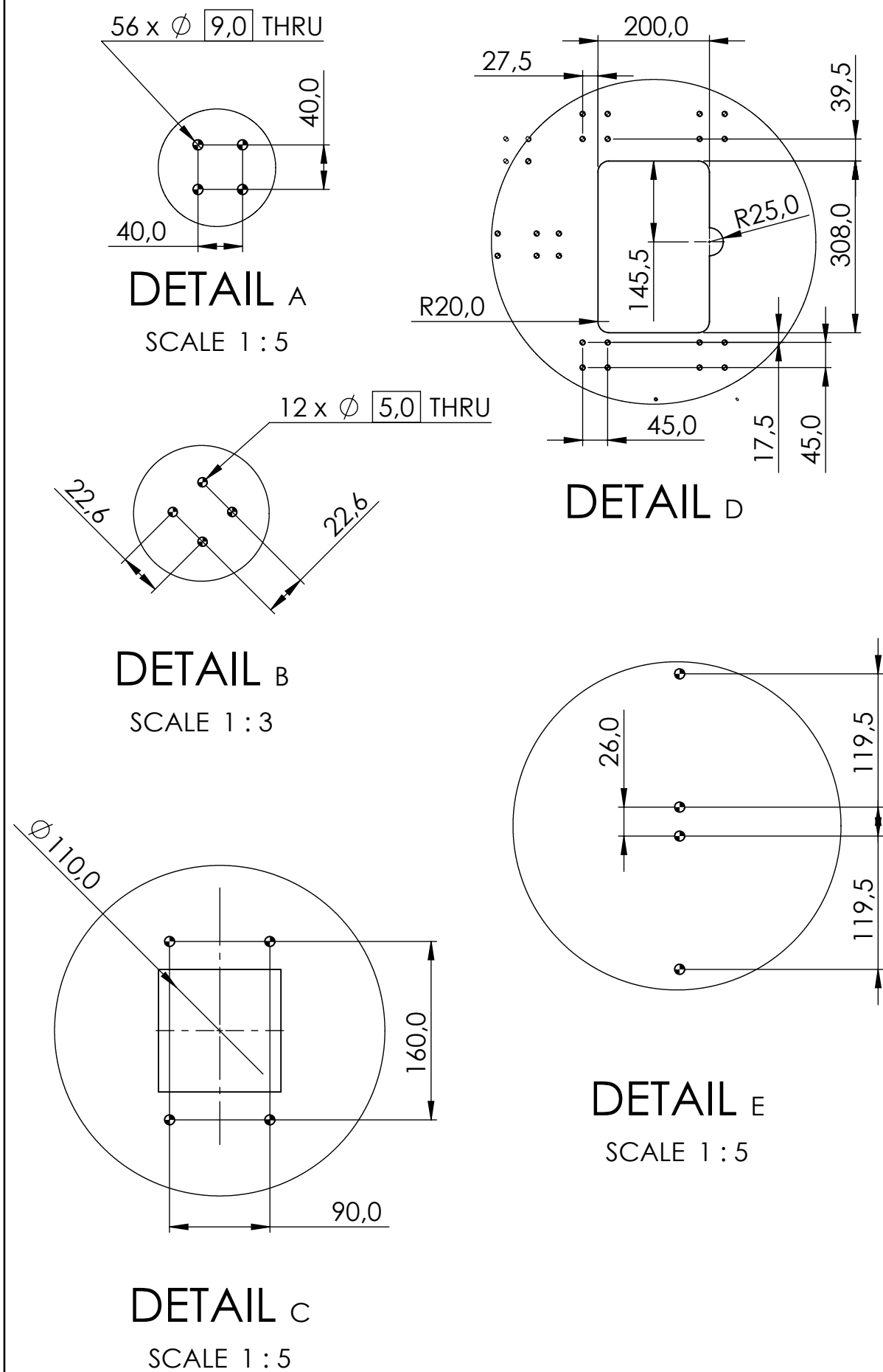
ISO 2768 mK



ESCALA
1:10

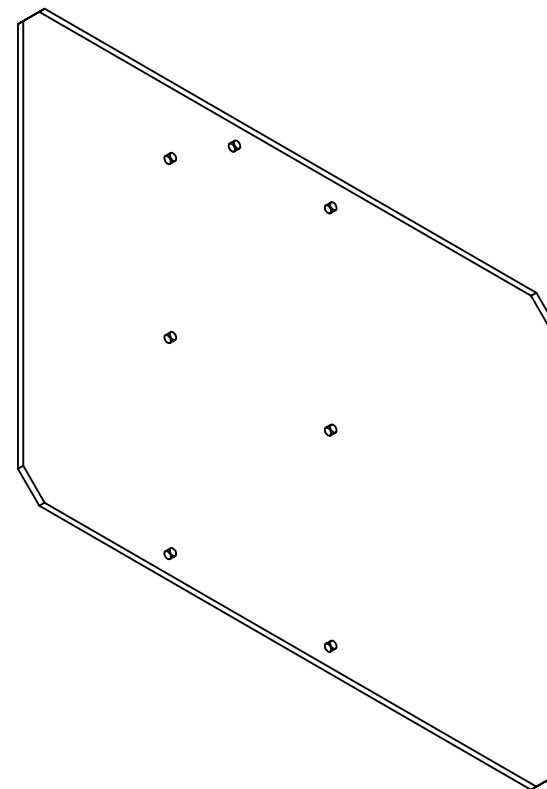
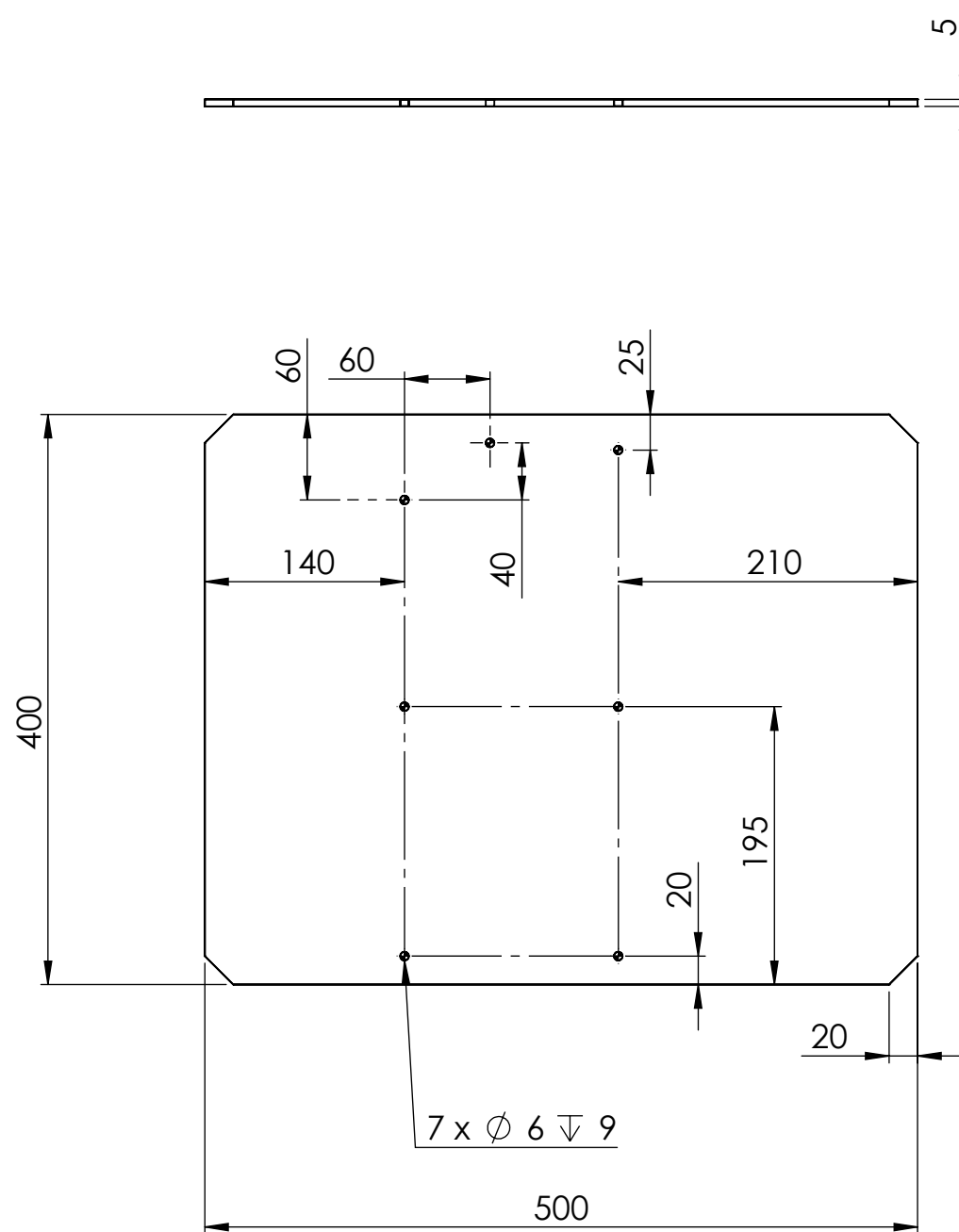
Tolerâncias gerais: ISO 2768 mK
ISO 8015

Pessoa responsável António Alves	Departamento responsável www.dem.isep.ipp.pt	Tipo de documento Desenho técnico	Estado do documento final		
Proprietário legal <i>DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431 4200-072 Porto</i>		Título Chapa do armário		Número	
			Revisão	Data de edição 09/09/2024	Língua PT
					Folha 1/2



ISO 2768 mK
ISO 8015

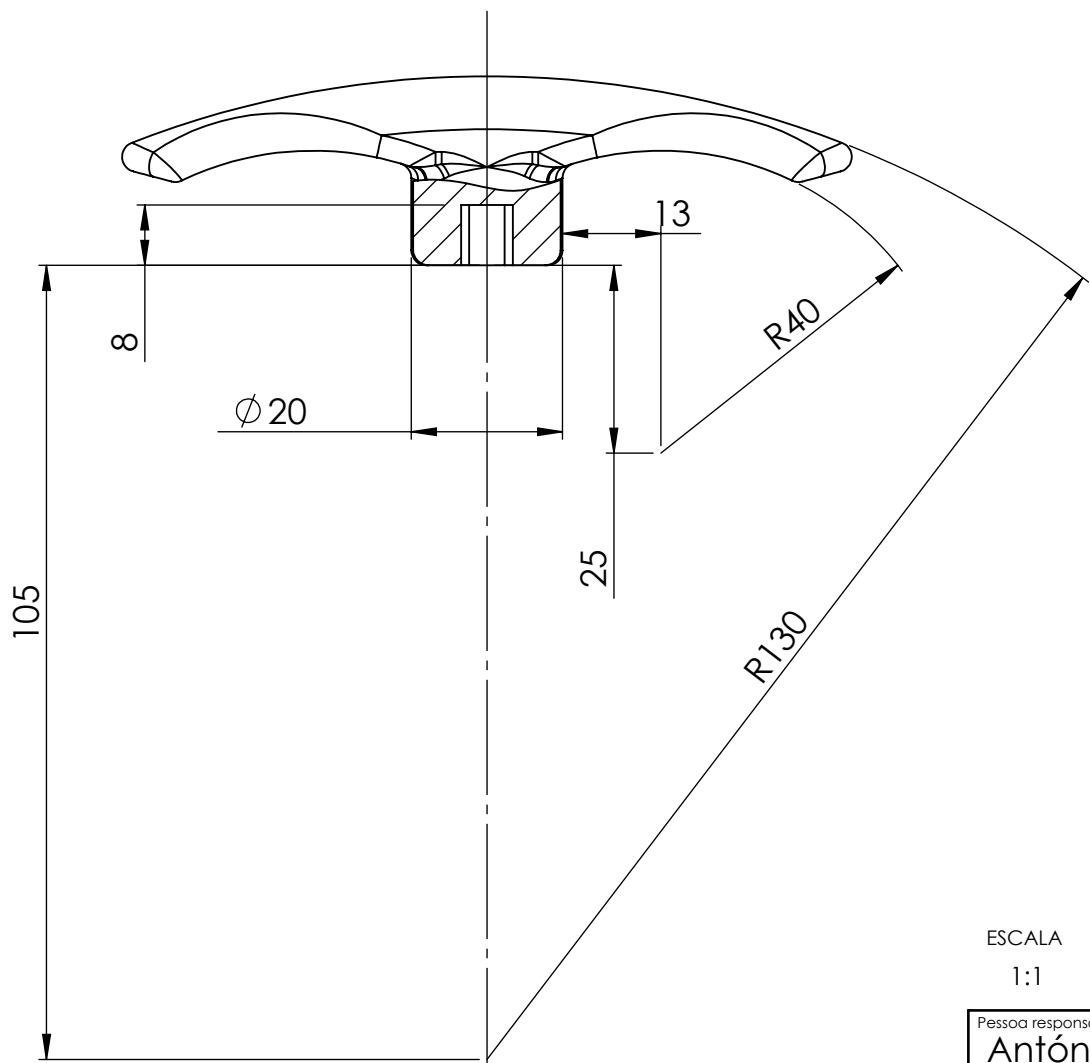
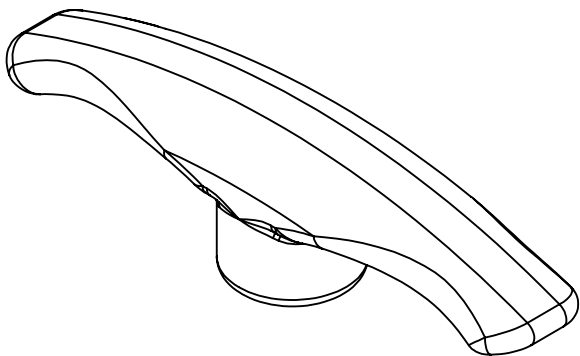
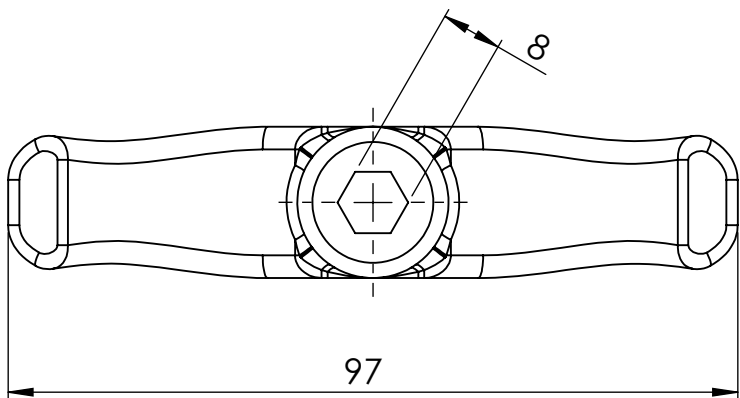
Pessoa responsável António Alves	Departamento responsável www.dem.isep.ipp.pt	Tipo de documento Desenho técnico	Estado do documento final			
Proprietário legal DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431 4200-072 Porto	Título Chapa do armário		Número			
		Revisão	Data de edição 09/09/2024	Língua PT	Folha 2/2	



ESCALA
1:5

ISO 2768 mK

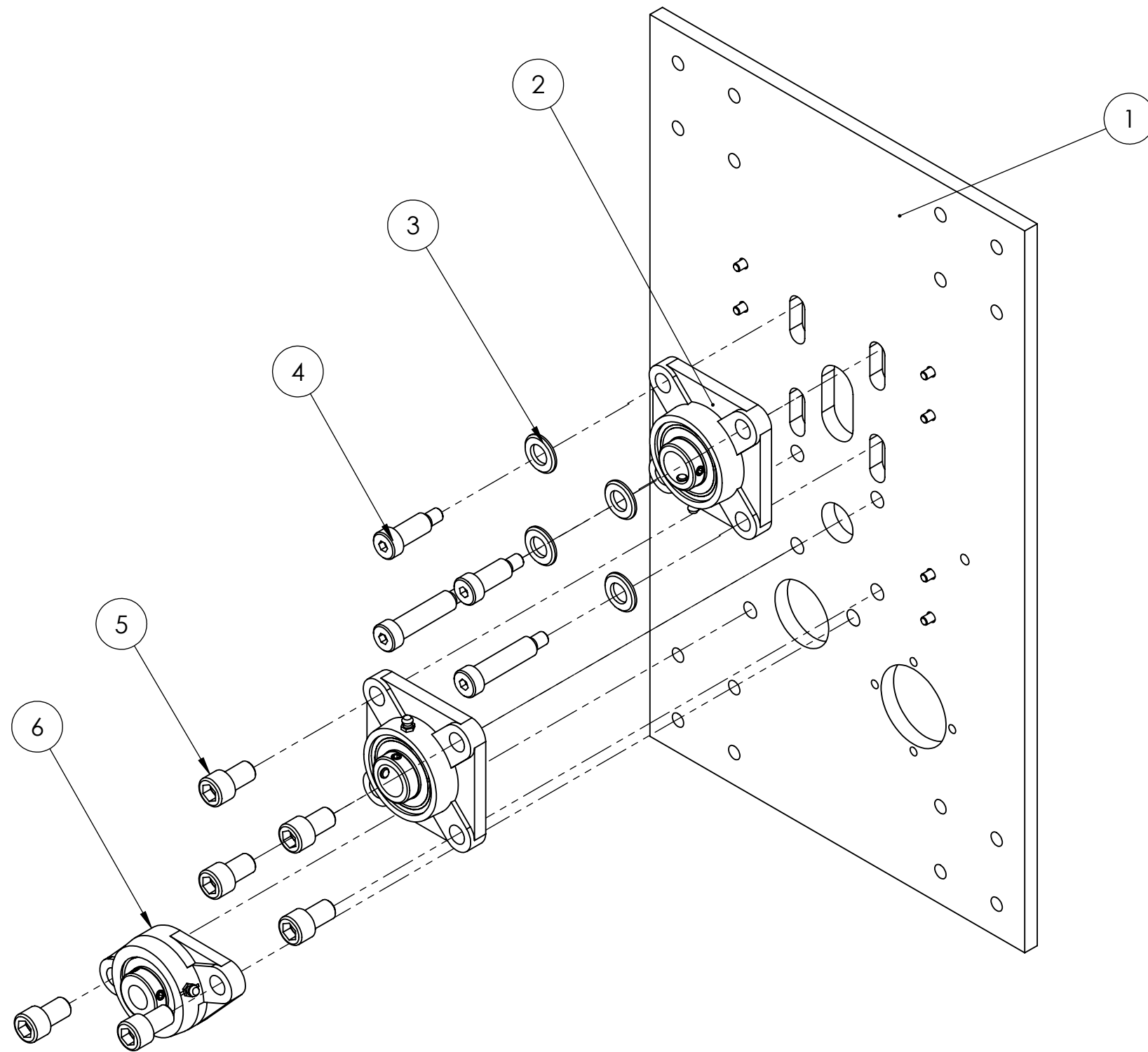
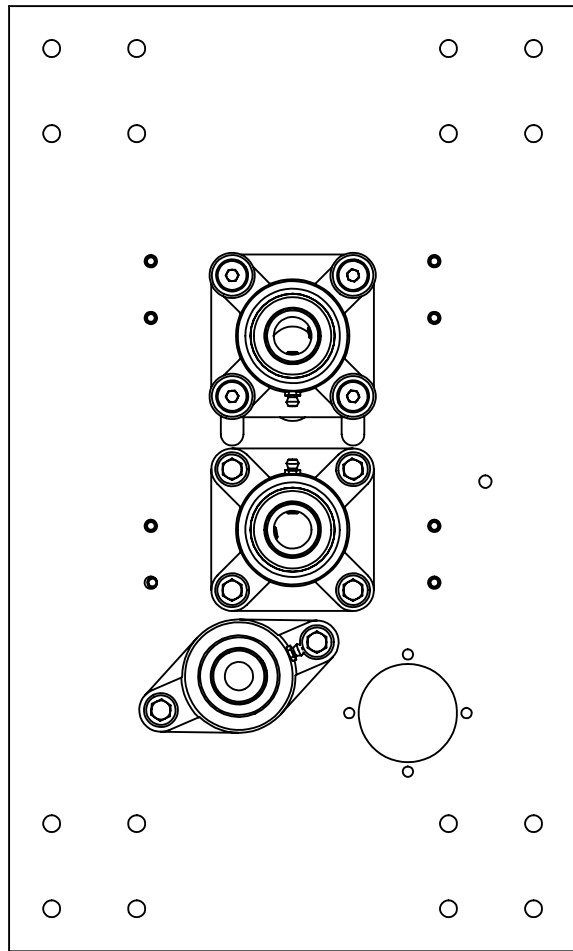
Pessoa responsável	Departamento responsável	Tipo de documento		Estado do documento	
António Alves	www.dem.isep.ipp.pt	Desenho Técnico		final	
Proprietário legal		Título		Número	
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431 4200-072 Porto		Acrílico de Proteção		Revisão	Data de edição
					09/09
				Língua	Folha
				PT	1/1



ESCALA
1:1

ISO 2768 mK

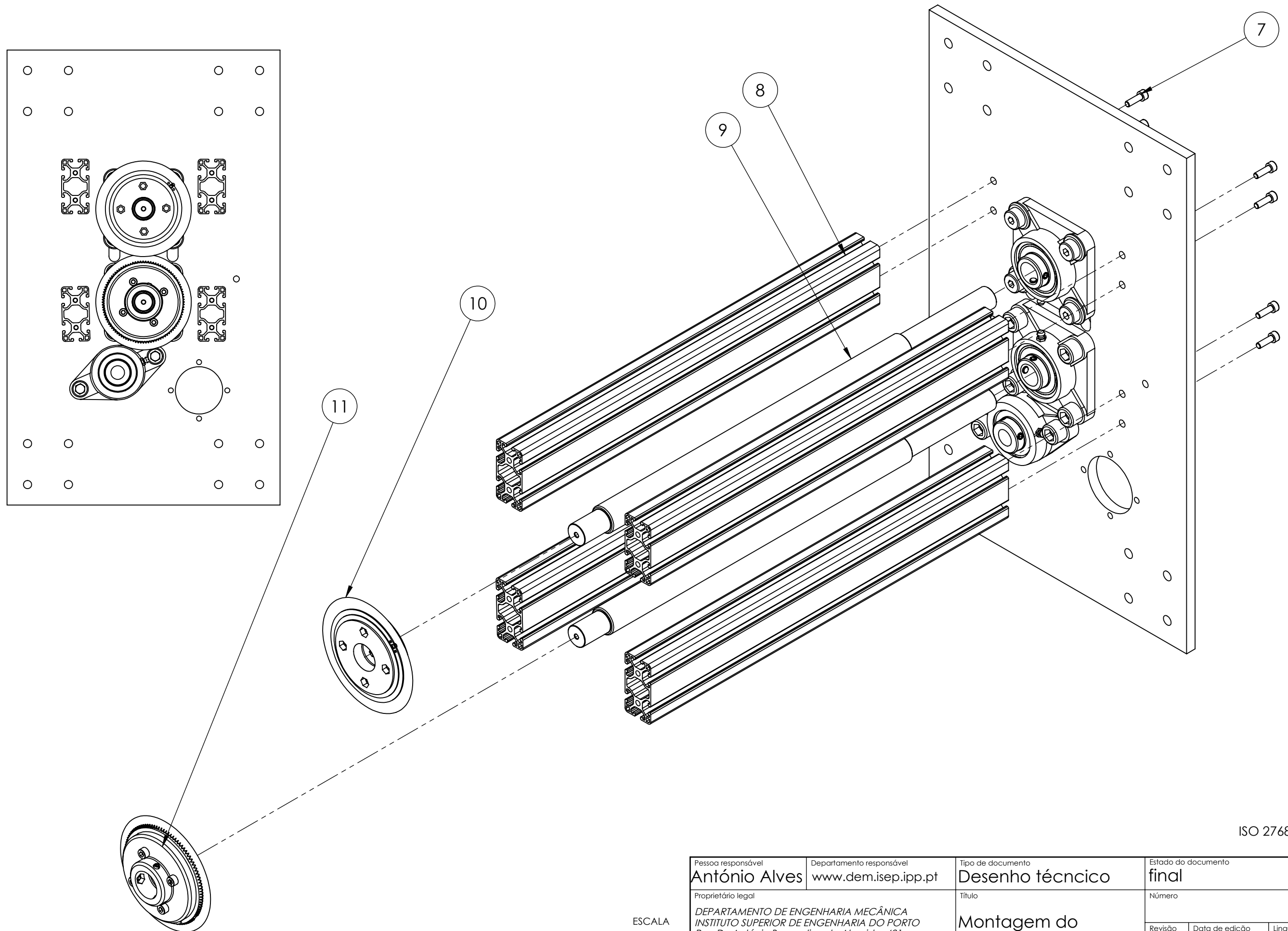
Pessoa responsável	Departamento responsável	Tipo de documento	Estado do documento			
António Alves	www.dem.isep.ipp.pt	Desenho Técnico	final			
Proprietário legal	DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431 4200-072 Porto		Número			
			Revisão	Data de edição	Língua	Folha
		Manivela do sistema de corte		09/09	PT	1/1



ISO 2768 mK

ESCALA
1:10

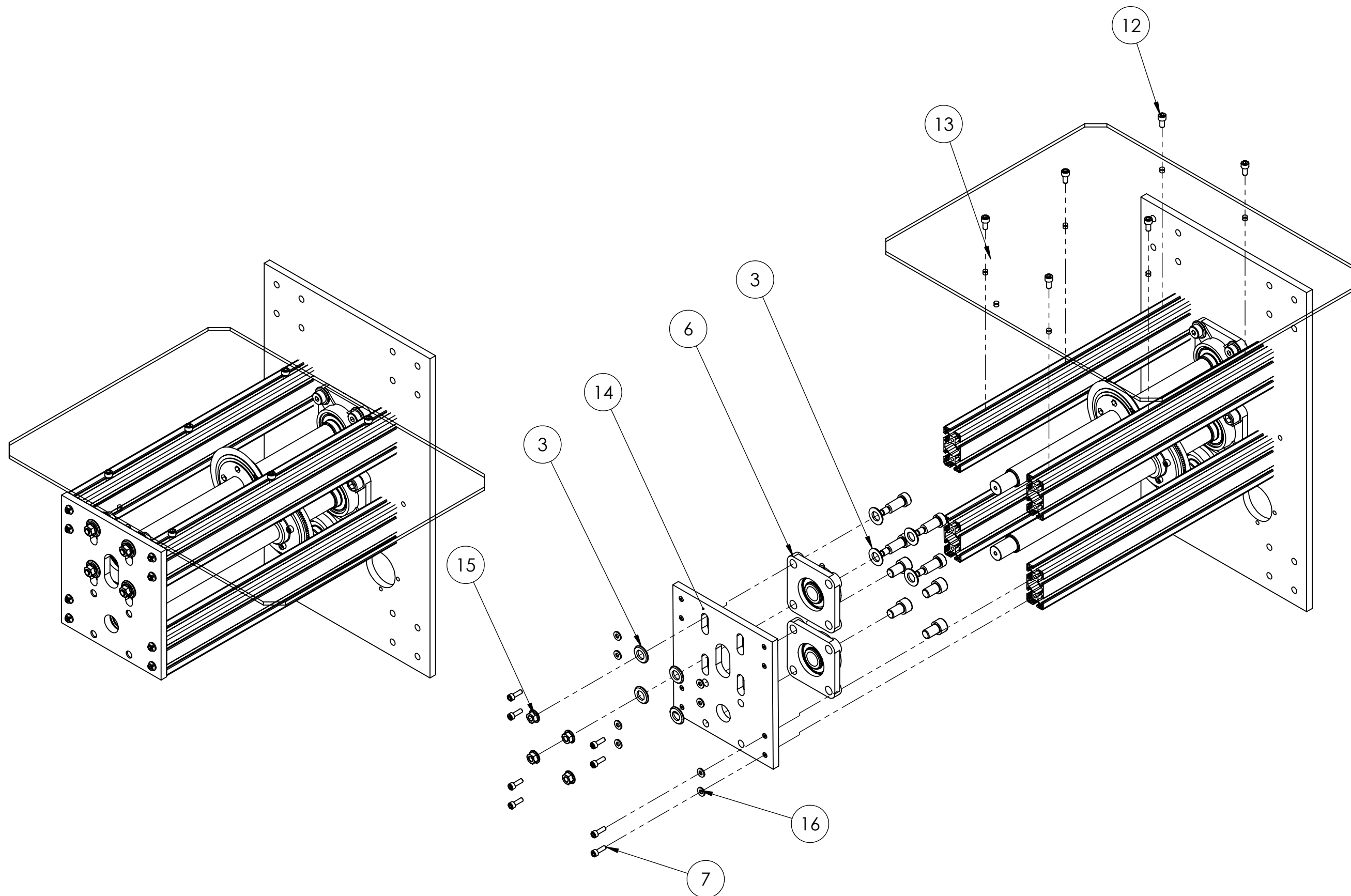
Pessoa responsável António Alves		Departamento responsável www.dem.isep.ipp.pt		Tipo de documento Desenho técnico		Estado do documento final	
Proprietário legal <i>DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431 4200-072 Porto</i>				Título Montagem do sistema de corte		Número	
						Revisão	Data de edição 09/09/2024



ISO 2768 mK

ESCALA
1:2

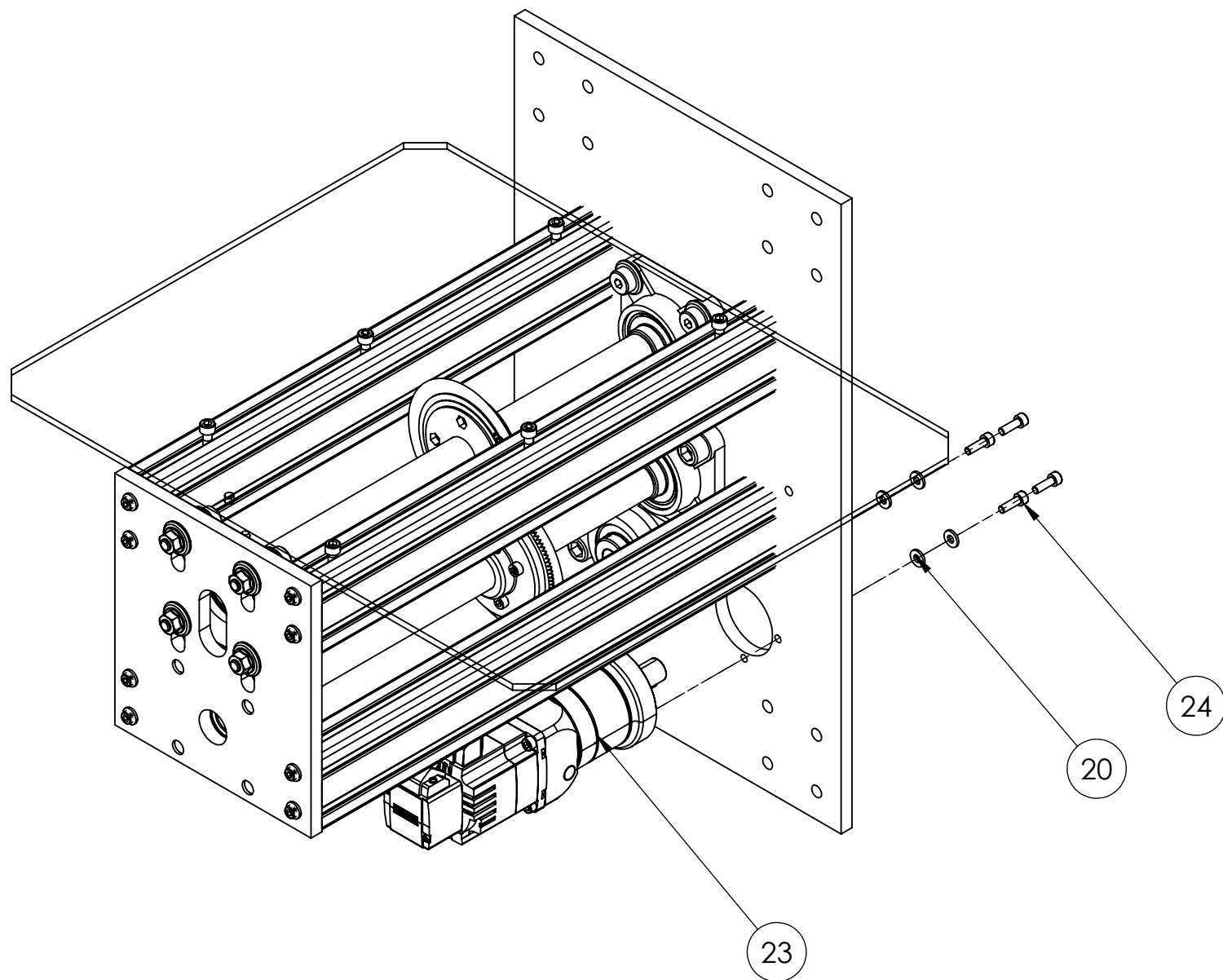
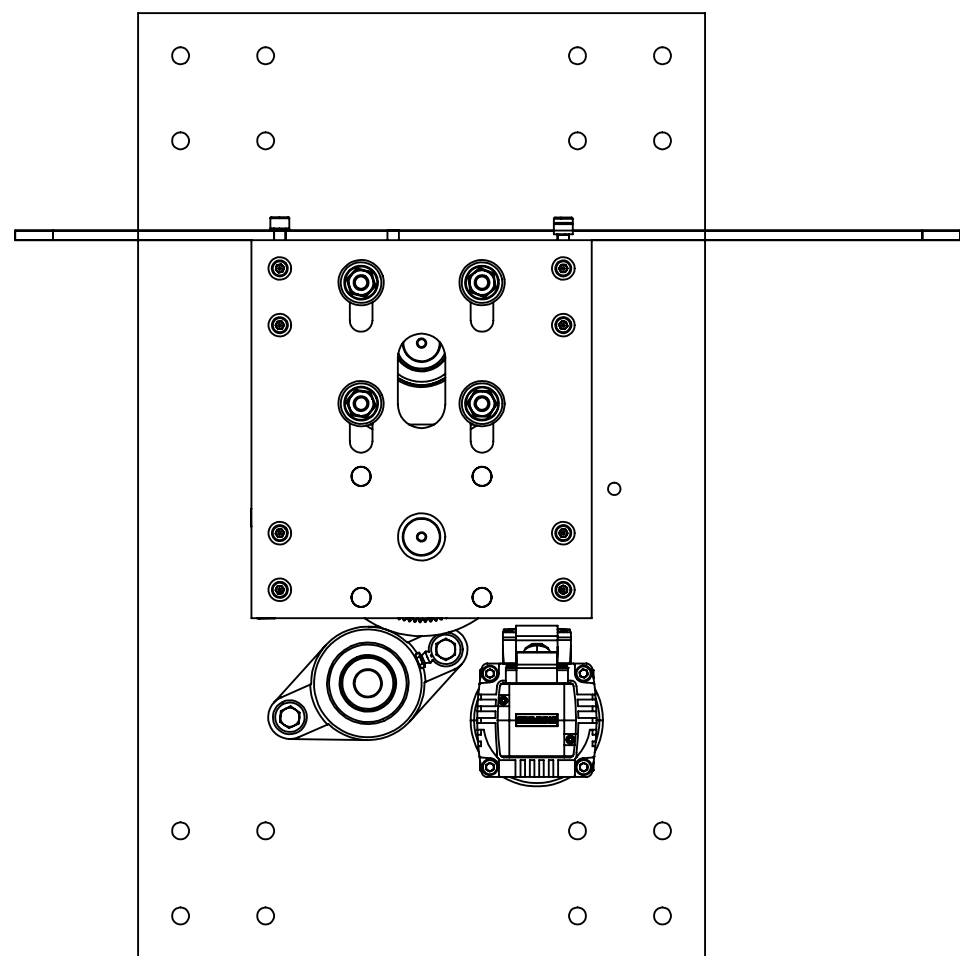
Pessoa responsável	Departamento responsável	Tipo de documento		Estado do documento			
António Alves	www.dem.isep.ipp.pt	Desenho técnico		final			
Proprietário legal		Título		Número			
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431 4200-072 Porto		Montagem do sistema de corte		Revisão	Data de edição	Língua	Folha
					09/09/2024	PT	2/7



ISO 2768 mK

ESCALA
1:5

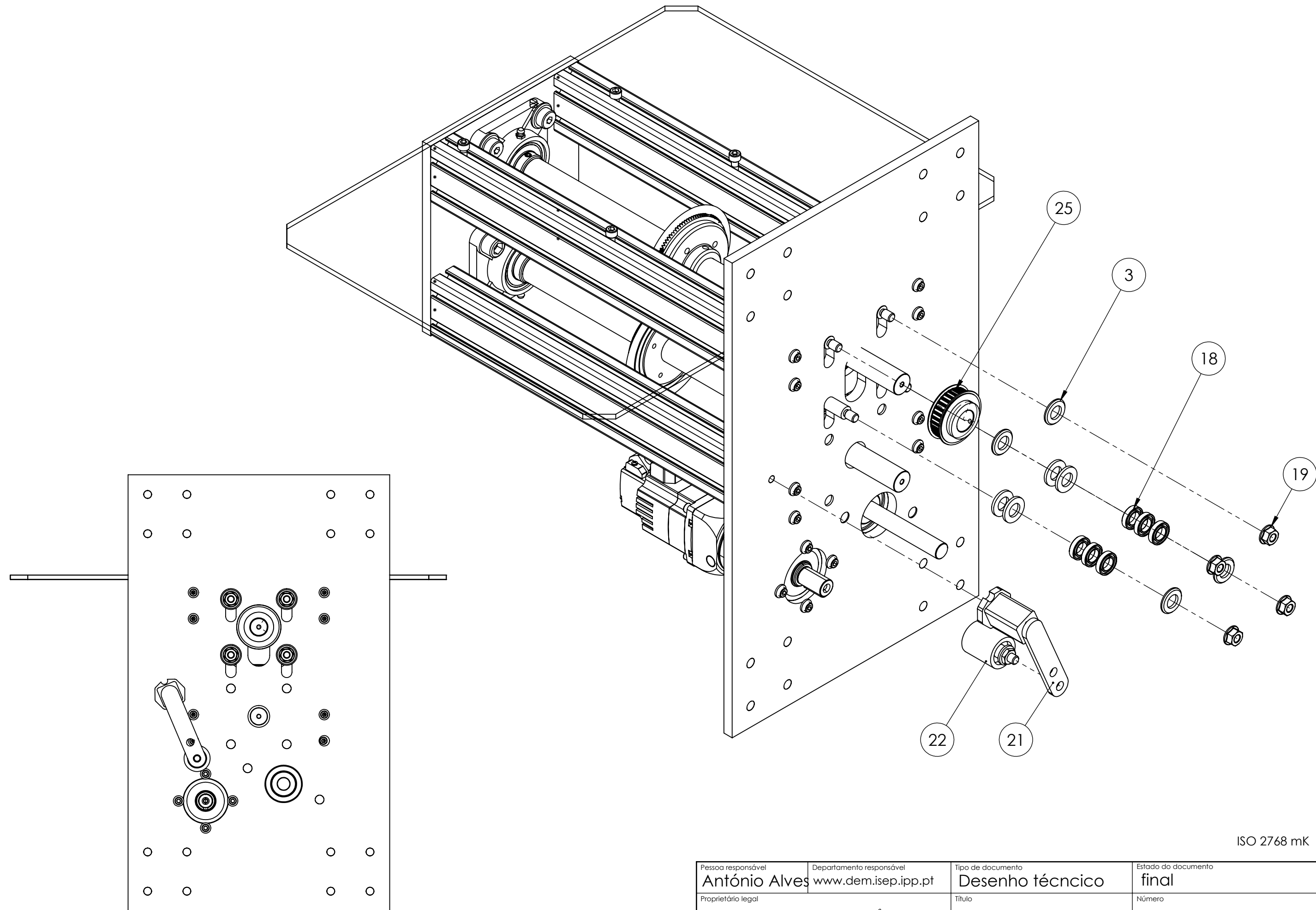
Pessoa responsável António Alves	Departamento responsável www.dem.isep.ipp.pt	Tipo de documento Desenho técnico	Estado do documento final			
Proprietário legal <i>DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431 4200-072 Porto</i>		Título Montagem do sistema de corte	Número			
			Revisão	Data de edição 09/09/2024	Língua PT	Folha 3/6



ISO 2768 mK

ESCALA
1:5

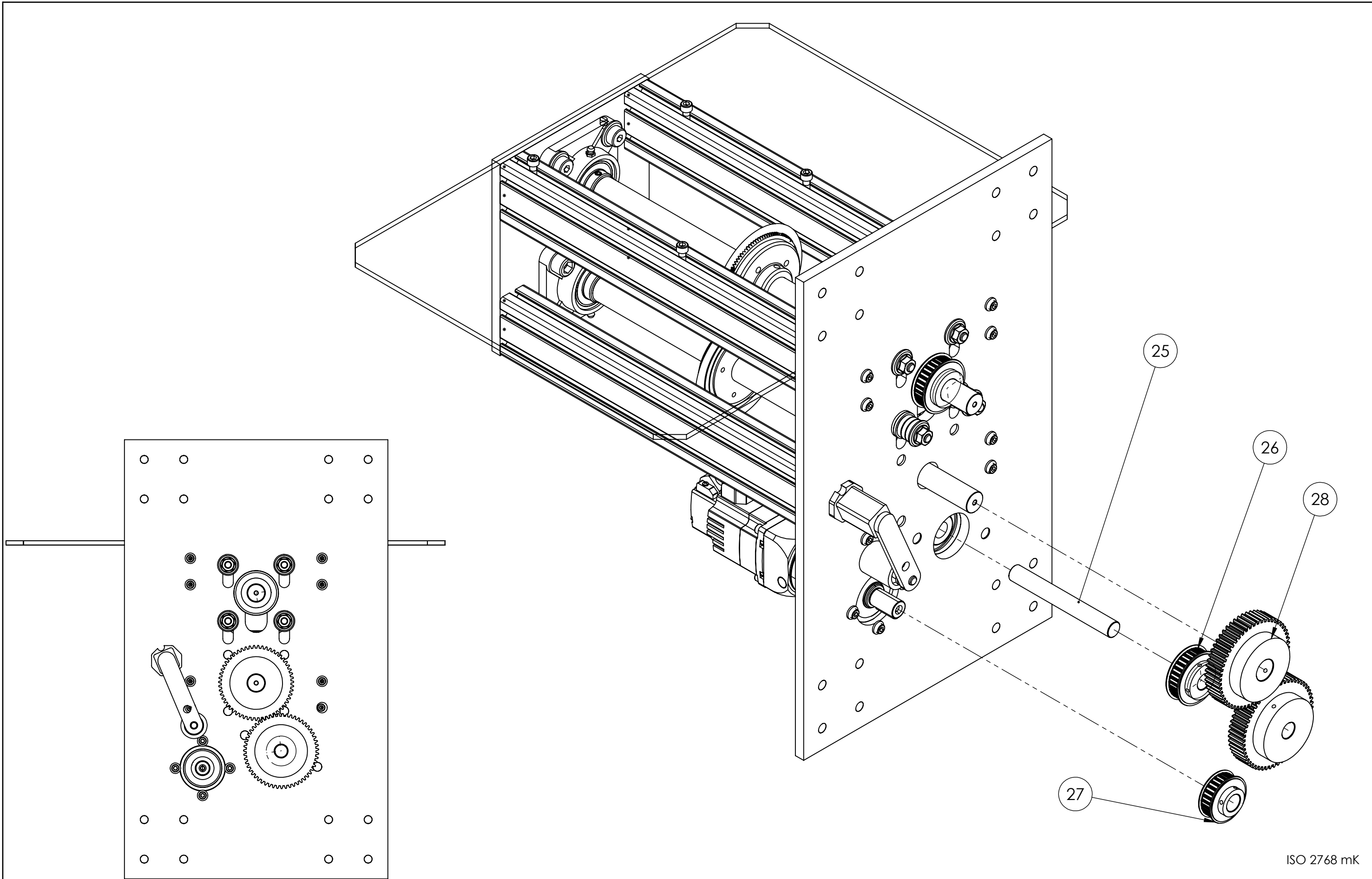
Pessoa responsável António Alves		Departamento responsável www.dem.isep.ipp.pt	Tipo de documento Desenho técnico		Estado do documento final			
Proprietário legal <i>DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431 4200-072 Porto</i>			Título Montagem do sistema de corte		Número			
					Revisão	Data de edição 09/09/2024	Língua PT	Folha 6/7



ISO 2768 mK

ESCALA
1:5

Pessoa responsável	Departamento responsável	Tipo de documento		Estado do documento			
António Alves	www.dem.isep.ipp.pt	Desenho técnico		final			
Proprietário legal		Título		Número			
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431 4200-072 Porto		Montagem do sistema de corte		Revisão	Data de edição	Língua	Folha
					09/09/2024	PT	5/7



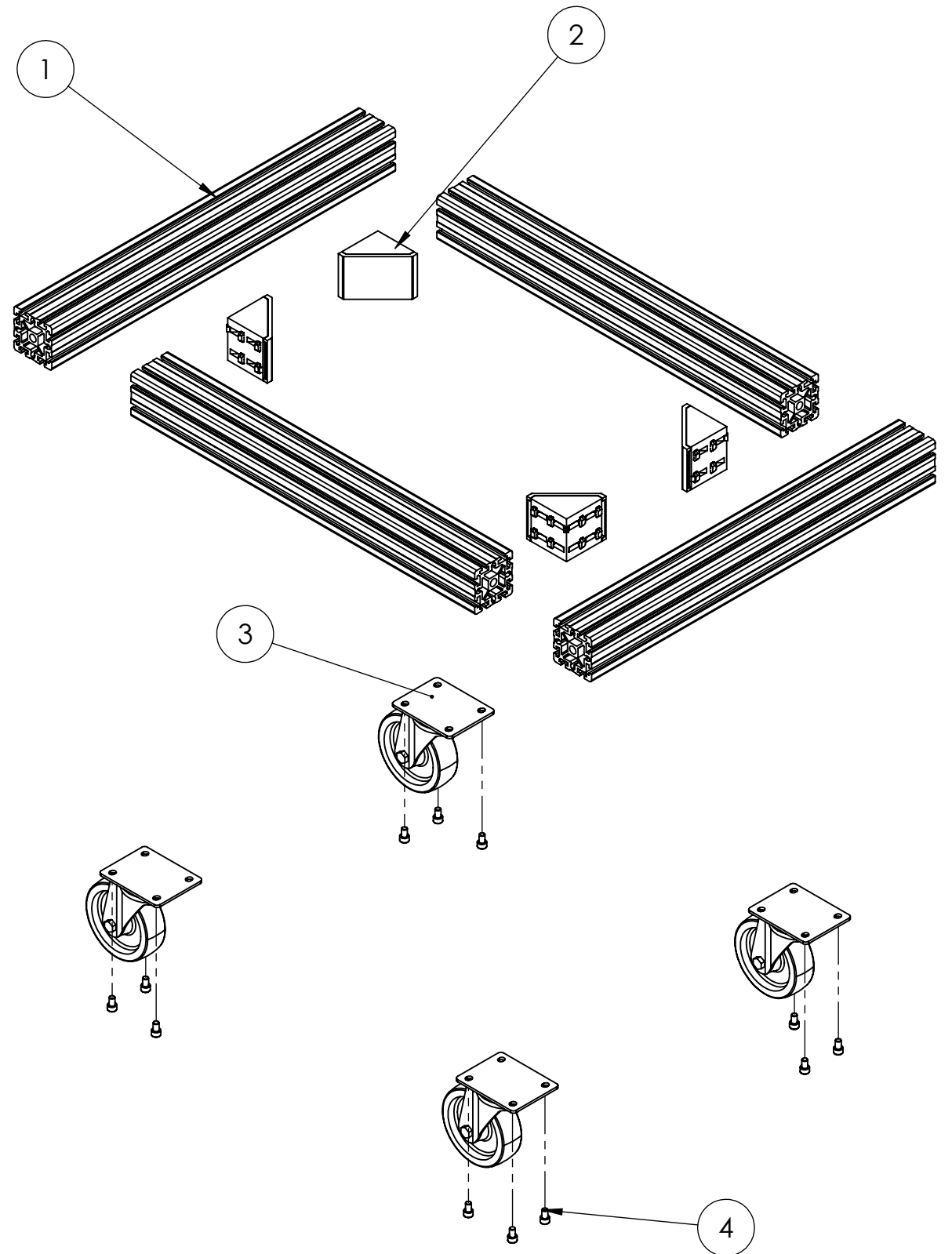
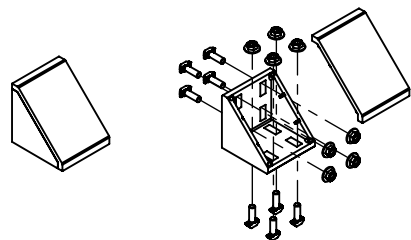
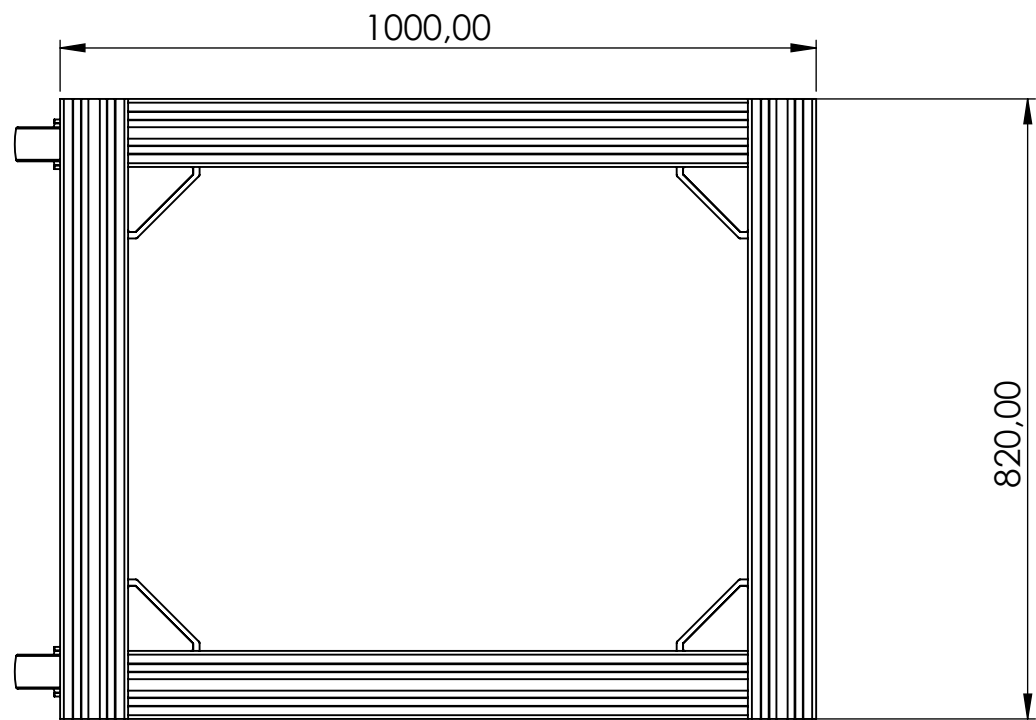
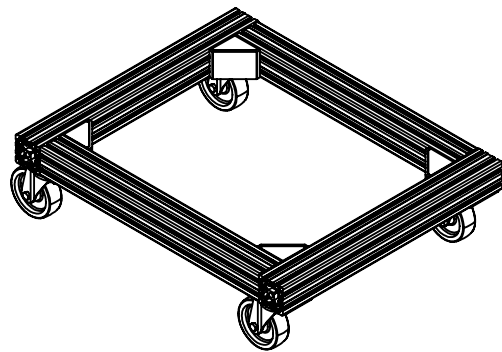
ESCALA
1:5

Pessoa responsável António Alves	Departamento responsável www.dem.isep.ipp.pt	Tipo de documento Desenho técnico	Estado do documento final			
Proprietário legal <i>DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431 4200-072 Porto</i>		Título Montagem do sistema de corte	Número			
			Revisão	Data de edição 09/09/2024	Língua PT	Folha 6/7

Nº Componente	Descrição	Quantidade
1	Chapa de suporte do lado motorizado	1
2	Mancal - NORELEM 24210-20204	4
3	Anilha ISO 7090 - M12 - A200	16
4	Parafuso NORELEM MSB12 - 45	2
5	Parafuso ISO 4762 - M12 x 20 - 12.9	8
6	Mancal - NORELEM 24215-15202	1
7	Parafuso ISO 4762 - M6 x 12 - 12.9	16
8	Perfil 60 x 30 x 417 mm - NORELEM 10025-063060X417	4
9	Veio das facas - MISUMI FPSSFJEE-D25-L350-F100-M5-T30-N5-P20-Q20	2
10	Conjunto de acoplamento das facas	
11	Conjunto de acoplamento das contrafacas	
12	Parafuso ISO 4762 - M5 x 12 - 12.9	6
13	Acrílico de proteção	1
14	Chapa de suporte do lado não motorizado	1
15	Porcas EN ISO 7 - M12 - 8.8	4
16	Anilha ISO 7089 - M6 - A200	16
17	Anilha ISO 7089 - M12 - A200	8
18	Rolamento - MISUMI 6801VV	6
19	Porcas EN ISO 7 - M8 - 8.8	4
20	Anilha ISO 7089 - M5 - A200	4
21	Tensionador - NORELEM 22281-10-1	1
22	Rolo do Tensionador - NORELEM 22102-30035	1
23	Servomotor com redutor	1
24	Parafuso ISO 4762 - M5 x 16 - 12.9	4
25	Veio da polia M15 x 125 -MISUMI SSFU15-120	1
26	Polia - MISUMI 22003-051030	2
27	Polia - MISUMI 22003-26	1
28	Roda dentada - NORELEM 22400-0115170055	2

ESCALA
1:2

Pessoa responsável	Departamento responsável	Tipo de documento		Estado do documento			
António Alves	www.dem.isep.ipp.pt	Desenho técnico		final			
Proprietário legal		Título		Número			
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431 4200-072 Porto		Montagem do sistema de corte		Revisão	Data de edição	Língua	Folha
					09/09/2024	PT	7/7

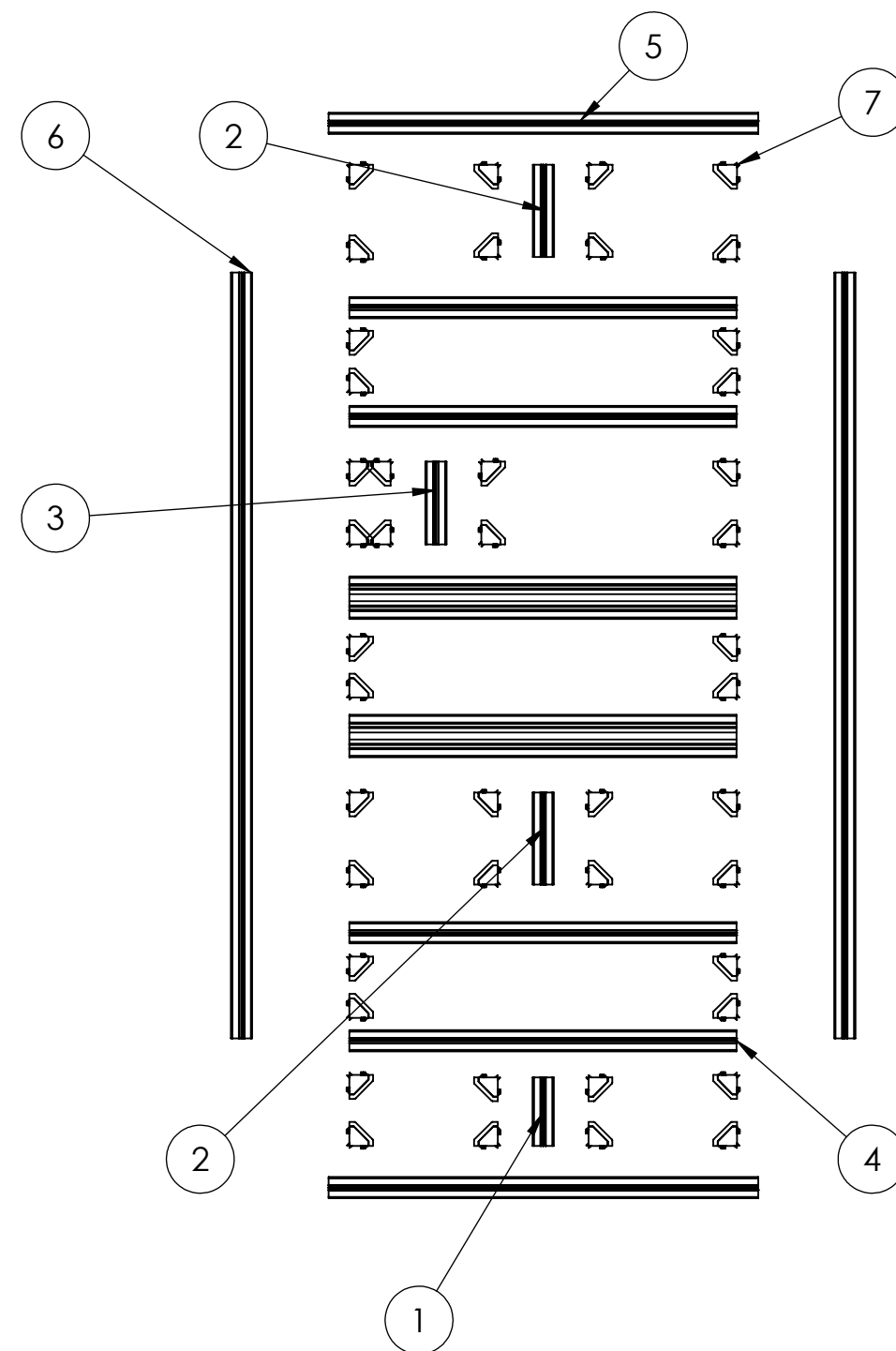
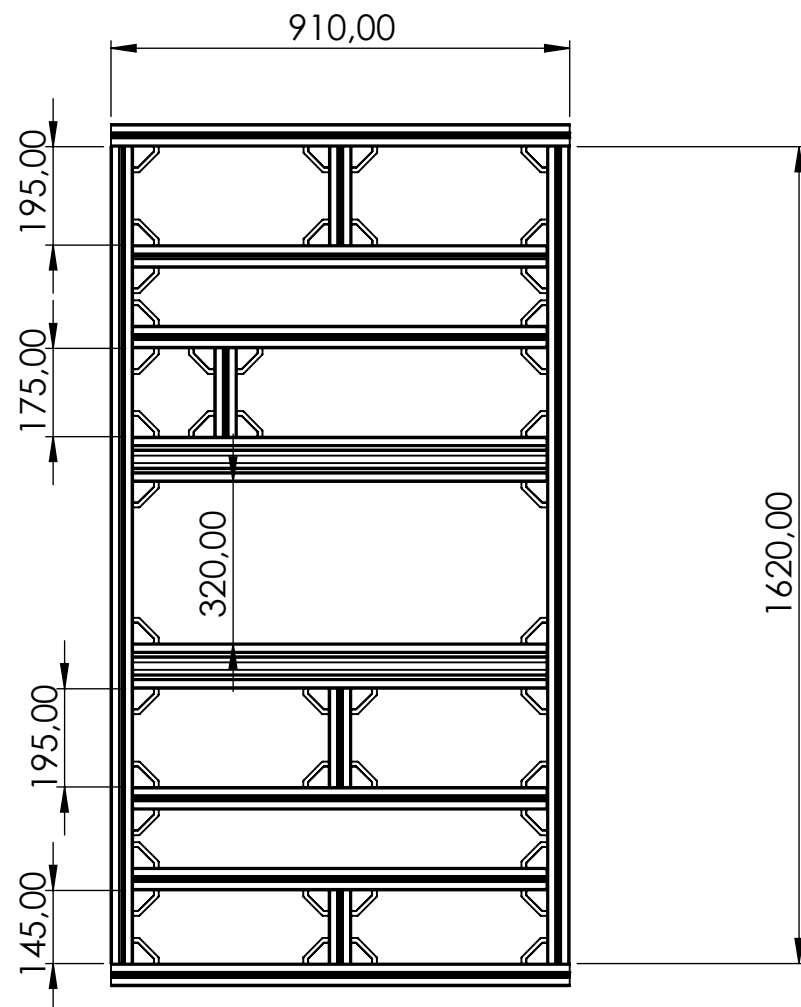
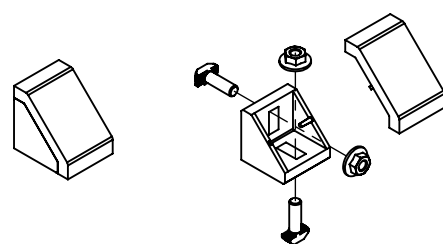
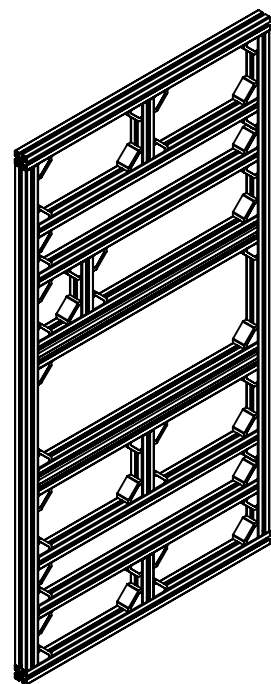


Nº Componente	Descrição	Quantidade
1	Perfil 90 x 90 x 820 mm - NORELEM 10160-109090X814	4
2	Cantoneira perfil - NORELEM 10157-104545X1000	4
3	Rodas RS 171-8318	4
4	Parafuso ISO 4762 - M8 x 20 - 12.9	12

ESCALA
1:20

ISO 2768 mK

Pessoa responsável António Alves	Departamento responsável www.dem.isep.ipp.pt	Tipo de documento Desenho técnico	Estado do documento final			
Proprietário legal <i>DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431 4200-072 Porto</i>		Título Estrutura do equipamento		Número		
		Revisão	Data de edição 09/09/2024	Língua PT	Folha 1/4	

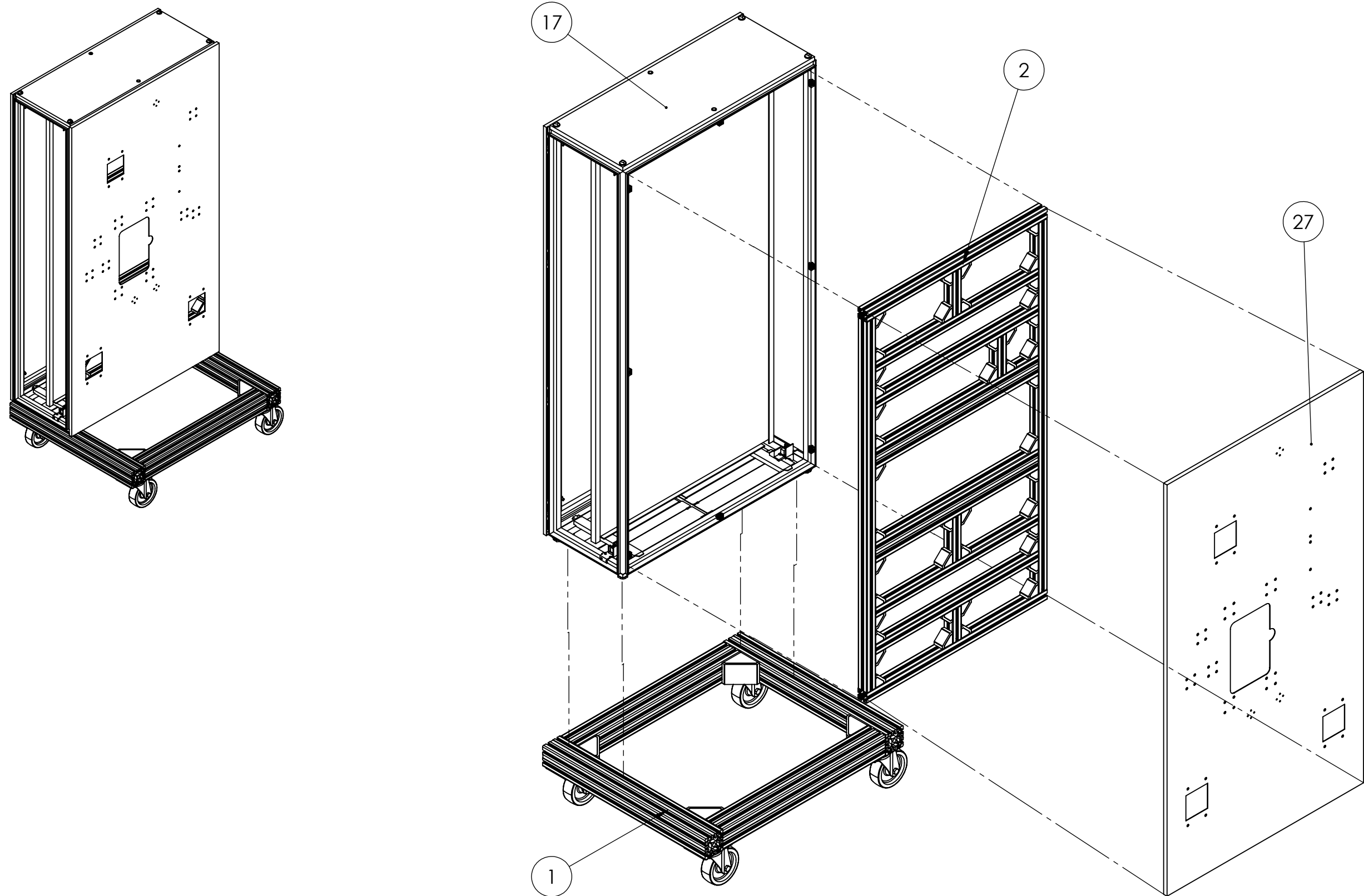


Nº Componente	Descrição	Quant.	
1	Perfil 45 x 45 x 145 mm - NORELEM 10157-104545X1000	1	
2	Perfil 45 x 45 x 195 mm - NORELEM 10157-104545X1000	2	
3	Perfil 45 x 45 x 175 mm - NORELEM 10157-104545X1000	1	
4	Perfil 45 x 45 x 820 mm - NORELEM 10157-104545X1000	4	
5	Perfil 45 x 45 x 910 mm - NORELEM 10157-104545X1000	2	
6	Perfil 45 x 45 x 1620 mm - NORELEM 10157-104545X1000	2	
7	Cantoneira para perfis - NORELEM 10252-104545	2	

ESCALA
1:10

ISO 2768 mK

Pessoa responsável António Alves	Departamento responsável www.dem.isep.ipp.pt	Tipo de documento Desenho técnico	Estado do documento final			
Proprietário legal <i>DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431 4200-072 Porto</i>		Título Estrutura do equipamento		Número		
				Revisão	Data de edição 09/09/2024	Língua PT
						Folha 2/4

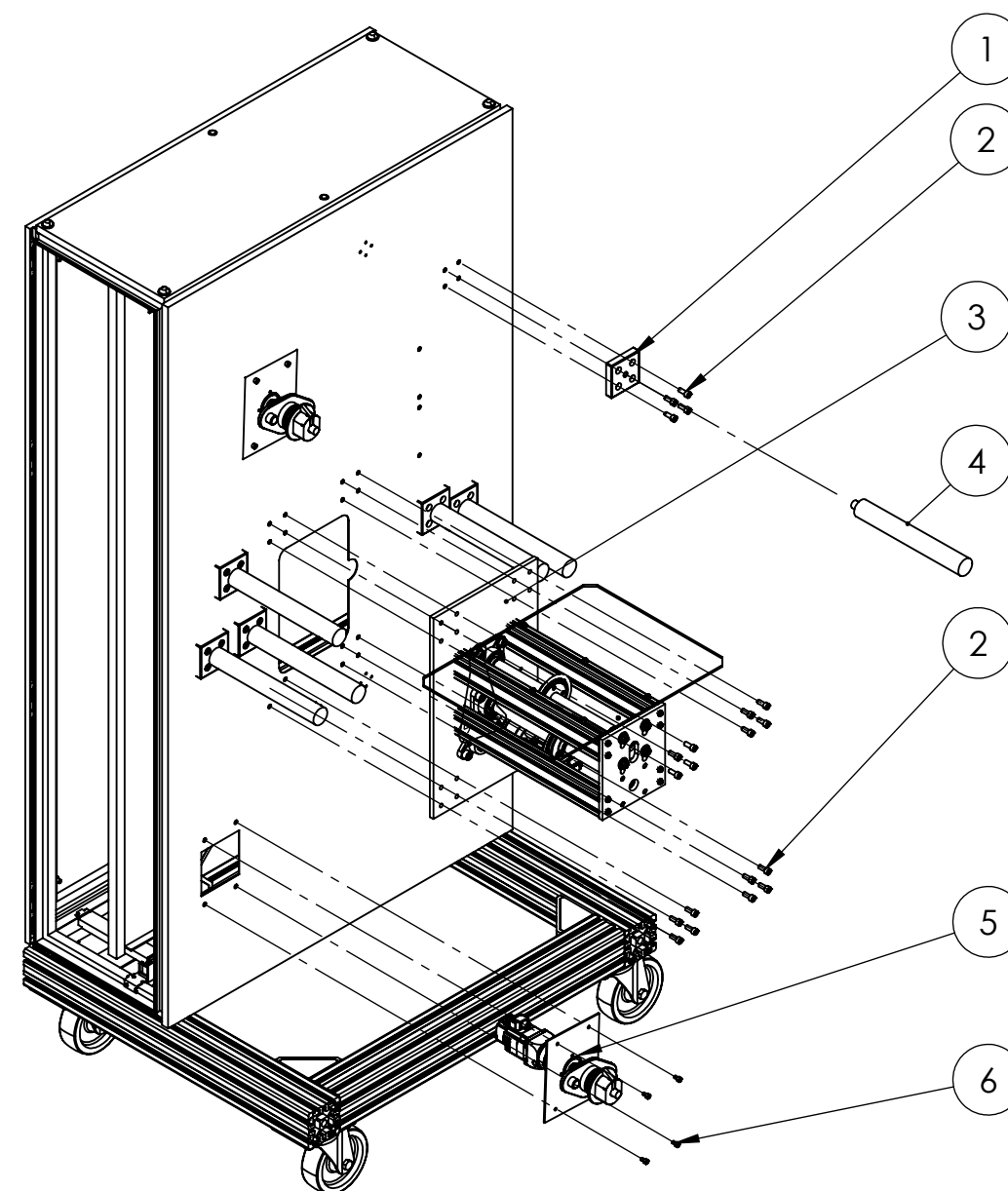
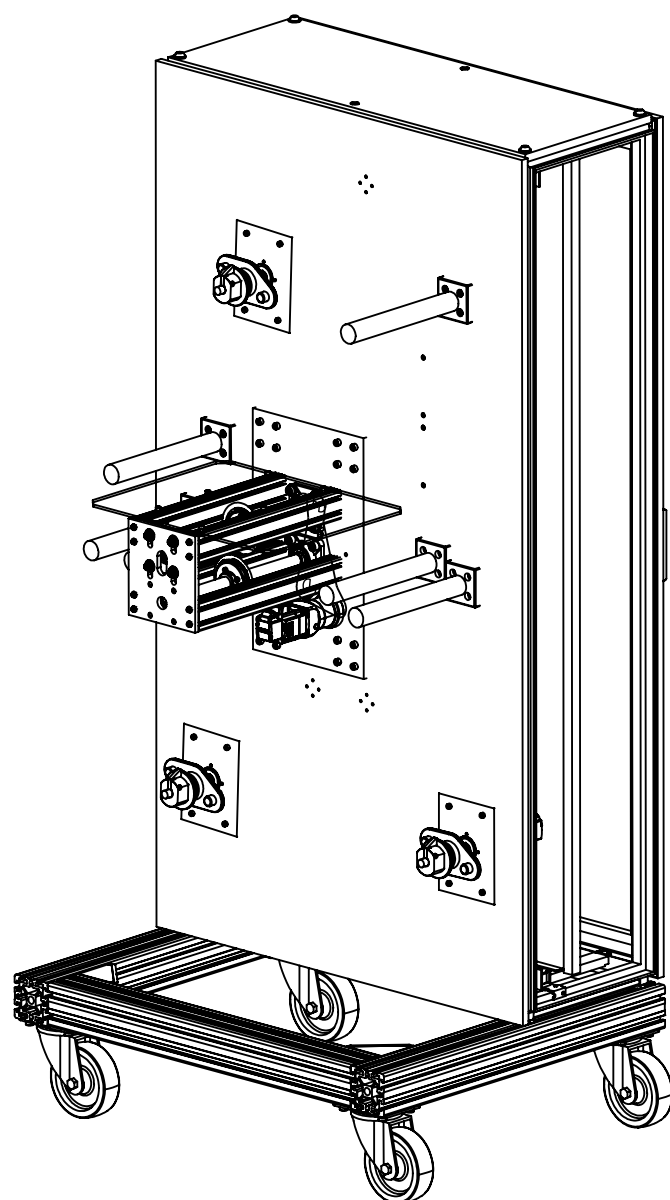


Nº Componente	Descrição	Quantidade
1	Base	1
2	Armário - BIFASE 8084000	1
3	Travessas do armário	1
4	Chapa do armário	1

ESCALA
1:15

Pessoa responsável António Alves	Departamento responsável www.dem.isep.ipp.pt	Tipo de documento Desenho técnico	Estado do documento final			
Proprietário legal <i>DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431 4200-072 Porto</i>		Título Estrutura do equipamento	Número Desenho 2020..			
			Revisão	Data de edição 09/09/2024	Língua PT	Folha 3/4

ISO 2768 mK

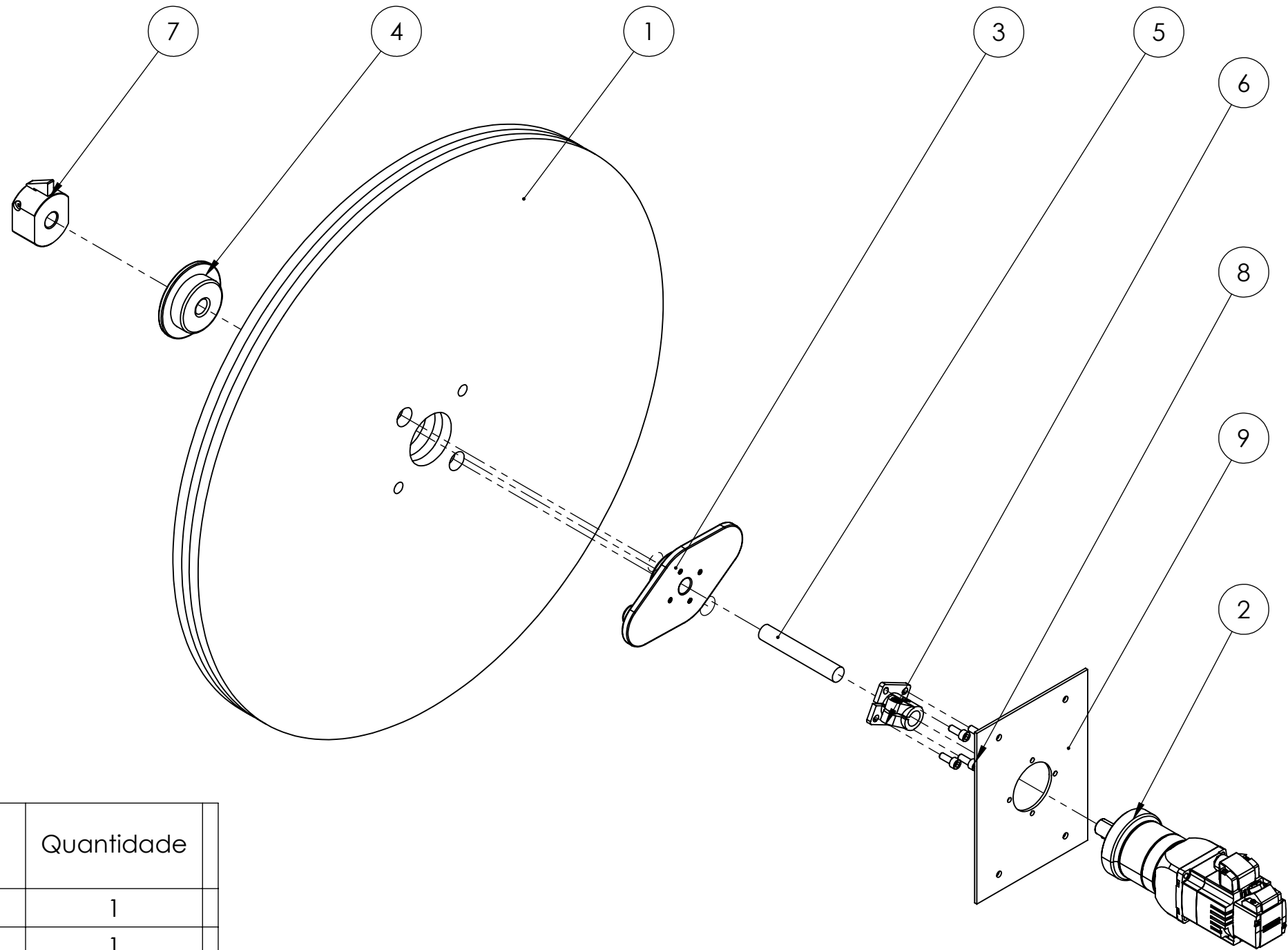
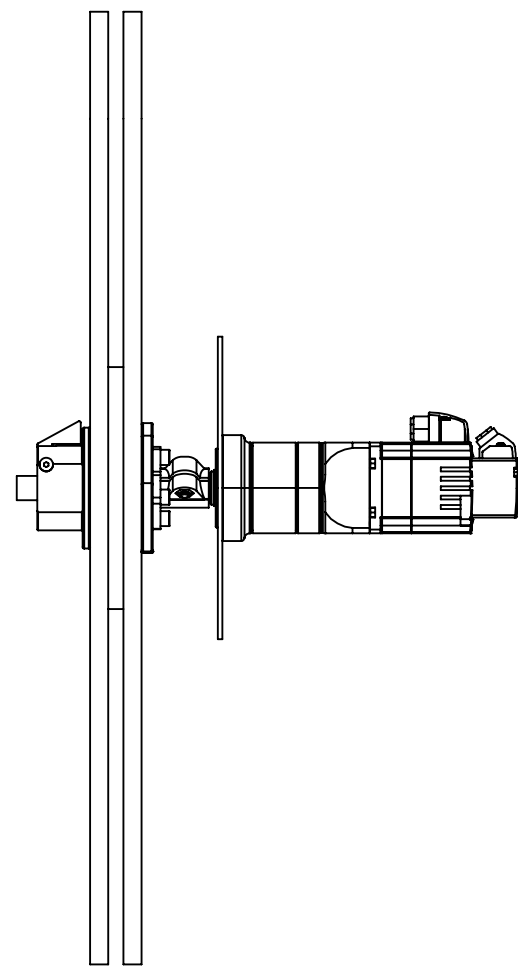


Nº Componentes	Descrição	Quantidade
1	Base dos rolos - NORELEM 10347-0880801121	6
2	Parafuso ISO 4762 - M8 x 20 - 12.9	36
3	Sistema de corte	1
4	Rolo - COMETO RU140X300	6
5	Sistema de suporte da bobine	3
6	Parafuso ISO 4762 - M6 x 12 - 12.9	12

ESCALA
1:15

ISO 2768 mK

Pessoa responsável António Alves	Departamento responsável www.dem.isep.ipp.pt	Tipo de documento Desenho técnico	Estado do documento final			
Proprietário legal <i>DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431 4200-072 Porto</i>		Título Estrutura do equipamento		Número Desenho 2020..		
		Revisão	Data de edição 09/09/2024	Língua PT	Folha 4/4	



N ^a Componente	Descrição	Quantidade
1	Bobine	1
2	Motor com redutor	1
3	Suporte de Bobine 1	1
4	Suporte de Bobine 2	1
5	Veio M16 x 800 - RS 724-3403	1
6	Flange - RS 509-7661	1
7	Bloqueador de Bobine - MISUMI WSC16	1
8	ISO 4762 M6 x 16 - 12.9	4
9	Chapa de suporte do motor	1

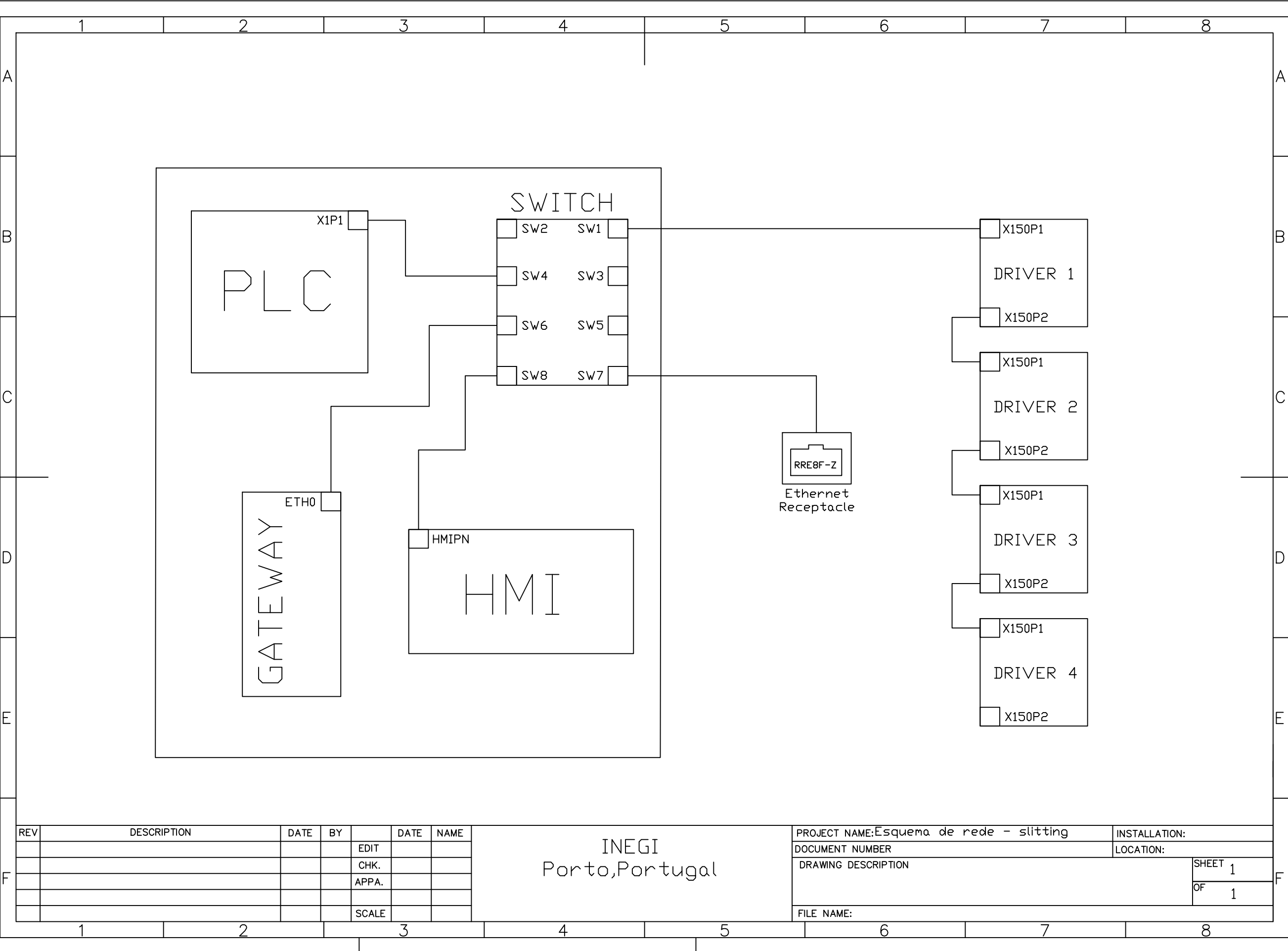
ESCALA
1:5

ISO 2768 mK

Pessoa responsável António Alves	Departamento responsável www.dem.isep.ipp.pt	Tipo de documento Desenho técnico	Estado do documento final			
Proprietário legal DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431 4200-072 Porto		Título Montagem do suporte de bobines	Número			
			Revisão	09/07/2024	Língua PT	Folha 1/1

Apêndice E

Esquema da comunicação



REV	DESCRIPTION	DATE	BY		DATE	NAME
				EDIT		
				CHK.		
				APPA.		
				SCALE		

INEGI
Porto, Portugal

PROJECT NAME:Esquema de rede - slitting	INSTALLATION:
DOCUMENT NUMBER	LOCATION:
DRAWING DESCRIPTION	SHEET 1
	OF 1
FILE NAME:	

Apêndice F

Código Ladder do TIA Portal.

Totally Integrated Automation Portal		
--------------------------------------	--	--

slitting / PLC_1 [CPU 1212C AC/DC/Rly] / Program blocks

Main [OB1]

Main Properties

General

Name	Main	Number	1	Type	OB
Language	LAD	Numbering	Automatic		

Information

Title	"Main Program Sweep (Cycle)"	Author		Comment	
Family		Version	0.1	User-defined ID	

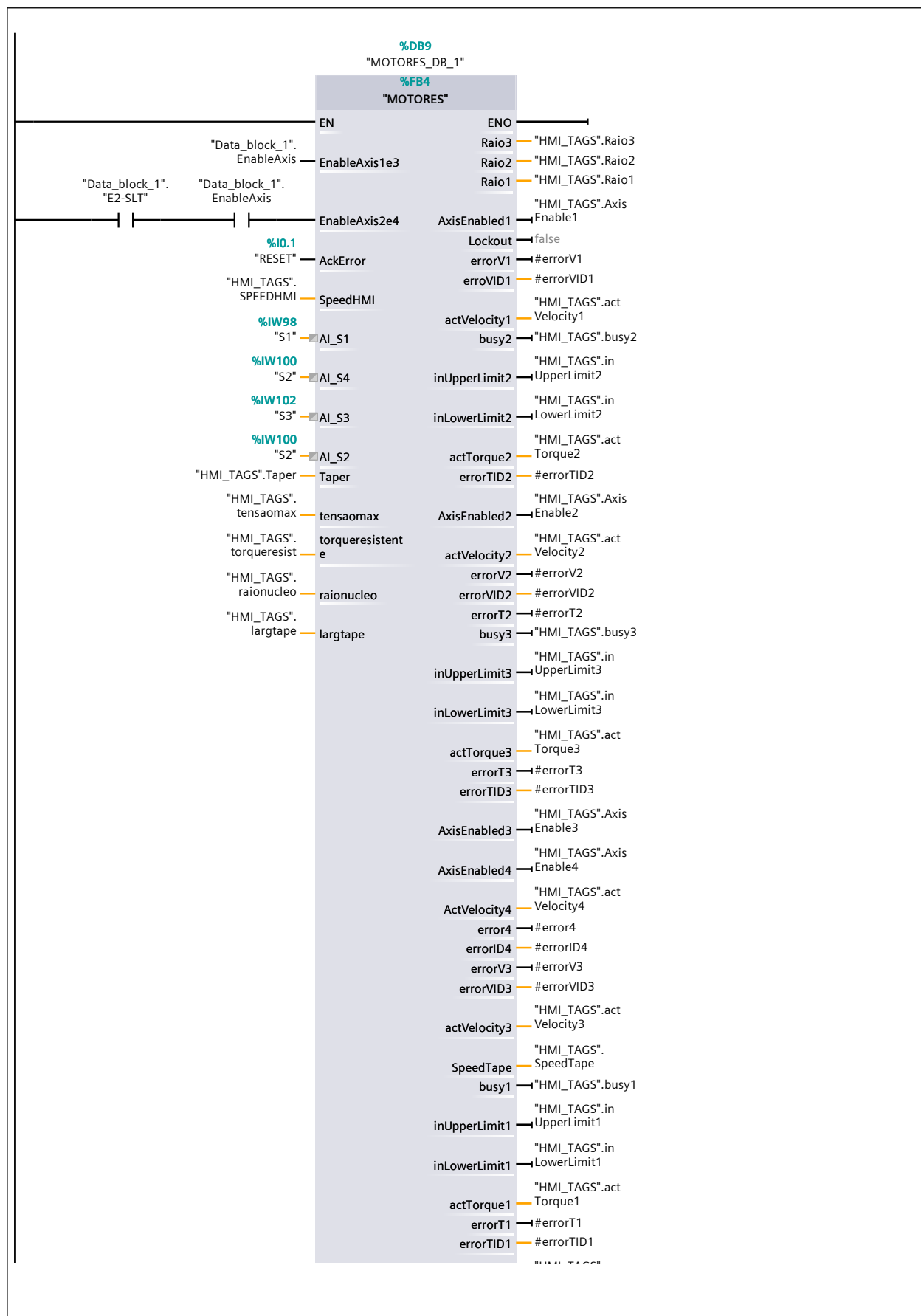
Main

Name	Data type	Default value	Comment
▼ Input			
Initial_Call	Bool		Initial call of this OB
Remanence	Bool		=True, if remanent data are available
▼ Temp			
errorVID1	Word		
errorTID2	Word		
errorVID2	Word		
errorTID3	Word		
errorID4	Word		
errorVID3	Word		
errorTID1	Word		
errorV1	Bool		
errorV2	Bool		
errorT2	Bool		
errorT3	Bool		
error4	Bool		
errorT1	Bool		
errorV3	Bool		
Constant			

Network 1: Motores

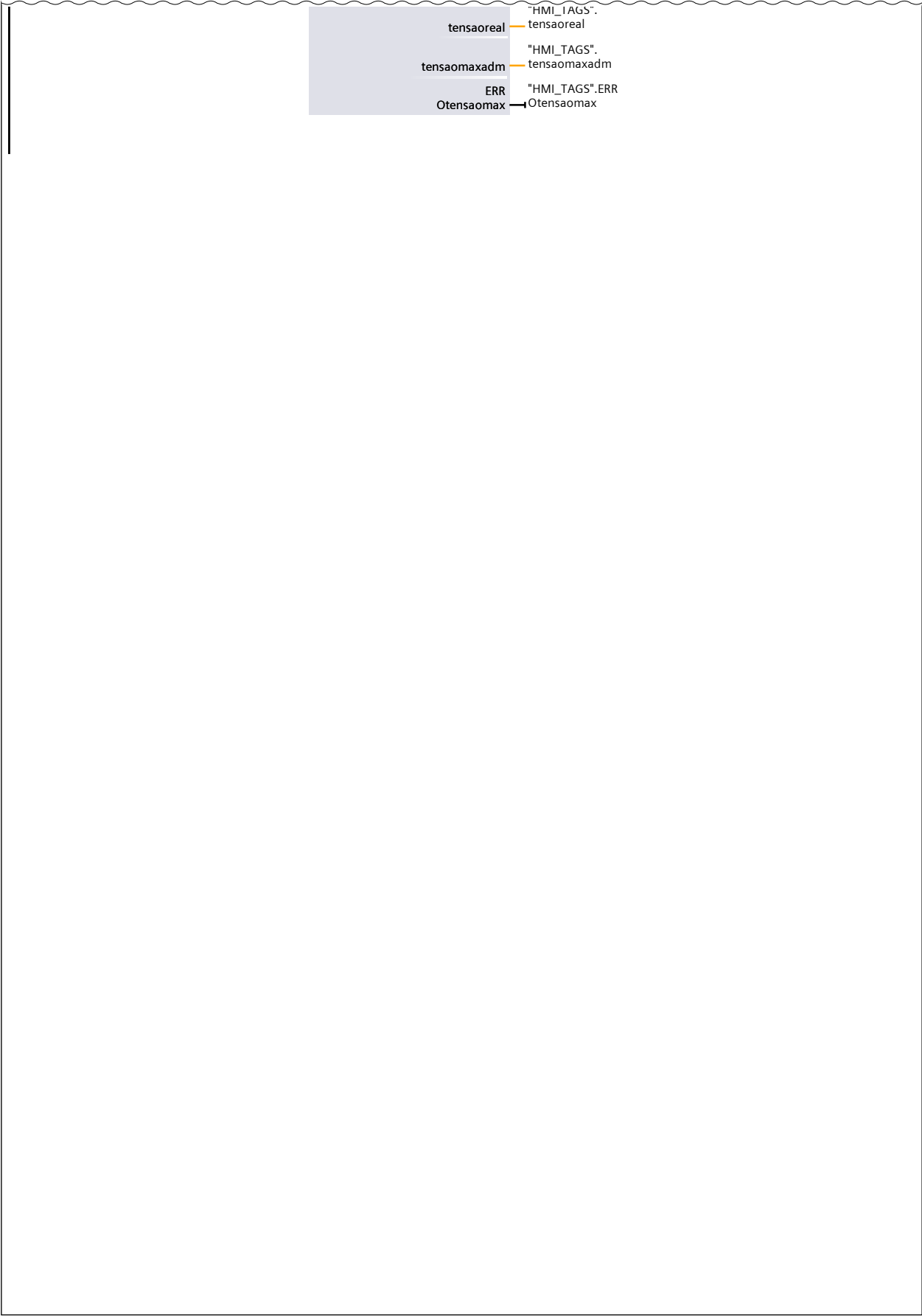
--	--	--

Network 1: Motores (1.1 / 2.1)

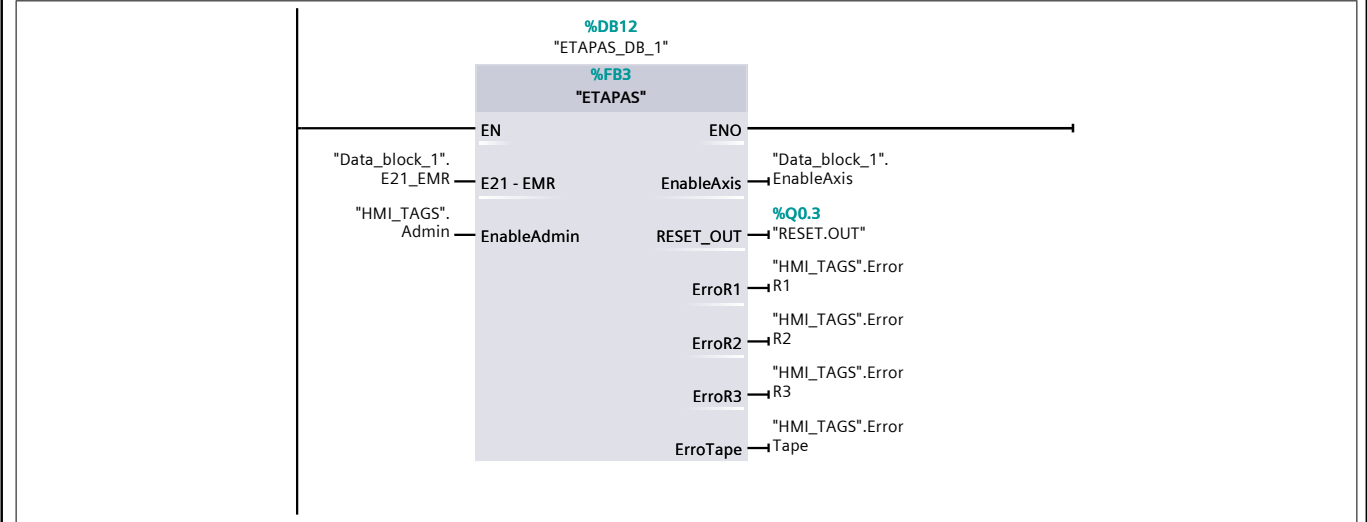


Network 1: Motores (2.1 / 2.1)

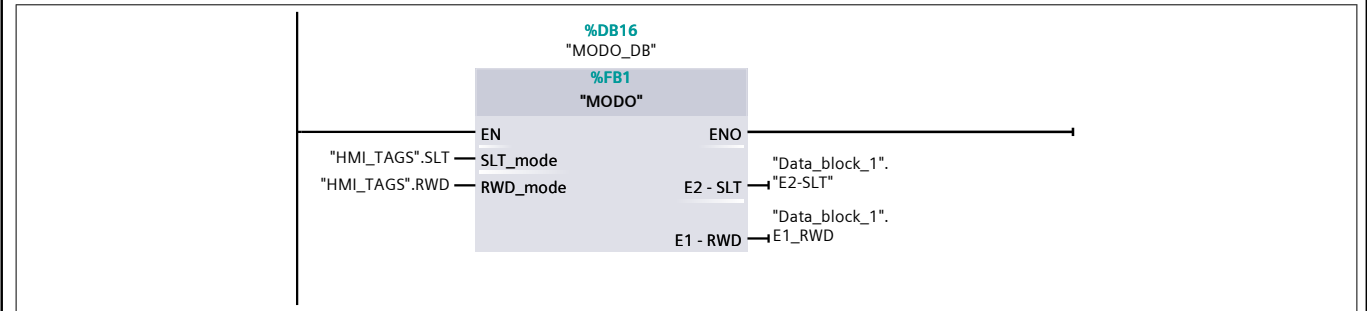
1.1 (Page1 - 2)



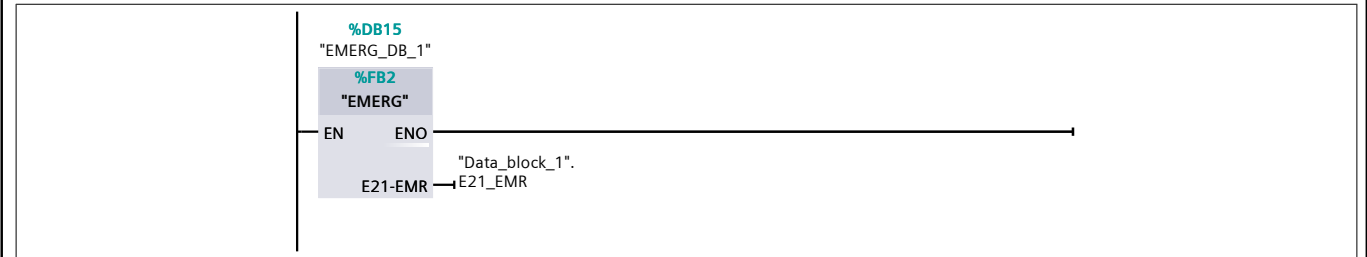
Network 2: Etapas



Network 3: Mode

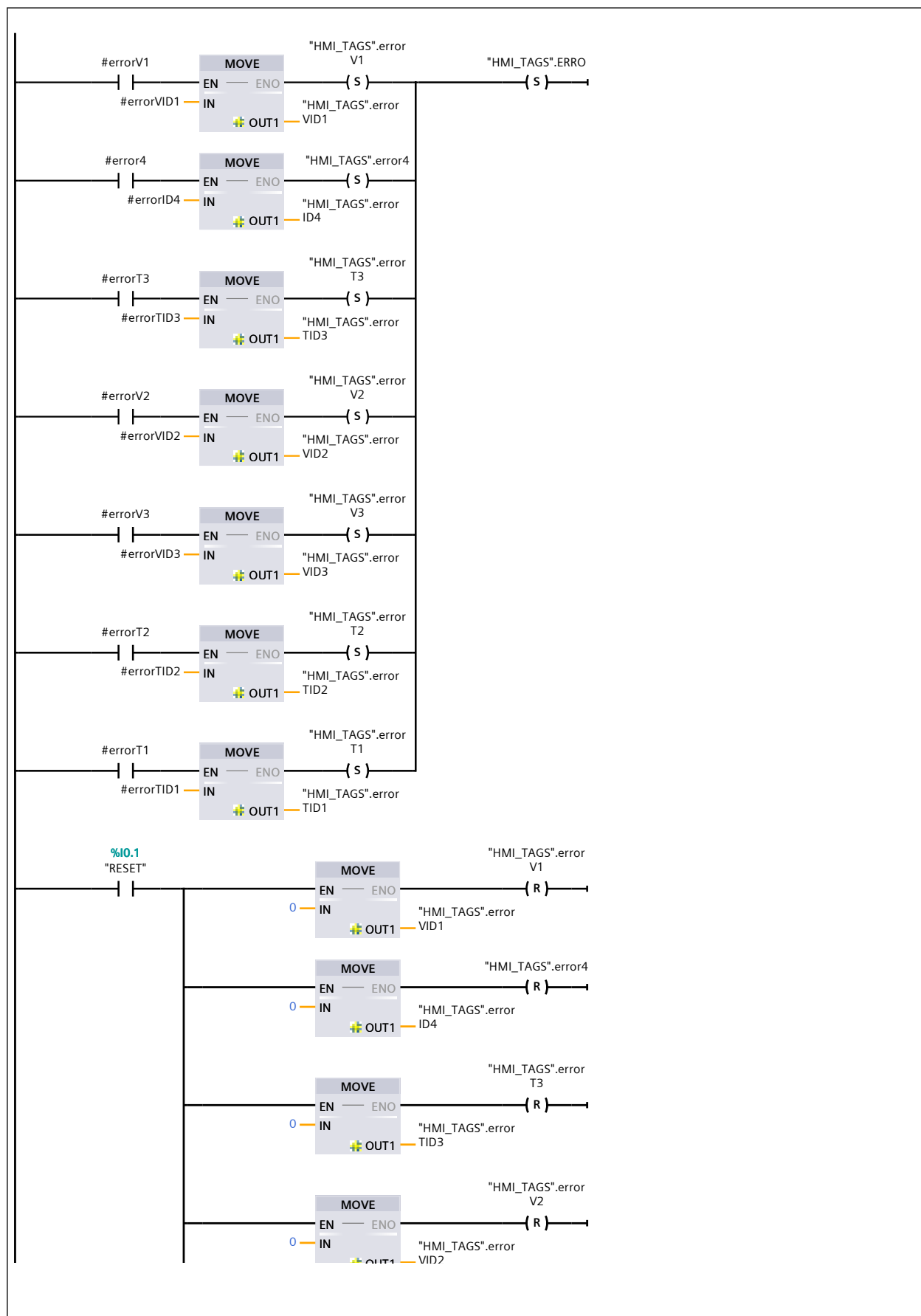


Network 4: Emergencia



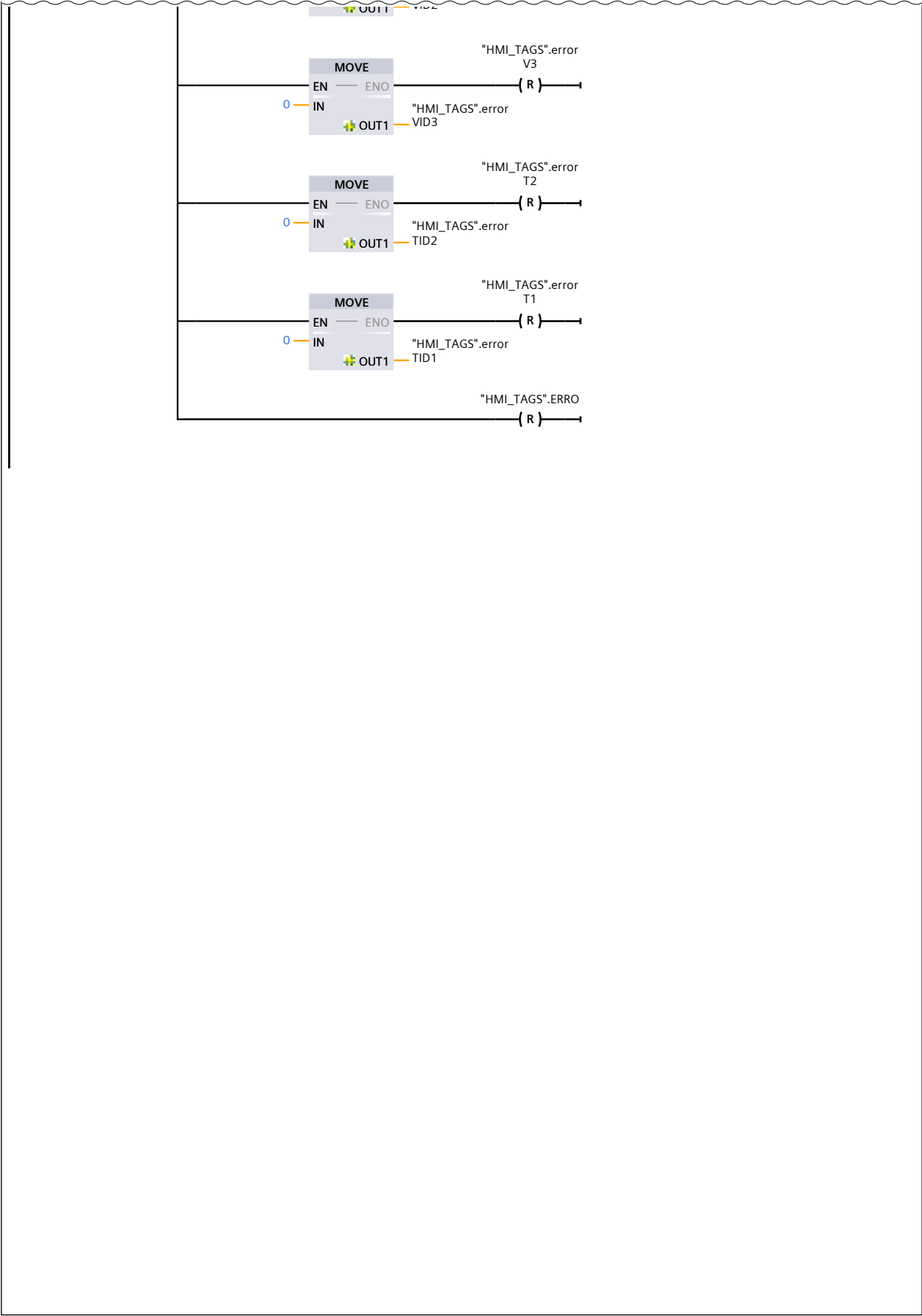
Network 5: Erro HMI

Network 5: Erro HMI (1.1 / 2.1)



Network 5: Erro HMI (2.1 / 2.1)

1.1 (Page1 - 5)



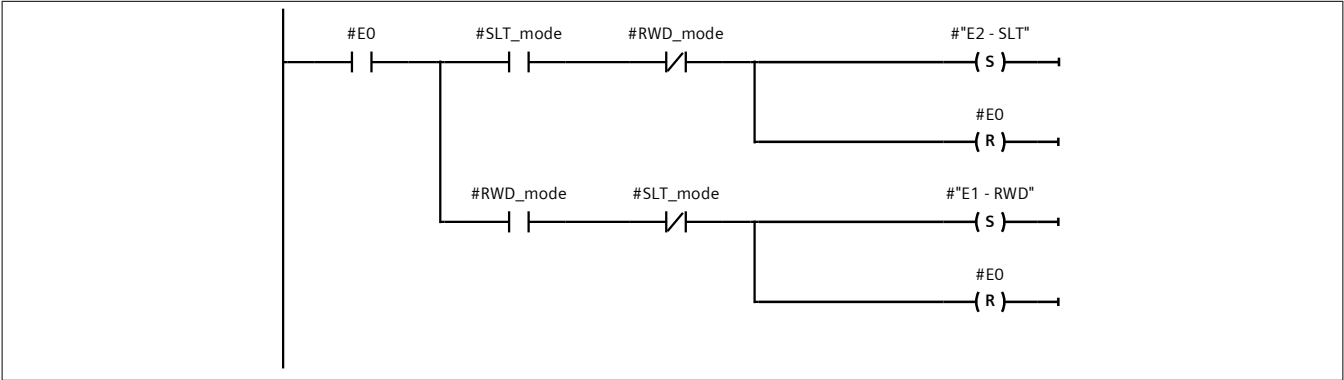
slitting / PLC_1 [CPU 1212C AC/DC/Rly] / Program blocks

MODO [FB1]

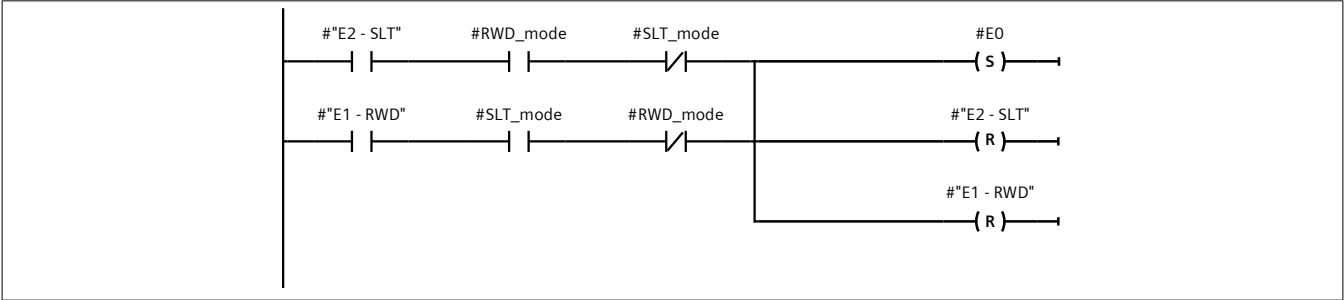
MODO Properties					
General					
Name	MODO	Number	1	Type	FB
Language	LAD	Numbering	Automatic		
Information					
Title		Author		Comment	
Family		Version	0.1	User-defined ID	

MODO									
Name	Data type	Default value	Retain	Access- ible from HMI/OP C UA/We b API	Wri- ta- ble fro m HM I/O PC UA/ We b API	Visible in HMI engi- neer- ing	Set- point	Su- per- vi- sion	Comment
▼ Input									
SLT_mode	Bool	false	Non-retain	True	True	True	False		
RWD_mode	Bool	false	Non-retain	True	True	True	False		
▼ Output									
E2 - SLT	Bool	false	Non-retain	True	True	True	False		
E1 - RWD	Bool	false	Non-retain	True	True	True	False		
InOut									
▼ Static									
E0	Bool	true	Non-retain	True	True	True	False		
Temp									
Constant									

Network 1:



Network 2:



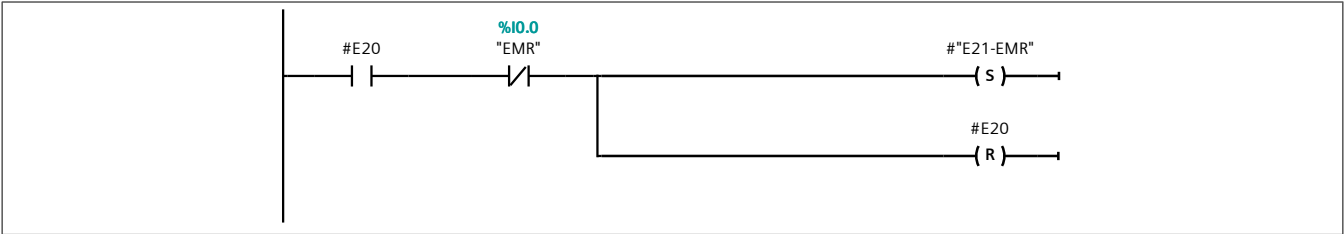
slitting / PLC_1 [CPU 1212C AC/DC/Rly] / Program blocks

EMERG [FB2]

EMERG Properties					
General					
Name	EMERG	Number	2	Type	FB
Language	LAD	Numbering	Automatic		
Information					
Title		Author		Comment	
Family		Version	0.1	User-defined ID	

EMERG									
Name	Data type	Default value	Retain	Access-ible from HMI/OP C UA/Web API	Wri-ta-ble from HM I/O PC UA/Web API	Visible in HMI engi-neer-ing	Set-point	Su-per-vi-sion	Comment
Input									
▼ Output									
E21-EMR	Bool	false	Non-retain	True	True	True	False		
InOut									
▼ Static									
E20	Bool	true	Non-retain	True	True	True	False		
Temp									
Constant									

Network 1:



Network 2:

Totally Integrated Automation Portal		
#"E21-EMR" %I0.0 "EMR" %I0.1 "RESET" #E20 (S) #"E21-EMR" (R)		

slitting / PLC_1 [CPU 1212C AC/DC/Rly] / Program blocks

ETAPAS [FB3]

ETAPAS Properties

General

Name	ETAPAS	Number	3	Type	FB
Language	LAD	Numbering	Automatic		

Information

Title		Author		Comment	
Family		Version	0.1	User-defined ID	

ETAPAS

Name	Data type	Default value	Retain	Access- ible from HMI/OP C UA/Web API	Wri- ta- ble from HM I/O PC UA/ Web API	Visible in HMI engi- neer- ing	Set- point	Su- per- vi- sion	Comment
▼ Input									
E21 - EMR	Bool	false	Non-retain	True	True	True	False		
EnableAdmin	Bool	false	Non-retain	True	True	True	False		
▼ Output									
EnableAxis	Bool	false	Non-retain	True	True	True	False		
RESET_OUT	Bool	false	Non-retain	True	True	True	False		
Error1	Bool	false	Non-retain	True	True	True	False		
Error2	Bool	false	Non-retain	True	True	True	False		
Error3	Bool	false	Non-retain	True	True	True	False		
ErrorTape	Bool	false	Non-retain	True	True	True	False		
InOut									
▼ Static									
E11	Bool	false	Non-retain	True	True	True	False		
E12	Bool	false	Non-retain	True	True	True	False		
E13	Bool	false	Non-retain	True	True	True	False		
AdminEnabled	Bool	false	Non-retain	True	True	True	False		
S4_Norm	Real	0.0	Non-retain	True	True	True	False		
E10	Bool	true	Non-retain	True	True	True	False		

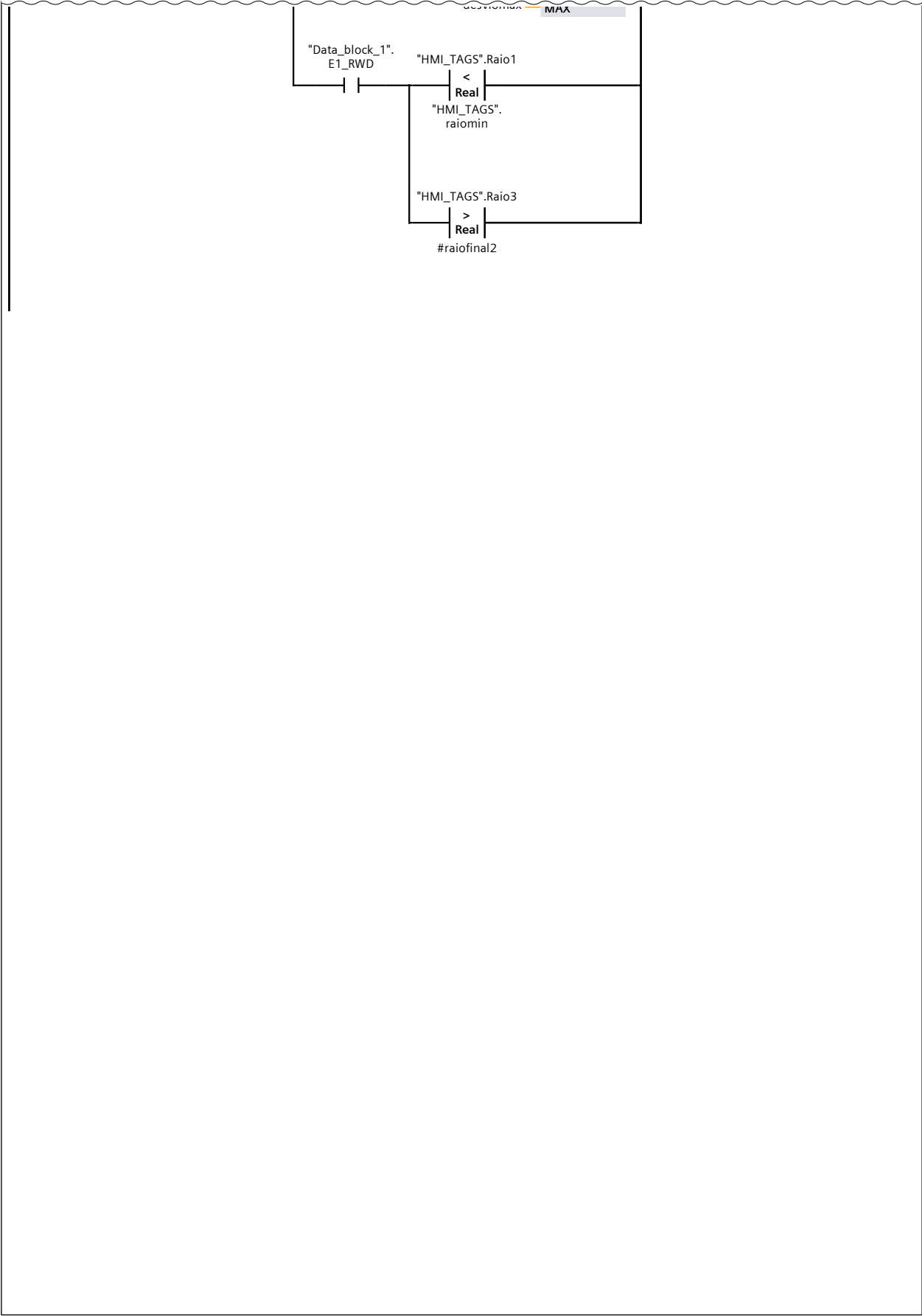
Totally Integrated Automation Portal											
Name	Data type	Default value	Retain	Access- ible from HMI/OP C UA/We b API	Wri- ta- ble from m HM I/O PC UA/ We b API	Visible in HMI engi- neer- ing	Set- point	Su- per- vi- sion			Comment
desvio	Real	0.0	Non-retain	True	True	True	False				
raiofinal2	Real	0.0	Non-retain	True	True	True	False				
Temp											
Constant											
Network 1: Ativação E11											

Network 1: Ativação E11 (1:1 / 2.1)

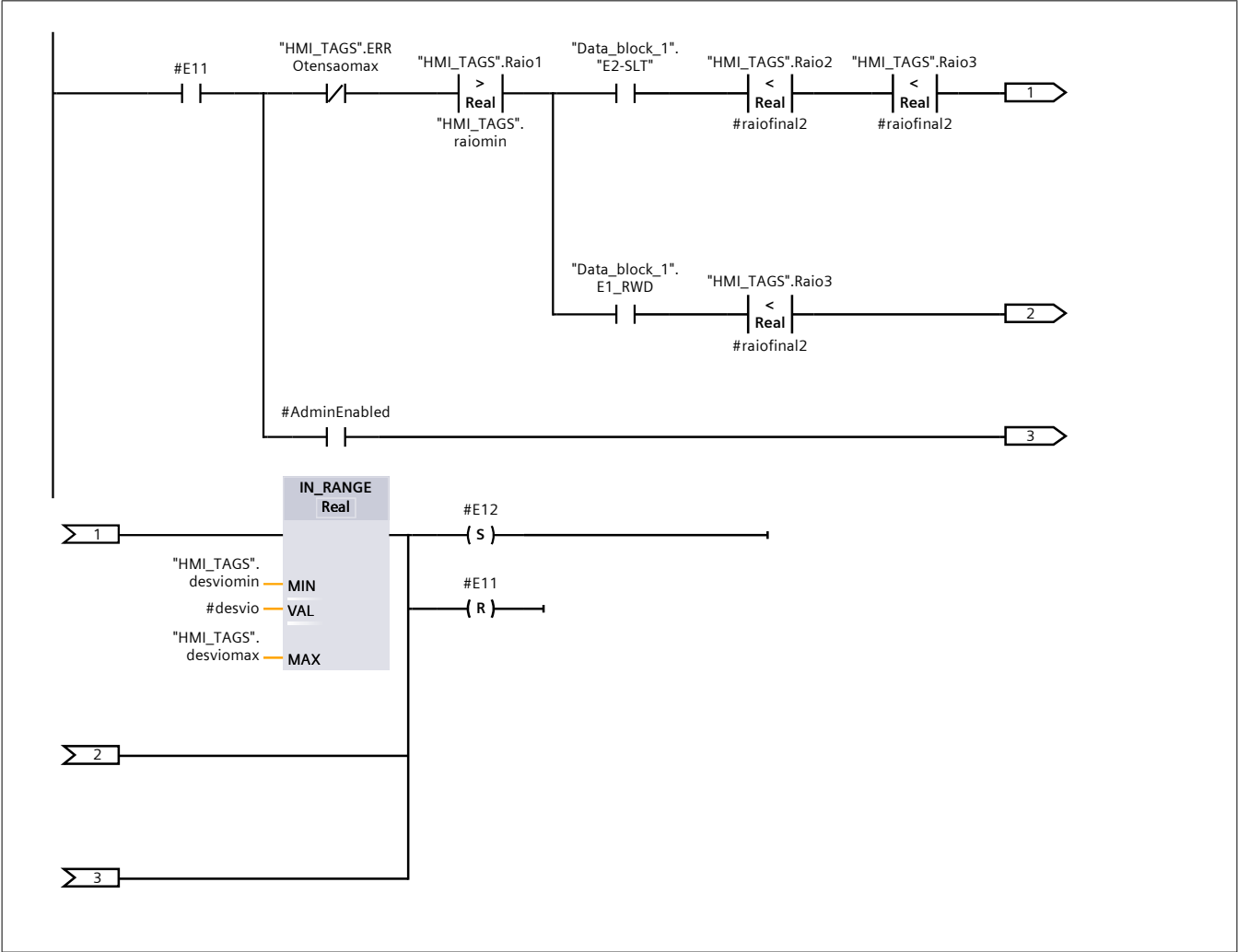
The diagram illustrates the logic for activating E11. It features two main parallel paths leading to coil #E11 (S). The top path includes a normally open contact #E10, followed by a normally open contact labeled %I0.1 "RESET", and a normally open contact labeled %I0.0 "EMR". The bottom path starts with a normally open contact #E13, followed by a normally closed contact labeled %I0.3 "STOP". After the STOP contact, the path splits into two parallel branches. The first branch contains a normally open contact #AdminEnabled in series with a normally open contact "HMI_TAGS".Raio3 > Real, where #raiofinal2 is the setpoint. The second branch contains a normally open contact "HMI_TAGS".Raio1 < Real, where "HMI_TAGS".raiommin is the setpoint. These two branches are in parallel with a third branch containing a normally open contact "Data_block_1". "E2-SLT" in series with a normally open contact "HMI_TAGS".Raio2 > Real, where #raiofinal2 is the setpoint. This entire parallel structure is then in series with a coil labeled "OUT_RANGE Real". Below this, there is a setpoint definition for "HMI_TAGS".Raio1 < Real, where "HMI_TAGS".raiommin is the setpoint. The bottom path continues with a normally open contact #E12, a normally open contact #AdminEnabled, and a normally open contact "Data_block_1". "E2-SLT" in series with a normally open contact "HMI_TAGS".Raio1 < Real, where "HMI_TAGS".raiommin is the setpoint. This is followed by a parallel structure of two branches: one with "HMI_TAGS".Raio2 > Real (setpoint #raiofinal2) and another with "HMI_TAGS".Raio3 > Real (setpoint #raiofinal2). This parallel structure is then in series with a coil labeled "OUT_RANGE Real". Below this, there is a setpoint definition for "HMI_TAGS".Raio1 < Real, where "HMI_TAGS".raiommin is the setpoint. The diagram also includes a setpoint definition for "HMI_TAGS".Raio1 < Real, where "HMI_TAGS".raiommin is the setpoint. The diagram is labeled 2.1 (Page1 - 4) at the bottom.

Network 1: Ativação E11 (2.1 / 2.1)

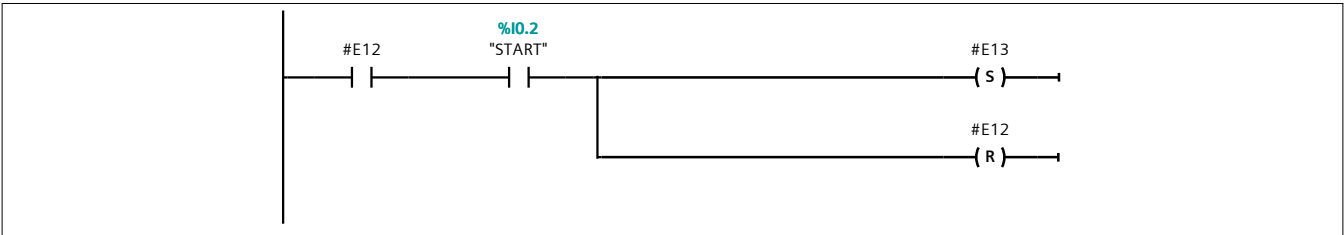
1.1 (Page1 - 3)



Network 2: Ativação E12

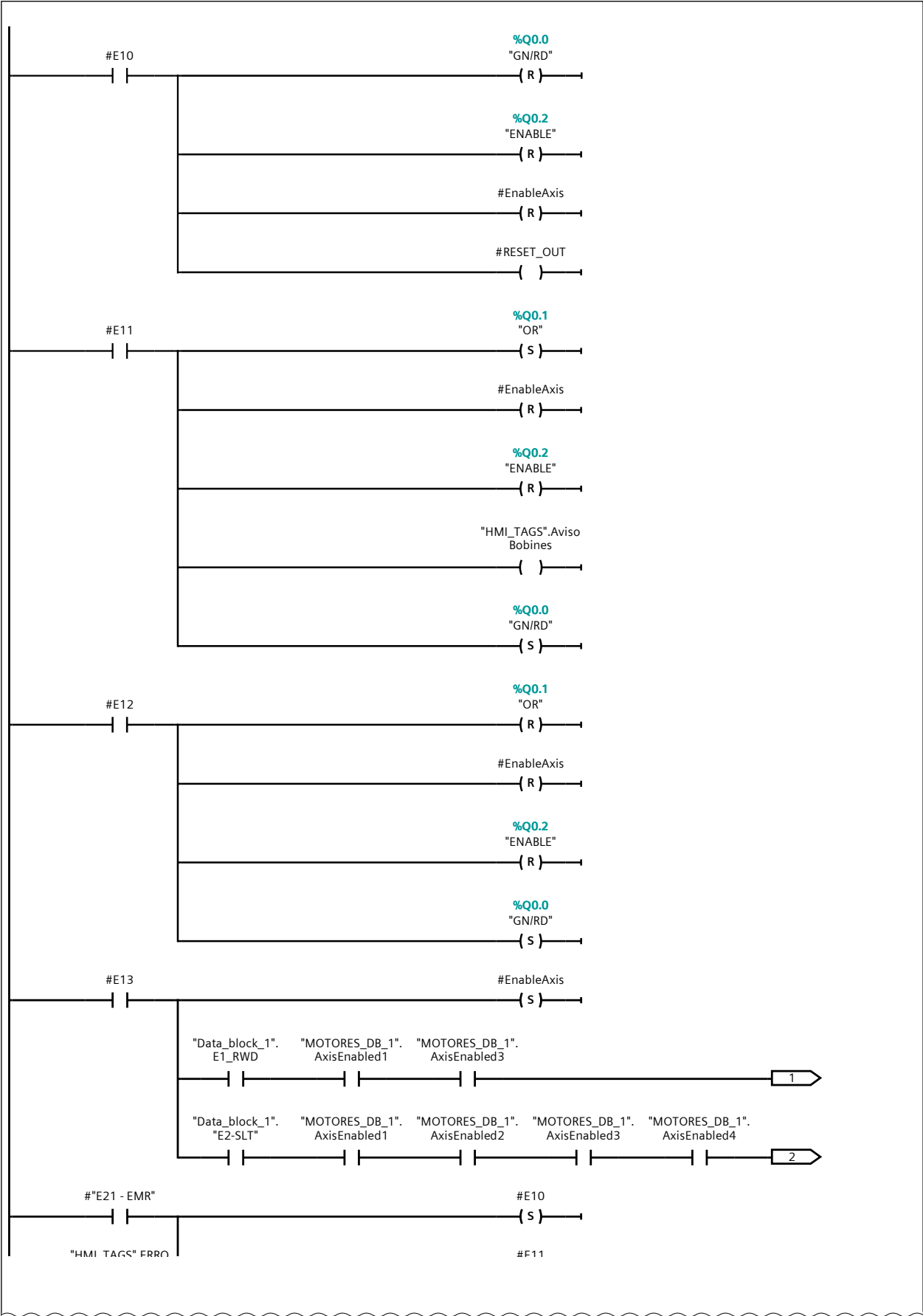


Network 3: ATIVAÇÃO E13



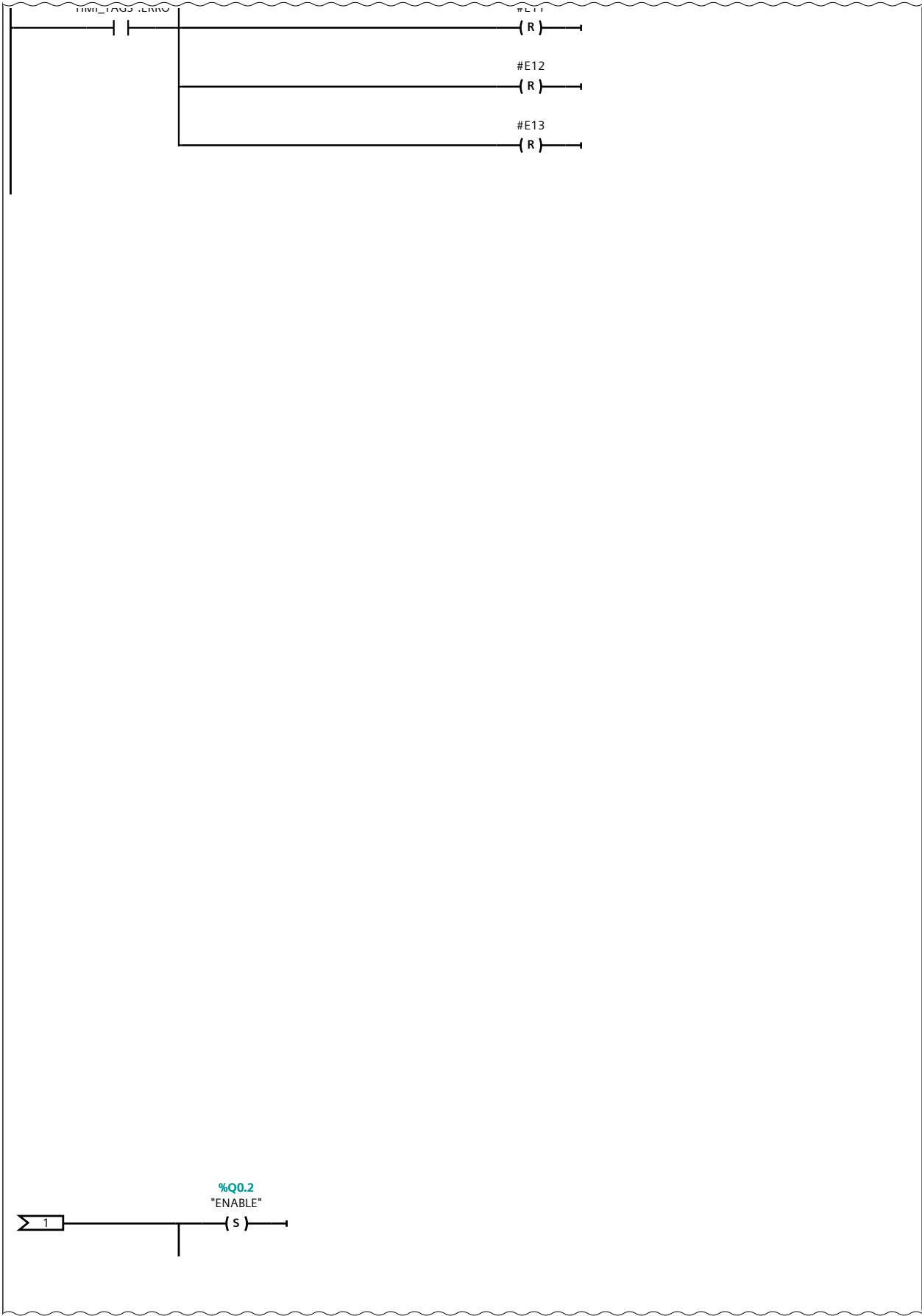
Network 4: ETAPA 10

Network 4: ETAPA 10 (1.1 / 3.1)



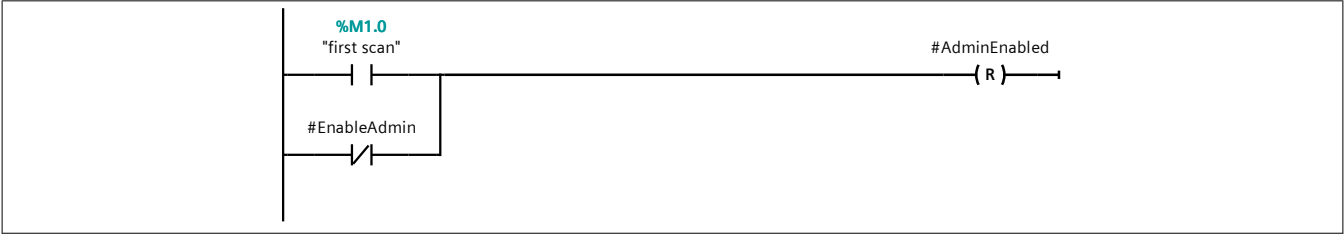
Network 4: ETAPA 10 (2.1 / 3.1)

1.1 (Page1 - 6)



3.1 (Page1 - 8)

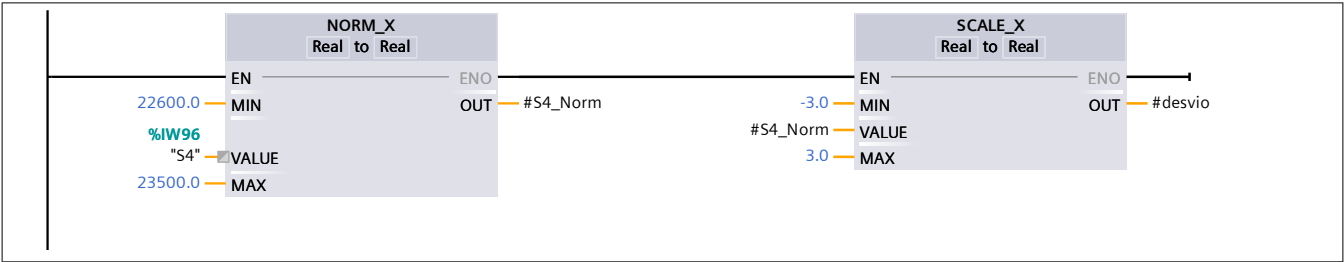
Network 5: Admin OFF



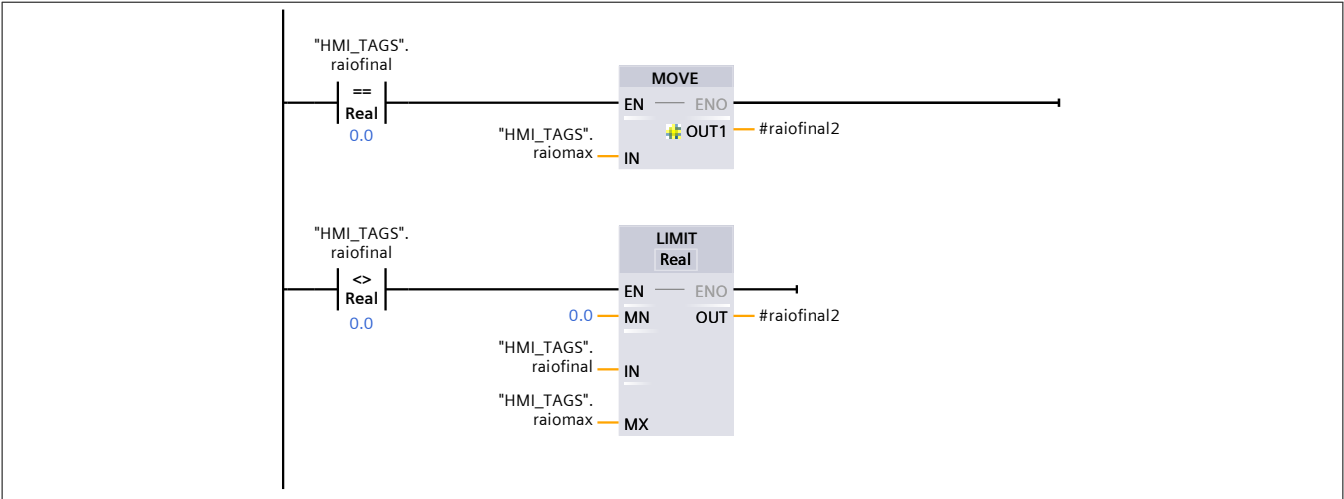
Network 6: Admin ON



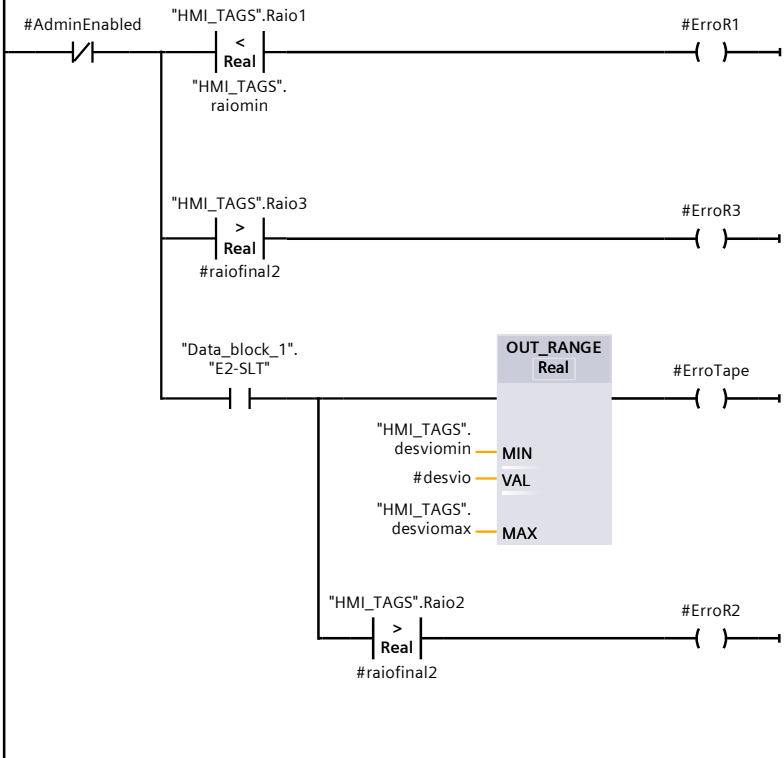
Network 7: Sensor de desvios



Network 8: raiofinal / raioimax



Network 9: Errors



Totally Integrated Automation Portal											
Name	Data type	Default value	Retain	Access- ible from HMI/OP C UA/We b API	Wri- ta- ble fro m HM I/O PC UA/ We b API	Visible in HMI engi- neer- ing	Set- point	Su- per- vi- sion			Comment
Raio1	Real	0.0	Non-retain	True	True	True	False				
AxisEnabled1	Bool	false	Non-retain	True	True	True	False				
Lockout	Bool	false	Non-retain	True	True	True	False				
errorV1	Bool	false	Non-retain	True	True	True	False				
erroVID1	Word	16#0	Non-retain	True	True	True	False				
actVelocity1	Real	0.0	Non-retain	True	True	True	False				
busy2	Bool	false	Non-retain	True	True	True	False				
inUpperLimit2	Bool	false	Non-retain	True	True	True	False				
inLowerLimit2	Bool	false	Non-retain	True	True	True	False				
actTorque2	Real	0.0	Non-retain	True	True	True	False				
errorTID2	Word	16#0	Non-retain	True	True	True	False				
AxisEnabled2	Bool	false	Non-retain	True	True	True	False				
actVelocity2	Real	0.0	Non-retain	True	True	True	False				
errorV2	Bool	false	Non-retain	True	True	True	False				
errorVID2	Word	16#0	Non-retain	True	True	True	False				
errorT2	Bool	false	Non-retain	True	True	True	False				
busy3	Bool	false	Non-retain	True	True	True	False				
inUpperLimit3	Bool	false	Non-retain	True	True	True	False				
inLowerLimit3	Bool	false	Non-retain	True	True	True	False				
actTorque3	Real	0.0	Non-retain	True	True	True	False				
errorT3	Bool	false	Non-retain	True	True	True	False				
errorTID3	Word	16#0	Non-retain	True	True	True	False				
AxisEnabled3	Bool	false	Non-retain	True	True	True	False				
AxisEnabled4	Bool	false	Non-retain	True	True	True	False				
ActVelocity4	Real	0.0	Non-retain	True	True	True	False				

Totally Integrated Automation Portal											
Name	Data type	Default value	Retain	Access- ible from HMI/OP C UA/We b API	Wri- ta- ble fro m HM I/O PC UA/ We b API	Visible in HMI engi- neer- ing	Set- point	Su- per- vi- sion			Comment
error4	Bool	false	Non-retain	True	True	True	False				
errorID4	Word	16#0	Non-retain	True	True	True	False				
errorV3	Bool	false	Non-retain	True	True	True	False				
errorVID3	Word	16#0	Non-retain	True	True	True	False				
actVelocity3	Real	0.0	Non-retain	True	True	True	False				
SpeedTape	Real	0.0	Non-retain	True	True	True	False				
busy1	Bool	false	Non-retain	True	True	True	False				
inUpperLimit1	Bool	false	Non-retain	True	True	True	False				
inLowerLimit1	Bool	false	Non-retain	True	True	True	False				
actTorque1	Real	0.0	Non-retain	True	True	True	False				
errorT1	Bool	false	Non-retain	True	True	True	False				
errorTID1	Word	16#0	Non-retain	True	True	True	False				
tensaoreal	Real	0.0	Non-retain	True	True	True	False				
tensaomaxadm	Real	0.0	Non-retain	True	True	True	False				
ERROtensaomax	Bool	false	Non-retain	True	True	True	False				
InOut											
▼ Static											
disS4	Real	0.0	Non-retain	True	True	True	False				
disS3	Real	0.0	Non-retain	True	True	True	False				
disS2	Real	0.0	Non-retain	True	True	True	False				
disS1	Real	0.0	Non-retain	True	True	True	False				
▼ SinaSpeed_Instance_1	SinaSpeed			False	False	False	False				
▼ Input											
EnableAxis	Bool	0	Non-retain	False	False	False	False				0-->1; 1 = Enable the drive (OFF2 / OFF 3 are 1 in default status) (OFF1 = 0-->1)

Totally Integrated Automation Portal										
Name	Data type	Default value	Retain	Access- ible from HMI/OP C UA/Web API	Wri- ta- ble from HMI I/O PC UA/ Web API	Visible in HMI engi- neering	Set- point	Su- per- vi- sion		Comment
AckError	Bool	0	Non-retain	False	False	False	False			1 = Acknowledge drive error
SpeedSp	Real	0.0	Non-retain	False	False	False	False			Speed standardises with the standardisation factor
RefSpeed	Real	0.0	Non-retain	False	False	False	False			Standardisation factor of speed
ConfigAxis	Word	16#003F	Non-retain	False	False	False	False			binary programmed input to control all functions in the telegram without its own function block input
HWIDSTW	HW_IO	0	Non-retain	False	False	False	False			Hardware Identifier set point slot
HWIDZSW	HW_IO	0	Non-retain	False	False	False	False			Hardware Identifier actual value slot
▼ Output										
AxisEnabled	Bool	0	Non-retain	False	False	False	False			1 = Drive is enabled
Lockout	Bool	0	Non-retain	False	False	False	False			1 = Drive lockout active
ActVelocity	Real	0.0	Non-retain	False	False	False	False			Actual in [U/min]
Error	Bool	0	Non-retain	False	False	False	False			1 = Error (FB and Infeed)
Status	Word	0	Non-retain	False	False	False	False			Status output (7002 = FB in operation; 8xxx = error description - read the manual)
DiagId	Word	16#0000	Non-retain	False	False	False	False			Error codes of the cyclic system function blocks DPWR / DPRD_DAT
InOut										
▼ Static										

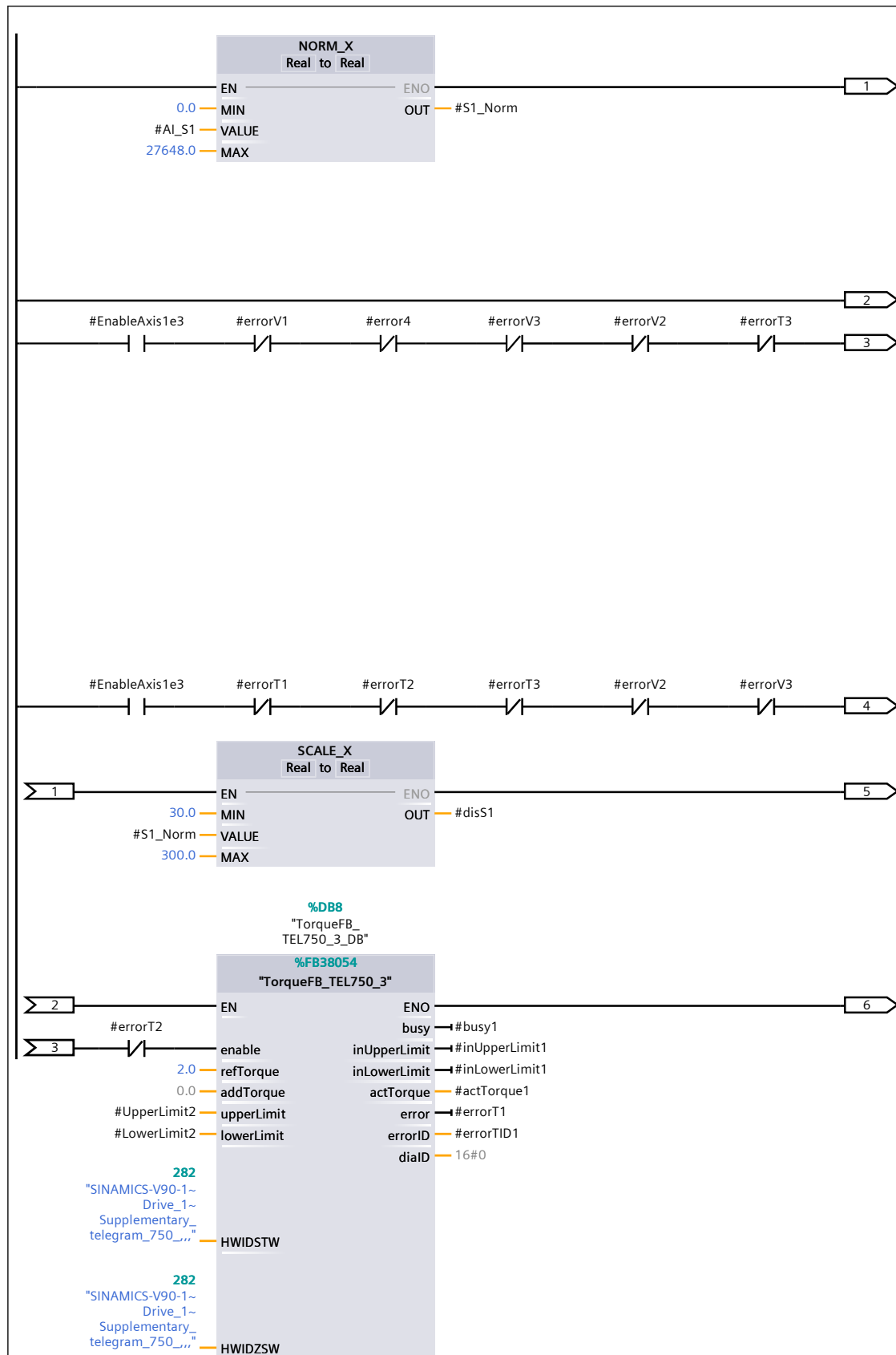
Totally Integrated Automation Portal									
Name	Data type	Default value	Retain	Access- ible from HMI/OP C UA/Web API	Wri- ta- ble fro m HM I/O PC UA/ Web API	Visible in HMI engi- neer- ing	Set- point	Sup- er- vi- sion	Comment
STW1	Word	WORD#16#0000	Non-retain	False	False	False	False		STW1sxSTW1 : STRUCT Bit08 : BOOL:=False; // ST- Wort-1 Bit 08 -- > Reserve Bit09 : BOOL:=False; // ST- Wort-1 Bit 09 -- > Reserve Bit10 : BOOL:=True; // ST- Wort-1 Bit 10 --> FÃ¼hrung durch PLC Dir : BOOL:=False; // ST- Wort-1 Bit 11 -- > Direction Bit12 : BOOL:=False; // ST-Wort-1 Bit 12 --> Halte- bremsen unbedingt Ã¶ffnen Bit13 : BOOL:=False; // ST- Wort-1 Bit 13 --> Motorpotenzi- ometer Sollwert hÃ¶her Bit14 : BOOL:=False; // ST- Wort-1 Bit 14 --> Motorpotenzi- ometer Sollwert tiefer Bit15 : BOOL:=False; // ST- Wort-1 Bit 15 -- > Reserviert Off1 : BOOL:=False; // ST- Wort-1 Bit 00 -- > OFF1/ON (flanks acceptance) Off2 : BOOL:=True; // ST- Wort-1 Bit 01 -- > OFF2/ON (ena- ble possible) Off3 : BOOL:=True; // ST- Wort-1 Bit 02 --> OFF3/ON (enable possible) InvEn : BOOL:=True; // ST- Wort-1 Bit 03 --> Enable con- troller RampEn : BOOL:=True; // ST- Wort-1 Bit 04 --> Ramp ena- ble RampOn : BOOL:=True; // ST-

Totally Integrated Automation Portal									
Name	Data type	Default value	Retain	Access- ible from HMI/OP C UA/We b API	Wri- ta- ble fro m HM I/O PC UA/ We b API	Visible in HMI engi- neer- ing	Set- point	Su- per- vi- sion	Comment
									Wort-1 Bit 05 --> Ramp On SpEn : BOOL:=True; // ST- Wort-1 Bit 06 --> Speed set point enable AckFlt : BOOL:=False; // ST- Wort-1 Bit 07 --> Acknowledge fault END_STRUCT;
VelocitySP	Word	WORD#16#0000	Non-retain	False	Fals e	False	False		Setpoint of velocity

Totally Integrated Automation Portal									
Name	Data type	Default value	Retain	Access- ible from HMI/OP C UA/We b API	Wri- ta- ble from HM I/O PC UA/ We b API	Visible in HMI engi- neer- ing	Set- point	Sup- er- vi- sion	Comment
ZSW1	Word	WORD#16#0000	Non-retain	False	False	False	False		ZSW1sxZSW1 : STRUCT SpDev : BOOL:=False; // ZSW-Wort-1 = Schleppfehler im Toleranzber- eich Pcd : BOOL:=False; // ZSW-Wort-1 = PZD-FÃ¼hrung er- reicht Comp : BOOL:=False; // ZSW-Wort-1 = Zielposition er- reicht CurLim : BOOL:=False; // ZSW-Wort-1 = Referenzpunkt ge- setzt Brake : BOOL:=False; // ZSW-Wort-1 = Haltebremse Ã¶ffnen Motover : BOOL:=False; // ZSW-Wort-1 = keine Warnung Ãœbertemperatur Motor Dir : BOOL:=False; // ZSW-Wort-1 = Di- rection Invover : BOOL:=False; // ZSW-Wort-1 = keine Warnung thermische Ãœ- berlast Leistung- steil Rts : BOOL:=False; // ZSW-Wort-1 = Ready to power up / to start Rdy : BOOL:=False; // ZSW-Wort-1 = Ready to op- erate IOp : BOOL:=False; // ZSW-Wort-1 = In operation (operation ena- bled) Fault : BOOL:=False; // ZSW-Wort-1 = Fault present NoOff2 : BOOL:=False; //

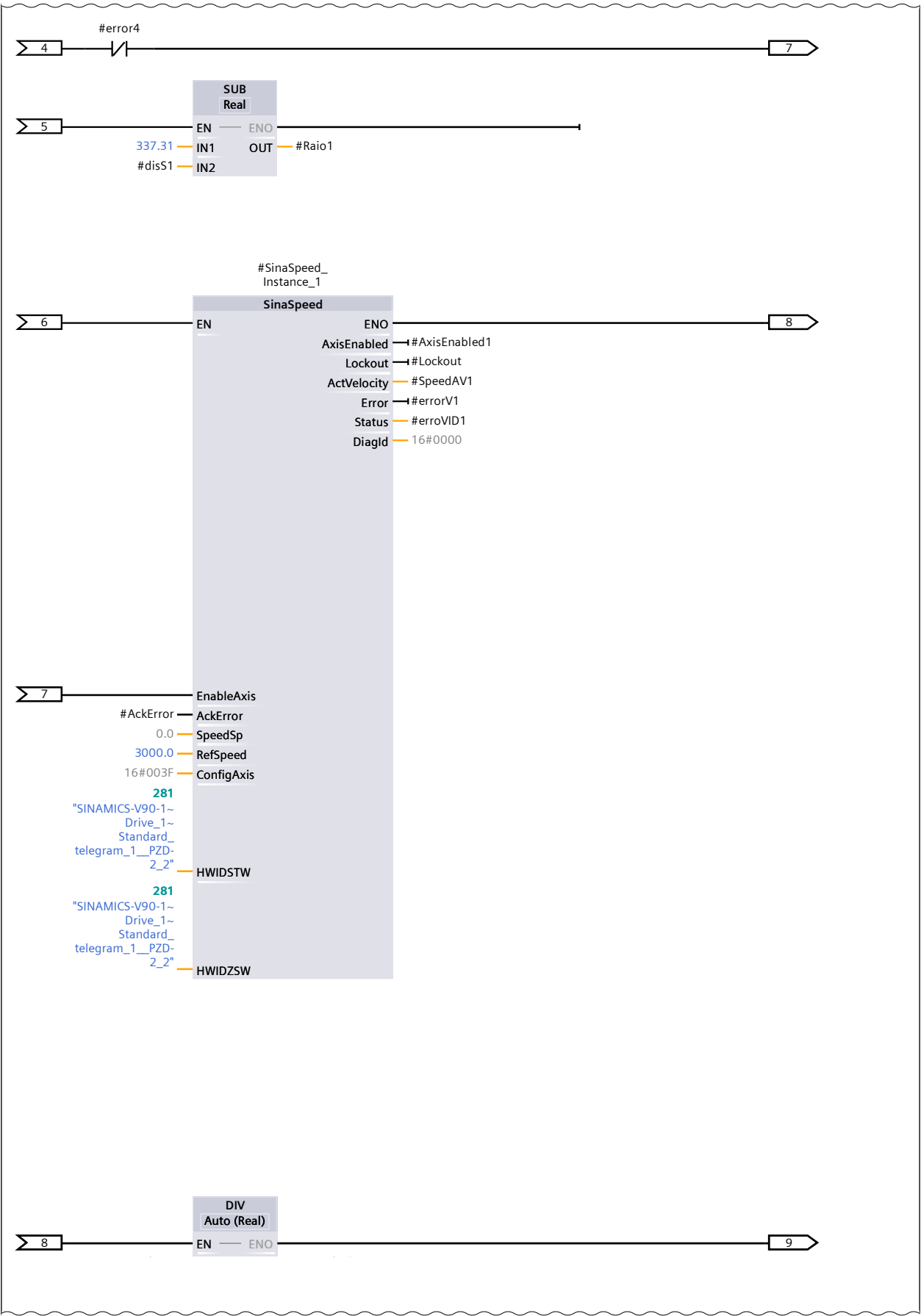
Totally Integrated Automation Portal										
Name	Data type	Default value	Retain	Access- ible from HMI/OP C UA/Web API	Wri- ta- ble from HM I/O PC UA/ Web API	Visible in HMI engi- neering	Set- point	Su- per- vi- sion	Comment	
									ZSW-Wort-1 = OFF2 inactive NoOff3 : BOOL:=False; // ZSW-Wort-1 = OFF3 inactive Inhibit : BOOL:=False; // ZSW-Wort-1 = Power ON inhibit active Alarm : BOOL:=False; // ZSW-Wort-1 = Alarm / Warning present END_STRUCT;	
VelocityAV	Word	WORD#16#0000	Non-retain	False	False	False	False		Feedback of velocity	
SpeedSp2_1	Real	0.0	Non-retain	True	True	True	False			
SpeedSp2_2	Real	0.0	Non-retain	True	True	True	False			
SpeedAV1	Real	0.0	Non-retain	True	True	True	False			
Speed4	Real	0.0	Non-retain	True	True	True	False			
SpeedAV4	Real	0.0	Non-retain	True	True	True	False			
SpeedAV2	Real	0.0	Non-retain	True	True	True	False			
SpeedAV3	Real	0.0	Non-retain	True	True	True	False			
S1_Norm	Real	0.0	Non-retain	True	True	True	False			
UpperLimit2	Real	0.0	Non-retain	True	True	True	False			
LowerLimit2	Real	0.0	Non-retain	True	True	True	False			
S2_Norm	Real	0.0	Non-retain	True	True	True	False			
S3_Norm	Real	0.0	Non-retain	True	True	True	False			
LowerLimit	Real	0.0	Non-retain	True	True	True	False			
UpperLimit	Real	0.0	Non-retain	True	True	True	False			
S4_Norm	Real	0.0	Non-retain	True	True	True	False			
Torque1	Real	0.0	Non-retain	True	True	True	False			

Network 1: motor 1 (1.1 / 3.1)



Network 1: motor 1 (2.1 / 3.1)

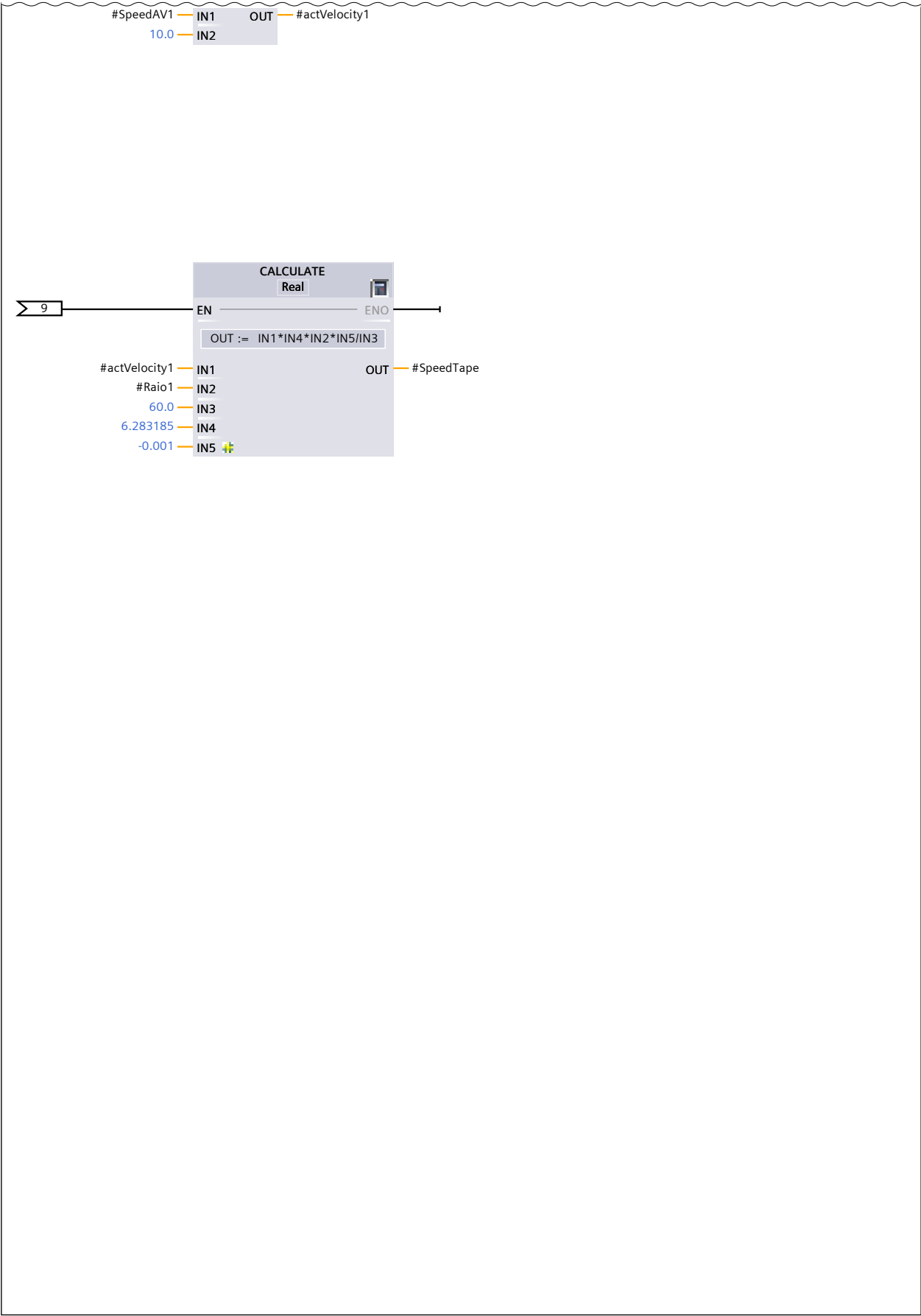
1.1 (Page1 - 10)



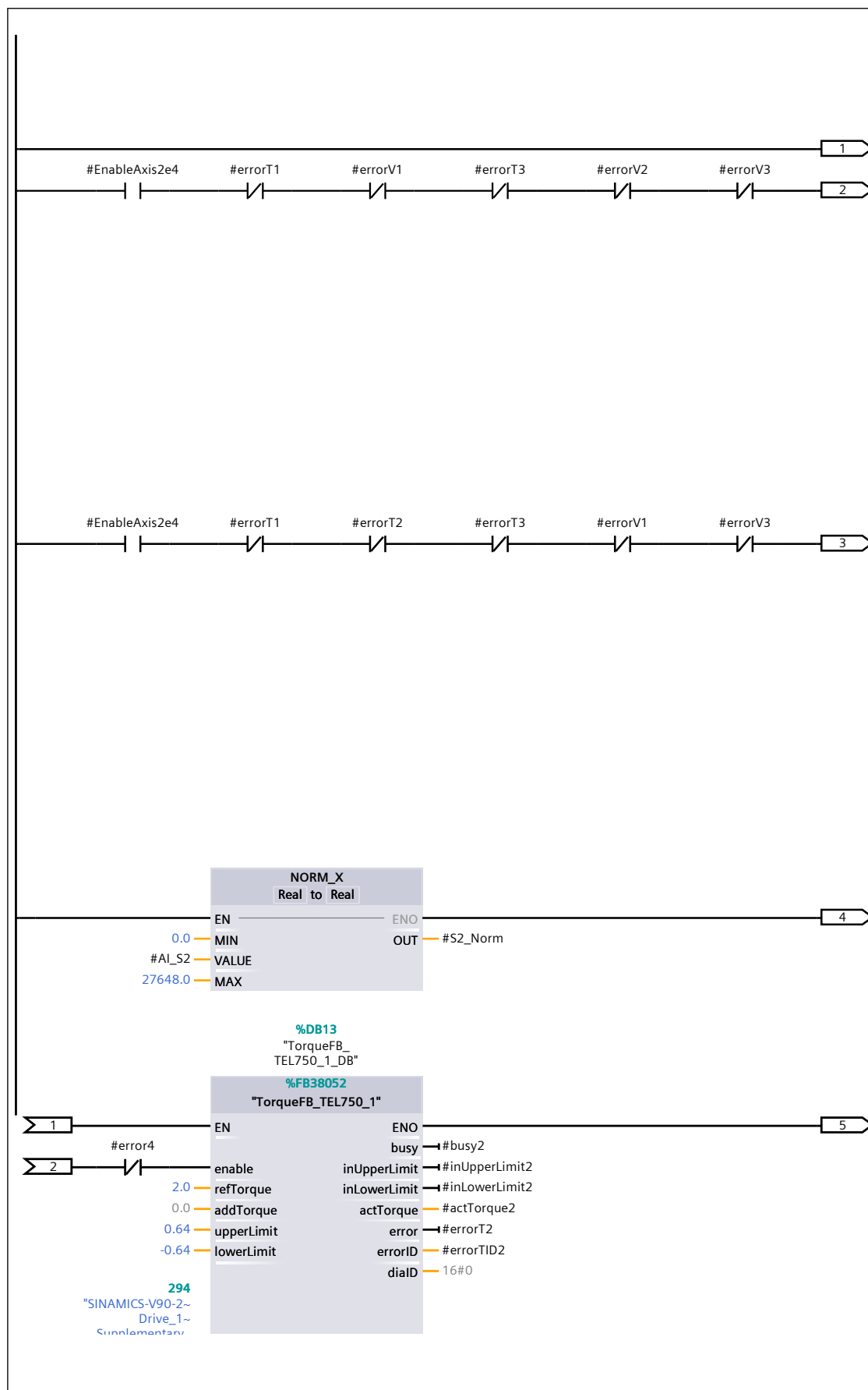
3.1 (Page1 - 12)

Network 1: motor 1 (3.1 / 3.1)

2.1 (Page1 - 11)

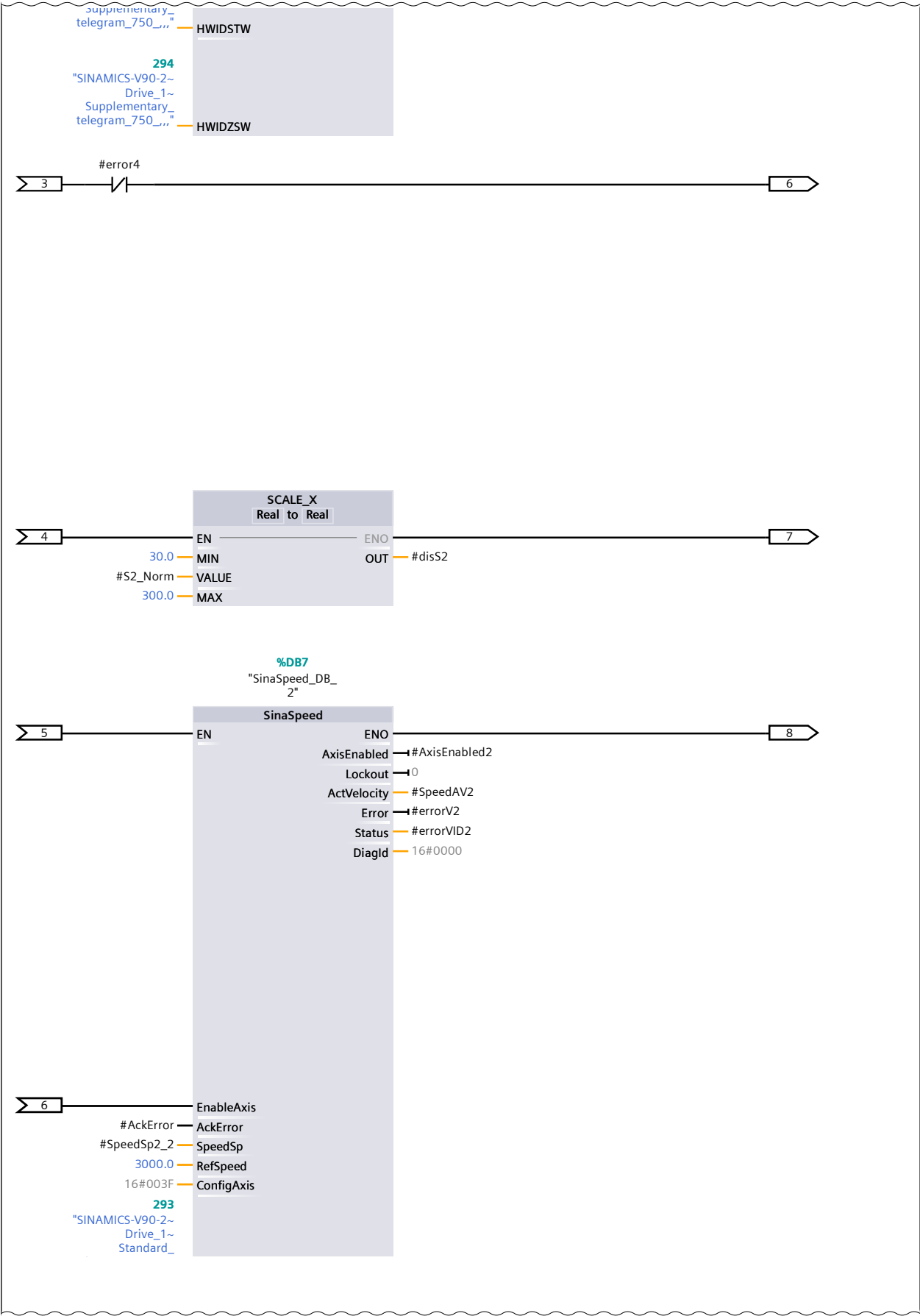


Network 2: motor2 (1.1 / 4.1)



Network 2: motor2 (2.1 / 4.1)

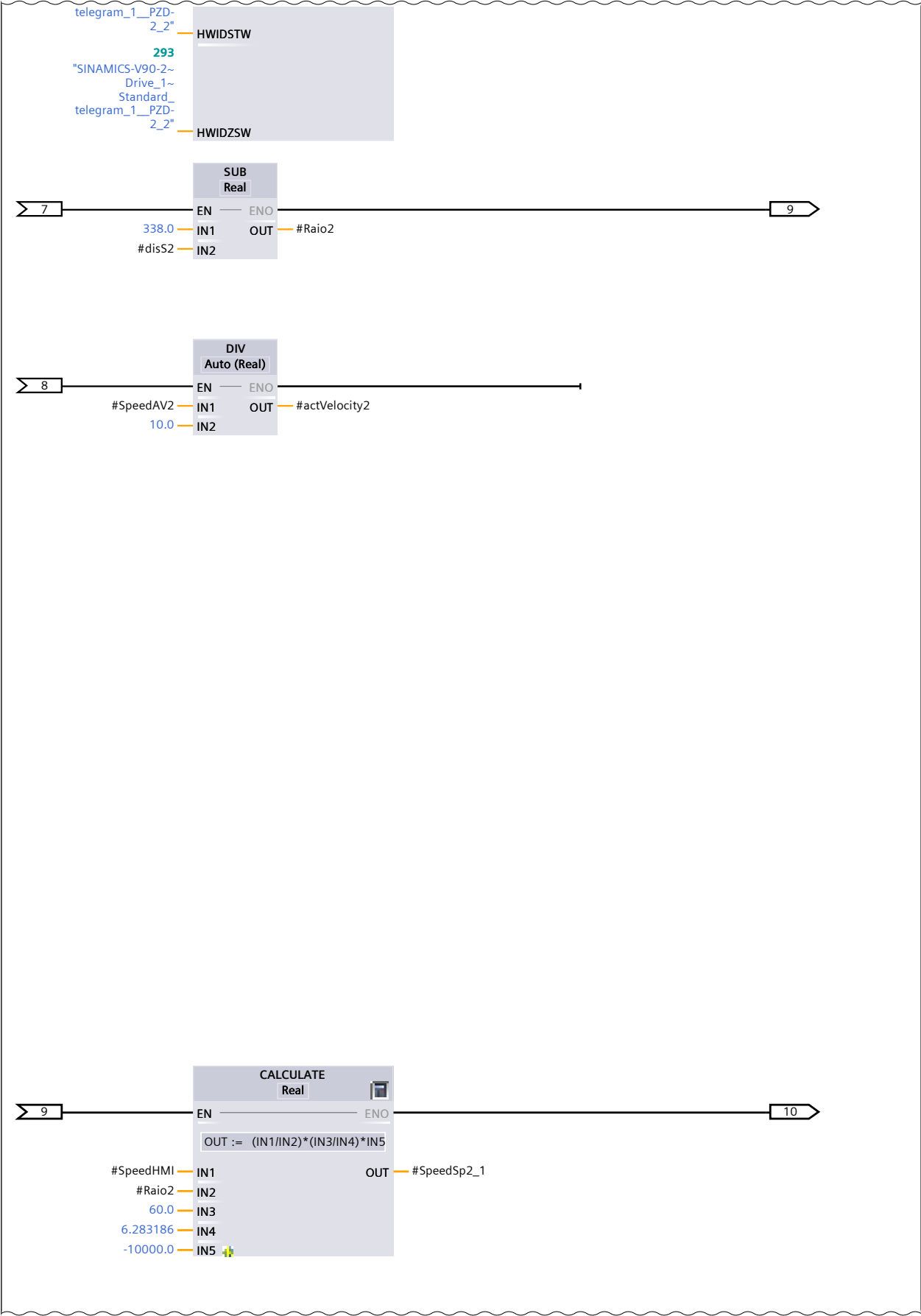
1.1 (Page1 - 14)



3.1 (Page1 - 16)

Network 2: motor2 (3.1 / 4.1)

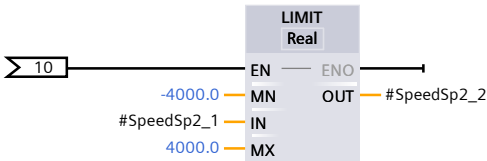
2.1 (Page1 - 15)



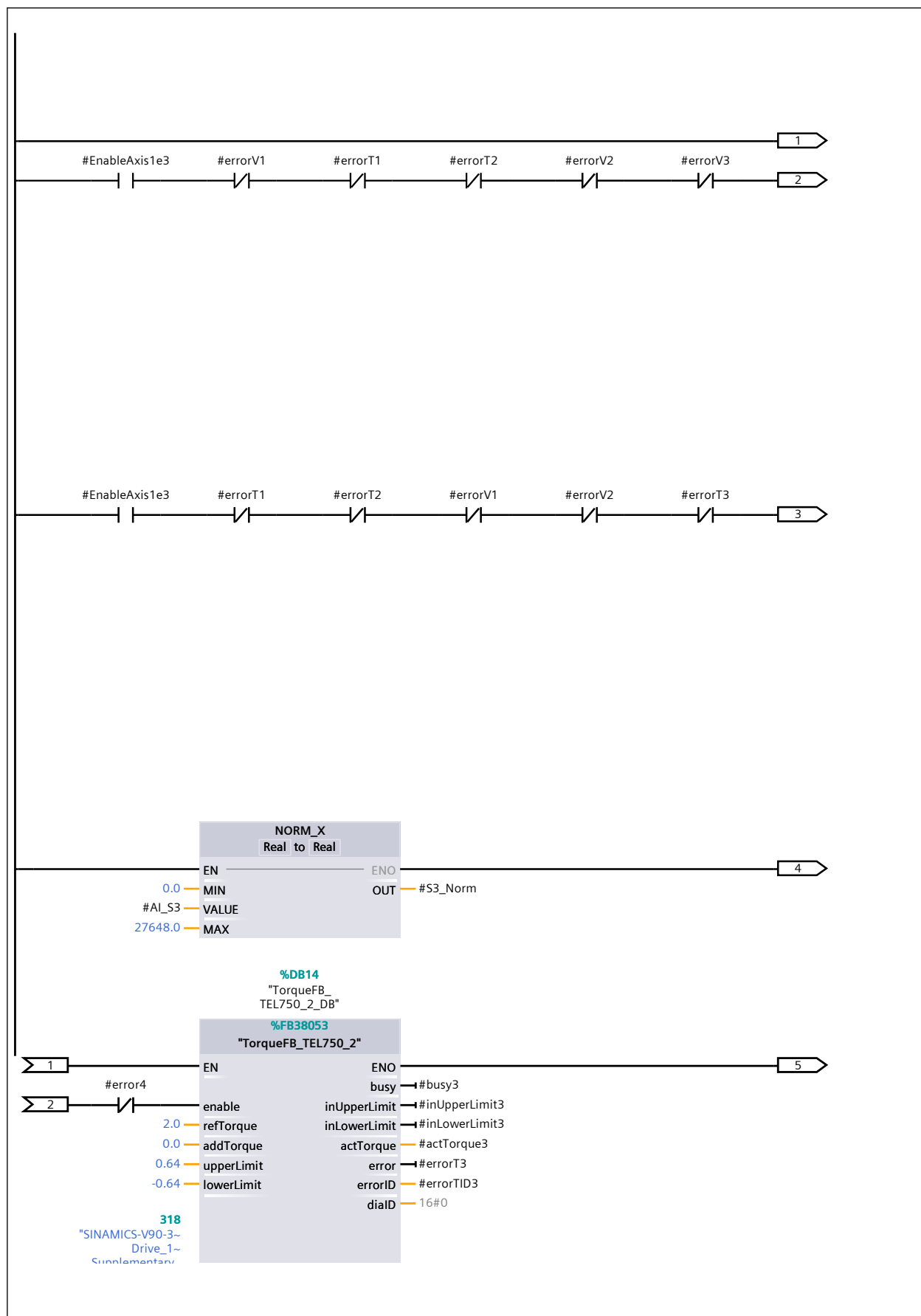
4.1 (Page1 - 17)

Network 2: motor2 (4.1 / 4.1)

3.1 (Page1 - 16)

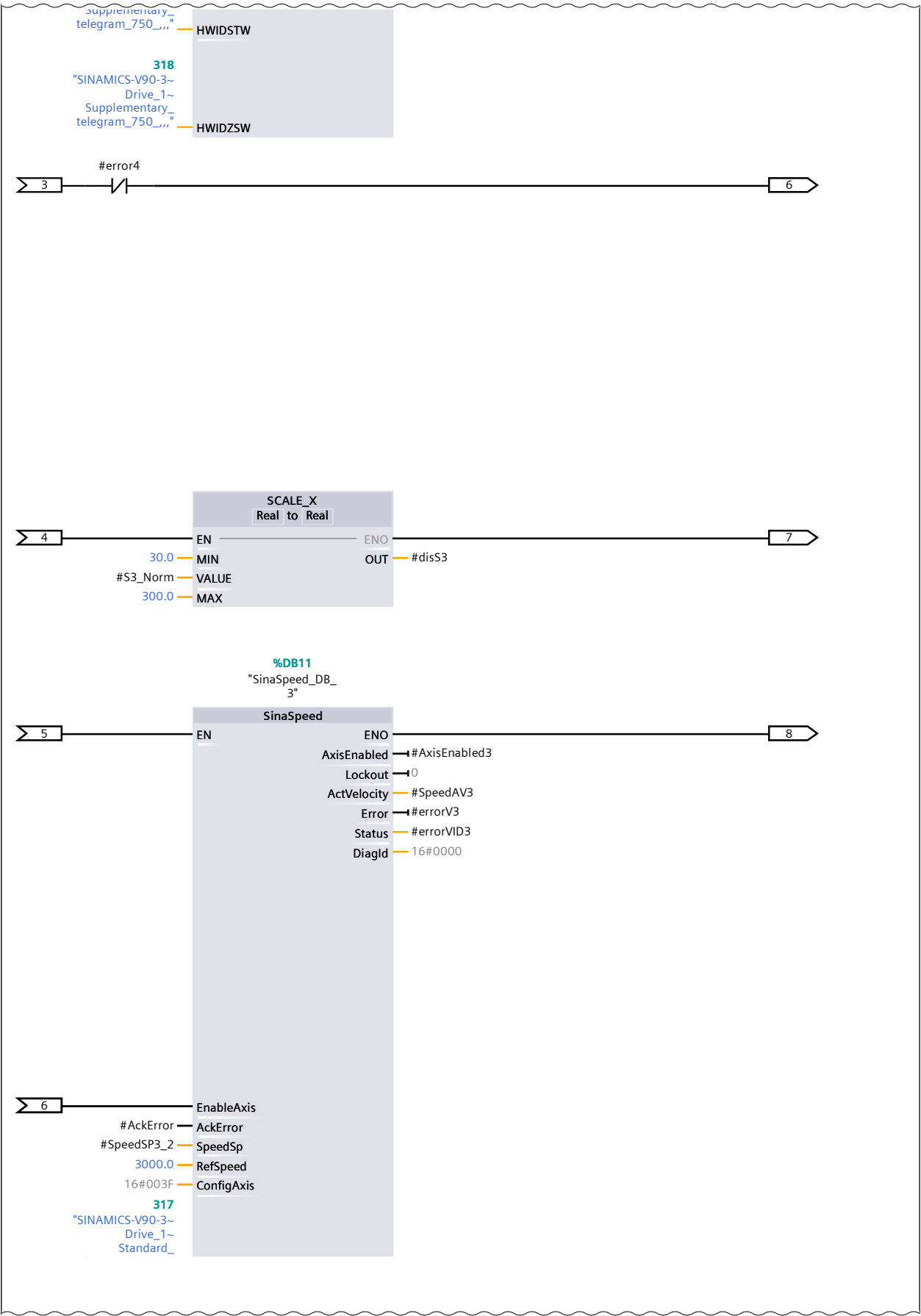


Network 3: motor3 (1.1 / 4.1)



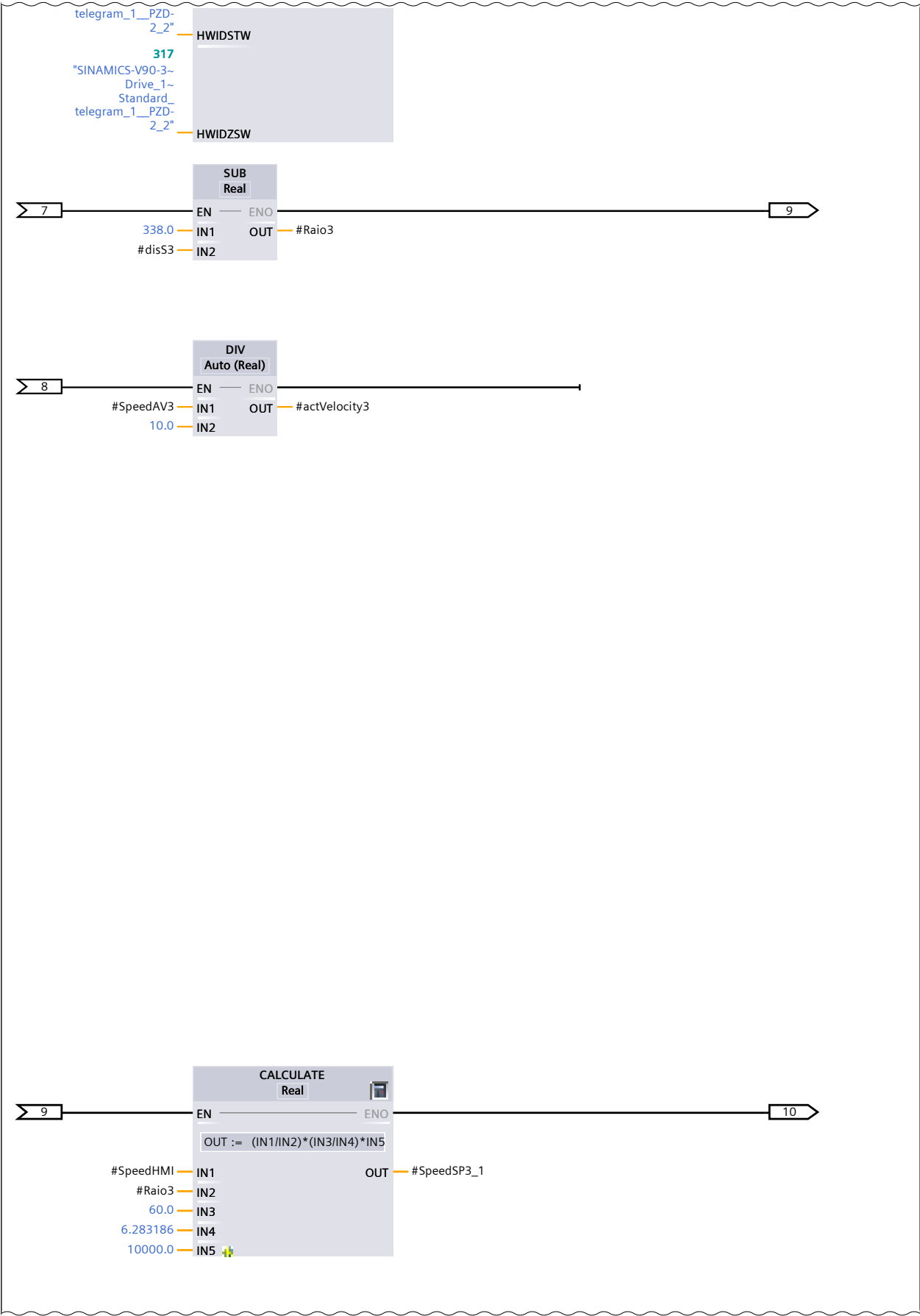
Network 3: motor3 (2.1 / 4.1)

1.1 (Page1 - 19)



Network 3: motor3 (3.1 / 4.1)

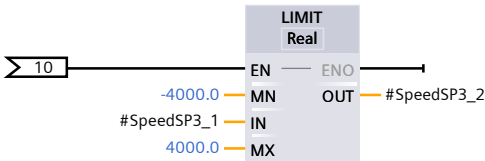
2.1 (Page1 - 20)



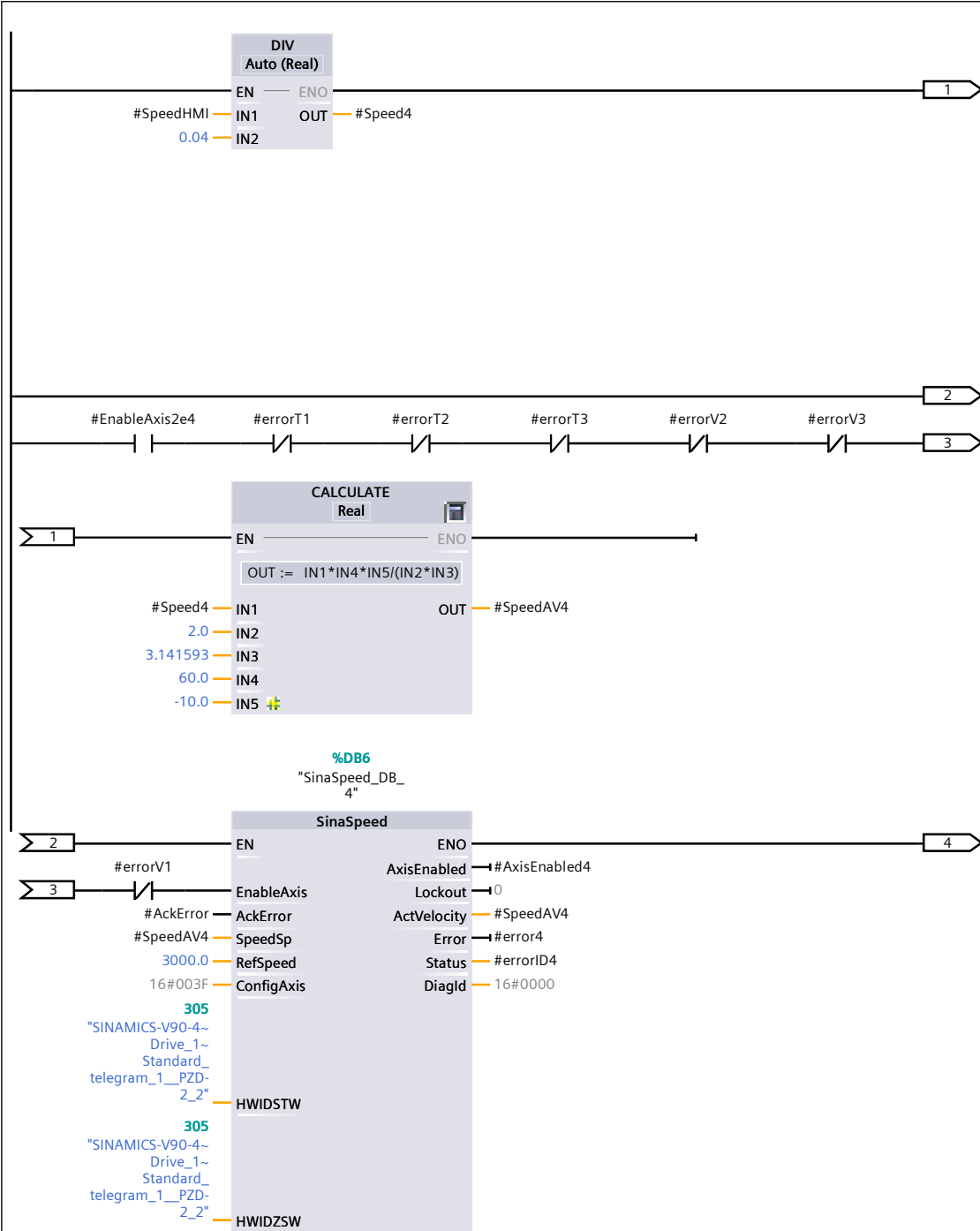
4.1 (Page1 - 22)

Network 3: motor3 (4.1 / 4.1)

3.1 (Page1 - 21)

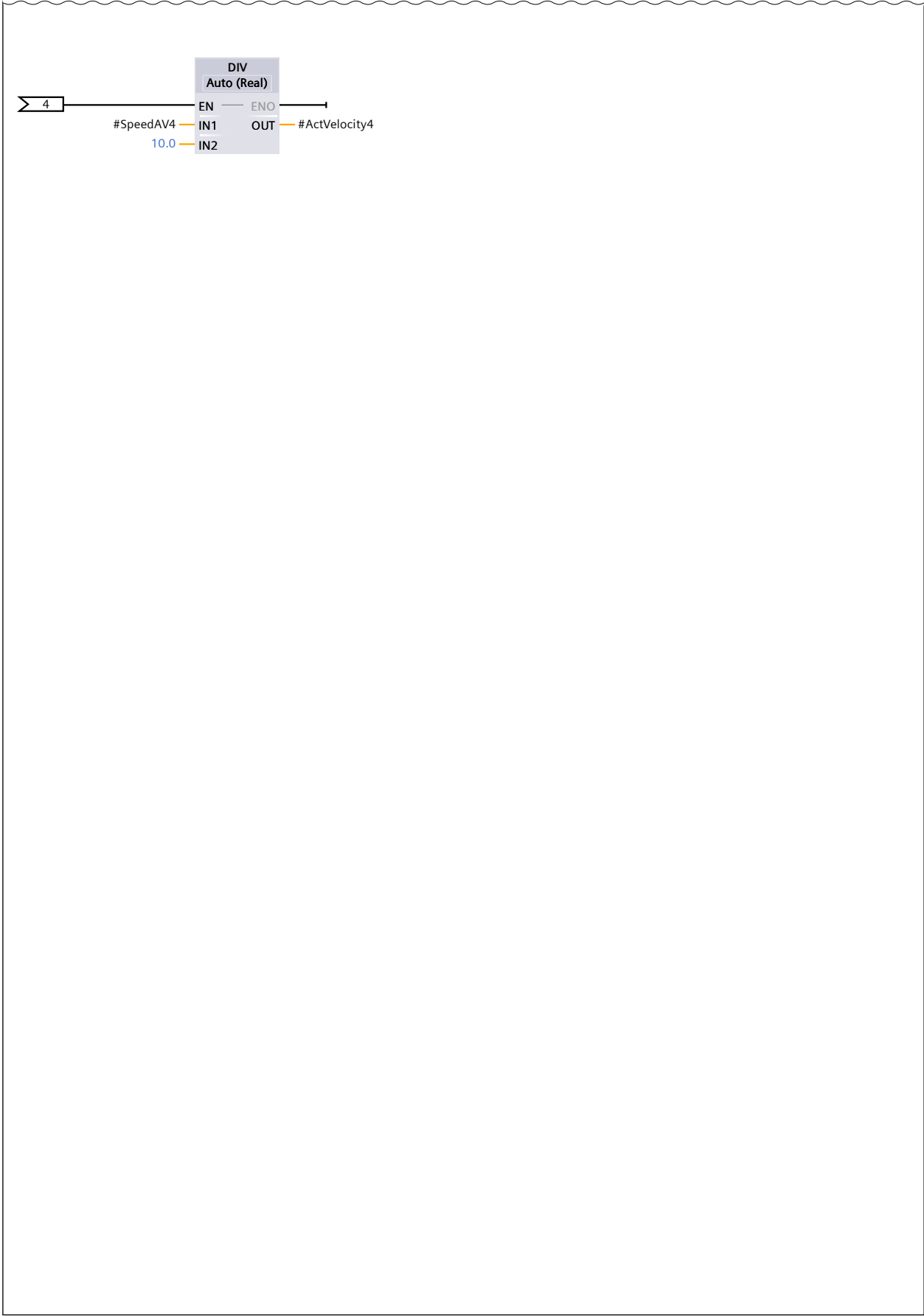


Network 4: motor4 (1.1 / 2.1)

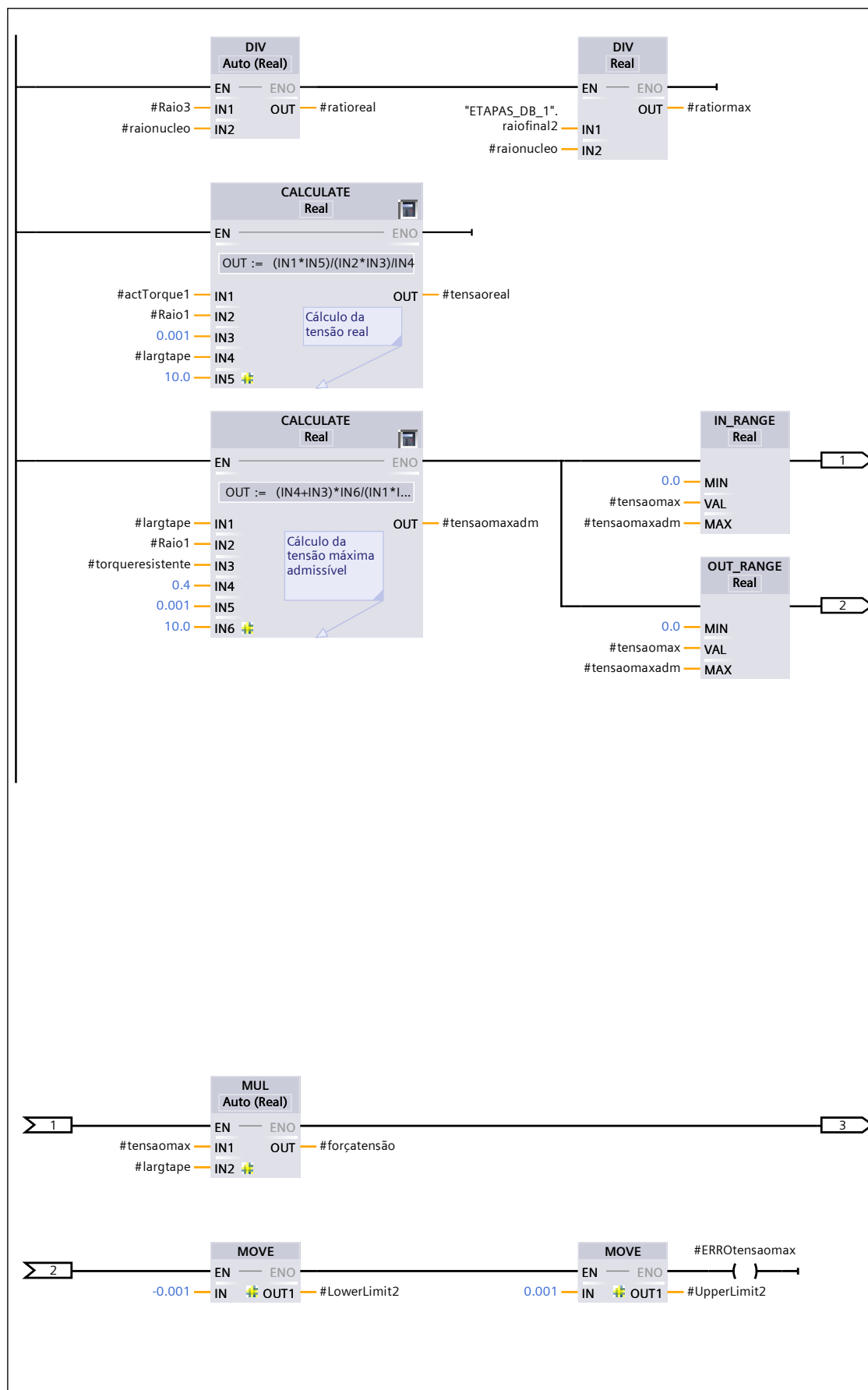


Network 4: motor4 (2.1 / 2.1)

1.1 (Page1 - 24)

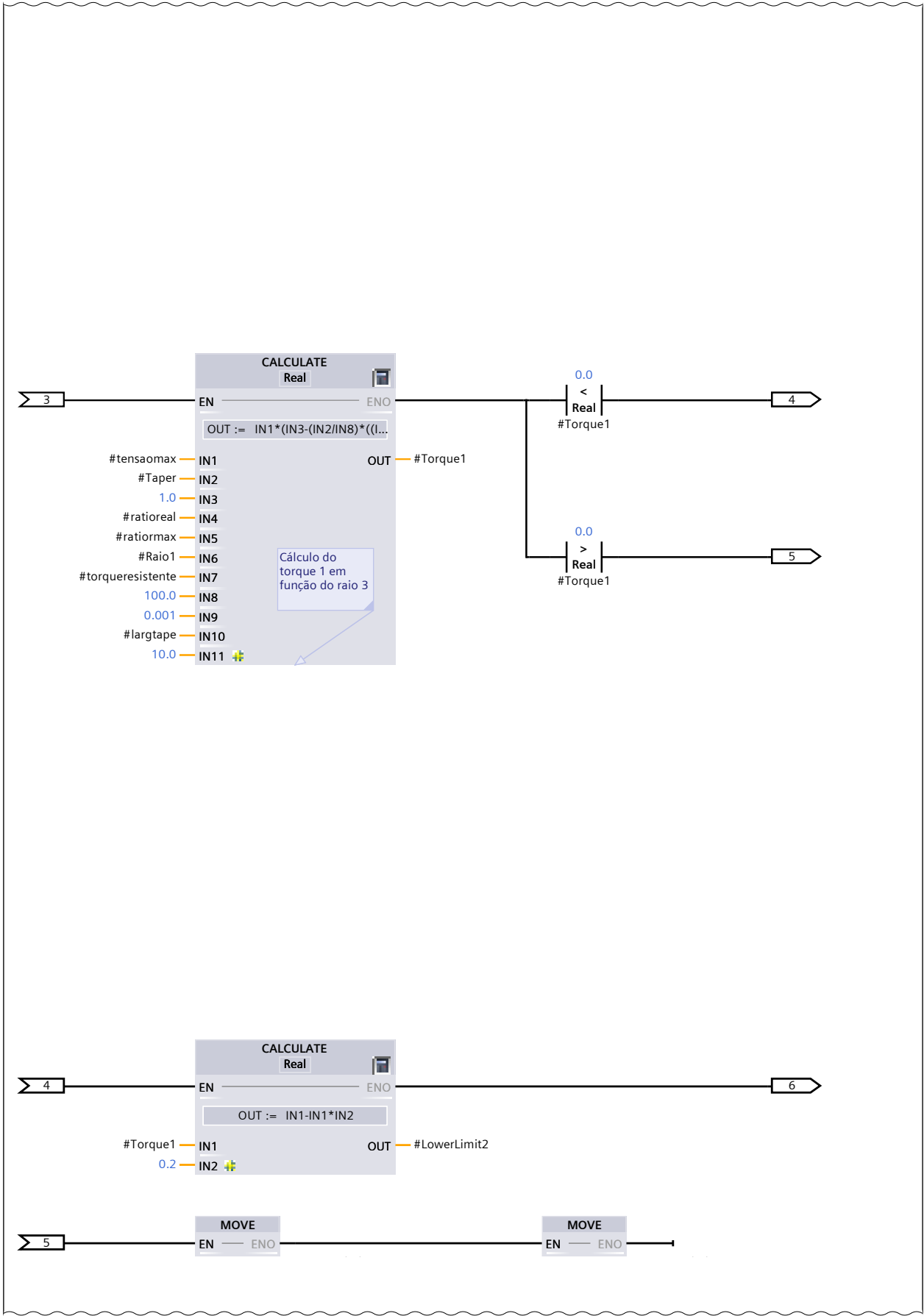


Network 5: Cálculo do torque (1.1 / 3.1)



Network 5: Cálculo do torque (2.1 / 3.1)

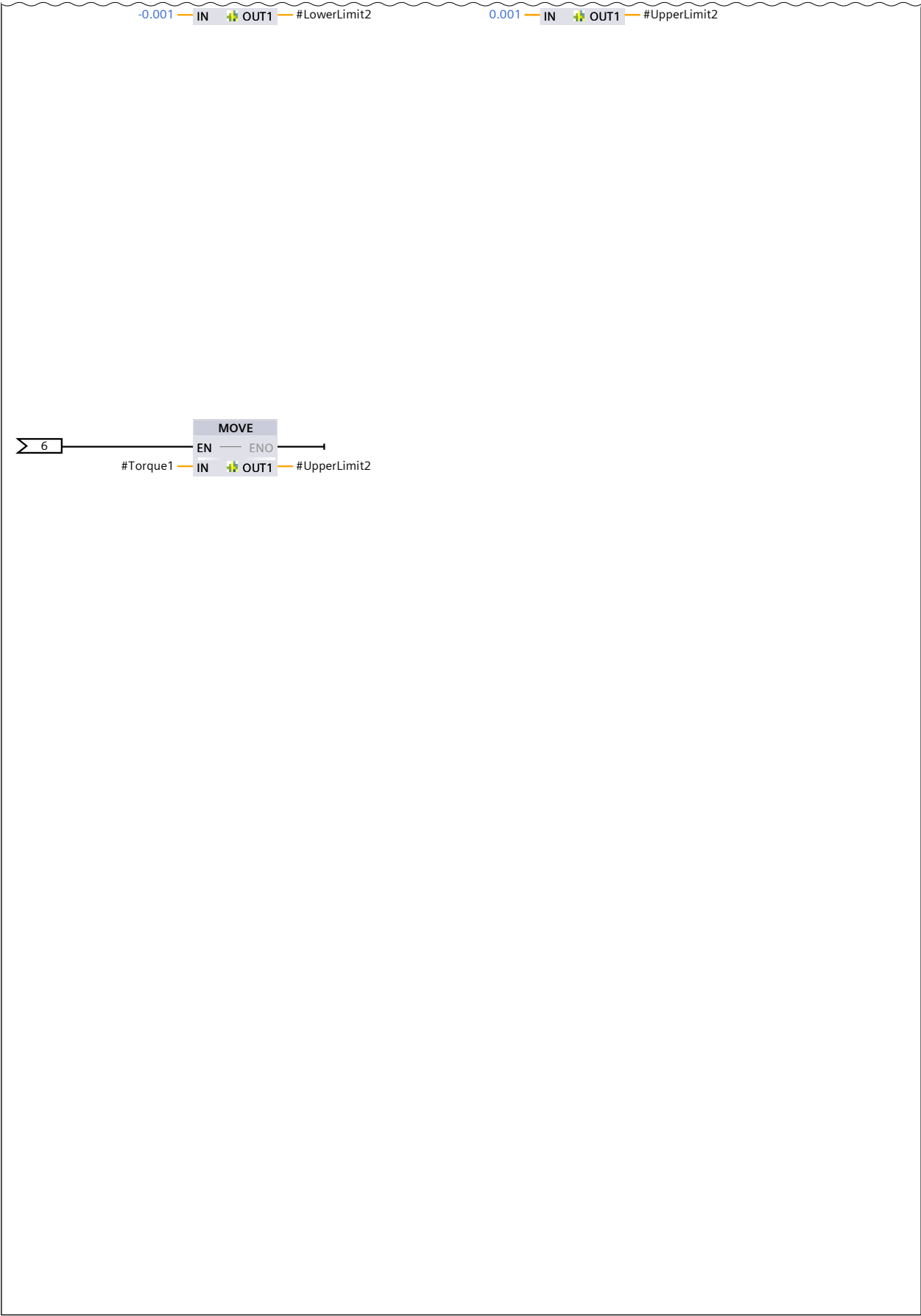
1.1 (Page1 - 27)



3.1 (Page1 - 29)

Network 5: Cálculo do torque (3.1 / 3.1)

2.1 (Page1 - 28)



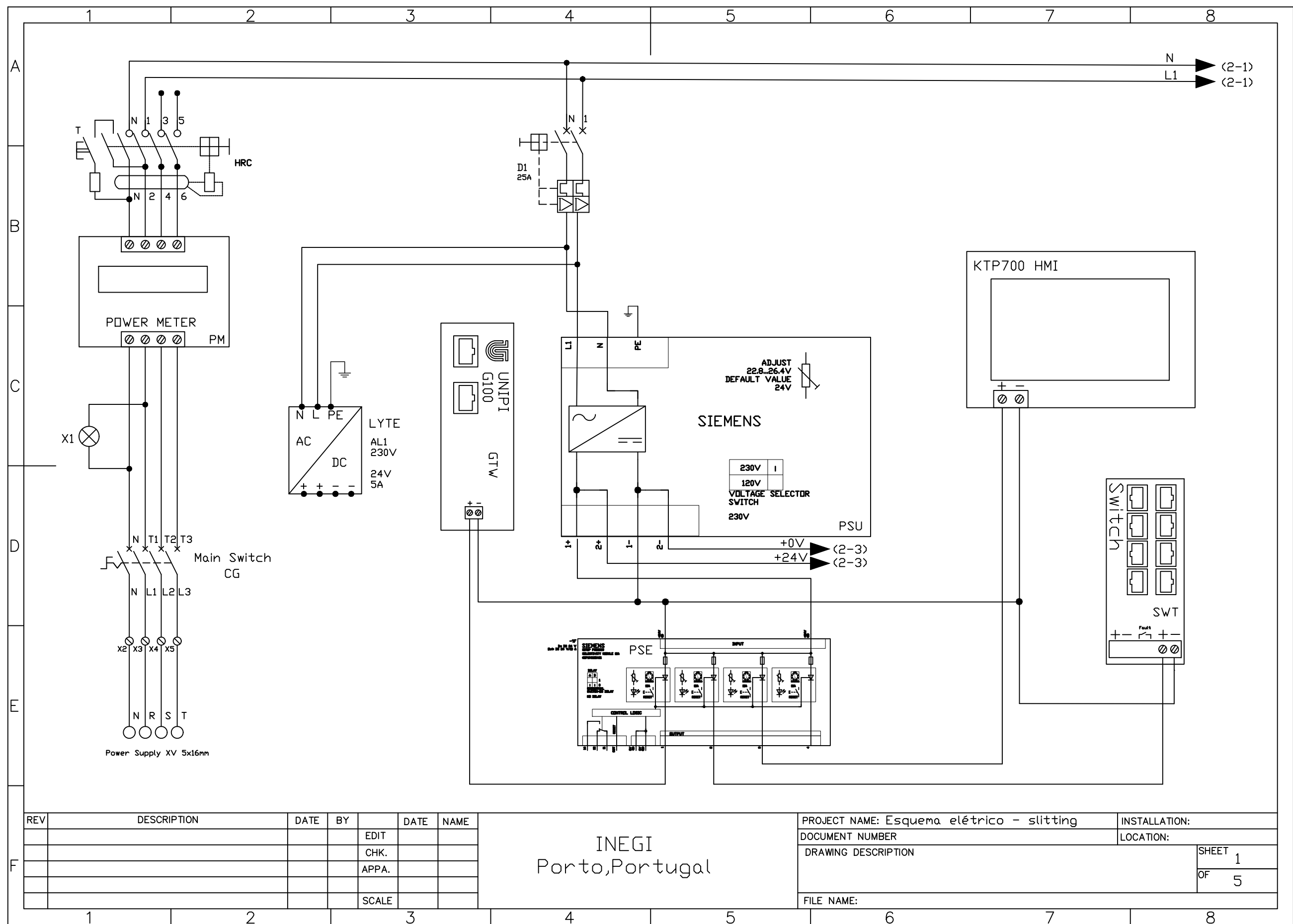
slitting / PLC_1 [CPU 1212C AC/DC/Rly]

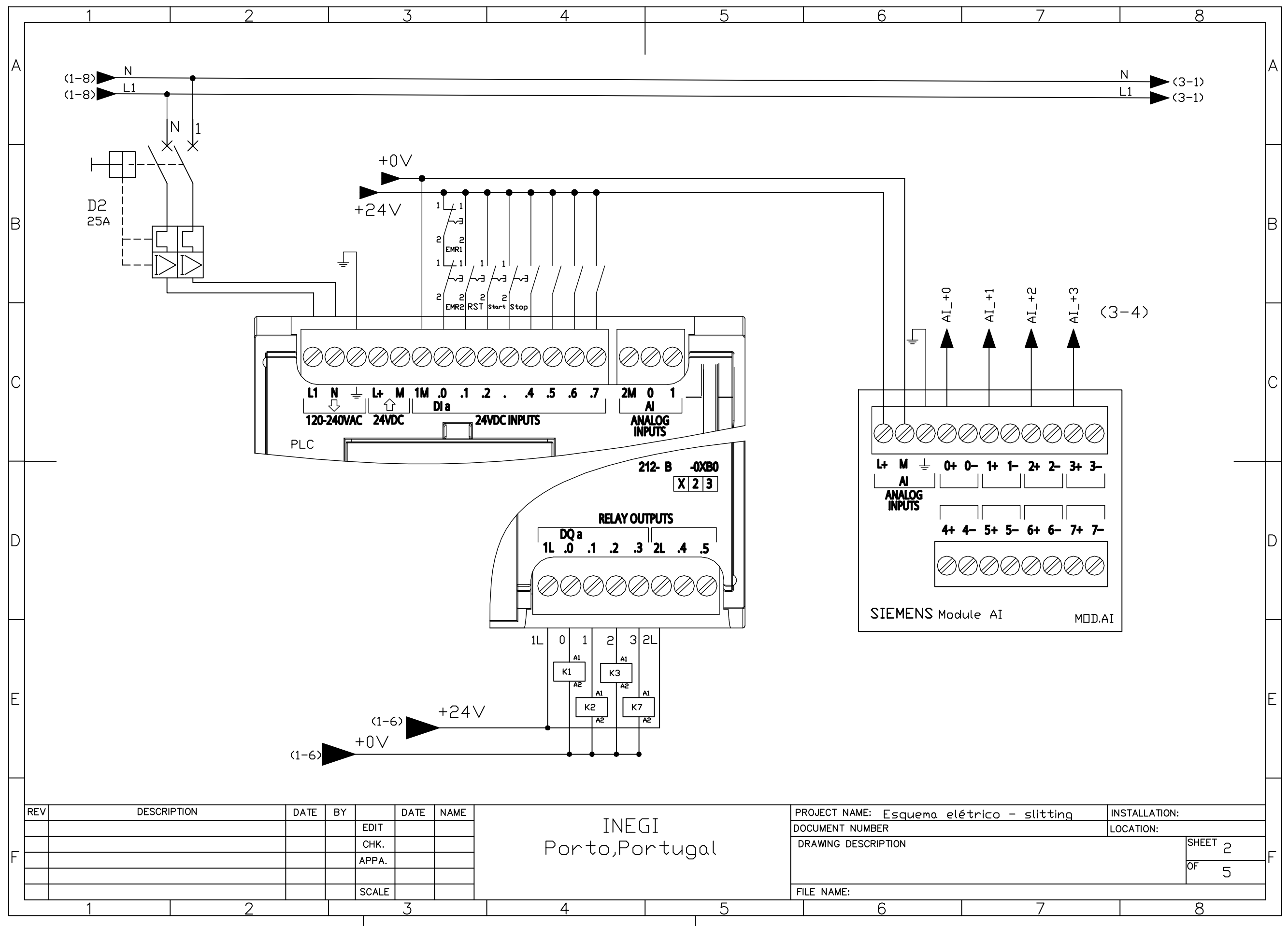
PLC tags

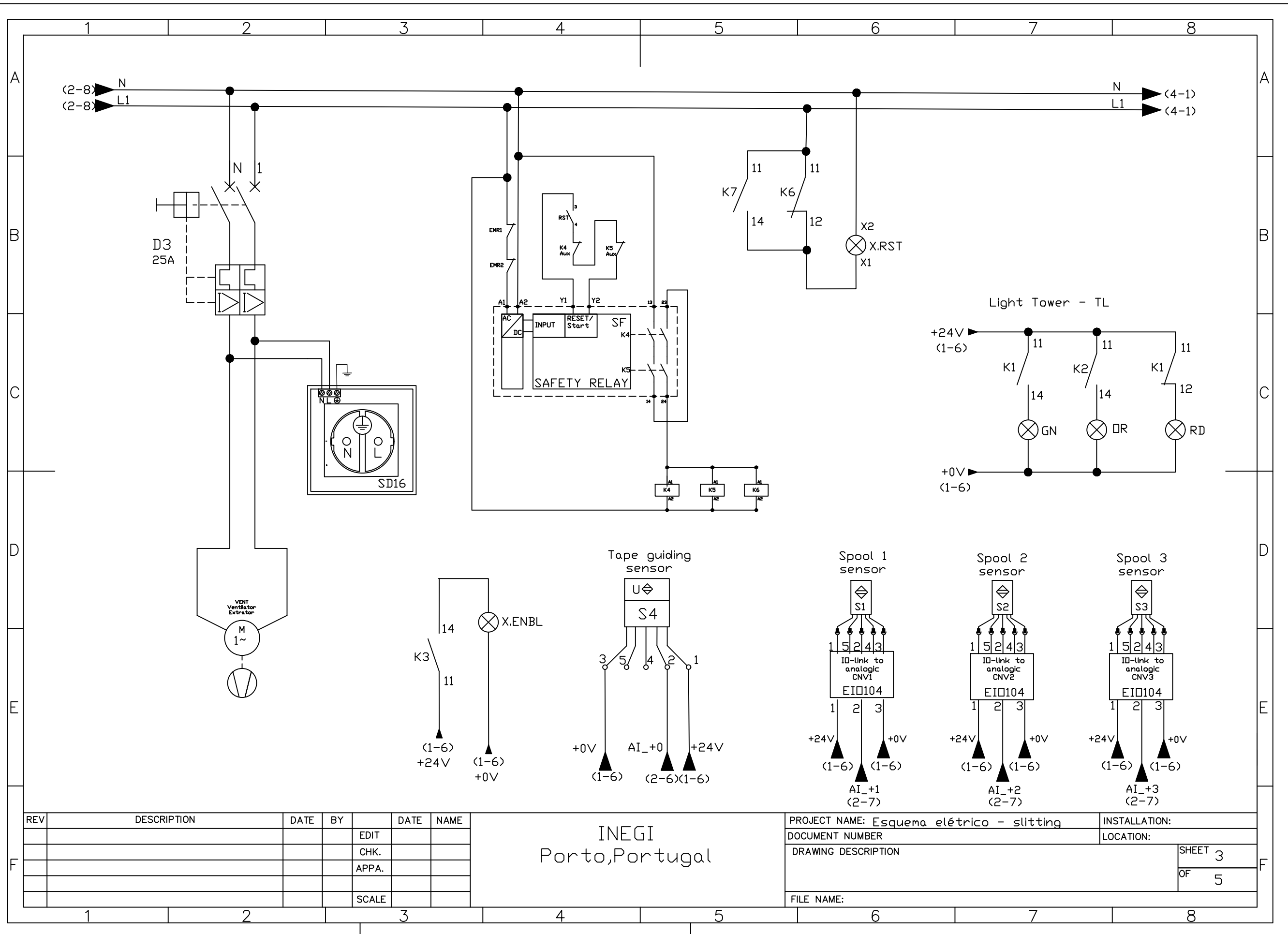
	Name	Data type	Address	Retain	Access- ible from HMI/O PC UA/W eb API	Writa- ble from HMI/O PC UA/W eb API	Visi- ble in HMI engi- neer- ing	Supervision				Comment
	RESET	Bool	%I0.1	False	True	True	True					
	START	Bool	%I0.2	False	True	True	True					
	STOP	Bool	%I0.3	False	True	True	True					
	EMR	Bool	%I0.0	False	True	True	True					
	S1	Int	%IW98	False	True	True	True					
	S2	Int	%IW100	False	True	True	True					
	S3	Int	%IW102	False	True	True	True					
	S4	Int	%IW96	False	True	True	True					
	GN/RD	Bool	%Q0.0	False	True	True	True					
	OR	Bool	%Q0.1	False	True	True	True					
	ENABLE	Bool	%Q0.2	False	True	True	True					
	first scan	Bool	%M1.0	False	True	True	True					
	RESET.OUT	Bool	%Q0.3	False	True	True	True					

Apêndice G

Esquema Elétrico



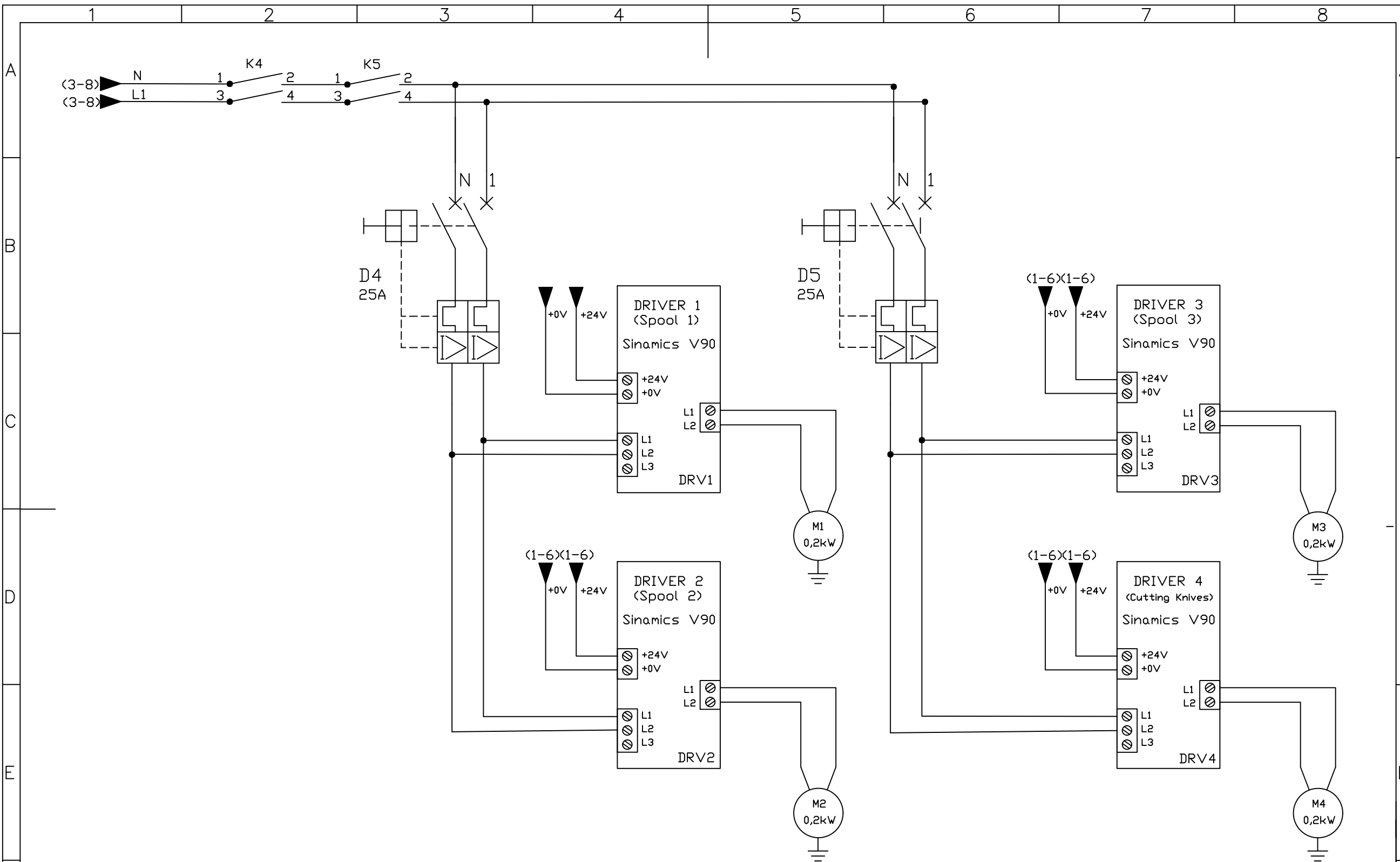




REV	DESCRIPTION	DATE	BY	EDIT	DATE	NAME
				EDIT		
				CHK.		
				APPA.		
				SCALE		

INEGI
Porto, Portugal

PROJECT NAME: Esquema elétrico - slitting	INSTALLATION:
DOCUMENT NUMBER	LOCATION:
DRAWING DESCRIPTION	SHEET 3
FILE NAME:	OF 5



REV	DESCRIPTION	DATE	BY		DATE	NAME
				EDIT		
				CHK.		
				APPA.		
				SCALE		

INEGI
Porto, Portugal

PROJECT NAME: Esquema elétrico - slitting	INSTALLATION:
DOCUMENT NUMBER	LOCATION:
DRAWING DESCRIPTION	D
FILE NAME:	SHEET 4 OF 5

Apêndice H

Manual do utilizador

MAIS DE 35 ANOS
A CONVERTER
CONHECIMENTO
EM VALOR

Máquina de slitting e bobinagem de pré-impregnados

Manual do utilizador

07/09/2024

0. CONTROLO DOCUMENTAL

0.1 IDENTIFICAÇÃO DO DOCUMENTO

Projeto	
Nome do Documento	Máquina de slitting e bobinagem de pré-impregnados Manual do utilizador
Nome do Ficheiro	Slittting_User_Guide_1.4.docx

0.2 CONTROLO DE VERSÕES

Versão	Edição	Revisão	Data	Descrição	Aprovado por
V.01	1	1	07/09/2024		Fernando Silva

0.3 AUTOR(ES)

Nome	Entidade	Iniciais
António Manuel Salvador Alves	INEGI	AMALVES

0.4 REVISOR(ES)

Nome	Entidade	Iniciais
Fernando Silva	INEGI	FS

0.5 LISTA DE DISTRIBUIÇÃO

Nome	Entidade	Iniciais

Índice

1.	Introdução	5
1.1.	Componentes.....	5
2.	Funcionamento Geral	6
3.	Utilização	7
3.1.	Preparação	7
3.1.1.	Calibração das facas	7
3.1.2.	Colocação das bobines e fita	8
3.2.	Operação	11
3.2.1.	Acionamento da máquina	11
3.2.2.	Interface.....	11
3.2.3.	Parâmetros	14
3.2.4.	Erros e avisos	15
3.3.	Finalização.....	17

Lista de Figuras

Figura 1 - Fotos do equipamento: a) Frente; b) painel de controlo.....	5
Figura 2 - Esquema de funcionamento do equipamento.....	6
Figura 3 - a) Montagem das facas; b) Configuração 1; c) Configuração 2	8
Figura 4 - a) Perfil 1; b) Perfil 2	8
Figura 5 - Passagem da fita pelos rolos perpendiculares	10
Figura 6 - a) ecrã inicial com parâmetros; b) ecrã de monitorização	12
Figura 7 - Ecrã de visualização das referências dos erros	13
Figura 8 - a) Pop-up de inserção de dados para acesso ao ecrã de administrador; b) ecrã do administrador	13
Figura 9 - a) sinalizadores de funcionamento dos servomotores; b) barras de progresso indicadoras da quantidade de material presente nas bobines; c) tensão real da fita, velocidade linear real da fita e LED sinalizador de erros; d) botão de alteração da língua .	14

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Legenda dos componentes	5
Tabela 2 - Lista de peças para montagem das facas e contrafacas.	8
Tabela 3 - Lista de avisos.	15
Tabela 4 - Lista de erros	16

1. Introdução

A máquina de *slitting* e bobinagem de fita tem dois modos de funcionamento. No modo *slitting*, o equipamento permite cortar longitudinalmente uma fita de pré-impregnado, originando bobines de fita com larguras mais reduzidas. No modo bobinagem, o equipamento passa a fita entre bobines de diferentes tamanhos ou materiais, como por exemplo passar fita de uma bobine de cartão helicoidal para uma bobine fina de plástico para ser usada na célula robótica.

1.1. Componentes

Os componentes presentes na máquina relevantes para este manual encontram-se descritos abaixo na Figura 1 e Tabela 1.

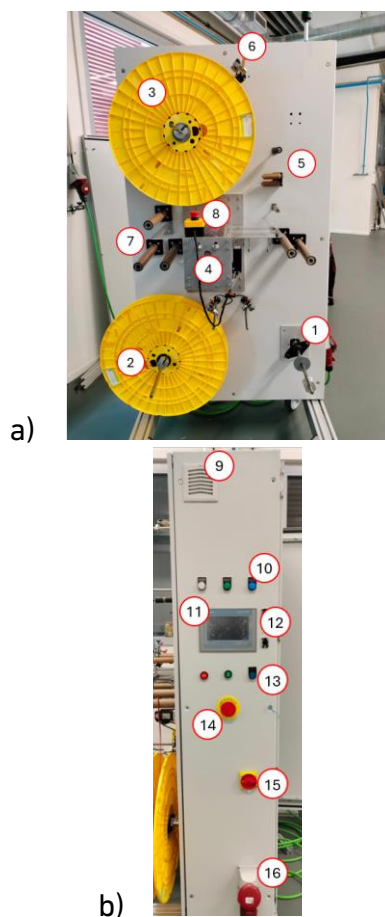


Tabela 1 - Legenda dos componentes

Nº	Componentes
1	Servomotor da bobine 1 de entrada
2	Servomotor da bobine 2 de saída
3	Servomotor da bobine 3 de saída
4	Sistema de corte
5	Rolos referentes à rebobinagem
6	Sensor de medição dos raios das bobinas
7	Rolos referentes ao <i>slitting</i>
8	Botão de emergência 2
9	Ventilador
10	LED's de sinalização
11	Ecrã de Interface Homem-máquina
12	Porta ethernet
13	Botões de controlo
14	Botão de emergência 1
15	Corte geral
16	Tomada Trifásica

Figura 1 - Fotos do equipamento: a) Frente; b) painel de controlo.

2. Funcionamento Geral

A máquina tem cinco interruptores físicos: um de corte geral que permite ligar e desligar a máquina, um botão de *start* (verde) que aciona os atuadores, um botão de *stop* (vermelho) que interrompe a ação dos atuadores, um botão de *reset* (azul) que realiza o rearme do equipamento e dois botões de emergência, que quando atuados, cortam a corrente para os servomotores e colocam a máquina em modo de standby.

O servomotor 1 deve acoplar a bobine original que se pretende realizar o corte ou rebobinagem, enquanto a 2 e 3 devem acoplar as bobines que armazenarão as fitas resultantes.

O servomotor da bobine 1 define a tensão aplicada na fita com controlo de binário. Os servomotores da bobine 2 e 3 controlam a velocidade linear da fita com controlo de velocidade angular dos servomotores. Para tal, o binário do motor 1 tem sinal contrário aos binários de 2 e 3 (Figura 2).

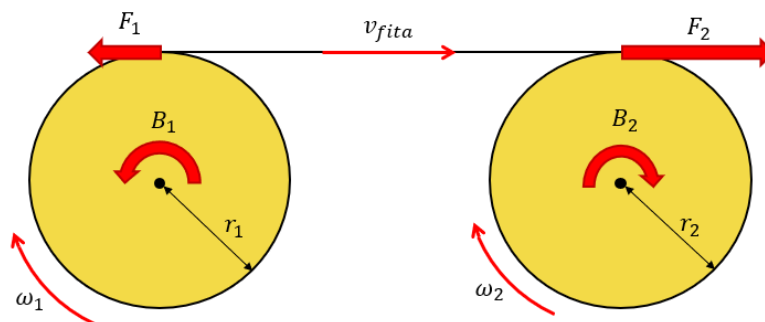


Figura 2 - Esquema de funcionamento do equipamento.

O controlo da tensão da fita é realizado através da monitorização do raio da bobina 3, que é considerada a "bobina mestre". Por esse motivo, ela é a bobina preferida para o processo de bobinagem da fita desejada.

A velocidade linear da fita é constante ao longo do processo. O valor de velocidade linear é definido pelo operador do equipamento. A velocidade de rotação das facas é definida pela razão da velocidade linear da fita com o raio das facas, sendo também constante ao longo do processo.

O modo de bobinagem é especialmente projetado para rebobinar bobines helicoidais de fitas de até 6,35 mm de largura para bobines em cassete. Este sistema é munido de rolos dispostos num layout que corrige desvios laterais de fita mais acentuados, permitindo a sua bobinagem com cassete.

3. Utilização

3.1. Preparação

Antes de se começar a trabalhar com o equipamento, é necessário realizar a sua preparação. A preparação da operação depende do modo que se pretende operar o equipamento, *slitting* ou rebobinagem. Isto implica calibrar as facas, no caso de *slitting*, colocar as bobines, posicionar a fita, definir os parâmetros da operação e por fim ligar a máquina.

3.1.1. Calibração das facas

A calibração das facas deve ser realizada com o equipamento **desligado**. Este passo é apenas necessário no caso de utilização do equipamento para modo *slitting*.

O sistema de corte é munido de dois veios, um superior e um inferior. No veio superior encontram-se as facas, no veio inferior encontram-se as contrafacas. De modo a garantir um corte com qualidade, deve-se posicionar a faca em contacto com a contrafaca (evitar pressão entre os componentes, o contacto deve ser leve).

O sistema de acoplamento das contrafacas é projetado de modo obedecer a 2 layouts diferentes, que possibilitam o corte com larguras diferentes com maior precisão. O acoplamento das facas não sofre nenhuma alteração nas diferentes configurações (Figura 3 a).

A montagem das contrafacas na configuração 1 (Figura 3 b) é exclusivamente utilizada para corte de fitas com largura de 6,35 mm. A configuração de montagem 2 (Figura 3 c) é utilizada para o corte de fitas de, no mínimo, 12,70 mm. Como tal, ao colocar dois adaptadores das contrafacas em contacto como demonstra a Figura 4 a), garante-se uma distância entre as contrafacas de 12,70 mm. No caso de aplicar um espaçador entre os dois suportes (Figura 4 b), obtém-se uma distância de contrafacas de 25,4 mm. A distância entre as contrafacas é o que define a largura das fitas cortadas. Na Tabela 2 estão listados todos os componentes pertinentes para a calibração das facas.

A posição das facas no veio deve obedecer à posição das bobines. A distância entre a faca mais próxima do armário à chapa do armário deve ser igual à soma da distância da chapa do armário à bobine 1 com a largura da borda pretendida do corte.

É boa prática confirmar o paralelismo dos veios antes de iniciar para o próximo passo da preparação.

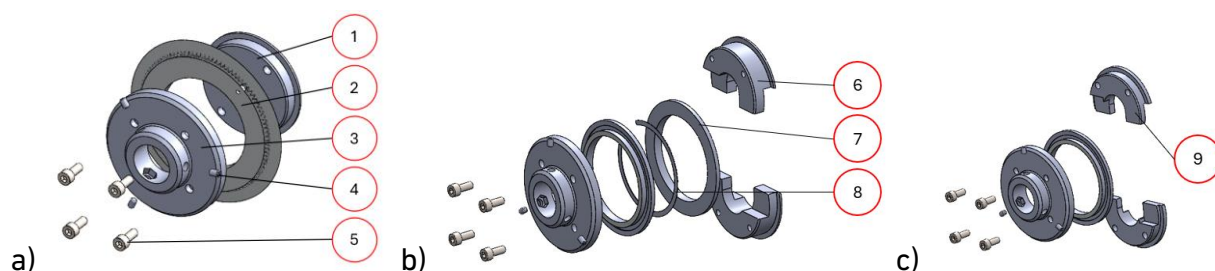


Figura 3 - a) Montagem das facas; b) Configuração 1; c) Configuração 2

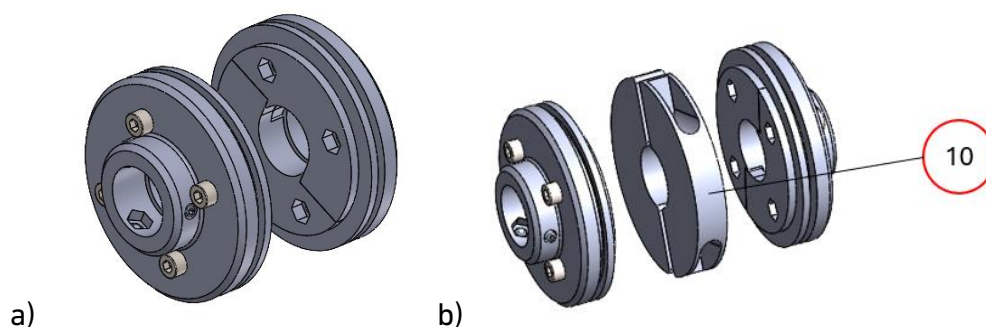


Figura 4 - a) Perfil 1; b) Perfil 2

Tabela 2 - Lista de peças para montagem das facas e contrafacas.

ID	Descrição	Quantidade	ID	Descrição	Quantidade
1	Adaptador 1	4	6	Peça do adaptador 2	2
2	Conjunto da faca	3	7	Contrafaca	3
3	Peça fixadora ao veio	6	8	Espaçador 0,35 mm	1
4	Perno DIN 916 – M5xA2	18	9	Peça do adaptador 3	4
5	Parafuso ISO 4726 – M5x16 – A2 70	24	10	Espaçador 12,7 mm	4

3.1.2. Colocação das bobines e fita

Ainda com o equipamento desligado, o passo seguinte é a colocação das bobines.

Para colocar as bobines, deve-se ter em atenção o tipo de bobine. Se for de cartão, deverá ser colocado um “Quick-Chuck” no servomotor e aplicar a bobine no mesmo, sendo preciso apertá-lo o para que a bobine fique presa.

- Nota: para um melhor funcionamento, não se deve encostar a bobine até à chapa onde o motor está acoplado, pois poderá fazer com que a fita caia do rolo de alinhamento mais perto.

Se a bobine for de plástico, e com formato “standard” da Häfner, deverá ser usado o adaptador impresso. Deve-se ter em atenção os furos da bobine, e deve-se encostar a bobine à face de cima da base do adaptador. De seguida, coloca-se outro adaptador, mas desta vez só de diâmetro, do outro lado da bobine, de maneira a entalar a mesma, seguido de um grampo/travão, de maneira a prender a bobine.

Na colocação das bobines, deve-se medir a distância entre as mesmas e a chapa do armário, para garantir que estão devidamente colocadas de modo a estabilizar o máximo possível a circulação da fita no sistema. Por exemplo, a distância entre a aresta da fita da bobine 1 e a chapa do armário deve ser a mesma da distância entre a aresta da fita da bobine que armazenará a borda e a chapa do armário.

Após instaladas as bobines, é necessário colocar a fita a circular nos rolos de guiamento. A colocação da fita depende do modo de funcionamento do equipamento. Na Figura 5 é possível observar a colocação da fita no modo de *slitting* e rebobinagem.

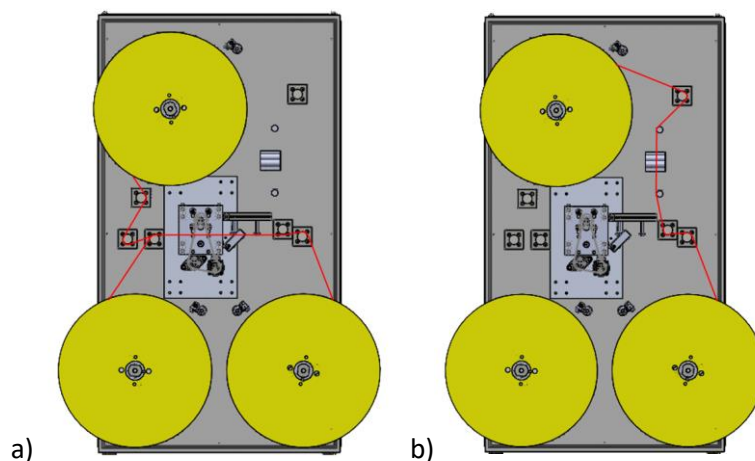


Figura 5 - a) montagem da fita em modo *slitting*; b) montagem da fita em modo rebobinagem

No caso de utilização do equipamento em modo rebobinagem, deve-se fazer a fita circular nos rolos de alinhamento de acordo com o esquema da figura 3. No conjunto de rolos perpendiculares aos restantes (simbolizados com dois retângulos na figura 3), deve-se passar a fita pela esquerda do rolo de baixo e de seguida pela direita do rolo de cima, ficando assim de acordo com o esquema da figura 4. Deve-se ter cuidado para que a fita não dê voltas sobre ela mesma, para evitar que esta se torça.

- Nota: os rolos perpendiculares podem ser ajustados para um melhor alinhamento da fita. Deve-se ter atenção à parte por onde esta deve passar no rolo seguinte.

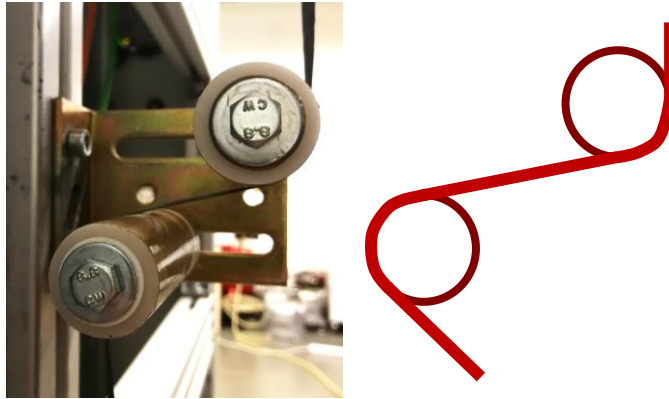


Figura 6 - Passagem da fita pelos rolos perpendiculares

No caso de o equipamento trabalhar em modo de *slitting*, a fita deve ser posicionada nos dois primeiros rolos como demonstra o esquema da Figura 5 a). O passo seguinte é realizar o corte manual da fita para colocação da mesma nas bobines 2 e 3. Para isso, é importante desenrolar manualmente a bobine 1, garantindo que existe um *loop* de fita entre os rolos de guiamento anteriores ao sistema de corte e o próprio sistema de corte. Depois, aplicando uma rotação lenta no sentido horário na manivela da Figura 7 e orientando a posição da fita à entrada do sistema de corte, realiza-se o corte da fita até ser possível fixar as fitas resultantes nas respetivas bobines.

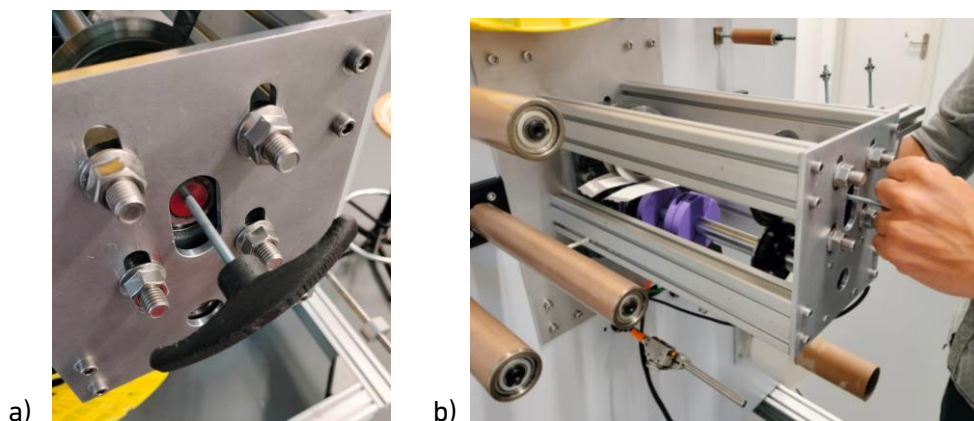


Figura 7 – a) Manivela do sistema de corte; b) rotação manual das facas.

Depois de fixada a fita nas bobines, é colocado o sensor ultrassónico da Figura 8 a) na posição adequada. Desapertando os parafusos 1, aproxima-se o sensor da fita até o mesmo apresentar uma luz de cor verde na face superior (deve-se ligar o equipamento do corte geral para posicionamento do sensor), e aperta-se novamente os parafusos para fixar a posição. Os parafusos 2 permitem o ajuste da altura do sensor, e o parafuso 3 permite a calibração da inclinação. A fita deve estar paralela e centrada às membranas ultrassónicas do sensor.

Por fim, através dos parafusos 1 do sistema de guiamento da fita, calibra-se a posição dos rolamentos de guiamento até estes encostarem levemente às arestas da fita.

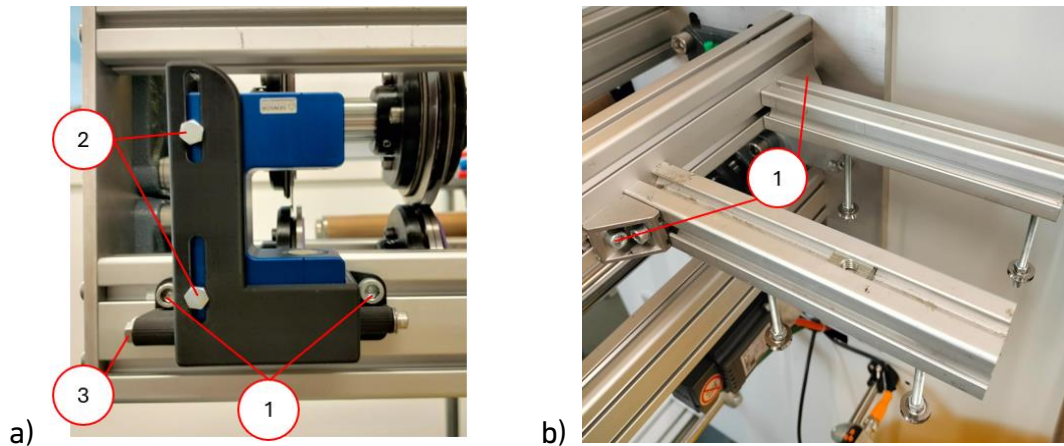


Figura 8 - a) sensor ultrassónico; b) Sistema de guiamento da fita.

3.2. Operação

3.2.1. Acionamento da máquina

Depois de concluída a preparação e ligado o equipamento a partir do interruptor de corte geral, a máquina ativará o ecrã de interface HMI, o LED branco e o LED azul. O LED branco sinaliza a entrada de energia no equipamento, e o LED azul sinaliza a necessidade de rearme do equipamento. Sempre que o LED azul acende, é necessário pressionar o botão de *reset* azul.

3.2.2. Interface

O equipamento de *slitting* e bobinagem é dotado de uma interface Homem-Máquina que foi programada para permitir a definição dos parâmetros de operação e a monitorização das atividades do equipamento. Esta interface é composta por quatro ecrãs principais: o ecrã de definição de parâmetros, o ecrã de monitorização, o ecrã de erros e o ecrã de administrador, sendo este último acessível apenas através de autenticação por palavra-passe.

O primeiro ecrã (Figura 9 a), que é o principal, permite ao operador definir os parâmetros necessários para a operação do equipamento. Na parte inferior deste ecrã, encontra-se o interruptor que permite ativar o modo de *slitting* ou o modo de rebobinagem, conforme a finalidade pretendida. Ao clicar no esquema do equipamento, o utilizador é direcionado para o ecrã de monitorização (Figura 9 b). Neste ecrã, é possível visualizar em tempo real os binários dos motores, as velocidades angulares e os raios das bobines, durante o funcionamento do equipamento.

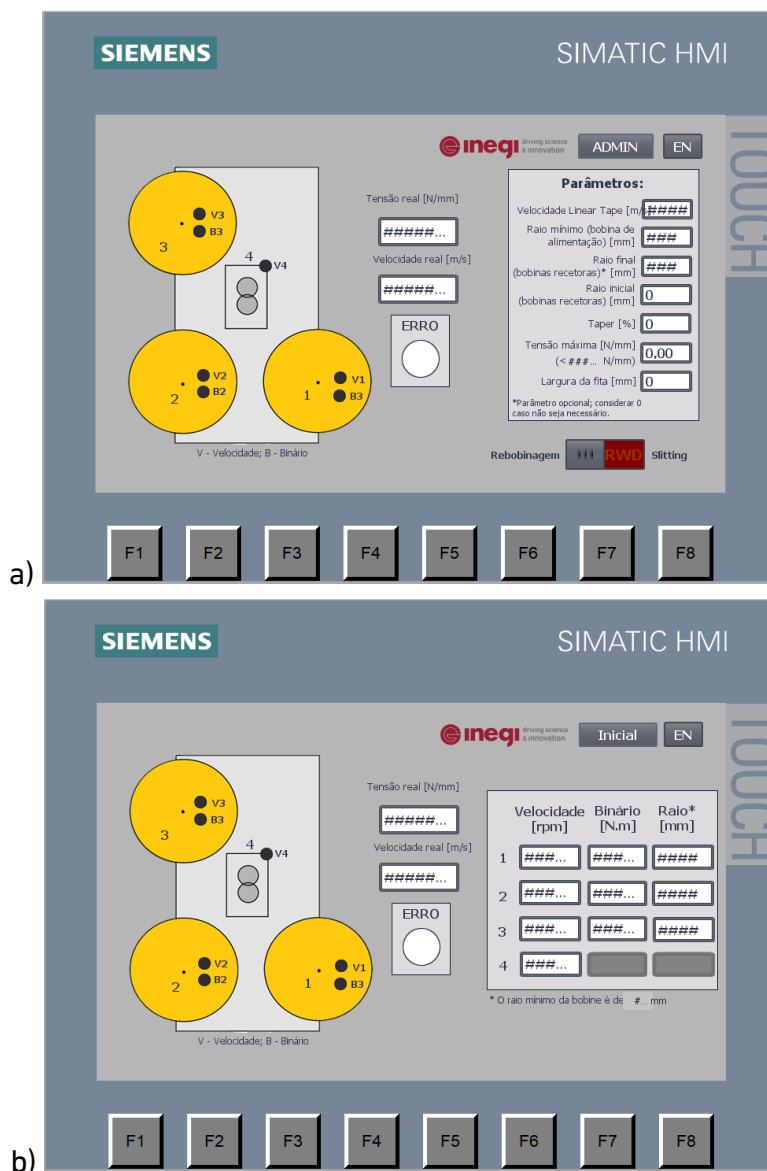


Figura 9 - a) ecrã inicial com parâmetros; b) ecrã de monitorização

Através do LED identificado como "ERRO", o operador pode aceder ao ecrã de observação dos erros (Figura 10). Neste ecrã, encontra-se uma tabela que lista as referências dos erros identificados, sendo possível consultar no sub-capítulo "3.2.4 Erros e Avisos" a descrição específica de cada de erro.

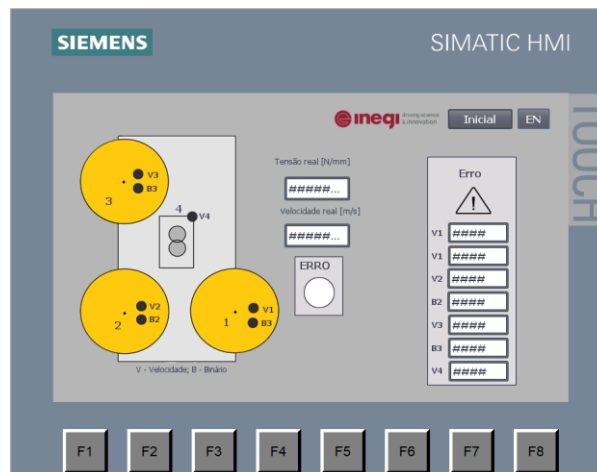


Figura 10 - Ecrã de visualização das referências dos erros

O quarto ecrã, destinado ao administrador, é acessível após a inserção de um nome de utilizador e uma palavra-passe válidos (Figura 11 a). Este ecrã apresenta parâmetros adicionais que podem ser configurados e inclui um interruptor para ativar o modo “Admin” (Figura 11 b). Neste modo, o equipamento pode ser acionado independentemente das leituras dos sensores, permitindo o seu funcionamento mesmo na ausência de fita.

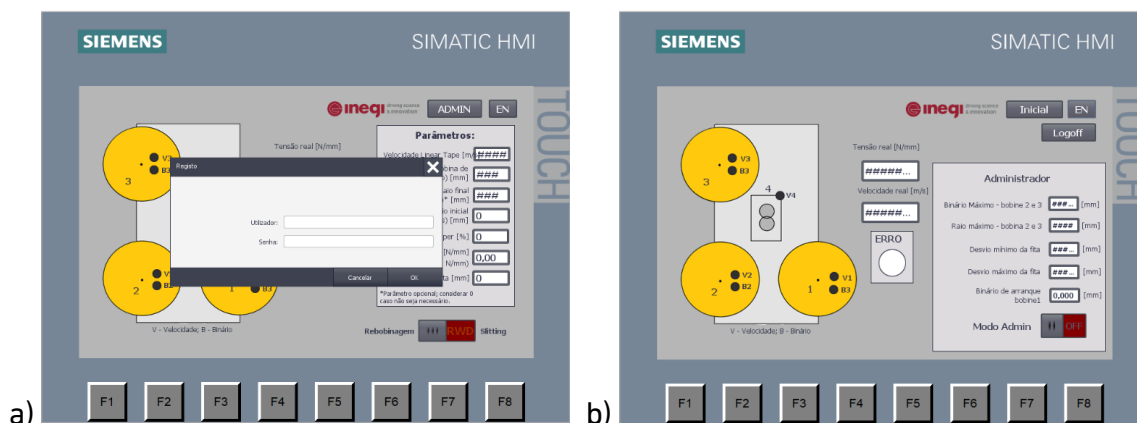


Figura 11 - a) Pop-up de inserção de dados para acesso ao ecrã de administrador; b) ecrã do administrador

De forma consistente, em todos os ecrãs, do lado direito e no centro, existem elementos comuns que facilitam a supervisão do equipamento. O esquema do equipamento, com sinalizadores em cada uma das bobines, indica o estado de funcionamento dos servomotores (Figura 12 a): verde significa que o controlo de velocidade ou de binário está ativado; vermelho indica um erro no controlo; e preto significa que estão desativados. Além disso, o esquema sinaliza quaisquer anomalias nas bobines ou na colocação da fita através de pop-ups. Durante o funcionamento do equipamento, aparecem barras de progresso sobre as bobines que indicam o nível de material presente em cada uma delas, sendo que quando preenchida com bordô significa que a bobine está completa, quando preenchida a cinzento, a bobine encontra-se sem material (Figura 12 b).

No centro da interface, encontram-se duas caixas de texto que exibem a velocidade linear real da fita e a tensão real aplicada na fita. Abaixo destas caixas, existe um LED que, quando aceso, indica a presença de um erro no sistema (Figura 12 c).

No canto superior direito, existe um botão que define a língua do programa, tendo como línguas disponíveis português e inglês (Figura 12 d).

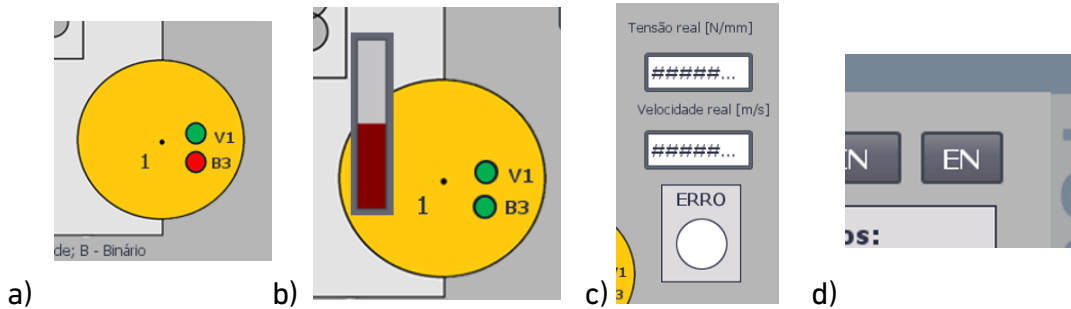


Figura 12 - a) sinalizadores de funcionamento dos servomotores; b) barras de progresso indicadoras da quantidade de material presente nas bobines; c) tensão real da fita, velocidade linear real da fita e LED sinalizador de erros; d) botão de alteração da língua

3.2.3. Parâmetros

O equipamento exige a definição de parâmetros para funcionar. Os parâmetros estão enumerados a seguir:

1. **Velocidade linear da fita.** A velocidade linear da fita é constante ao longo do processo. Este parâmetro define a velocidade angular dos servomotores 2 e 3, dependendo do raio corrente das respectivas bobines, e a velocidade angular das facas do sistema de *slitting*. A velocidade linear da fita não pode exceder os
2. **Raio mínimo da bobine de alimentação.** Este parâmetro é referente ao raio do núcleo da bobine 1. Este parâmetro define a que raio da bobine que deve ocorrer a interrupção automática da máquina.
3. **Raio máximo da bobine recetora.** Este parâmetro define a que raio da bobine recetora deve ocorrer a interrupção da máquina. Este parâmetro é opcional, e só se deve definir se não se pretender cortar/rebobinar o material todo da bobine 1, mas sim até a bobine recetora cumprir com um determinado raio.
4. **Raio mínimo da bobine recetora.** Este parâmetro é referente ao raio do núcleo da bobine recetora. Este é utilizado no cálculo da tensão da fita.
5. **Taper.** O valor em percentagem do *taper* é utilizado no cálculo da tensão da fita. Este valor refere-se à diferença em percentagem da tensão máxima no núcleo da bobine e a tensão mínima na superfície da bobine. Este valor é recomendado que seja inferior a 40% no caso de uma razão entre raio máximo e raio de núcleo inferior a 2, e superior a 40% no caso de uma razão superior a 2.

6. **Tensão máxima no núcleo da bobine.** Este parâmetro define a tensão inicial máxima no núcleo da bobine recetora. Este parâmetro é utilizado no cálculo do binário do servomotor 1. Na HMI é indicado o valor máximo admissível que o equipamento consegue exercer na fita, dependendo da largura do mesmo e do raio inicial da bobine 1.
7. **Largura da fita inicial.** Este parâmetro define qual a tensão máxima admissível que o equipamento consegue exercer na fita. A largura da fita inicial é utilizada no cálculo do binário do servomotor 1.

No caso de o equipamento estar a funcionar no modo “Administrador”, o operador pode definir outros parâmetros de funcionamento do equipamento.

1. **Binários máximos de funcionamento dos servomotores 2 e 3.** Este parâmetro é exclusivamente um parâmetro de segurança.
2. **Raio máximo admissível das bobines 2 e 3.** Novamente, este é um parâmetro de segurança.
3. **Desvio inferior da fita.** Este parâmetro define qual o desvio lateral máximo no sentido negativo que a fita tem que sofrer para que a operação seja interrompida. Esse desvio é medido pelo sensor ultrassónico.
4. **Desvio superior da fita.** Este parâmetro define qual o desvio lateral máximo no sentido positivo que a fita tem que sofrer para que a operação seja interrompida. Esse desvio é medido pelo sensor ultrassónico.
5. **Binário de arranque do servomotor 1.** Este parâmetro refere-se ao binário mínimo exercido pelo servomotor 1 para a bobine 1 ter uma velocidade diferente de 0. Este valor é utilizado no cálculo do binário do servomotor 1.

3.2.4. Erros e avisos

No ecrã de HMI é possível observar os avisos e erros sinalizados pelo equipamento. Os avisos aparecem no esquema do equipamento do lado esquerdo. Na Tabela 3 é possível observar a lista de avisos e a solução para cada um deles. Na Tabela 4 é possível observar as referências de cada erro, o que cada um significa e sugestões de resolução.

Tabela 3 - Lista de avisos.

Aviso	Solução
“Bobine 1 não detetada.”	- Colocar bobine de alimentação; - Posicionar o sensor ótico 1 corretamente; - Corrigir o parâmetro “Raio mínimo da bobine de alimentação”;
“Bobine 2 não detetada.”	- Colocar bobine recetora 2; - Posicionar o sensor ótico 2 corretamente;

	- Corrigir o parâmetro "Raio mínimo da bobine recetora";
"Bobine 3 não detetada."	- Colocar bobine recetora 3; - Posicionar o sensor ótico 3 corretamente; - Corrigir o parâmetro "Raio mínimo da bobine recetora";
"Posicione a fita corretamente."	- Colocar a fita corretamente no sistema de corte; - Calibrar a posição do sensor ultrassónico; - Adaptar parâmetro "Desvios máximos da fita".
Sinal de alerta no parâmetro da "Tensão máxima"	- Tensão máxima definida superior à tensão máxima admissível.

Tabela 4 - Lista de erros

	Referência	Descrição	Solução
Binário	0000	Nenhum erro	
	8001	Torque de referência errado.	O valor de refTorque deve ser o igual ao parâmetro p2003 no drive
	8002	Limite de torque superior demasiado elevado.	Limite de toque superior deve ser inferior ao valor de torque de referência.
	8003	Limite de torque inferior demasiado baixo.	O limite de torque inferior deve ser maior que o valor simétrico do torque de referência.
	8004	O limite de torque superior é inferior ou igual ao limite de torque inferior.	O limite de torque superior deve ser superior ao limite de torque inferior.
	8007	Erro de comunicação para DPWR_DAT.	Verifique o estado do <i>output</i> do dialD no código de programação da máquina.
	8008	Erro de comunicação para DPRD_DAT.	Verifique o estado do <i>output</i> do dialD no código de programação da máquina.
Velocidade	7002	Nenhum erro	
	8401	Erro na drive	Consultar no ecrã do drive a referência do erro e agir de acordo com a ficha técnica do componente.
	8402	Inibição ativa	Realize o rearme do drive.

	8600	Erro de comunicação para DPWR_DAT.	Verifique a comunicação do bloco de função "SinaSpeed" no código da máquina.
	8601	Erro de comunicação para DPRD_DAT.	Verifique a comunicação do bloco de função "SinaSpeed" no código da máquina.

3.3. Finalização

Após a utilização da máquina, deve-se assegurar que os motores estão desligados, vendo-se na HMI nos sinais apropriados. De seguida, é possível desligar a máquina rodando o interruptor de corte geral para a esquerda, para a posição em que a palavra "off" fica visível.

O cabo da ficha trifásica pode ser enrolado sobre ele próprio e guardado num lugar apropriado, como dentro do quadro elétrico se assim for possível. Os acessórios dos motores deverão ficar nos eixos dos mesmos. É aconselhado a remoção das bobines e a arrumação das próprias.

MAIS DE 35 ANOS
A CONVERTER
CONHECIMENTO
EM VALOR

**INEGI - Instituto de Ciência e Inovação
em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial**

Campus da FEUP | Rua Dr. Roberto Frias, 400 | 4200-465 Porto | Portugal
T. +351 22 957 87 10 | inegi@inegi.up.pt

www.inegi.pt

