



Universidade de Aveiro

2023

**Tatiana
Pinho Resende**

**Desenvolvimento de uma máquina de
estampagem incremental compacta**

Development of a compact incremental forming machine



**Tatiana
Pinho Resende**

**Desenvolvimento de uma máquina de
estampagem incremental compacta**

Development of a compact incremental forming machine

Trabalho de Projeto apresentado à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob orientação científica de Ricardo José Alves de Sousa, Professor Auxiliar com Agregação, do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro, e de Daniel Gil Afonso, Professor Adjunto em Regime Laboral da Universidade de Aveiro da Universidade de Aveiro.

Esta dissertação teve o apoio dos projetos UIDB/00481/2020 e UIDP/00481/2020 - Fundação para a Ciência e a Tecnologia; e CENTRO-01-0145 FEDER-022083 - Programa Operacional Regional do Centro (Centro2020), através do Portugal 2020 e do Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional.

O júri / The jury

Presidente / President

Doutor Tiago Manuel Rodrigues da Silva

Investigador Doutorado (Nível 1) da Universidade de Aveiro

Vogais / Committee

Doutor Francisco Malheiro Queirós de Melo

Consultor da *Inegi - Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial*

Prof. Doutor Daniel Gil Afonso

Professor Adjunto em Regime Laboral da *Universidade de Aveiro*

Agradecimentos / Acknowledgements

Ao Professor Ricardo Sousa, agradeço pela sua orientação e contribuições ao longo deste projeto. Ao Professor Daniel Afonso, meu co-orientador, expresso o meu agradecimento pela orientação valiosa e apoio, que foram fundamentais para o sucesso deste projeto.

Gostaria também de expressar minha gratidão ao Professor José Paulo Santos pela sua disponibilidade, compreensão e valiosas contribuições, que foram de suma importância para o desenvolvimento deste trabalho. Ao Engenheiro Ricardo Beja, meu especial reconhecimento cuja assistência na fase final para a resolução de problemas foi de valor inestimável.

Aos meus amigos, em particular à Sofia, sou grata pelo apoio incondicional e pela prontidão em esclarecer minhas dúvidas de escrita. Ao Zé, agradeço por abrir a porta todas as manhãs, e ao André, pela sua paciência ao lidar com as minhas inseguranças. Um agradecimento especial também à Carla, minha companheira ao longo dos últimos cinco anos desta jornada acadêmica.

Não posso deixar de expressar meu profundo agradecimento à minha família, especialmente à minha mãe. A sua constante crença em mim e apoio incansável foram fundamentais para que eu alcançasse este patamar.

Por fim, a minha mais profunda gratidão a todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para o sucesso deste trabalho. A todos, o meu sincero e caloroso obrigado.

Keywords

Incremental sheet forming (ISF), single point incremental forming (SPIF), parallel kinematics, industrial robot, processing technology, CNC milling machine-tool

Abstract

There have been numerous studies conducted since the beginning of the 21st century on incremental sheet metal forming processes, such as single-point incremental forming. This process extends beyond prototype development and can also be applied to the production of unique products and small series. The key benefit of this process is the accelerated design and product development, making small-scale production economically viable. Additionally, this capacity opens up new business prospects by enabling the development and production of exclusive or customized products. Incremental forming can also be advantageous in conjunction with other production processes, such as 3D printing. The interaction between processes contributes to reduced time to market, cost reduction, and increased product design flexibility. However, most current methods of incremental forming are adaptations of conventional machine tools, resulting in a less flexible process with limitations in terms of materials and geometries.

The objective of this project is to develop a dedicated machine for incremental forming that surpasses the intrinsic limitations of machines currently in circulation. Therefore, it is imperative that the machine is compact, electric, and minimizes sound emission. The project is available to the public at https://github.com/TatianaResend/SPIF-A_v2.

Palavras-chave	Conformação incremental de chapa (ISF) , conformação incremental por ponto único (SPIF), cinemática paralela, robôs industriais, tecnologia de processamento, fresadoras CNC
Resumo	<p>Há uma grande número de estudos realizados desde o início do século XXI, sobre os processos incrementais de estampagem de chapas metálicas, como a estampagem incremental de ponto único. Este processo não se limita ao desenvolvimento de protótipos, podendo ser aplicado também à produção de produtos únicos e pequenas séries. O principal benefício desse processo é a aceleração do design e do desenvolvimento do produto, o que torna a produção em pequena escala economicamente viável. Além disso, essa possibilidade oferece novas perspetivas de negócio, permitindo o desenvolvimento e a produção de produtos exclusivos ou personalizados. A estampagem incremental também pode ser útil em colaboração com outros processos de produção, como a impressão 3D. A interação entre processos contribui para a diminuição do tempo de lançamento no mercado, redução de custos e aumento da flexibilidade no design do produto. No entanto, a maioria dos métodos atuais de estampagem incremental é uma adaptação de máquinas-ferramenta convencionais, o que resulta em um processo pouco flexível, com limitações em termos de materiais e geometrias.</p> <p>O objetivo deste projeto é desenvolvimento de uma máquina dedicada ao processo de estampagem incremental, a qual supere as limitações intrínsecas às máquinas atualmente em circulação. Impõe-se, assim, que a máquina seja compacta, eletrica e com emanação sonora minimizada. O projeto está disponível ao público em https://github.com/TatianaResend/SPIF-A_v2.</p>

Índice

1	Introdução	1
1.1	Enquadramento e Motivação	1
1.2	Descrição do Problema	2
1.3	Objetivo	2
1.4	Organização	3
2	Estado de Arte	5
2.1	Conformação Incremental	5
2.2	Conformação Incremental por Ponto Único - SPIF	7
2.2.1	Desempenho e Conformabilidade do Processo SPIF	7
2.2.2	Princípio de Funcionamento	8
2.2.3	Ferramentas	8
2.2.4	Trajetórias	9
2.2.5	Forças	10
2.2.6	Valores Típicos	11
2.3	Máquinas para Processos de SPIF	12
2.3.1	Fresadoras Adaptadas	12
2.3.2	Robôs Série	12
2.3.3	Máquinas Dedicadas (<i>Purpose Built</i>)	13
2.4	Projeto SPIF-A	14
3	Projeto da Estrutura Mecânica da Máquina	15
3.1	Análise Comparativa da Arquitetura	15
3.2	Otimização dos Braços do Robô: Área de Trabalho e Minimização do Binário	17
3.3	Análise Cinemática	18
3.3.1	Cinemática Direta	18
3.3.2	Cinemática Inversa	20
4	Projeto Mecânico	23
4.1	<i>Design</i> dos Braços	23
4.2	Sistema de Suporte para o Punção de Conformação	25
4.2.1	Seleção de Rolamentos	26
4.2.2	Seleção do Porta-ferramentas	27
4.3	Seleção e Dimensionamento do Conjunto Motor — Redutor	29
4.3.1	Seleção do Motor	29

4.3.2	Redutor: Análise Comparativa	30
4.3.3	Estudo da Configuração Motor — Redutor	31
4.3.4	Seleção do Redutor	34
4.4	Seleção e Dimensionamento do Conjunto Motor — Atuador Linear	34
4.4.1	Seleção do Atuador Linear	35
4.4.2	Ligaçāo Motor — Atuador Linear	36
4.5	Configuração Estrutural	37
4.6	Simulações	38
4.6.1	Simulação com Análise de Movimento	39
4.6.2	Simulação Estática	44
5	Projeto de Automação	47
5.1	Esquema Elétrico e Principais Componentes	47
5.1.1	Círculo de Potência	48
5.1.2	Controlador	49
5.1.3	<i>Drive</i>	50
5.1.4	Elementos de Segurança	53
5.1.5	Quadro Elétrico	55
5.2	Controlo de Movimento	56
5.2.1	Implementação da Cinemática	57
5.2.2	Determinação do Número de Pulso	57
5.2.3	Posicionamento Incremental	58
5.3	SPIF-A_v2 GUI	59
5.3.1	Modo Manual	60
5.3.2	Modo Automático	60
5.3.3	Página Informativa	61
6	Implementação e Resultados	63
6.1	Implementação do Projeto Mecânico	63
6.2	Implementação do projeto de automação	66
6.2.1	Montagem do Hardware	66
6.2.2	Programação do Controlador	67
6.2.3	Implementação e Configuração do <i>Drive</i> do Motor	68
6.2.4	Implementação do Controlo de Movimento e da GUI	68
6.2.5	Testes, Validação e Resultados	69
7	Conclusões	73
Referências		77
A Otimização do comprimento de braços em função do binário		83
B Características do módulo linear de correia TLM105G		85
C Esquema elétrico da SPIF-A_v2		89

D User Manual CL86T(V3.0) Closed Loop Stepper Driver	107
E Painel de configuração do <i>drive</i> do motor	117

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

Lista de Tabelas

2.1	Resultados obtidos da medição da força em conformação incremental.	11
2.2	Valores típicos no processo de conformação incremental por ponto único. .	11
3.1	Principais requisitos do projeto.	15
4.1	Principais características do rolamento de rolos de agulhas combinados com axial de esferas.	27
4.2	Principais características do motor NEMA 34.	30
4.3	Características dos redutores em análise.	34
4.4	Características dos atuadores lineares em análise.	35
5.1	Lista das entradas e saídas necessárias no controlador.	49
5.2	Principais características do Controllino MAXI e do Controllino MEGA. .	50
5.3	HRN: pontuação correspondente ao nível de risco para cada perigo.	54

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

Listas de Figuras

2.1	ISF variações: (a) SPIF, (b) TPIF com matriz parcial, (c) TPIF com matriz completa.	6
2.2	ISF variações: (a) DPIF-P, (b) DPIF-L.	6
2.3	Diagrama esquemático do processo de estampagem incremental: (a) 1. ^a etapa, (b) 2. ^a etapa, (c) 3. ^a etapa, (d) 4. ^a etapa.	8
2.4	Tipos de incrementos na trajetória da ferramenta: (a) passo em z constante, (b) altura de vieira constante.	9
2.5	Trajetórias da ferramenta no processo SPIF: (a) contorno simples, (b) contorno alternado, (c) contorno helicoidal.	10
2.6	Máquinas para processos SPIF: fressadoras adaptadas.	12
2.7	Máquinas para processos SPIF: robôs série.	13
2.8	Máquinas para processos SPIF: máquinas dedicadas.	14
3.1	Estudo da arquitetura: (a) hipótese 1, (b) hipótese 2, (c) hipótese 3.	16
3.2	Configuração dos braços: (a) motores em série, (b) motores em paralelo.	17
3.3	Esquema da estrutura do robô <i>D2 Delta</i>	18
4.1	Configuração dos braços do robô: (a) dois braços principais, (b) três braços principais.	24
4.2	Esquema de montagem dos componentes dos braços principais: a) lado esquerdo. b) lado direito.	25
4.3	Componentes do sistema de suporte para o punção de conformação.	26
4.4	Arquitetura de um porta-ferramentas: A — cone, B — flange, C — sistema de fixação.	28
4.5	Porta-ferramentas selecionado: cone HSK com um mandril <i>Weldon</i>	29
4.6	Hipótese 1 configuração motor — redutor: motor na vertical com redutor helicoidal de 90 graus.	31
4.7	Hipótese 2 configuração motor — redutor: motor na horizontal no topo da estrutura com redutor linear.	32
4.8	Hipótese 3 configuração motor — redutor: motor na horizontal com redutor helicoidal de 90 graus.	33
4.9	Hipótese 4 configuração motor — redutor: motor na horizontal com redutor linear.	33
4.10	Configuração dos dois atuadores lineares: 2x.	36
4.11	Componentes do sistema de transmissão entre o veio do motor e o veio do atuador linear e entre os dois veios dos atuadores lineares.	36
4.12	Dimensões exteriores da estrutura.	37
4.13	Estrutura projetada.	38

4.14	Sequência da trajetória simulada do robô durante a passagem pelos pontos críticos.	39
4.15	Gráfico da força de reação ao longo do tempo no componente garfo com pino: a) do lado esquerdo, c) do lado direito e posição do robô no respetivo ponto crítico: b) canto superior direito, d) canto inferior esquerdo.	40
4.16	Simulação do componente garfo com pino do lado direito na posição crítica.	41
4.17	Gráfico da força de reação ao longo do tempo no componente acoplador universal: a) do lado esquerdo, c) do lado direito e posição do robô no respetivo ponto crítico: b) canto superior direito, d) canto inferior esquerdo.	42
4.18	Componente barra de paralelismo maior: a) gráfico da força de reação ao longo do tempo, b) posição do robô no respetivo ponto crítico, canto inferior esquerdo.	43
4.19	Simulação do componente plataforma na posição crítica.	44
4.20	Resultados da simulação estática da estrutura: (a) tensão, (b) deslocamento.	45
5.1	Esquema de ligações entre componentes.	48
5.2	<i>Software launch STEPPERONLINE</i> : simulação da velocidade.	51
5.3	<i>Software launch STEPPERONLINE</i> : simulação da posição.	52
5.4	Conexões do <i>driver</i> CL86T com o controlador e o motor.	52
5.5	<i>Drive</i> selecionado: CL86T.	53
5.6	Organização do quadro elétrico.	55
5.7	Posicionamento ideal do quadro elétrico na máquina.	56
5.8	Fluxograma para a implementação do posicionamento incremental.	59
5.9	GUI página “Manual Mode”.	60
5.10	GUI página “Automatic Mode”.	61
5.11	GUI página “Info”.	61
6.1	Componente — plataforma: (a) modelo original, (b) modelo final.	64
6.2	Componente — ligação entre os braços de paralelismo e o braço principal direito: (a) modelo original, (b) modelo final.	64
6.3	Protótipo físico do projeto mecânico	65
6.4	Esquemático das ligações entre os principais componentes elétricos.	67
6.5	<i>Software launch STEPPERONLINE</i> : página parcial da configuração do <i>drive</i>	68
6.6	Diagrama de fluxo do controlo de movimento.	69
6.7	Plano da trajetória criada entre dois pontos.	70
6.8	Valores dos ângulos provenientes da cinemática nos pontos de validação.	71
6.9	Respostas geradas pelo programa aos comandos da interface gráfica do utilizador.	72
E.1	<i>Software launch STEPPERONLINE</i> : página completa da configuração do <i>drive</i>	117

Lista de acrónimos

CAD *Computer Aided Design.*

CAM *Computer-Aided Manufacturing.*

CNC *Computer Numerical Control.*

DPIF *Dual Point Incremental Forming.*

GUI *Interface Gráfica do Utilizador.*

HRN *Risk Assessment Methodology IOSH Method.*

HSK *Hohlfutter Schaft Konus.*

ISF *Incremental sheet forming.*

PID Proporcional, Integral e Derivativo.

SPIF *Single Point Incremental Forming.*

TPIF *Two Point Incremental Forming.*

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

Capítulo 1

Introdução

1.1 Enquadramento e Motivação

A constante evolução dos processos de fabrico decorre da necessidade de melhorar os métodos de produção atuais. Isso leva a uma evolução tecnológica do processo de fabricação visando torná-lo mais flexível e preciso, resolvendo problemas de conformidade, qualidade das peças produzidas e produtividade. Novas tecnologias surgem de tempos em tempos.

Uma técnica que tem sido amplamente pesquisada e evolui consistentemente desde o início dos anos 2000 é o processo de conformação incremental, como a conformação incremental por ponto único (*Single Point Incremental Forming - SPIF*) [1]. A gama de aplicações é ampla, abrangendo muitos materiais e geometrias diferentes. Além da sua aplicação no campo da prototipagem, o processo SPIF também pode ser utilizado na produção de peças únicas e pequenas séries. Essa capacidade abriu novas oportunidades de negócios e possibilitou o desenvolvimento de produtos exclusivos e personalizados [1]. Apesar de ser um processo de fabricação de forma livre, o SPIF possui algumas limitações geométricas. Isso se deve principalmente à sua específica mecânica de conformação e às limitações de conformabilidade do material. Portanto, é importante estabelecer diretrizes bem definidas para garantir um projeto viável [2].

O SPIF pode ser implementado em vários equipamentos tecnológicos. Os mais comuns são fresas adaptadas, robôs em série e máquinas dedicadas [3]. Ambos os equipamentos têm vantagens e desvantagens. A vantagem mais óbvia dos robôs em série é a sua cinemática superior devido ao maior número de eixos, especialmente quando comparados às fresas de Controlo Numérico Computadorizado (CNC) de três eixos. No entanto, a maioria das peças fabricadas por meio do SPIF tem geometrias simples, que geralmente não requerem mais do que equipamentos de três eixos para processamento. Assim, é questionável se o uso de robôs industriais para o processo SPIF se justifica do ponto de vista económico. Uma máquina dedicada tem um investimento inicial maior que uma fresa CNC customizada, mas é projetada especificamente para a operação SPIF, resultando num maior desempenho [4].

A SPIF-A foi uma máquina dedicada para a conformação incremental por ponto único de chapa desenvolvida no Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro [5]. O objetivo desta máquina era substituir os custosos processos de conformação industrial quando o objetivo for produzir um número reduzido de peças. Um grande problema da estampagem por prensa é que exige um grande investimento inicial no

desenho da matriz e do punção que centralizam e unem as chapas para formar a peça com a geometria desejada. Para evitar esse investimento, muitas vezes os protótipos são feitos de fibra de vidro ou madeira, com a desvantagem de que esses materiais não serão utilizados na produção em massa do produto.

Para poder fabricar não apenas peças de referência académica, mas também peças industriais reais, a SPIF-A possuía uma área de trabalho de 500×500 mm com um deslocamento de altura de 400 mm [4].

Porém, como todas as máquinas, a SPIF-A apresentava algumas desvantagens. Por ser uma máquina hidráulica, englobava todo um sistema hidráulico com um tamanho considerável, produzindo bastante ruído. Embora tivesse uma grande área de trabalho e pudesse moldar peças grandes, era raramente usado para peças de elevadas dimensões. Em ambientes académicos, é mais comum construir peças pequenas para testes e prototipagem, o que levou mesmo ao desmantelamento da mesma [5].

Dado que o projeto SPIF-A está intimamente relacionado ao crescimento do processo SPIF, seria interessante desenvolver uma máquina que superasse as suas principais limitações.

1.2 Descrição do Problema

A necessidade de obter produtos em pequenas séries ou de peças únicas é crescente tanto no campo da prototipagem como no desenvolvimento de produtos exclusivos e personalizados. Isso torna necessário aperfeiçoar os processos de estampagem incremental por ponto único, sobretudo em peças pequenas e em colaboração com outros processos, como impressão 3D.

Portanto, este projeto planeia resolver o problema de compatibilidade discutido na subsecção anterior e fornecer novos recursos, como ser portátil e permitir o uso em sala de aula. Pretende também trabalhar paralelamente a impressoras 3D, permitindo a cooperação de processos de impressão com estampagem para a produção de peças.

1.3 Objetivo

O objetivo deste projeto reside no desenvolvimento de uma máquina de estampagem incremental compacta. A máquina, de natureza elétrica, apresenta um funcionamento silencioso e uma configuração compacta, permitindo assim a sua integração com impressoras 3D e a sua adequação aos ambientes académicos, que impõem exigências rigorosas relativamente aos níveis de ruído.

Este projeto envolve a integração de conhecimentos nas áreas de projeto mecânico, mecânica aplicada (incluindo cinemática direta e inversa) e automação. No que diz respeito ao projeto mecânico, é fundamental assegurar que a máquina seja capaz de suportar as forças envolvidas na conformação de chapas metálicas. Quanto ao projeto de automação, é essencial garantir o funcionamento correto da máquina, incluindo um sistema de controlo preciso e intuitivo e uma interface amigável para o utilizador.

1.4 Organização

Este projeto está organizado em sete capítulos, sendo este o primeiro. A seguir, apresentase um pequeno resumo sobre cada capítulo.

- **Capítulo 1 - Introdução:**

Este capítulo apresenta um breve resumo do processo de estampagem incremental e enquadra o projeto, assim como a motivação para o mesmo e os objetivos.

- **Capítulo 2 - Estado da Arte:**

Revisão do estado da arte da conformação de chapa metálica, com especial ênfase no processo de estampagem incremental por ponto único. São abordadas as principais variáveis que influenciam o desempenho e a conformabilidade, assim como as máquinas utilizadas no processo.

- **Capítulo 3 - Projeto da Estrutura Mecânica:**

Descrição dos requisitos do projeto e, a partir desses requisitos, definição da arquitetura da máquina e das principais dimensões dos braços do robô.

- **Capítulo 4 - Projeto Mecânico:**

Este capítulo aborda o *design* dos braços, o sistema de transporte para a punção de conformação, a seleção e dimensionamento do conjunto motor — redutor, seguido do conjunto motor — atuador linear. Também é discutida a configuração estrutural e apresentadas simulações de alguns componentes.

- **Capítulo 5 - Projeto de Automação:**

Elaboração do esquema elétrico e seleção dos principais componentes envolvidos. Apresentação do desenvolvimento do controlo de movimento, seguido pela criação de uma interface gráfica.

- **Capítulo 6 - Implementação e Resultados:**

Este capítulo expõe os passos para a elaboração do protótipo, implementando as propostas dos dois capítulos anteriores. Contempla a análise da implementação de cada projeto em particular, tanto na área mecânica como na área de automação.

- **Capítulo 7 - Conclusão:**

Apresentação do panorama das realizações gerais alcançadas no trabalho. Além disso, são mencionados alguns trabalhos futuros sugeridos para dar continuidade ao desenvolvimento da máquina, visando aprimorar as suas capacidades.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

Capítulo 2

Estado de Arte

Este capítulo fornece uma visão geral da conformação incremental e em detalhe da conformação incremental por ponto único (*Single Point Incremental Forming - SPIF*), desde o desenvolvimento do processo até aos princípios operacionais. Em seguida, são descritos parâmetros relacionados ao processo, como ferramentas, trajetórias e forças, são discutidos juntamente com alguns valores comuns. Posteriormente, são apresentadas as principais configurações atuais do processo SPIF: fresadoras adaptáveis, robôs em série e máquinas dedicadas. Por fim, destaca-se uma máquina dedicada desenvolvida pela Universidade de Aveiro, a SPIF-A.

2.1 Conformação Incremental

O termo conformação incremental é usado para diversos processos. Todos esses processos são caracterizados pelo facto de que apenas uma pequena parte da superfície da folha é realmente formada de cada vez. Os processos de conformação de chapas metálicas são mais flexíveis do que os processos tradicionais de conformação, permitindo a produção de peças com geometrias complexas.

Em suma, a tecnologia de conformação incremental de chapa (*Incremental sheet forming - ISF*) oferece flexibilidade e baixos custos de produção para peças de chapa metálica. Contudo, esses são processos que requerem tempo e podem não ser adequados quando são necessárias altas taxas de cadência de produção. Dessa forma, a eficiência da produção em massa é menor do que a da tecnologia convencional [6].

Embora existam diversas variações no processo ISF, em geral, a sequência de trabalho é a mesma. Primeiramente, é necessário projetar a geometria da peça, o que pode ser feito utilizando um *software CAD* (*Computer Aided Design*) convencional. Em seguida, o caminho da ferramenta deve ser gerado num *software de CAM* (*Computer-Aided Manufacturing*). Após isso, a chapa deve ser preparada e fixada com o porta-chapas na área de trabalho da máquina. Uma vez que a chapa esteja posicionada e o programa de trajetória da ferramenta carregado na máquina, o processo de fabricação está pronto para iniciar.

Variantes da Conformação Incremental

Com o progresso tecnológico e a facilidade de acesso à informação, há uma série de processos ISF. A técnica SPIF é, provavelmente, a mais utilizada para operações ISF. Este

processo será descrito mais detalhadamente na próxima subseção. Outras técnicas amplamente utilizadas são a estampagem de dois pontos (*Two Point Incremental Forming* - TPIF) e a conformação incremental de ponto duplo (*Dual Point Incremental Forming* - DPIF) [7].

O processo SPIF utiliza uma ferramenta controlada por computador para formar uma folha presa ao longo das arestas e suportada perifericamente por uma placa de suporte, Figura 2.1.

No processo TPIF, uma matriz dedicada, total ou parcial, substitui a placa de apoio, proporcionando um suporte mais amplo à chapa metálica, Figura 2.1.

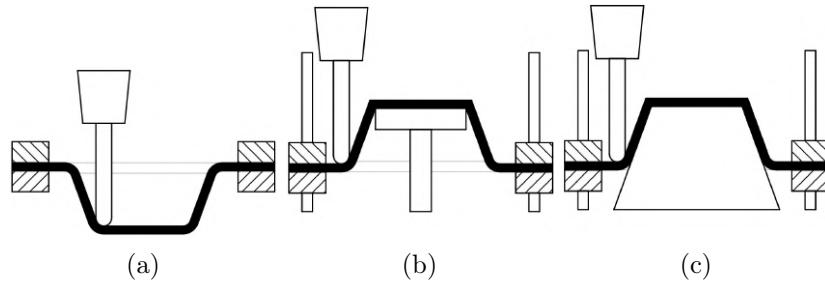


Figura 2.1: ISF variações: (a) SPIF, (b) TPIF com matriz parcial, (c) TPIF com matriz completa. Adaptado de D. Afonso [2].

Apesar do custo adicional do equipamento ISF e da necessidade de produzir ferramentas especiais para qualquer formato, esse processo aumentou a precisão. A operação de matriz parcial oferece vantagens especiais no ápice da forma, em contraste com o SPIF. No entanto, matrizes completas permitem alcançar uma maior precisão geométrica. Porém, é importante ressaltar que essa precisão vem acompanhada de um custo mais alto e de um maior tempo de fabricação para cada peça [1, 2].

O processo (DPIF) pode ser usado para fornecer a vantagem de suporte adicional em ISF sem a necessidade de fabricação de matrizes. Este método utiliza dois atuadores independentes com duas ferramentas de conformação para deformar a folha na forma desejada. A Figura 2.2 representa duas abordagens possíveis para DPIF, usando ferramentas de suporte periféricas (DPIF-P) ou locais (DPIF-L) [1, 2].

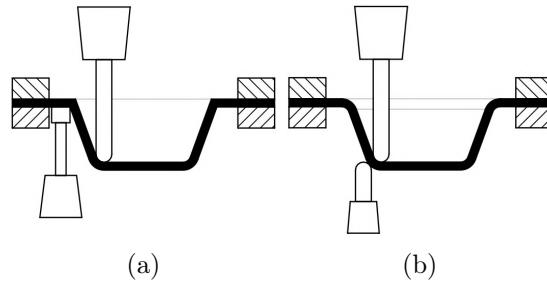


Figura 2.2: ISF variações: (a) DPIF-P, (b) DPIF-L. Adaptado de D. Afonso [2].

No método de suporte periférico (DPIF-D), a ferramenta de conformação empurra a folha de forma incremental, formando-a no formato do caminho da ferramenta, enquanto a ferramenta de suporte segue ao longo do limite, substituindo a necessidade de uma placa de apoio. Na abordagem de suporte local (DPIF-L), duas ferramentas de con-

formação universais são usadas para seguir caminhos de ferramentas complementares, criando uma lacuna de conformação entre elas. Além de aumentar a precisão, também é possível a fabricação de formas côncavas e convexas. Apesar de o processo DPIF oferecer grandes vantagens na precisão formada, ele aumenta a complexidade do processo. Além de requerer a fabricação de uma matriz, que consome tempo e dinheiro, também exige uma calibração precisa da posição da matriz, acrescentando custos e duração adicional ao processo [1, 2].

2.2 Conformação Incremental por Ponto Único - SPIF

O processo ISF tem sido objeto de intensa pesquisa nas últimas duas décadas, levando a uma melhor compreensão dos seus mecanismos de formação e capacidades de processo. Em 1967, Leszak [8] patenteou a primeira ideia documentada de estampagem incremental, destinada a evitar a necessidade de novas matrizes e punções para cada nova peça. Isso levou a uma ampla variedade de implementações de *hardware* e *software* em vários laboratórios e indústrias, especialmente nos últimos anos, devido aos rápidos avanços em máquinas, automação e controlo.

Uma técnica de conformação incremental emergente é a conformação incremental por ponto único (SPIF). Esta técnica consiste em deformar incrementalmente uma chapa plana numa forma desejada, manipulando a ferramenta ao longo de um percurso bem definido conforme a geometria final da peça [9]. Este processo permite produzir peças com geometrias complexas a partir de uma grande variedade de materiais e escalas com pouco investimento e custo energético. Recomendado para prototipagem, produção em pequenos lotes e aplicações de ferramentas rápidas.

2.2.1 Desempenho e Conformabilidade do Processo SPIF

O desempenho e a conformabilidade do processo SPIF são avaliados com base no ângulo da parede de conformação, na espessura da chapa deformada e no acabamento da superfície. Estes dependem de vários fatores, como diâmetro da ferramenta, taxa de avanço, profundidade do passo incremental, velocidade de rotação da ferramenta e lubrificantes.

Técnicas analíticas, numéricas e computacionais foram utilizadas para melhorar e entender melhor o processo.

Os modelos analíticos tornaram-se complicados e incapazes em capturar os complexos mecanismos de deformação do processo SPIF, mas este foi o início da pesquisa do processo. Jeswiet et al. [10], em 2002, investigaram o efeito da espessura da chapa na maximização dos ângulos de parede. Um modelo proposto por Ham e Jeswiet [11] em 2008 descreve a influência de vários parâmetros, como tamanho da ferramenta, tamanho do passo, tipo de material e espessura do material para melhorar o desempenho de conformação do processo SPIF em comparação com os métodos convencionais. Um novo estudo foi realizado em 2011 considerando diferentes percursos de ferramentas e de tamanhos do passo [12].

Modelos numéricos baseados no método dos elementos finitos requerem muito tempo de computação, mas podem fornecer informações relevantes sobre o processo. Então, Senthil e Gnanavelbabu [13] (2014) realizaram simulações de elementos finitos para estimar a deformação e a distribuição de deformação do SPIF. Em 2017, Gupta e Jeswiet [14] mostraram que o aumento da velocidade de rotação da ferramenta durante a conformação

incremental de ponto único da chapa de liga AA 5754-H32 melhorou a conformabilidade devido à geração de calor.

A utilização de materiais neste processo expandiu-se de ligas metálicas para polímeros, painéis compostos e ligas com memória de forma, abrindo novas áreas de aplicação para este processo. Os avanços na metrologia dimensional e nas ferramentas de projeto auxiliadas por computador melhoraram o controlo de qualidade do processo [9].

Técnicas de inteligência computacional, como algoritmos genéticos e otimização de enxames de partículas, têm sido adotadas por diversos pesquisadores. (Abualigah e Hanandeh (2015) [15]; Abualigah e Khader [16]; Abualigah (2019) [17]).

2.2.2 Princípio de Funcionamento

Dependendo do tipo de máquina utilizada, do uso de diferentes armações, placas de apoio e ferramentas simples de apoio, o princípio de funcionamento pode variar ligeiramente. Em todos os casos, no entanto, a ferramenta de conformação de ponta esférica controlada por CNC segue um caminho de ferramenta programado contra uma chapa mantida pelo seu limite externo [18].

A Figura 2.3 representa o princípio de funcionamento do SPIF, no qual uma chapa metálica é suportada por porta-chapas e uma placa de apoio, sendo fixada na parte superior (Figura 2.3-a). A Figura 2.3-b representa o início do processo e a Figura 2.3-d representa indicativamente diferentes níveis de profundidade do percurso. A abordagem inicial consiste em mover a ferramenta de conformação para uma posição sobre a chapa. O seguinte movimento leva a ferramenta ao ponto de entrada num caminho de mergulho ou rampa. O caminho da ferramenta continua a deformar a folha, aprofundando a ponta da ferramenta ao longo do processo de acordo com um passo predefinido. A ferramenta retraí-se da folha quando a forma final é alcançada [1].

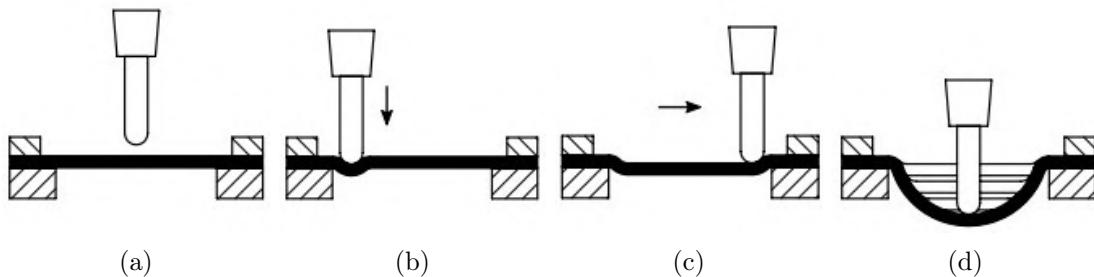


Figura 2.3: Diagrama esquemático do processo de estampagem incremental: (a) 1.^a etapa, (b) 2.^a etapa, (c) 3.^a etapa, (d) 4.^a etapa. Retirado de D. Afonso [2].

2.2.3 Ferramentas

As ferramentas de conformação podem ser montadas em porta-ferramentas padrão ou personalizados. Na maioria das aplicações, o porta-ferramentas está montado num fuso. A operação SPIF pode ser alcançada permitindo a rotação passiva livre, minimizando o atrito ou impondo uma velocidade específica do fuso.

O raio mínimo de arredondamento da peça é definido pelo tamanho da ferramenta e é igual ao raio da ferramenta. O tamanho mínimo da ferramenta depende da espessura

da chapa. Isso ocorre porque ferramentas pequenas e finas não são fortes o suficiente para as forças de conformação exigidas por chapas grossas [19].

O diâmetro da ferramenta também é determinado pelo acabamento da superfície da peça. As ferramentas deixam marcas na superfície e essas marcas podem ser reduzidas usando ferramentas de diâmetro maior e reduzindo o passo de conformação. Porém, se o passo for muito pequeno, o tempo de conformação será retardado, e o material é conformado várias vezes no mesmo local, aumentando o encruamento. O que pode levar a rachaduras na chapa. No entanto, como a ferramenta está exposta à alta compressão e cisalhamento, deve-se evitar o deslocamento excessivo da ponta devido à flexão elástica ou deformação excessiva da superfície hemisférica. Um lubrificante adequado pode ser usado durante todo o processo para melhorar a qualidade da superfície [20].

2.2.4 Trajetórias

O método mais comum usa uma trajetória de contorno onde a ferramenta segue ao longo do perímetro da peça, mergulhando entre as etapas numa filosofia camada por camada. A ação de mergulho segue um incremento vertical definido (Δz) com valores típicos entre 0,1 e 2 mm [21].

Algumas estratégias seguem um passo Δz constante, enquanto outras escolhem uma altura de vieira constante (Δh), conforme mostrado na Figura 2.4. A altura de vieira é a distância perpendicular máxima entre a superfície formada e a ferramenta.

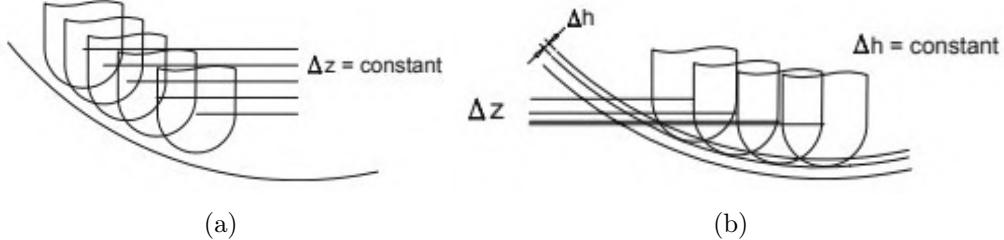


Figura 2.4: Tipos de incrementos na trajetória da ferramenta: (a) passo em z constante, (b) altura de vieira constante. Retirado de D. Afonso [2].

Para peças simples com paredes de inclinação constante, a estratégia com passo Δz constante oferece excelentes resultados. Numa trajetória de contorno simples ou alternado, caso a e b da Figura 2.5, respetivamente, a ferramenta move-se diagonalmente de um plano z para o próximo plano no eixo xz. Em ambos os casos, a chapa é marcada no ponto de transição entre camadas consecutivas. A qualidade das superfícies planas ou próximas de planas é má, especialmente quando são usadas profundidades ou passos altos (mais de 0,5 mm). Para contornar esse problema, pode-se optar por uma trajetória helicoidal (caso c da Figura 2.5). Com essa abordagem, a ferramenta move-se sempre nos eixos x, y e z, criando um padrão helicoidal na peça moldada. Usar este tipo de trajetória não apenas melhora a qualidade da superfície, mas também melhora a precisão geométrica [1].

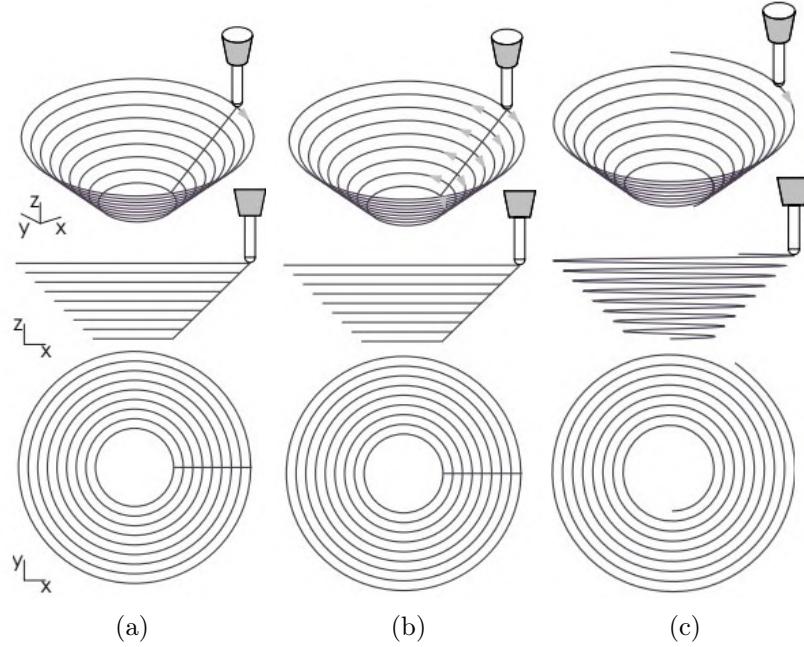


Figura 2.5: Trajetórias da ferramenta no processo SPIF: (a) contorno simples, (b) contorno alternado, (c) contorno helicoidal. Adaptado de D. Afonso [2].

As estratégias multiestágios e/ou de cinco eixos permitem geometrias complexas, incluindo paredes verticais e até com tiragem negativa que não eram possíveis com as técnicas anteriores.

Se uma peça for impossível ou difícil de fabricar devido a um ângulo acentuado em apenas uma parede, é possível inclinar o eixo da ferramenta e regenerar o caminho da ferramenta redistribuindo o ângulo de extração criando caminhos de ferramenta em ângulo [22].

2.2.5 Forças

A máquina utilizada define o tamanho máximo do produto e a espessura da chapa, de modo que a força necessária para conformar é um fator-chave. A força pode ser decomposta em duas componentes, vertical (F_z) e horizontal (F_{xy}). A componente horizontal pode ser decomposta em tangencial (F_t) e perpendicular (F_r). A partir de resultados publicados por diversos autores, resumidos na Tabela 2.1, conclui-se que a componente vertical da força é influenciada pela espessura da chapa e pelas propriedades do material, diâmetro da ferramenta, ângulo da parede e tamanho do degrau vertical ou altura do recorte. A lubrificação e a rotação da ferramenta afetam apenas a componente horizontal da força, não a componente vertical.

Tabela 2.1: Resultados obtidos da medição da força em conformação incremental.

Autor	Força máx.	Método
Allwood et al. [23]	13 kN; 6,5 kN	Cálculos aproximados
Dufiou et al. [24]	1,460 kN	Experimental
Rauch et al. [25]	0,9 kN	Experimental
Jackson et al. [26]	3 kN	Experimental
Durante et al. [27]	2 kN	Experimental
Bouffoux et al. [28]	1,3 kN	Experimental

2.2.6 Valores Típicos

Como a resistência de escoamento plástico difere dependendo do material usado, a espessura máxima da placa também difere com o material. Dependendo do *hardware*, as espessuras máximas típicas são de 2 mm para aço e 4 mm para alumínio. O SPIF também pode ser aplicado a materiais poliméricos com espessura superior a 10 mm. A qualidade da superfície das peças SPIF é afetada pelas ferramentas e percursos usados.

As velocidades de conformação para o SPIF variam de velocidades muito baixas, como 100 mm/min, e velocidades muito altas, superiores a 12 m/min. Os degraus verticais normalmente utilizados variam entre 0,1 mm e 2 mm, dependendo da espessura e resistência do material [2]. A Tabela 2.2 resume alguns parâmetros típicos de operações de conformação incremental por ponto único.

Tabela 2.2: Valores típicos no processo de conformação incremental por ponto único.

Área de trabalho	100 × 100 mm a 2000 × 1500 mm
Espessura da chapa	t_0 0,5 a 4 mm
Material da chapa	aço, alumínio ou polímeros
Diâmetro da ferramenta de conformação	ϕ_t 5 a 20 mm
Tamanho do passo vertical	Δz 0,1 a 2 mm
Ângulo mínimo de parede ISF de estágio único	λ 10° a 30°
Ângulo máximo de desenho ISF de estágio único	α 60° a 80°
Raio interno mínimo	3 a 6 mm
Velocidade de formação	500 a 3000 mm/min
Forças de conformação	0,3 a 7,5 kN (vertical) 0,1 a 2,5 kN (horizontal)

2.3 Máquinas para Processos de SPIF

Máquinas-ferramentas CNC, robôs série e máquinas dedicadas são os equipamentos tecnológicos mais comuns para operações de SPIF. Estes podem executar movimentos coordenados, que envolvem alta precisão, usando unidades de alimentação de *feedback* de controlo fechado em cada eixo.

2.3.1 Fresadoras Adaptadas

A maioria das máquinas-ferramenta CNC de três eixos podem ser adaptadas ao processo SPIF devido à sua alta rigidez e alto volume de trabalho, Figura 2.6. As fresadoras estão disponíveis em diferentes configurações com diferentes volumes de trabalho, velocidade de avanço, cargas máximas e preços.



Figura 2.6: Máquinas para processos SPIF: fresadoras adaptadas. Retirado de Tayebi et al. [29].

No entanto, esse método apresenta algumas desvantagens. As fresadoras, em regra, não são projetadas para suportar cargas tão altas no plano perpendicular ao eixo da ferramenta, por estarem principalmente preparadas para operações de corte de metal nesse plano. Como resultado, durante o processo de conformação, há um alto risco de danificar tanto o punção quanto o próprio porta-ferramenta. Por essa razão, é importante destacar que esse método é mais adequado para materiais mais macios, dadas as limitações mencionadas. Além disso, geralmente, não há instrumentação adequada para a medição de forças nos três eixos principais na ponta da ferramenta. Devido à natureza sólida da mesa de trabalho é difícil acessar ao lado avesso da peça para medição de força e controlo geométrico. Por outro lado, o custo adicional na transformação de uma fresadora numa máquina de estampagem incremental é reduzido, tornando assim uma opção atrativa [3, 5].

2.3.2 Robôs Série

Manipuladores robóticos com cinemática série foram implementados para realizar conformação incremental, Figura 2.7, conforme mostrado nos trabalhos de Duflou et al. [24], Schafer & Schraft [30] e Meier et al.[31].

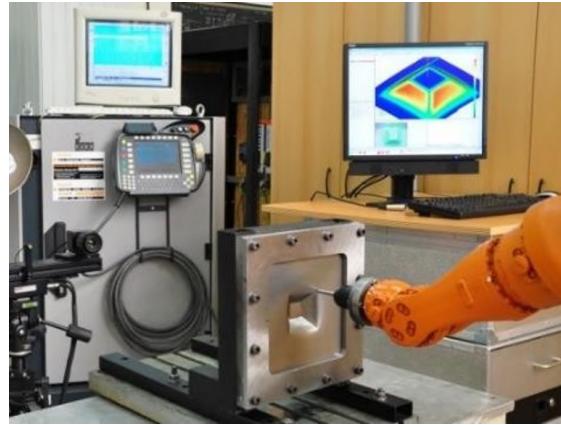


Figura 2.7: Máquinas para processos SPIF: robôs série. Adaptado de Rack et al. [32].

O processo com braços robóticos é muito semelhante ao realizado por máquinas-ferramenta. O modelo da peça é fatiado em camadas horizontais no *software* e convertido em trajetórias de ferramentas.

Manipuladores robóticos são uma solução atrativa devido à sua alta flexibilidade, grande área de conformação e por agregar mobilidade em seis graus ao processo, permitindo a conformação da chapa na posição mais conveniente. Também permite a combinação de várias fases de produção numa única célula e operadas por um único robô. Os robôs industriais são caracterizados por altas cargas de trabalho, grandes variações de velocidade e rapidez de posicionamento. No entanto, devido à sua arquitetura serial e baixa rigidez, os erros de posicionamento são aditivos para cada grau de liberdade, podendo levar a grandes desvios geométricos finais. Além disso, a capacidade de força depende da carga útil do robô [3, 5].

2.3.3 Máquinas Dedicadas (*Purpose Built*)

As máquinas dedicadas, Figura 2.8, também conhecidas pelo termo em inglês *purpose built* são equipamentos construídos para realizar operações de conformação incremental. Este tipo de máquina é caracterizado por alta velocidade de avanço e uma carga de trabalho moderada. Estas máquinas são equipadas com um cerra-chapas móvel que permite maior flexibilidade ao processo. Combinando a elevada rigidez das máquinas-ferramenta com a alta flexibilidade dos robôs pode-se obter peças de geometrias complexas com alta precisão e excelente acabamento superficial [3, 5].



Figura 2.8: Máquinas para processos SPIF: máquinas dedicadas. Adaptado de S. Marabuto [5].

Exemplos dessas máquinas são a *Cambridge ISF Machine* [23], desenvolvida pela Universidade de Cambridge em 2004 e a *Amido Dieless NC Forming* [33] comercializada pela Amino Corporation. Outro caso pertinente é a SPIF-A, desenvolvida pela Universidade de Aveiro.

2.4 Projeto SPIF-A

Muitas instituições e pesquisadores adotaram a ideia de adaptar fresadoras CNC convencionais para realizar operações SPIF. No entanto, essa abordagem resultava numa gama limitada de aplicações em termos de materiais e geometria. O projeto SPIF-A superou com sucesso algumas das limitações das máquinas CNC adaptadas.

O SPIF-A usava uma plataforma 6-6. Essa plataforma empregava uma geometria hexagonal semirregular coplanar que proporciona alta rigidez. Além disso, usava juntas universais padrão, evitando as juntas mais complexas e caras para plataformas do tipo 3-3 ou 6-3. Os arranjos cinemáticos 6 graus de liberdade permitem um posicionamento de perfuração não vertical em relação à superfície da chapa. Este aspecto era importante para minimizar os momentos fletores no fuso e alterar as condições de atrito entre a chapa e o punção.

Os atuadores utilizados na plataforma *Stewart* eram hidráulicos de dupla ação que oferecerem o melhor equilíbrio entre forças disponíveis, custo e área de trabalho em comparação com atuadores elétricos e pneumáticos. No entanto, apresentavam algumas restrições:

- A rigidez dos sistemas hidráulicos aumenta com a pressão de operação;
- A carga útil máxima do sistema deve ser alcançada mesmo com apenas dois atuadores;
- O atuador deve ter curso suficiente para atingir a área de trabalho desejada.

O *design* do SPIF-A, visando proporcionar versatilidade à máquina e permitir a uso de materiais mais duros e geometrias mais espessas, apresentava um curso vertical de 400 mm, uma área de trabalho 500 × 500 mm e uma força de compressão axial até 13 kN (vertical) e tangencial de 6,5 kN (horizontal) [3, 4].

Capítulo 3

Projeto da Estrutura Mecânica da Máquina

Em contraste com outras máquinas dedicadas desenvolvidas anteriormente, este projeto, a máquina SPIF-A_v2, representa a segunda versão da máquina de estampagem incremental da Universidade de Aveiro, concebida com o objetivo de atender às necessidades fundamentais da conformação de peças em ambiente académico. Isso quer dizer conformar peças de pequenas e médias dimensões, o que se traduz numa área de trabalho de 200 mm x 200 mm, com um curso vertical de 100 mm. Outra propriedade relevante na hora de definir a arquitetura de uma máquina é saber quais materiais considerar e as suas espessuras. Neste caso, serão principalmente chapas de alumínios com espessuras entre os 0.5 e 3 mm.

O projeto de uma máquina deve considerar as forças envolvidas no processo tecnológico em questão. Dessa forma, a chave para projetar uma máquina de conformação incremental é prever as forças que atuam na ferramenta durante o processo. A força necessária para conformar a chapa depende do material e da espessura do mesmo. Posto isto, a força estimada para conformar chapas de alumínio é 3 kN no eixo vertical e 1 kN nos eixos horizontais.

Em suma, a Tabela 3.1 apresenta os principais requisitos do projeto.

Tabela 3.1: Principais requisitos do projeto.

Área de trabalho	200 × 200 mm
Curso vertical	100 mm
Espessura da chapa	0,5 a 3 mm
Material da chapa	alumínio
Forças de conformação	3 kN (vertical) 1 kN (horizontal)

3.1 Análise Comparativa da Arquitetura

Ao longo deste projeto de desenvolvimento, foram consideradas e estudadas diversas soluções arquitetónicas, tendo em vista que um processo de conformação incremental por

ponto único requer pelo menos três eixos. Algumas hipóteses relevantes são apresentadas na Figura 3.1.

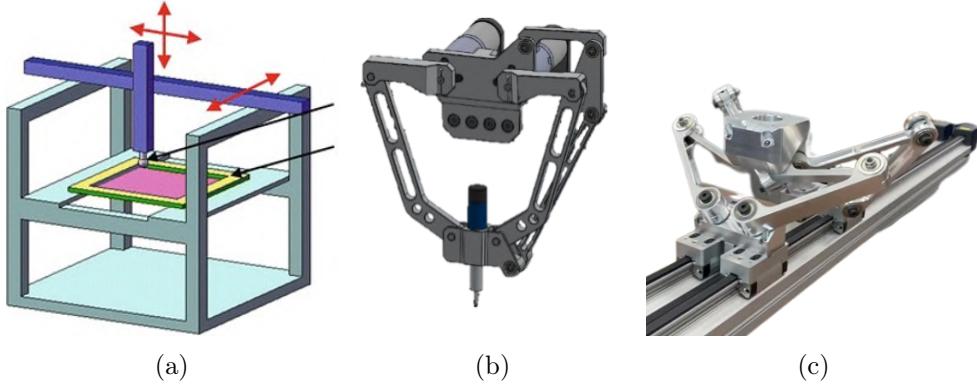


Figura 3.1: Estudo da arquitetura: (a) hipótese 1. Adaptado de N. V. Reddy et al. [34]. (b) hipótese 2. Adaptado de X. Yang et al. [35]. (c) hipótese 3. Adaptado de Rudmin [36].

Hipótese 1: Cada eixo é controlado por um fuso. Este tipo de solução é semelhante ao utilizado em muitas máquinas de impressão 3D. Este tipo de arquitetura permite uma boa relação entre velocidade de conformação e a força exercida. Também permite que o processo seja preciso.

Hipótese 2: Um eixo é controlado por um fuso e os restantes dois eixos através de um robô de dois eixos, ou seja, com dois braços do tipo RR planar. Este tipo de robô designa-se por *D2 Delta Robot*. Este tipo de arquitetura permite uma excelente relação entre velocidade de conformação e força exercida. Além de permitir que o processo seja preciso.

Hipótese 3: Os três eixos são obtidos pela combinação de dois fusos. Este tipo de solução designa-se por *Parallel Axis Tripteron*. O grande benefício deste sobre o modelo do *D2 Delta Robot* é o controle linear. O que significa que ao elaborar o projeto mecânico e o programa de controlo dos movimentos dos motores não é necessário ter em conta as singularidades, tendo as mesmas características de resolução e impulso em toda a sua área de trabalho e a cinemática direta e inversa é trivial. Este tipo de solução permite obter velocidades elevadas, mas não é adequado para processos que envolvam forças significativas como no processo de SPIF.

Optando-se assim pela hipótese 2. Analisando as possíveis configurações dos braços, em série ou em paralelo (Figura 3.2), é possível concluir que numa configuração em série a precisão do processo é diminuída, pois o erro da posição acumula-se e será maior que numa configuração paralela. Como num processo SPIF a precisão é um fator-chave, optou-se por uma configuração em paralelo.

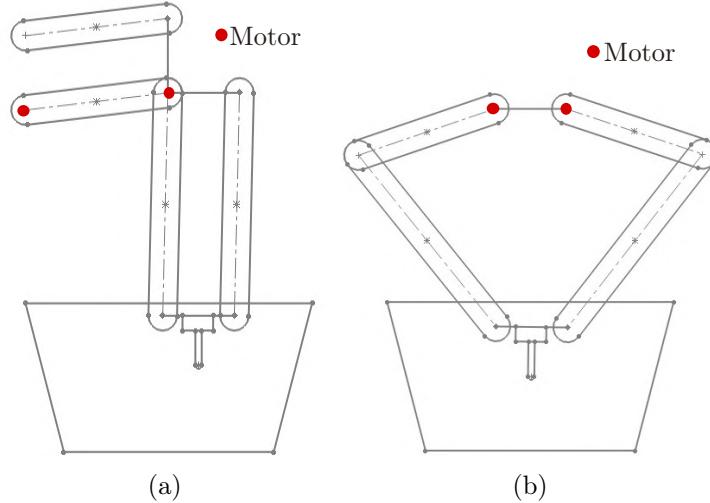


Figura 3.2: Configuração dos braços: (a) motores em série, (b) motores em paralelo.

Nesta configuração, os braços podem ser orientados no mesmo ou em lados opostos como no caso (b) da Figura 3.2. Após analisar o binário aplicado nos motores conclui-se que em ambos os casos é igual. O fator decisivo foi, portanto, a simplicidade do *design* dos braços orientados em lados opostos.

3.2 Otimização dos Braços do Robô: Área de Trabalho e Minimização do Binário

Após a determinação da arquitetura da máquina, é imprescindível proceder à definição dos comprimentos dos braços. Essa definição está sujeita à área de trabalho e ao binário exercido nos motores, já que visa minimizar o comprimento dos braços, sem afetar a área de trabalho e reduzir o binário nos motores. O motor que se responsabiliza pelo movimento ao longo do eixo x estará disposto no mesmo plano da mesa de trabalho, enquanto os demais dois motores, encarregados do movimento nos eixos y e z, ficarão dispostos acima da base de trabalho. A altura dos motores está diretamente relacionada ao binário aplicado nos mesmos, visto que o binário (τ) é obtido a partir da multiplicação da distância (d) entre o motor e o plano da mesa de trabalho pela força aplicada (F) (conforme a Equação 3.1).

$$\tau = d \times F \quad (3.1)$$

A otimização do comprimento dos braços foi possível através de um programa desenvolvido em MATLAB, disponível no Apêndice A para consulta. Os resultados obtidos indicam que o menor comprimento possível, sem prejudicar a estrutura da máquina, é de 120 mm para o primeiro braço, 150 mm para o segundo braço, e a distância entre o motor e o plano da mesa de trabalho de 290 mm. Consequentemente, o torque máximo que pode ser alcançado é de 665 Nm.

3.3 Análise Cinemática

A análise cinemática de robôs é uma área de estudo que se divide em duas partes principais: a análise cinemática direta e a análise cinemática inversa. A análise cinemática direta é a determinação dos parâmetros de movimento da ferramenta final (*end-effector*) — como deslocamento, velocidade e aceleração — a partir dos parâmetros de movimento das juntas do robô (como deslocamento angular, velocidade angular e aceleração angular). Por outro lado, a análise cinemática inversa refere-se à determinação dos parâmetros de movimento das juntas do robô com base nos parâmetros de movimento do *end-effector* [37].

A cinemática inversa é especialmente útil em robótica para a programação de tarefas complexas como o processo de SPIF.

3.3.1 Cinemática Direta

Conforme demonstrado na Figura 3.3, o robô do tipo *D2 Delta* terá a responsabilidade de controlar o movimento ao longo dos eixos y e z. O objeto de estudo consiste no ponto médio do *end-effector*, denominado “O” e cujas coordenadas são (T_y, T_z) .

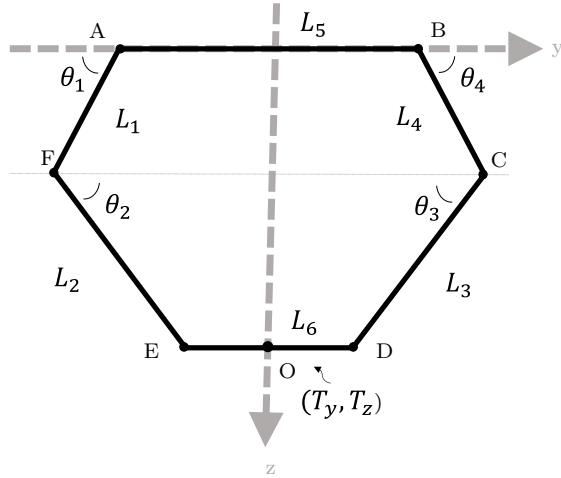


Figura 3.3: Esquema da estrutura do robô *D2 Delta*.

De modo a obter o modelo matemático da cinemática direta, estabelece-se a relação de movimento da organização, expressa pelas Equações 3.2, 3.3 e 3.4.

$$\begin{cases} -L_1 \cos \theta_1 + L_2 \cos \theta_2 + L_6 + L_3 \cos \theta_3 - L_4 \cos \theta_4 - L_5 = 0 \\ L_1 \sin \theta_1 + L_2 \sin \theta_2 - L_3 \sin \theta_3 - L_4 \sin \theta_4 = 0 \end{cases} \quad (3.2)$$

$$\begin{cases} T_y = -\frac{1}{2}L_5 - L_1 \cos \theta_1 + L_2 \cos \theta_2 + \frac{1}{2}L_6 \\ T_z = L_1 \sin \theta_1 + L_2 \sin \theta_2 \end{cases} \quad (3.3)$$

$$\begin{cases} T_y = \frac{1}{2}L_5 + L_4 \cos \theta_4 - L_3 \cos \theta_3 - \frac{1}{2}L_6 \\ T_z = L_4 \sin \theta_4 + L_3 \sin \theta_3 \end{cases} \quad (3.4)$$

A obtenção das coordenadas do *end-effector* (τ_y, τ_z) é realizada mediante a rotação dos ângulos θ_1 e θ_4 . A relação entre θ_2 e θ_3 com θ_1 e θ_4 pode ser calculada a partir da Equação 3.2. Dessa forma, obtém-se a Equação 3.5:

$$A + B \sin \theta_3 + C \cos \theta_3 + D = 0 \quad (3.5)$$

Onde,

$$A = L_1^2 - L_2^2 + L_3^2 + L_4^2 + L_5^2 + L_6^2 \quad (3.6)$$

$$B = -2L_1L_3 \sin \theta_1 + 2L_3L_4 \sin \theta_4 \quad (3.7)$$

$$C = -2L_1L_3 \cos \theta_1 - 2L_3L_4 \cos \theta_4 + 2L_3L_6 - 2L_3L_5 \quad (3.8)$$

$$\begin{aligned} D = & -2L_1L_4 \sin \theta_1 \sin \theta_4 + 2L_1L_4 \cos \theta_1 \cos \theta_4 - 2L_1L_6 \cos \theta_1 \\ & + 2L_1L_5 \cos \theta_1 - 2L_4L_6 \cos \theta_4 + 2L_4L_5 \cos \theta_4 - 2L_5L_6 \end{aligned} \quad (3.9)$$

Tomando em conta a igualdade $\sigma = \tan \frac{\theta_3}{2}$ e empregando as normas das funções trigonométricas, é possível obter a equação $\tan \theta_3 = \frac{2 \tan(\frac{\theta_3}{2})}{1 - \tan^2(\frac{\theta_3}{2})} = \frac{2\sigma}{1 - \sigma^2}$. Deste modo, é possível concluir que $\sin \theta_3 = \frac{2\sigma}{1 + \sigma^2}$ e $\cos \theta_3 = \frac{1 - \sigma^2}{1 + \sigma^2}$.

Ao realizar a substituição dos valores de $\sin \theta_3$ e $\cos \theta_3$ na Equação 3.5,

$$A + B \frac{2\sigma}{1 + \sigma^2} + C \frac{1 - \sigma^2}{1 + \sigma^2} + D = 0 \quad (3.10)$$

Simplificando a Equação 3.10:

$$\sigma^2(A - C + D) + \sigma(2B) + (A + C + D) = 0 \quad (3.11)$$

$$\sigma = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - (A - C + D)(A + C + D)}}{A - C + D} \quad (3.12)$$

$$\theta_3 = 2 \tan^{-1} \sigma \quad (3.13)$$

$$\theta_2 = \sin^{-1} \frac{-L_1 \sin \theta_1 + L_3 \sin \theta_3 + L_4 \sin \theta_4}{L_2} \quad (3.14)$$

A Equação 3.14 na Equação 3.3 permite encontrar as coordenadas do *end-effector*:

$$\begin{cases} T_y = -\frac{1}{2}L_5 - L_1 \cos \theta_1 + L_2 \cos \theta_2 + \frac{1}{2}L_6 \\ T_z = L_1 \sin \theta_1 + L_2 \sin \theta_2 \\ \theta_2 = \sin^{-1} \frac{-L_1 \sin \theta_1 + L_3 \sin \theta_3 + L_4 \sin \theta_4}{L_2} \end{cases} \quad (3.15)$$

A Equação 3.14 na Equação 3.4 permite encontrar as coordenadas do end-effector:

$$\begin{cases} T_y = \frac{1}{2}L_5 + L_4 \cos \theta_4 - L_3 \cos \theta_3 - \frac{1}{2}L_6 \\ T_z = L_4 \sin \theta_4 + L_3 \sin \theta_3 \\ \theta_3 = 2\tan^{-1}\sigma \end{cases} \quad (3.16)$$

Por meio das Equações 3.15 e 3.16, conhecendo os ângulos de entrada θ_1 e θ_4 , pode-se calcular as coordenadas do *end-effector* (τ_y, τ_z).

3.3.2 Cinemática Inversa

A análise de cinemática inversa do robô do tipo *D2 Delta* é fundamentada nas coordenadas do *end-effector* (τ_y, τ_z) para resolver os ângulos de rotação θ_1 e θ_4 . Pela Equação 3.3, podemos obter a Equação 3.17:

$$A1 + B1 \sin \theta_1 + C1 \cos \theta_1 + D1 = 0 \quad (3.17)$$

Onde,

$$A1 = \tau_y^2 + \tau_z^2 + L_1^2 - L_2^2 + 0,25L_5^2 + 0,25L_6^2 \quad (3.18)$$

$$B1 = 2\tau_y L_1 + L_1 L_5 - L_1 L_6 \quad (3.19)$$

$$C1 = -2\tau_z L_1 \quad (3.20)$$

$$D1 = \tau_y L_5 - \tau_y L_6 - 0,5L_5 L_6 \quad (3.21)$$

Tomando em conta a igualdade $\sigma = \tan \frac{\theta_1}{2}$ e empregando as normas das funções trigonométricas, é possível obter a equação $\tan \theta_1 = \frac{2\tan(\frac{\theta_1}{2})}{1-\tan^2(\frac{\theta_1}{2})} = \frac{2\sigma}{1-\sigma^2}$. Deste modo, é possível concluir que $\sin \theta_1 = \frac{2\sigma}{1+\sigma^2}$ e $\cos \theta_1 = \frac{1-\sigma^2}{1+\sigma^2}$.

Ao realizar a substituição dos valores de $\sin \theta_1$ e $\cos \theta_1$ na Equação 3.17,

$$A1 + B1 \frac{2\sigma}{1+\sigma^2} + C1 \frac{1-\sigma^2}{1+\sigma^2} + D1 = 0 \quad (3.22)$$

Simplificando a Equação 3.22:

$$\sigma^2(A1 - C1 + D1) + \sigma(2B1) + (A1 + C1 + D1) = 0 \quad (3.23)$$

$$\sigma = \frac{-B1 \pm \sqrt{B1^2 - (A1 - C1 + D1)(A1 + C1 + D1)}}{A1 - C1 + D1} \quad (3.24)$$

$$\theta_1 = 2\tan^{-1}\sigma \quad (3.25)$$

Pela Equação 3.4, podemos obter a equação:

$$A2 + B2 \sin \theta_4 + C2 \cos \theta_4 + D2 = 0 \quad (3.26)$$

Onde,

$$A2 = \tau_y^2 + \tau_z^2 + L_4^2 - L_3^2 + 0,25L_5^2 + 0,25L_6^2 \quad (3.27)$$

$$B2 = -2\tau_y L_4 + L_4 L_5 - L_4 L_6 \quad (3.28)$$

$$C2 = -2\tau_z L_4 \quad (3.29)$$

$$D2 = -\tau_y L_5 + \tau_y L_6 - 0,5L_5 L_6 \quad (3.30)$$

Tomando em conta a igualdade $\rho = \tan \frac{\theta_4}{2}$ e empregando as normas das funções trigonométricas, é possível obter a equação $\tan \theta_4 = \frac{2 \tan(\frac{\theta_4}{2})}{1 - \tan^2(\frac{\theta_4}{2})} = \frac{2\rho}{1-\rho^2}$. Deste modo, é possível concluir que $\sin \theta_4 = \frac{2\rho}{1+\rho^2}$ e $\cos \theta_4 = \frac{1-\rho^2}{1+\rho^2}$.

Ao realizar a substituição dos valores de $\sin \theta_4$ e $\cos \theta_4$ na Equação 3.26,

$$A2 + B2 \frac{2\rho}{1+\rho^2} + C2 \frac{1-\rho^2}{1+\rho^2} + D2 = 0 \quad (3.31)$$

Simplificando a Equação 3.31:

$$\rho^2(A2 - C2 + D2) + \rho(2B2) + (A2 + C2 + D2) = 0 \quad (3.32)$$

$$\rho = \frac{-B2 \pm \sqrt{B2^2 - (A2 - C2 + D2)(A2 + C2 + D2)}}{A2 - C2 + D2} \quad (3.33)$$

$$\theta_4 = 2\tan^{-1}\rho \quad (3.34)$$

Através das Equações 3.25 e 3.34, conhecendo as coordenadas do *end-effector* (τ_y, τ_z), pode-se calcular os ângulos de entrada θ_1 e θ_4 .

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

Capítulo 4

Projeto Mecânico

O projeto mecânico é crucial no desenvolvimento de produtos industriais e engenharia mecânica, visando criar e desenvolver sistemas, máquinas e equipamentos mecânicos que atendam às necessidades específicas dos clientes, garantindo a sua segurança, eficiência e qualidade. Softwares CAD, como o SOLIDWORKS, são cada vez mais importantes no projeto mecânico devido à sua precisão, agilidade, flexibilidade e facilidade de visualização. O SOLIDWORKS [38] é um software CAD amplamente utilizado que permite aos engenheiros e projetistas criar e modificar modelos 3D, gerir dados do projeto, simular movimentos e testar a resistência e durabilidade dos componentes. Além de criar desenhos técnicos que facilitam a comunicação com membros da equipa, clientes e fornecedores.

O desenvolvimento de uma máquina requer atenção cuidadosa aos componentes utilizados. É importante escolher componentes que possam ser facilmente adquiridos no mercado, ou cuja fabricação seja relativamente simples, de modo a reduzir os custos do projeto. Além disso, é essencial considerar o material utilizado para garantir que a máquina resista adequadamente às forças exercidas sobre ela, sem ser excessivamente conservador. Essas considerações são fundamentais para garantir a eficácia, eficiência e segurança da máquina, ao mesmo tempo, em que se tem em vista otimizar os custos e recursos envolvidos no projeto.

4.1 Design dos Braços

A configuração de um robô *D2 DELTA* é composta por dois braços principais, um do lado direito e outro do lado esquerdo, responsáveis pela movimentação e sustentação de forças, acompanhados por um ou dois braços secundários para garantir o paralelismo da plataforma, como demonstrado no caso a) da Figura 4.1. No entanto, para processos que envolvem forças horizontais, tais como o SPIF, é preferível usar uma configuração de três braços principais em triângulo, caso b) da Figura 4.1. Essa configuração aumenta significativamente a resistência do robô às forças horizontais, proporcionando uma maior eficiência.

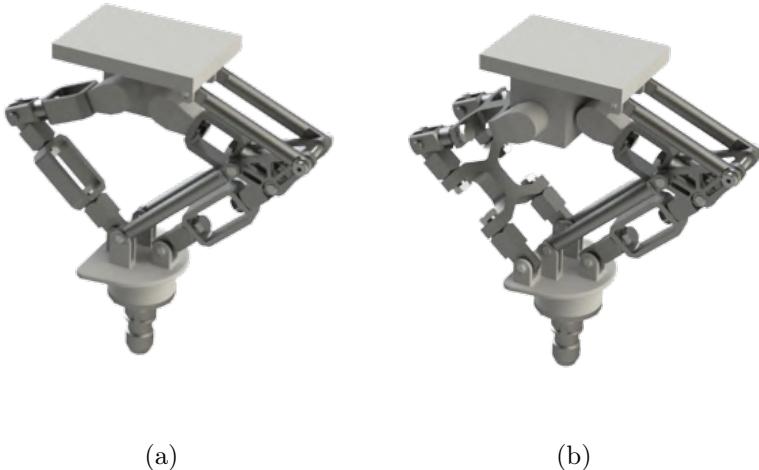


Figura 4.1: Configuração dos braços do robô: (a) dois braços principais, (b) três braços principais.

Dois dos três braços principais estão alinhados relativamente ao eixo y (do lado esquerdo) e movem-se em conjunto, enquanto o terceiro braço (do lado direito) está equidistante no eixo x dos outros dois braços. Para assegurar o movimento solidário entre os dois braços do lado esquerdo, estes são conectados por componentes em forma de “x”, permitindo não somente o movimento em conjunto, mas também um fácil acoplamento entre os componentes. A estrutura do braço do lado direito é em forma de “O”, simplificando o acoplamento entre os componentes. Do mesmo lado, há dois braços secundários que garantem o paralelismo.

O movimento da plataforma e, consequentemente, da ferramenta é assegurado pelo movimento dos motores acoplados aos braços na parte superior. O movimento é transmitido por juntas universais para permitir a transmissão de binário em ângulos diferentes.

Em situações em que é necessário permitir o movimento entre duas peças com baixa carga e moderada velocidade de rotação, são usados casquilhos, que também são denominados por buchas. Esse método é considerado uma opção mais vantajosa do que o uso de rolamentos devido ao fator económico envolvido.

O caso a) da Figura 4.2 apresenta a montagem dos componentes dos braços principais do lado esquerdo e o caso b) da Figura 4.2 do braço principal do lado direito.

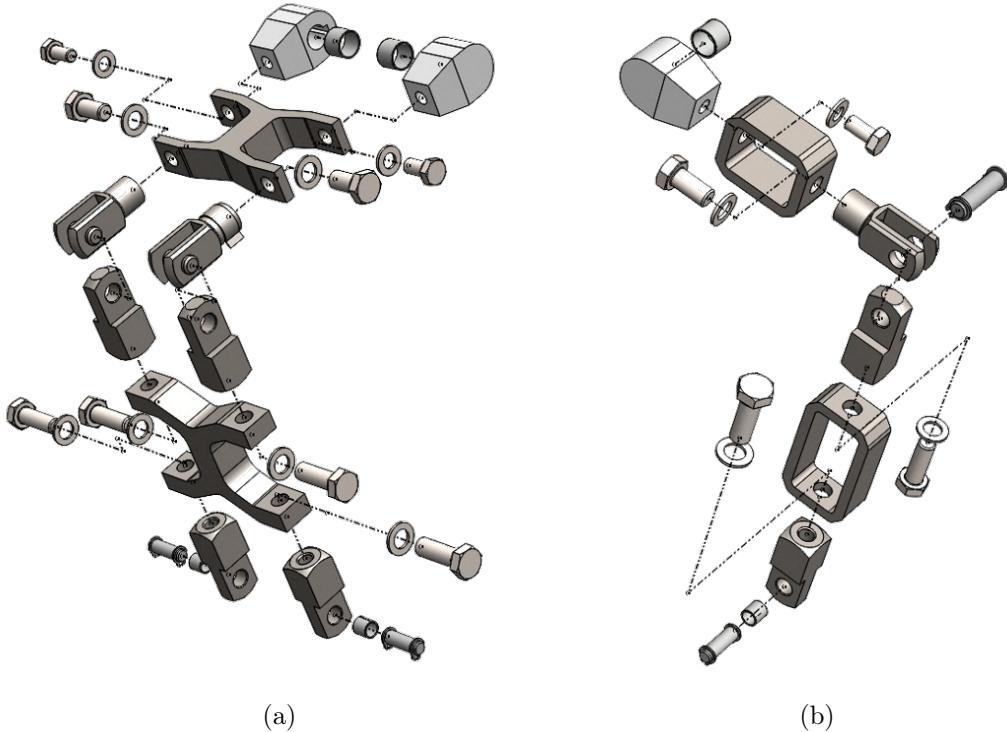


Figura 4.2: Esquema de montagem dos componentes dos braços principais: a) lado esquerdo. b) lado direito.

4.2 Sistema de Suporte para o Punção de Conformação

Dado que há forças que atuam no plano da chapa durante o processo SPIF, foi desenvolvido um sistema de suporte mecânico integrado à plataforma para abrigar o punção de conformação. Essa abordagem é benéfica porque requer menos componentes e torna a montagem mais simples.

O sistema de suporte foi concebido para lidar com as exigências do processo, garantindo um mínimo de fricção no deslizamento passivo do punção sobre a chapa e uma integração adequada com a estrutura da máquina.

A Figura 4.3 ilustra os principais componentes do sistema, que incluem um veio que conecta a plataforma ao porta-ferramentas, um rolamento para garantir a posição e suporte adequado ao veio, e uma tampa para posicionar e fornecer acesso aos componentes.

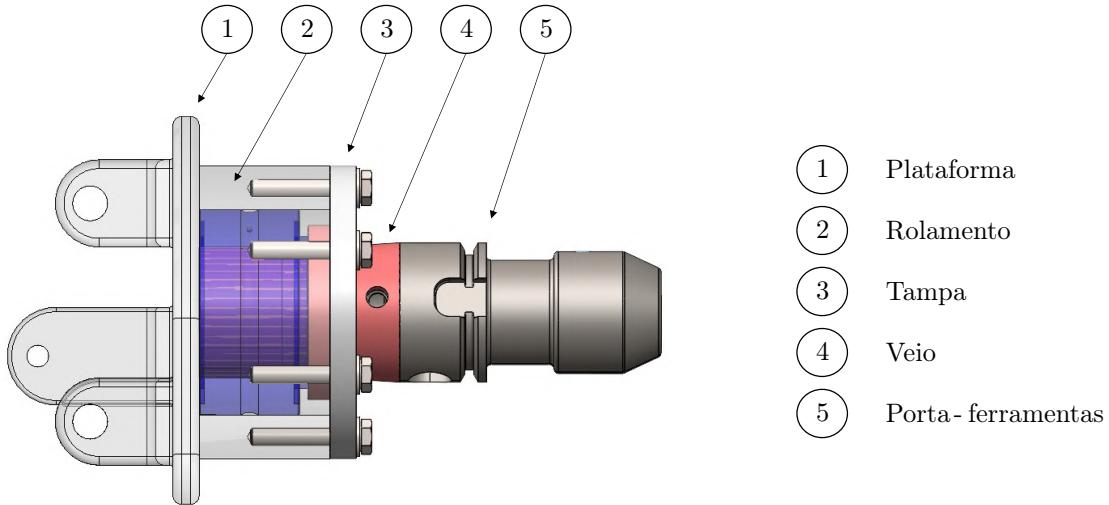


Figura 4.3: Componentes do sistema de suporte para o punção de conformação.

4.2.1 Seleção de Rolamentos

A seleção de rolamentos segue três critérios fundamentais, que incluem o posicionamento correto do veio, a minimização de deslocamentos e a resistência aos esforços do processo.

Dentre os tipos de rolamentos estudados, estão os rolamentos de rolos de agulhas, rolamentos rígidos de uma carreira de esferas e rolamentos de rolos de agulhas combinados com axial de esferas.

- Os rolamentos de rolos de agulhas são compostos por rolos longos e finos que suportam cargas radiais elevadas em espaços limitados. Possuem uma grande capacidade de carga radial, mas não suportam muita carga axial.
- Os rolamentos rígidos de uma carreira de esferas contêm uma pista de esferas e um canal profundo no anel externo e no anel interno para suportar cargas radiais e axiais leves.
- Os rolamentos de rolos de agulhas combinados com axial de esferas, têm uma combinação de rolos de agulhas e esferas para suportar cargas radiais e axiais simultaneamente. Podem suportar cargas radiais mais elevadas que os rolamentos de esferas e cargas axiais mais elevadas que os rolamentos de agulhas.

No processo de SPIF, que envolve cargas axiais e radiais, o rolamento de rolos de agulhas combinado com axial de esferas é a solução mais adequada. As principais características deste rolamento podem ser observadas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Principais características do rolamento de rolos de agulhas combinados com axial de esferas. Adaptado de SKF [39].

	Radial	Axial
C_0	39 kN	6,32 kN
C	25,5 kN	4,54 kN
P_u	4,65 kN	0,268 kN
Esforço	Flexão e compressão (guiamento e apoio)	
v_{ref}	11 000 r/min	
v_{lim}	13 000 r/min	
Massa	0,15 kg	

4.2.2 Seleção do Porta-ferramentas

O suporte de ferramenta é um elemento crítico, atuando como uma conexão passiva entre o eixo e o punção de conformação, com o objetivo de transmitir eficientemente o movimento rotativo do punção para o eixo, sem comprometer a eficiência dos elementos de conexão.

Para garantir o desempenho adequado do porta-ferramentas, é essencial considerar três pontos: concentricidade, força de fixação e padronização. A concentricidade dos eixos de rotação da plataforma e do punção deve ser mantida, enquanto a ferramenta deve ser segurada com firmeza para evitar a sua rotação ou liberação durante o trabalho, que pode representar perigos. Todos os diferentes componentes devem ser uniformes entre si [5].

Apesar de haver diversas opções de porta-ferramentas disponíveis no mercado para diversos processos tecnológicos, o processo de SPIF ainda é relativamente recente, com pouco desenvolvimento em equipamentos especializados. Sendo assim, será necessário escolher um porta-ferramentas já existente para outro processo tecnológico e adequá-lo às necessidades específicas do processo de SPIF.

Um porta-ferramentas é composto por três elementos principais, como se pode observar na Figura 4.4: o cone, a flange e o sistema de fixação da ferramenta.

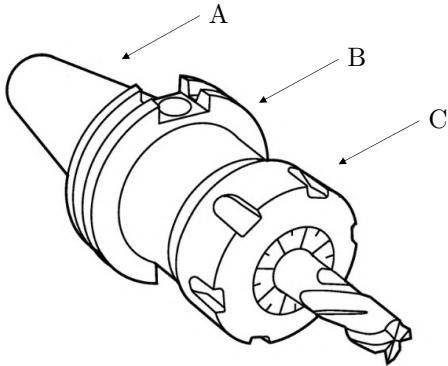


Figura 4.4: Arquitetura de um porta-ferramentas: A — cone, B — flange, C — sistema de fixação. Adaptado de Instructables [40].

Cone

A interface entre a plataforma e o porta-ferramentas é formada por um cone que pode ser de diferentes tipos.

O cone (CAT, ISO, DIN) representa o tipo mais prevalente e versátil empregado na indústria. O alojamento é simples e não requer muitos requisitos, tornando ideal para protótipos e máquinas com troca manual de ferramentas.

Por outro lado, o cone HSK (*Hohlfutter Schaft Konus*) com haste oca é caracterizado por uma superfície plana de contacto cone/furo. É especialmente indicado para máquinas de alta velocidade devido ao elevado balanceamento que alcança, além de possuir elevada rigidez estática e dinâmica. A sua fixação centralizada permite cargas de flexão até duas vezes superiores aos porta-ferramentas cónicos comuns.

Já o cone flutuante é indicado para operações de roscagem e alargamento, devido ao complexo equilíbrio de movimento de rotação e axial que se desenvolve durante a geração de rosca. No entanto, não é recomendado para processos que envolvam flutuações radiais, pois não oferece resistência à flexão [5].

Flange

A flange é uma superfície plana e circular localizada na extremidade inferior do suporte de ferramenta, utilizada para apoiar a base da ferramenta a ser fixada. A flange é geralmente fixada no cone do porta-ferramentas por meio de parafusos ou por um sistema de travamento mecânico. Além de ser um ponto de apoio para a ferramenta, também é responsável por transmitir as forças de corte e o binário gerados durante o processo de conformação da peça para a máquina-ferramenta.

Sistema de Fixação

Há quatro categorias de sistemas de fixação empregados para assegurar a fixação da ferramenta no porta-ferramentas. O primeiro tipo é o mandril de pinças, que usa uma bucha metálica para prender a ferramenta, sendo travado com uma porca. O segundo tipo é o mandril hidráulico, que usa um reservatório de óleo para equilibrar a pressão

de fixação. O terceiro tipo é o mandril de contração ou aperto térmico, que utiliza um aquecedor para dilatar o furo no qual a ferramenta é inserida e depois arrefece para prender a ferramenta com firmeza. O quarto tipo é o mandril *Weldon* que usa um parafuso radial para prender a ferramenta, requerendo uma área plana na haste [5].

Porta-ferramentas Selecionado

De modo a atender adequadamente às demandas do processo SPIF, a alternativa mais indicada consiste em empregar um suporte de ferramenta com formato cônico HSK em conjunto com um mandril *Weldon*. Dado que este conjunto apresenta elevada rigidez no aperto e é de manuseio simplificado, inclusive por parte de operadores que não possuem especialização específica. A Figura 4.5 apresenta um exemplo deste tipo de porta-ferramenta.



Figura 4.5: Porta-ferramentas selecionado: cone HSK com um mandril *Weldon*. Adaptado de Sanches Blanes [41].

4.3 Seleção e Dimensionamento do Conjunto Motor — Redutor

Conforme mencionado na Secção 3.2, o binário máximo necessário é de 665 Nm. Sendo assim, é crucial dimensionar e selecionar adequadamente tanto o motor quanto o redutor. Esta seleção é indispensável para assegurar o desempenho e a eficiência do sistema, bem como a segurança do ambiente de operação.

4.3.1 Seleção do Motor

No processo SPIF, é necessário que os motores empregados possuam a capacidade necessária para assegurar a conformidade total das peças, sem a perda de passos. Isso implica que os motores devem ter o poder de executar todos os comandos enviados pelo controlador, mesmo que o binário aumente. Para atender a esse requisito, é recomendado o uso de um motor em malha fechada, o qual possui um componente chamado *encoder*, que está acoplado ao eixo. O *encoder* envia um sinal de resposta ao controlador indicando o deslocamento real do eixo. Dessa forma, o controlador pode monitorizar de forma contínua se o motor está posicionado corretamente, e tomar medidas caso ocorra uma alteração [42].

Com base nesta premissa, o autor Jorge Fernandes [42] realizou um estudo sobre diversos tipos de motores visando aplicá-los no processo SPIF, a saber, servo motores,

motores sem escovas de corrente contínua e motores de passo. Dado que é necessário trabalhar com baixas velocidades e altos binários, concluiu-se que os motores de passo apresentam a melhor relação entre custo e benefício.

Existem soluções no mercado no qual os motores de passo são conectados a um *encoder* e a resposta do *encoder* é enviada para o controlador ou para o *driver*. Quando o *encoder* está conectado ao *driver*, um circuito integrado processa os sinais vindos do *encoder*, reduzindo a quantidade de informação que o controlador precisa processar e aumentando o seu desempenho. O autor Jorge Fernandes [42] enfatizou a necessidade de procurar motores de passo que operem em malha fechada e que forneçam binário suficiente para atender às forças e momentos estimados no processo SPIF.

Após uma análise criteriosa de diversas opções, o motor escolhido para o projeto em questão foi o NEMA 34 [42]. Este motor apresenta um excelente desempenho em termos de binário e precisão, além de possuir um tamanho compatível com as necessidades do projeto. As principais características deste motor são apresentadas na Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Principais características do motor NEMA 34.

Número de fases	2
Torque de retenção	12 Nm
Corrente nominal/fase	6,0 A
Resistência de fase	0,72 ohms
Indutância	7,3 mH \pm 20% (1 KHz)
Tamanho da moldura	86 \times 86 mm
Comprimento do corpo	150,6 mm
Diâmetro do eixo	\emptyset 14 mm
Comprimento do eixo	37 mm
Comprimento de chaveta	25 mm
Número de ligações	4
Comprimento do cabo	270 mm

4.3.2 Redutor: Análise Comparativa

Considerando um binário máximo de 665 Nm (Secção 3.2), o motor escolhido para o sistema apresenta um torque de 12 Nm, sendo necessário o uso de um redutor com uma relação de transmissão teórica de 56:1.

Para este propósito, foram avaliados redutores planetários, nomeadamente de engrenagens retas e de engrenagens helicoidais e redutores de rosca sem-fim de precisão.

As engrenagens retas são frequentemente usadas em redutores planetários de precisão, devido à sua elevada eficiência e facilidade de fabricação. Além disso, essas engrenagens a capacidade de transmitir grandes cargas de torque, e também de suportar cargas de choque elevadas [43].

Já as engrenagens helicoidais são conhecidas pelo seu poder de reduzir o ruído e a vibração em sistemas mecânicos. Além disso, as engrenagens helicoidais conseguem transmitir cargas de binário elevadas e oferecem uma alta eficiência. Contudo, essas engrenagens são mais complexas de serem fabricadas do que as engrenagens retas, aumentando os custos de produção [43, 44].

Por fim, os redutores de rosca sem-fim são frequentemente usados em aplicações que requerem altas relações de redução. Esses redutores são capazes de transmitir cargas de torque muito altas e são extremamente silenciosos. No entanto, os redutores de rosca sem-fim de precisão apresentam uma eficiência relativamente baixa em relação às com as engrenagens retas e helicoidais, o que pode ser uma desvantagem em aplicações que requerem alta eficiência [43, 44].

Dada a necessidade de aplicação de uma força significativa no processo SPIF, a seleção de um redutor de baixa eficiência, como os redutores de rosca sem-fim, pode originar uma redução significativa na eficiência da transmissão de torque. Consequentemente, isso pode causar problemas como a perda de potência, o aumento do consumo de energia e o superaquecimento do sistema. Além disso, os redutores de rosca sem-fim tendem a gerar mais calor devido ao atrito do parafuso sem-fim com a engrenagem de rosca, o que pode resultar em problemas de lubrificação e desgaste prematuro das engrenagens, aumentando, assim, os custos de manutenção e reduzindo a vida útil do redutor [43].

Com base nos fundamentos apresentados, excluiu-se a possibilidade de utilizar redutores de rosca sem-fim, concentrando-se na análise dos redutores de engrenagens retas e helicoidais.

4.3.3 Estudo da Configuração Motor — Redutor

Ao longo de todo o processo de desenvolvimento da máquina, foi primordial considerar a exigência de compatibilidade, resultando num estudo para selecionar a configuração do motor — redutor.

A primeira abordagem, apresentada na Figura 4.6, é posicionar o motor verticalmente e utilizar um redutor de 90 graus. Esta configuração oferece a vantagem de não necessitar de um sistema de transmissão entre o veio do redutor e os braços, resultando em maior eficiência e economia. No entanto, essa configuração não é favorável, pois requer uma adaptação da zona de acesso à mesa de trabalho.

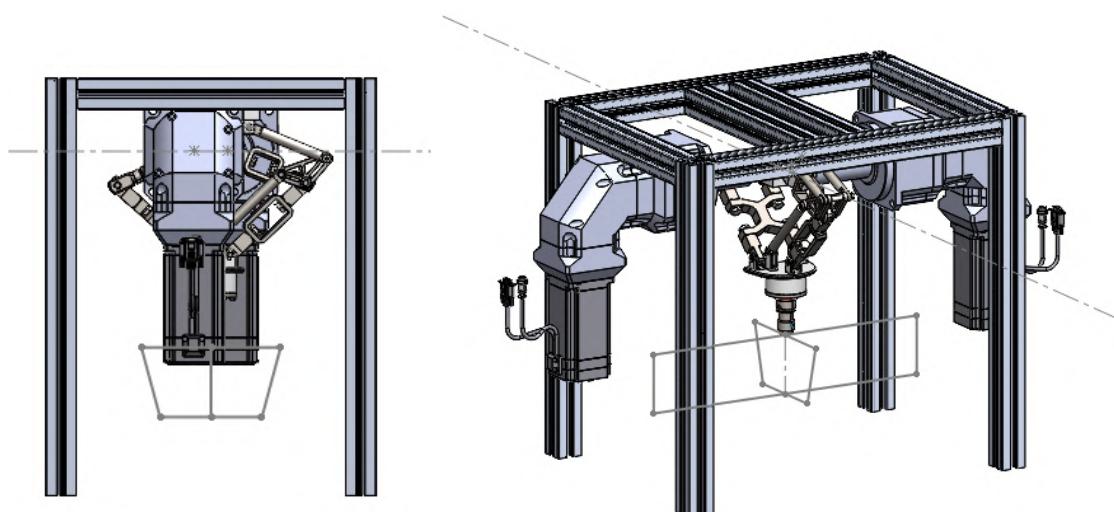


Figura 4.6: Hipótese 1 configuração motor — redutor: motor na vertical com redutor helicoidal de 90 graus.

A segunda hipótese, representada na Figura 4.7, posiciona o motor horizontalmente no topo da estrutura e utiliza um redutor linear. Esta configuração é compacta e não tem a desvantagem da configuração anterior. Contudo, esta configuração requer um sistema de transmissão, resultando em maior custo e menor eficiência.

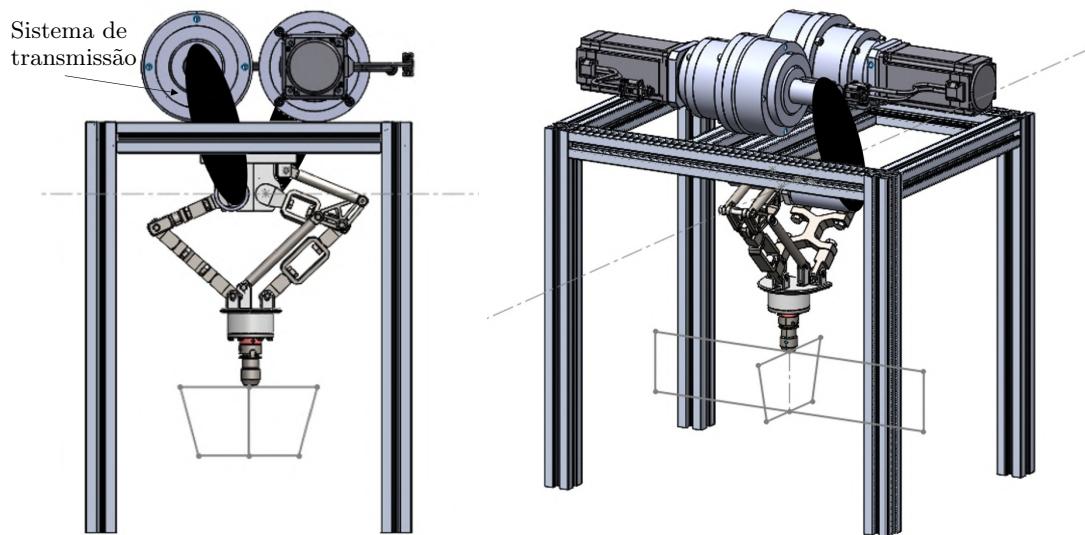


Figura 4.7: Hipótese 2 configuração motor — redutor: motor na horizontal no topo da estrutura com redutor linear.

A terceira hipótese analisada, apresentada na Figura 4.8, posiciona o motor horizontalmente e usa um redutor de 90 graus. O sistema é compacto apesar de o motor não estar completamente envolvido pela estrutura, não interfere com o plano acesso à mesa de trabalho e não requer um sistema de transmissão, superando as desvantagens das configurações anteriores.

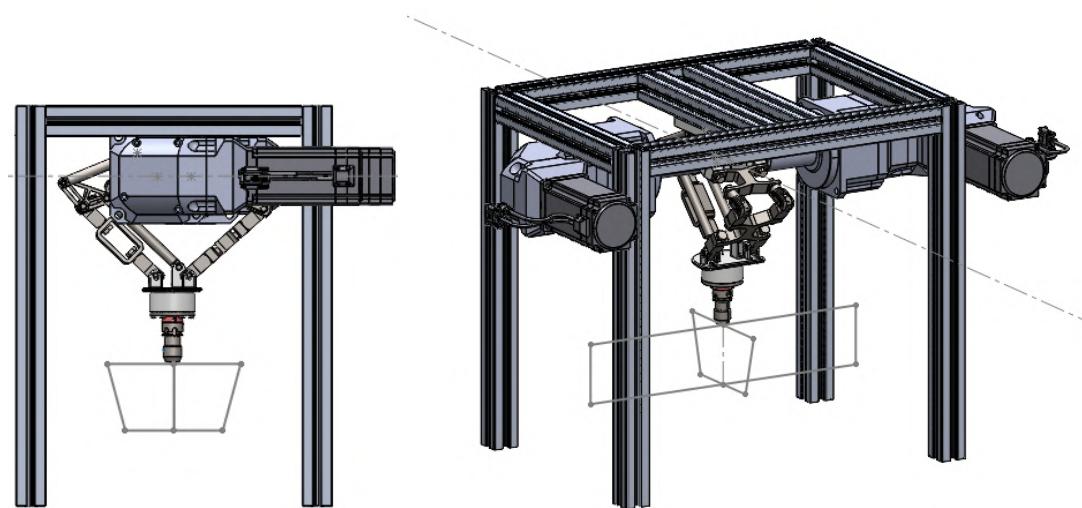


Figura 4.8: Hipótese 3 configuração motor — redutor: motor na horizontal com redutor helicoidal de 90 graus.

Outra configuração estudada, apresentada na Figura 4.9, posiciona o motor na horizontal e utiliza um redutor linear. Esta configuração apresenta as mesmas vantagens da hipótese 3.

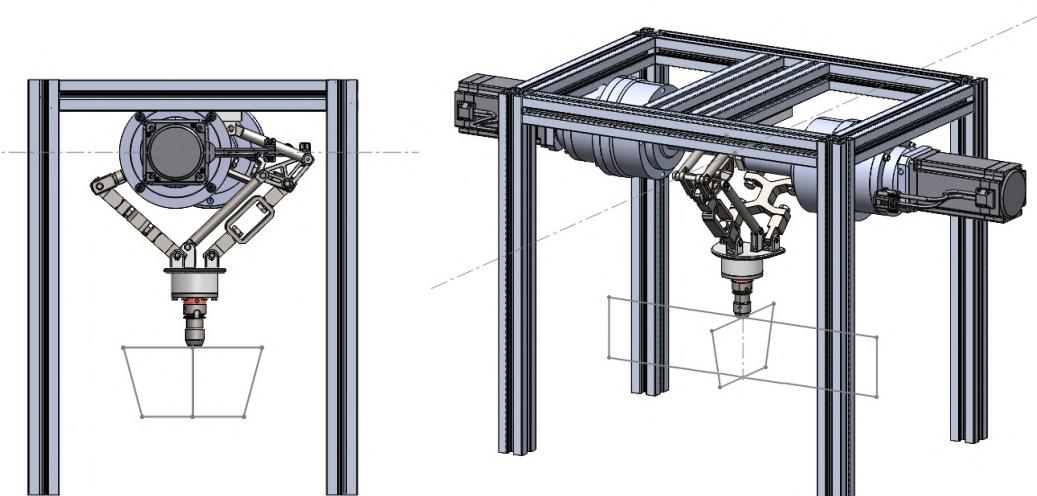


Figura 4.9: Hipótese 4 configuração motor — redutor: motor na horizontal com redutor linear.

Em suma, as hipóteses 3 e 4, Figura 4.8 e Figura 4.9, respectivamente, são quase equivalentes, sendo a diferença entre elas, possivelmente, o preço de aquisição do redutor.

4.3.4 Seleção do Redutor

Inicialmente, com base no valor teórico do binário de 665 Nm, que corresponde a uma redução de 56:1, foram examinadas alternativas existentes no mercado em diversos fornecedores. Após uma análise atenta, constatou-se a dificuldade com redutores de engrenagens retos atingir um valor de binário tão elevado.

Consoante a premissa de redução de binário, foram encontrados três redutores helicoidais, do qual se identificou uma relação de redução de 60:1 com um binário de 600 Nm. Apesar de ser inferior ao valor teórico, este binário representa o binário nominal, o que indica que o binário máximo alcançado pelo redutor é superior, nomeadamente até três vezes superior ao binário nominal. Dois dos três redutores são redutores helicoidais de 90 graus, enquanto o outro é um redutor helicoidal linear. A Tabela 4.3 apresenta as principais características dos redutores analisados. Os redutores helicoidais de 90 graus têm uma maior capacidade de suportar cargas radiais, enquanto os redutores helicoidais lineares são mais compactos e têm um desempenho melhor em aplicações de alta precisão.

Tabela 4.3: Características dos redutores em análise.

	ABR142 [45]	AER155 [46]	AE155 [47]
Tipo	90 graus	90 graus	linear
Velocidade de entrada nominal	rpm	3000	3000
Carga radial nominal	N	9400	8460
Carga axial nominal	N	4700	4700
Rendimento	%	≥ 92	≥ 92
Peso	Kg	27,5	21,8
Comprimento	mm	365	324,5
Preço	€	3.805,00	2.237,00

Após uma análise comparativa dos redutores, optou-se pelo redutor helicoidal linear AE155. Embora os redutores helicoidais de 90 graus possuam vantagens significativas, o redutor linear atende melhor aos requisitos específicos da aplicação, incluindo o espaço limitado disponível, a necessidade de alta precisão e menor custo. Além disso, a relação de redução de 60:1 com um binário nominal de 600 Nm é adequada para a aplicação em questão. Sendo assim, a seleção do redutor linear AE155 foi a escolha mais adequada.

4.4 Seleção e Dimensionamento do Conjunto Motor — Atuador Linear

Enquanto o conjunto motor-redutor é responsável por garantir o movimento do eixo y e z da máquina, o conjunto motor-atuador linear é responsável pelo eixo x. De modo a padronizar os componentes, adotou-se um processo semelhante ao descrito na Secção 4.3.1 para selecionar o motor, resultando na escolha do mesmo motor.

4.4.1 Seleção do Atuador Linear

Para selecionar sistemas de controlo de movimento linear, é necessário considerar requisitos como força, velocidade, distância percorrida, precisão, repetibilidade e vida útil. Dentre os tipos de acionamentos para controlo de movimento, destacam-se os acionamentos por esferas (*ball-screw*), acionamentos por fuso de avanço (*lead-screw*) e acionamentos por correias (*belt*) [48, 49].

Os acionamentos por esferas são adequados para aplicações que requerem alta precisão, como em máquinas CNC e robótica. Os rolamentos de esferas recirculantes são usados para converter o movimento rotativo em movimento linear, resultando em alta eficiência, precisão e repetibilidade. No entanto, o seu custo é, geralmente, maior e requer manutenção regular [49].

Os acionamentos por fuso de avanço são adequados para aplicações que não requerem grande precisão, como em sistemas de posicionamento simples ou para ajustes manuais. O eixo rosqueado e a porca são usados para mover a carga, resultando num custo relativamente baixo e baixa necessidade de manutenção [49].

Os acionamentos por correias são amplamente utilizados em aplicações que requerem alta velocidade, por conseguinte podem operar em velocidades muito maiores do que os acionamentos por fuso. A correia é flexível e transfere energia entre o motor e a carga, resultando num custo relativamente baixo e facilidade de manutenção. Contudo, eles não são tão precisos quanto os de acionamentos por esferas [49].

Dessa forma, vários sistemas de acionamento por esferas e correias foram analisados. A Tabela 4.4 apresenta as características de três atuadores lineares, um de esfera e dois de correia, que atendem aos requisitos do projeto.

Tabela 4.4: Características dos atuadores lineares em análise.

		MTJ40 ECO L	MTV40 1205	TLM105G
Tipo de acionamento		correia	esferas	correia
Comprimento do carro	mm	200 Mx = 158	150 Mx = 28	300 Mx = 76
Momento dinâmico	Nm	My = 660 Mz = 660	My = 260 Mz = 260	My = 296 Mz = 296
Força máxima	N	Fpy = 6540 Fpz = 10190 Mx = 60	Fpy = 2300 Fpz = 3860 Mx = 23	Fpy = 6355 Fpz = 6355 Mx = 168
Momento máximo	Nm	My = 341 Mz = 219	My = 210 Mz = 130	My = 679 Mz = 679
Força axial máxima	N	262	3400	3451
Velocidade máxima	m/s	3	0,49	3
Preço	€	740,00	1156,41	1500,00

As características do atuador linear MTJ40 ECO L podem ser encontradas em [50], do MTV40 1205 em [51] e do TLM105G no Apêndice B.

Qualquer uma das três opções analisadas consegue atender aos requisitos do projeto. Ao utilizar um atuador linear com acionamento por esferas, obtém-se uma precisão

superior relativamente aos atuadores por correia, o que é um aspeto importante no processo SPIF. No entanto, devido a questões económicas, optou-se inicialmente pelo modelo MTJ40 ECO L. No futuro, é recomendável realizar uma segunda avaliação considerando o orçamento disponível para o projeto, de modo a verificar se o atuador MTJ40 ECO L continua a ser a opção mais adequada.

4.4.2 Ligação Motor — Atuador Linear

O movimento da mesa de trabalho é garantido por dois atuadores lineares, a este tipo de configuração é usualmente conhecida como 2x, Figura 4.10.

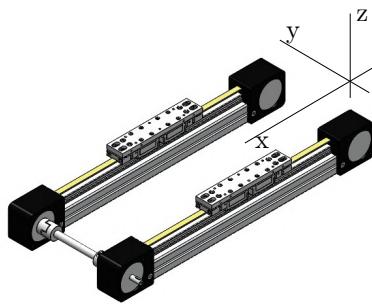


Figura 4.10: Configuração dos dois atuadores lineares: 2x.

De forma a tornar o sistema compacto, optou-se por colocar o motor perpendicular ao eixo dos atuadores lineares. O sistema de transmissão entre o veio do motor e o veio do atuador linear é feito por duas polias e uma correia e a transmissão entre os dois atuadores lineares por um eixo de sincronização do tipo OSL, Figura 4.11.

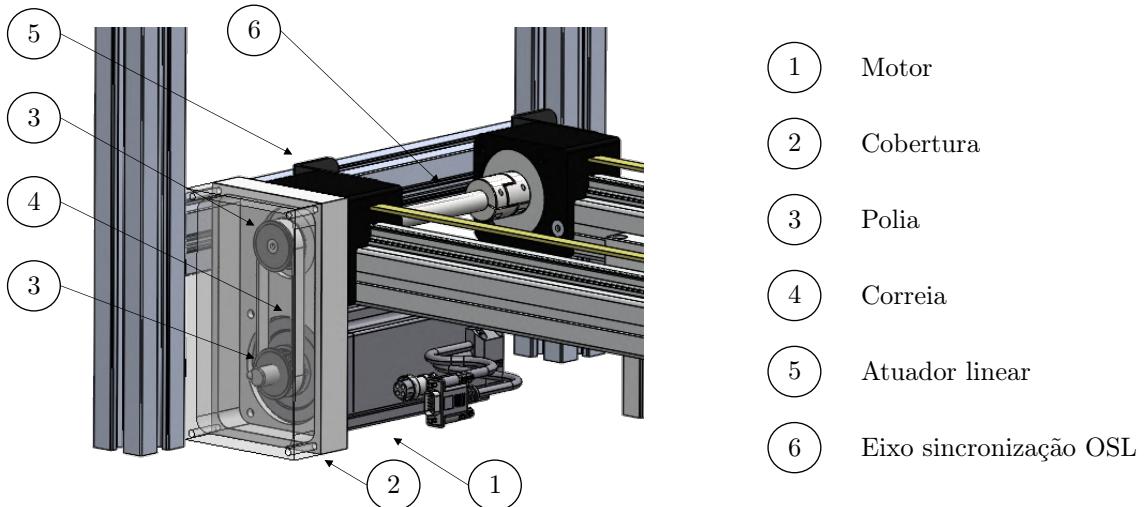


Figura 4.11: Componentes do sistema de transmissão entre o veio do motor e o veio do atuador linear e entre os dois veios dos atuadores lineares.

4.5 Configuração Estrutural

A configuração estrutural de uma máquina é um elemento crucial para o seu desempenho e durabilidade. É necessário considerar a resistência e a estabilidade da estrutura para garantir que a máquina seja capaz de suportar as cargas e vibrações a que está sujeita durante a operação.

Os perfis de alumínio 45×45 mm representam uma excelente relação entre peso e resistência, sendo, portanto, uma escolha ideal para tais aplicações. Esses perfis apresentam uma secção quadrada transversal de 45 mm e são fabricados numa liga de alumínio altamente resistente.

Com dimensões exteriores de $640 \times 475 \times 600$ mm, conforme mostrado na Figura 4.12, a estrutura precisa acomodar a área de trabalho e os braços. Para proporcionar apoio e reforço adicional, foram adicionados perfis diagonais, visto que a máquina estará sujeita a elevadas cargas e vibrações durante o processo. Esta informação é ilustrada na Figura 4.13.

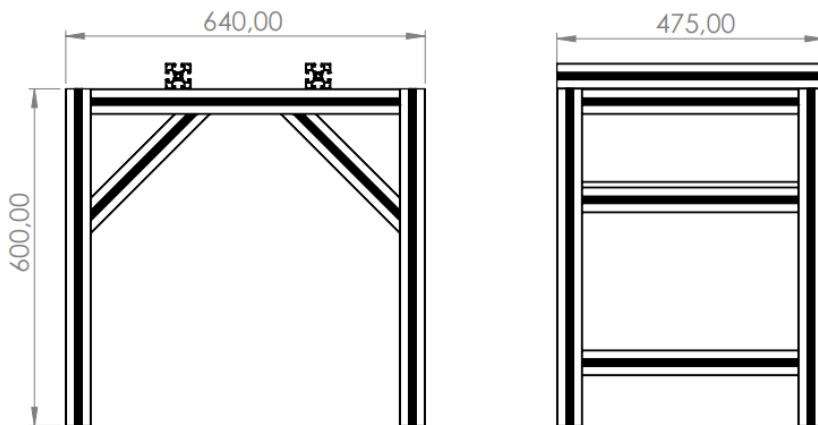


Figura 4.12: Dimensões exteriores da estrutura.



Figura 4.13: Estrutura projetada.

4.6 Simulações

A utilização da simulação de componentes e da estrutura possibilita a verificação da viabilidade e desempenho de projetos virtuais, resultando em economia de tempo e recursos no processo de produção. O *software* SOLIDWORKS oferece a possibilidade de realizar simulações estáticas e dinâmicas (com análise de movimento), úteis em diferentes situações do projeto.

A simulação estática é usada para analisar o comportamento de modelos estáticos. Útil para analisar a resistência estrutural de peças e montagens, bem como na observação de tensões e deformações em condições estáticas [52].

A simulação com análise de movimento, por sua vez, é usada para analisar o comportamento de um modelo em movimento, considerando as forças e restrições que afetam o movimento de peças e montagens. Ajuda a avaliar a dinâmica de sistemas mecânicos, identificar interferências e otimizar o desempenho de projetos que envolvam movimento. A vantagem da análise de movimento relativamente à simulação estática é que fornece recursos como análise cinemática e dinâmica, cálculos de força e do momento torsor, e deteção de colisão. Esses recursos podem ser utilizados para simular os efeitos do movimento, incluindo a influência da gravidade, o atrito e outros fenômenos físicos sobre as peças e montagens [52, 53].

A simulação com análise de movimento permite identificar potenciais problemas nos projetos e fazer as alterações necessárias antes de criar protótipos físicos. Em geral, as simulações com o SOLIDWORKS, incluindo a análise estática e a análise de movimento, são uma ferramenta poderosa para otimizar os projetos e melhorar o desempenho dos produtos.

4.6.1 Simulação com Análise de Movimento

As simulações realizadas consideraram as forças atuantes na ponta da ferramenta e assumiram a suposição de que essas forças são aplicadas equitativamente, sendo 3 kN na vertical (eixo z) e 1 kN em ambos os eixos na horizontal (eixo x e eixo y). Além disso, levou-se em conta que as peças são feitas de aço EN10083:C45, o qual é um tipo de aço de construção de médio carbono.

Durante a simulação, o porta-ferramentas e consequentemente os braços da máquina são movimentados para os locais críticos da área de trabalho, que correspondem aos quatro cantos do trapézio, segundo a sequência apresentada na Figura 4.14 por meio da rotação proporcionada pelos motores. Esses pontos críticos foram verificados ao definir a arquitetura da máquina.

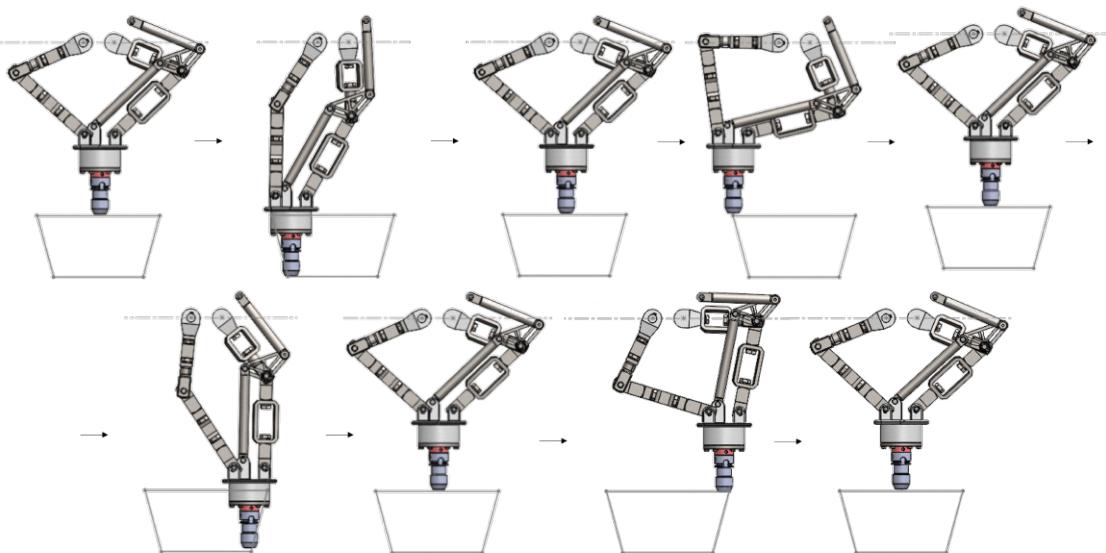


Figura 4.14: Sequência da trajetória simulada do robô durante a passagem pelos pontos críticos.

Realizou-se um estudo da reação da força ao longo do tempo de simulação do movimento nas peças e nas ligações entre as peças potencialmente críticas. Este estudo computacionalmente é rápido e permite a obtenção de um gráfico com a curva da força de reação ao longo do tempo de simulação do movimento, possibilitando uma boa primeira análise dos esforços críticos. Após identificar o ponto crítico no plano de trabalho (pico da curva), é possível simular o componente durante um intervalo de 0,2 segundos, composto por 0,1 segundos antes e 0,1 segundos depois do ponto em questão. Optou-se por um curto período para a simulação, de modo a evitar um aumento significativo do tempo de processamento.

O objetivo principal desta simulação é avaliar a capacidade de suporte dos componentes frente às tensões e forças a que serão submetidos em operação e assegurar que todos os componentes de ligação possuam um fator de segurança mínimo de 1,5, com o intuito de evitar qualquer risco de falha ou acidente. Para isso, foram selecionados quatro componentes principais: garfo com pino, acoplador universal, barra de paralelismo maior e plataforma. Tais componentes foram considerados críticos devido à sua importância para

o funcionamento adequado da máquina e/ou à sua exposição a maiores tensões e forças. As simulações realizadas permitiram a avaliação dos resultados e análise da viabilidade de cada componente em relação às suas especificidades e necessidades.

Componente — Garfo com Pino

A peça denominada garfo com pino é adquirida na sua forma final de aquisição, sendo que a principal preocupação é assegurar que a força ou tensão a que esta peça é submetida não exceda as especificações fornecidas pelo fabricante. É importante salientar que o componente em questão apresenta níveis diferentes de tensão em cada lado do robô, devido à assimetria presente no dispositivo. Dessa forma, para assegurar o funcionamento adequado do robô, é crucial examinar os dois casos. A Figura 4.15 apresenta a variação temporal da força exercida e a posição em que esta é máxima.

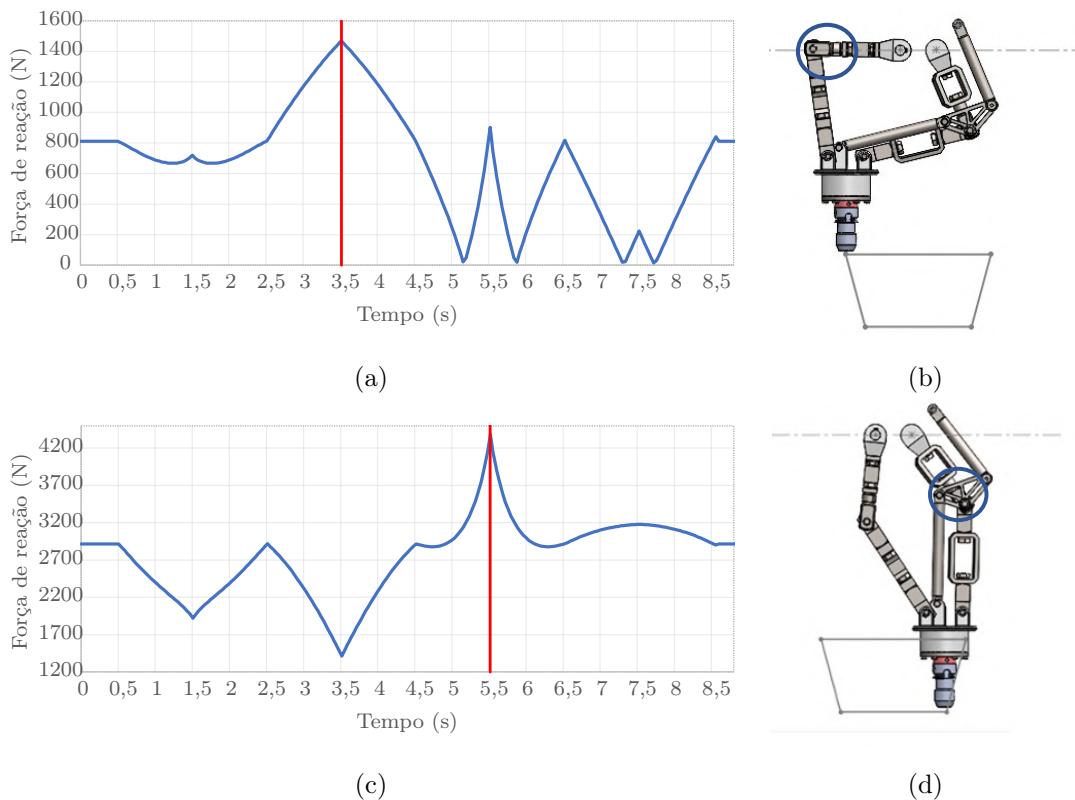


Figura 4.15: Gráfico da força de reação ao longo do tempo no componente garfo com pino: a) do lado esquerdo, c) do lado direito e posição do robô no respetivo ponto crítico: b) canto superior direito, d) canto inferior esquerdo.

A partir da análise do gráfico, é possível observar que a magnitude da força de reação é menor no lado esquerdo em comparação ao lado direito, o que é justificável pelo fato de que o lado esquerdo possuir dois braços principais, enquanto o lado direito possui apenas um. Em virtude da reação da força ser mais elevada no lado esquerdo, procedeu-se à realização de uma simulação na posição crítica, durante o intervalo de tempo 5,4 a 5,6 segundos, cujos resultados são apresentados na Figura 4.16.

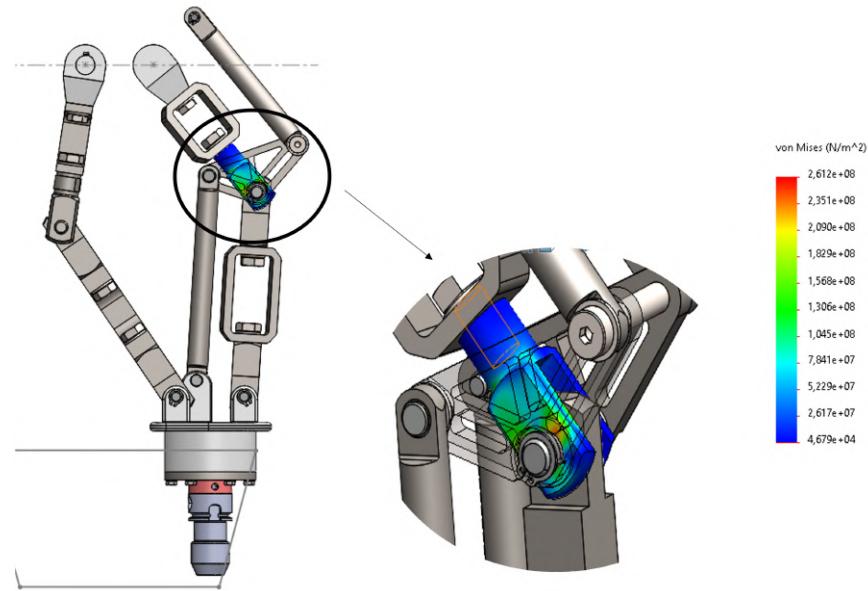


Figura 4.16: Simulação do componente garfo com pino do lado direito na posição crítica.

Dado que o material usado para a simulação é um aço de construção *AISI 1045*, submetido a processo de tração a frio, cuja tensão de cedência é de 530 MPa, [54], pode-se inferir que o fator de segurança adotado foi de 2. Este valor atende ao requisito mínimo do projeto de um fator de segurança de 1,5, garantindo uma margem de segurança adequada para a aplicação em questão.

Componente — Acoplador Universal

O componente acoplador universal é adquirido pronto e, assim como o componente anterior, é crucial examinar tanto o componente localizado no lado direito do robô quanto o do lado esquerdo para assegurar o seu funcionamento adequado. A Figura 4.17 apresenta gráficos que ilustram a força de reação ao longo do tempo e a posição do robô nos respectivos pontos críticos.

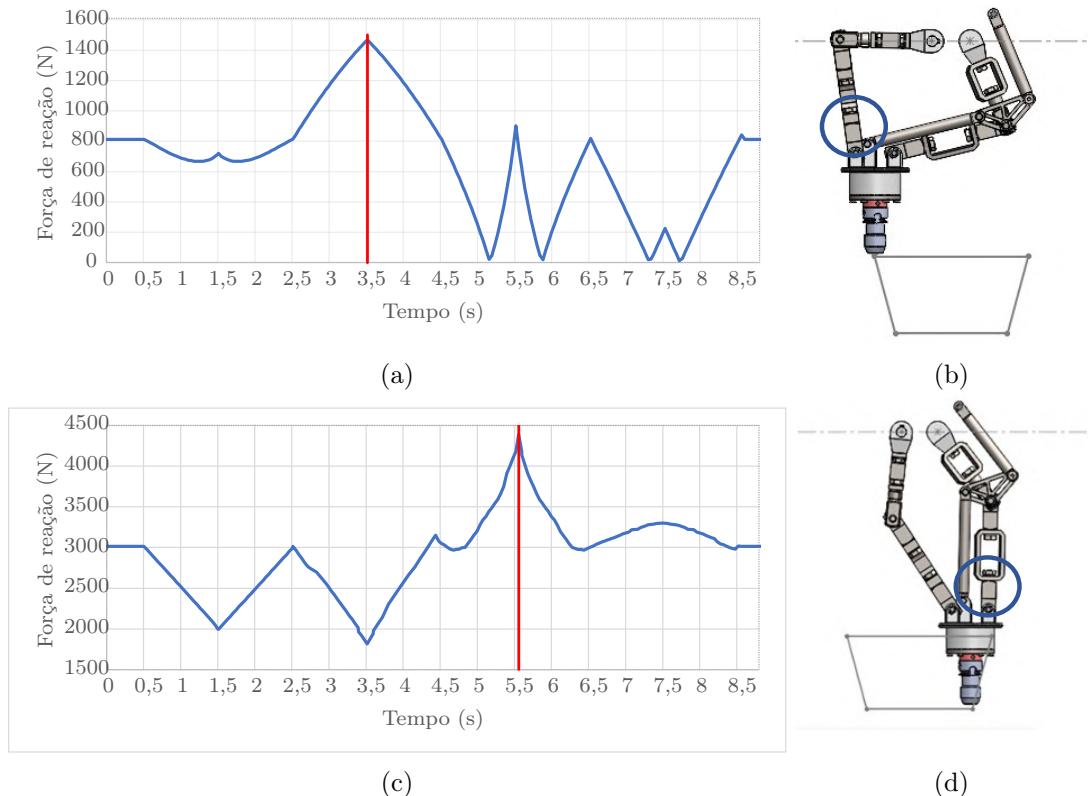


Figura 4.17: Gráfico da força de reação ao longo do tempo no componente acoplador universal: a) do lado esquerdo, c) do lado direito e posição do robô no respetivo ponto crítico: b) canto superior direito, d) canto inferior esquerdo.

Ao analisar os gráficos, é possível notar uma semelhança significativa entre os gráficos do componente atual e do componente anterior (garfo com pino). Essa semelhança é consequência da simplificação realizada durante a simulação, na qual todas as partes fixas foram consideradas um corpo rígido. Como resultado, pode-se concluir que o componente possui capacidade adequada para suportar os esforços gerados pela máquina.

Componente — Barra de Paralelismo Maior

Um elemento adicional de suma importância para o projeto em questão são as barras de paralelismo de maiores dimensões, as quais serão fabricadas internamente. Para assegurar que o material produzido seja adequado para tal aplicação, é crucial conhecer a tensão máxima que será suportada. A análise da reação da força no ponto de conexão com a plataforma ao longo do tempo é apresentada na Figura 4.18.

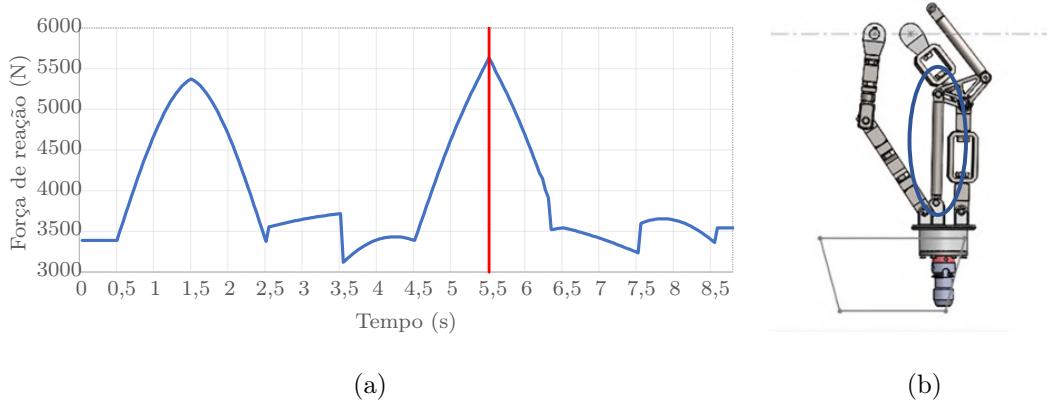


Figura 4.18: Componente barra de paralelismo maior: a) gráfico da força de reação ao longo do tempo, b) posição do robô no respetivo ponto crítico, canto inferior esquerdo.

Ao analisar o gráfico, é possível notar que o valor máximo da força de reação é de 5630 N. Considerando que a barra em questão possui formato circular e um diâmetro de 15 mm, é possível aplicar a Equação 4.1 para determinar a tensão máxima.

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{F}{\pi \times r^2} \quad (4.1)$$

A partir desta análise, conclui-se que a peça pode ser produzida em alumínio, uma vez que este material consegue suportar uma tensão de 33 MPa, ao mesmo tempo, em que é mantém o fator de segurança de 1,5.

Componente — Plataforma

Outra peça a ser produzida é a plataforma. Esta peça é crucial para o funcionamento da máquina. Os pontos potencialmente críticos localizam-se nas ligações com outros componentes. Então a força de reação nesses locais será igual ao já visto para os componentes acoplador universal e para a barra de paralelismo de maiores dimensões. Posto isto, fez-se uma simulação durante o intervalo de tempo 5,4 a 5,6 segundos, cujos resultados são apresentados na Figura 4.19.

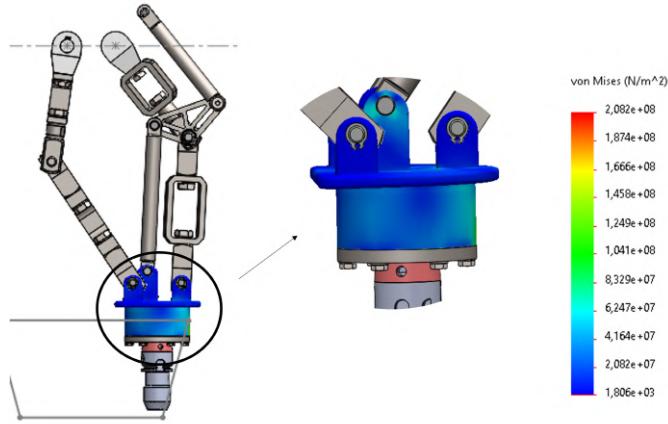


Figura 4.19: Simulação do componente plataforma na posição crítica.

Como esperado, o fator de segurança deste componente é superior a 1,5, garantindo uma margem de segurança adequada para a aplicação em questão.

4.6.2 Simulação Estática

Foi adotada uma análise estática da estrutura em vez de uma simulação com análise de movimento, uma vez que a estrutura apresenta um comportamento predominantemente estático. A análise realizada foi linear, por ser mais simples e rápida do que a análise não linear. A simulação não linear é justificada quando ocorrem grandes deslocamentos, mudanças na rigidez do modelo, curvas de tensão-deformação não lineares e influência na ordem de aplicação de cargas. Contudo, para este projeto, no qual se busca manter o material em regime de elasticidade e deslocamentos pequenos, os resultados da análise linear são aceitáveis.

Para o pré-processamento, foram definidas as condições de fronteira, carregamentos e simplificações. As condições de fronteira incluem encastramento nos pés. Os carregamentos consideraram uma força de 3 kN na vertical e 1 kN em ambos os eixos horizontais na zona de suporte dos braços e as cargas do redutor-motor na zona de suporte do redutor. As simplificações incluem a eliminação de furos desnecessários para a simulação.

Na Figura 4.20, pode-se visualizar os resultados da simulação estática, que demonstram as variações de tensão e deformação.

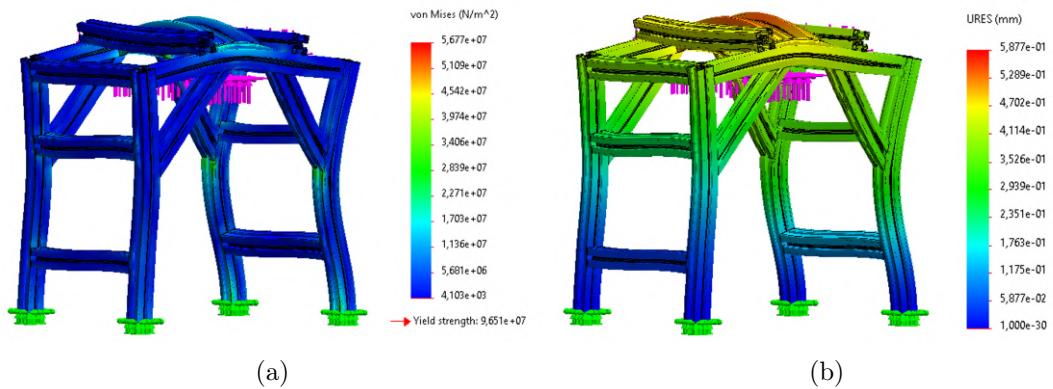


Figura 4.20: Resultados da simulação estática da estrutura: (a) tensão, (b) deslocamento.

Através da simulação, Figura 4.20, observa-se que a maioria das tensões ocorre na zona de ligação entre o perfil vertical e o perfil diagonal de reforço. Os maiores deslocamentos ocorrem ao longo dos perfis superiores de suporte dos braços, atingindo uma amplitude de 0,59 mm. O fator de segurança é adequado ao projeto, sendo o ponto crítico superior a 1,5.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

Capítulo 5

Projeto de Automação

Para criar uma máquina capaz de realizar estampagem incremental por ponto único, é indispensável que ela esteja equipada com recursos para operação em dois modos distintos: manual e automático. No modo manual, o operador deve inserir manualmente as coordenadas do ponto, enquanto no modo automático, o processo de estampagem é controlado por um programa em código-G. A capacidade de operar em ambos os modos é crucial para assegurar a flexibilidade e a eficiência do processo de estampagem e, consequentemente, para o sucesso do projeto.

Com o intuito de atingir esse objetivo, o projeto consiste na elaboração de uma interface em MATLAB que permitirá que o utilizador transmita as informações necessárias para a máquina realizar a estampagem. As informações serão encaminhadas para um controlador que, por sua vez, gerenciará os motores que controlam o deslocamento da ferramenta de conformação.

A fim de assegurar a segurança do operador e do processo de estampagem, a máquina será equipada com componentes de segurança, como barreiras de segurança de cortina, também designadas por barreiras imaterial. Além disso, serão tomadas medidas para assegurar que a máquina cumpra as normas de segurança aplicáveis, incluindo a proteção dos componentes elétricos e mecânicos. A adoção dessas medidas de segurança é indispensável para diminuir os riscos de acidentes ou danos relacionados ao processo de estampagem, assegurando um ambiente de trabalho seguro e produtivo.

5.1 Esquema Elétrico e Principais Componentes

Durante a elaboração do quadro elétrico destinado ao funcionamento e controlo da máquina, é contemplada a inclusão de todos os componentes elétricos e eletrónicos relacionados a essa finalidade. Além disso, os componentes de segurança, que visam resguardar a integridade física dos utilizadores, e de proteção contra sobrecarga e curto-circuito, que têm por objetivo impedir o comprometimento dos componentes da máquina, também são incorporados. Importante salientar que o referido quadro elétrico foi projetado especificamente para operar com alimentação monofásica de tensão alternada 230V, 50 Hz, correspondente à voltagem disponível nas tomadas em Portugal. Essa informação é de grande relevância para garantir o adequado funcionamento e manutenção da máquina, pois quaisquer alterações na voltagem de alimentação podem acarretar danos irreparáveis aos seus componentes elétricos e eletrónicos.

O esquema elétrico completo pode ser consultado no Apêndice C. O esquema de liga-

ções entre componentes, Figura 5.1, é fundamental para a compreensão do funcionamento da máquina.

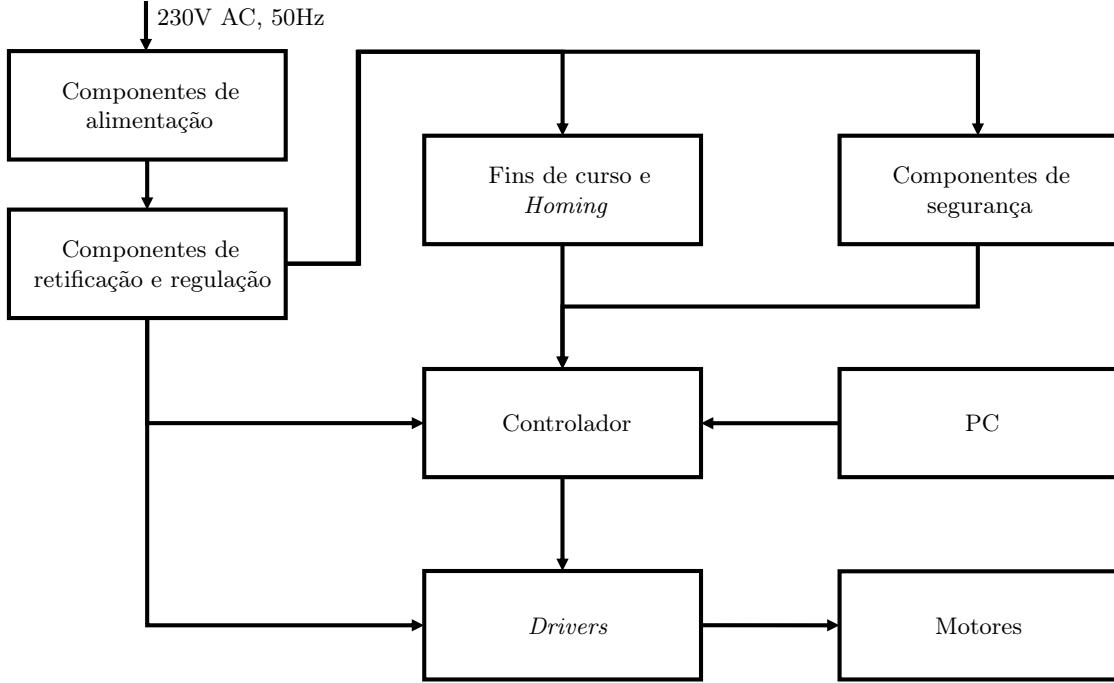


Figura 5.1: Esquema de ligações entre componentes.

O processo de seleção dos componentes de potência e de segurança têm por base uma pesquisa de mercado, considerando as suas características e a relação preço/qualidade. O controlador é selecionado com base no tipo de programação a ser implementada e no número e tipo de entradas e saídas necessárias.

5.1.1 Circuito de Potência

O circuito de potência é alimentado por uma ficha do tipo IEC C14 localizada na lateral do quadro, e passando por um seccionador geral de três polos 20 A, com dois polos utilizados, um para a linha e outro para o neutro. O circuito também contém um disjuntor diferencial de 25 A em série para proteger contra choques elétricos de 30 mA.

Uma tomada auxiliar e um disjuntor correspondente são instalados no quadro para fornecer energia a equipamentos externos que requerem alimentação monofásica AC. Além disso, uma luz verde indicadora de energia é montada na porta frontal e uma ventoinha para resfriamento dos componentes é colocada na lateral. Os dois estão conectados em série com um fusível de 250 V, 2 A, para proteção contra curtos-circuitos.

Segundo a pesquisa conduzida por Jorge Fernandes [42], uma estratégia vantajosa para alimentar os *drives* é utilizar diversas fontes de alimentação interligadas em série, acompanhadas por um disjuntor de um polo conectado à linha, em contraposição a uma única fonte de alimentação de maior capacidade. Essa abordagem resulta num menor custo e maior estabilidade de corrente para os *drives*, além diminuir o aquecimento no interior do quadro.

Dessa forma, são utilizadas quatro fontes de alimentação, sendo três de 400 W com

saída de 48 V DC e uma de 60 W com saída de 24 V DC. As fontes de 48 V alimentam os diferentes *drivers*, enquanto a fonte de 24 V alimenta o controlador, os componentes de segurança, fins de curso e sensores de *homing*. Um componente luminoso é incluído em paralelo com a saída de cada fonte de alimentação de 48 V para uma rápida análise do seu funcionamento.

5.1.2 Controlador

Ao escolher um controlador para a tarefa de controlar três motores de passo e dos componentes de segurança numa máquina, optou-se pelo Controllino. Essas placas foram desenvolvidas especialmente para aplicações industriais, oferecendo uma solução confiável e eficiente [42, 55].

A escolha do Controllino para o projeto em questão é fundamentada em diversos critérios relevantes. A robustez do Controllino é um dos seus principais atributos, o que o torna capaz de resistir a condições adversas frequentemente encontradas em ambientes industriais. Isso garante um controlo efetivo e estável da máquina ao longo do tempo.

O Controllino oferece múltiplas entradas e saídas digitais que permitem uma conexão direta e precisa dos motores, resultando num controlo eficiente e preciso do movimento. Além disso, as saídas de relé integradas facilitam a integração de componentes de segurança, como sensores e dispositivos de emergência [55, 56].

O Controllino é totalmente compatível com a plataforma Arduino IDE, trazendo uma série de benefícios adicionais. Essa compatibilidade permite aproveitar a ampla biblioteca de código aberto disponível para o Arduino, facilitando o desenvolvimento do *software* de controlo da máquina e simplificando o processo de implementação [42].

Para selecionar o modelo mais adequado do Controllino, é necessário determinar o número de entradas e saídas digitais necessárias, que podem ser encontradas na Tabela 5.1.

Tabela 5.1: Lista das entradas e saídas necessárias no controlador.

Sinal	Tipo	Quantidade
Botoeira de emergência	entrada digital	1
Sinal de barreira	entrada digital	1
Botoeira de <i>rearm</i>	entrada digital	1
Alarme <i>drives</i>	entrada digital	3
Fins de curso	entrada digital	3
Leitor de cartão <i>SD</i>	entrada digital	4
Pulso <i>drives</i>	saída digital	3
Direção <i>drives</i>	saída digital	3
<i>Enable drives</i>	saída digital	1

Após uma análise aprofundada, concluiu-se que são necessárias, no total, 13 entradas digitais e 7 saídas digitais.

Entre os modelos disponíveis, foram identificados o Controllino MAXI e o Controllino MEGA [56]. A Tabela 5.2 apresenta algumas características de ambos os modelos.

Tabela 5.2: Principais características do Controllino MAXI e do Controllino MEGA [55, 56].

Características	Controllino MAXI	Controllino MEGA
Cabeçalhos de pinos de 5 V	Sim	Sim
Entradas analógicas/digitais	10	16
Apenas Entradas Digitais	2	5
Entradas Analógicas 0 - 10 V	Não	Não
Entradas de Interrupção	2	2
Saídas Digitais 2 A	12 (todos PWM)	24 (15 PWM)
Saídas Analógicas 0 - 10 V	Não	Não
Saídas de Relé	10	16
Interface Serial TTL	2	2
Interface I ² C	1	1
Interface SPI	1	1
Interface RS485	1	1
RTC	1	1
Interface Ethernet	1	1

O Controllino MEGA apresenta recursos mais aprimorados e capacidades mais amplas relativamente aos modelos convencionais. O Controllino MEGA oferece uma maior flexibilidade e adaptação às necessidades futuras do projeto, permitindo a integração de módulos adicionais, como módulos de comunicação ou módulos de memória. Além disso, a sua relação de preço em comparação com o Controllino MAXI é vantajosa [55, 56].

O controlador Controllino MEGA é instalado no quadro elétrico, montado numa trilha DIN, ao lado dos demais componentes. Ele é alimentado pela fonte de 24V mencionada anteriormente, e suas entradas e saídas são conectadas diretamente aos componentes ou mediante bornes, quando necessário. Uma extensão USB macho-fêmea é conectada à porta USB do Controllino MEGA, tornando essa conexão acessível externamente, sem a necessidade de abrir a porta do quadro elétrico. A porta USB fêmea está disposta na parte frontal do quadro elétrico.

5.1.3 Drive

O *driver* é indispensável para o controlo do movimento do motor, por ser o componente que recebe os sinais do controlador, como pulsos e direção, e os converte em comandos comprehensíveis para o motor. É importante ressaltar que cada motor requer um *driver* dedicado, uma vez que as suas características e requisitos de controlo podem variar. Sendo assim, é crucial escolher um *driver* adequado para assegurar um funcionamento eficiente e preciso, levando em consideração o motor selecionado. Neste caso, um *driver* que seja compatível com o motor de passo NEMA 34.

O *driver* é responsável por estabelecer a conexão entre o circuito de baixa tensão do controlador e o circuito de alta tensão da fonte de alimentação, que alimenta o motor. Ele tem um papel crucial na regulação da corrente enviada ao motor, assegurando um binário adequado e prevenindo o superaquecimento. Além disso, o *driver* controla o número de

pulsos necessários para o motor realizar uma rotação completa, com uma faixa de variação de 200 a 51.200 pulsos por revolução. Aumentar esse valor permite uma maior precisão de posicionamento, porém resulta numa diminuição do binário disponível [42].

No que diz respeito à operação em malha fechada, o *driver* tem o controlo dos sinais do *encoder*. Apesar de existirem opções em que esses sinais são direcionados diretamente ao controlador, nesse caso, é o *driver* quem processa esses sinais. Essa capacidade é possível devido à presença de um microcontrolador incorporado no *driver*, que possui um *firmware* dedicado para essa finalidade. Esse *firmware* oferece uma variedade de parâmetros configuráveis que podem ser acessados conectando o *driver* a um computador. Para essa conexão, é necessário instalar um *software* específico, como o “Launch STEPPERONLINE” ou “CLSeries”, e utilizar um cabo de comunicação RS232 conectado à porta RJ-45 do *driver*. Através desse *software*, é possível ajustar as características do controlo em malha fechada, utilizando um controlo PID (Proporcional, Integral e Derivativo) tanto para a corrente quanto para o posicionamento preciso do motor. Além disso, é possível configurar outras características, como a corrente consumida quando o motor está parado, o tipo de sinal das saídas do *driver* (alto ou baixo) e a ação a ser tomada para o sinal de entrada “enable” do *driver*.

Com o *driver* conectado ao computador, é possível realizar testes e ajustar as configurações diretamente no motor. Isso permite simular velocidade, como representado na Figura 5.2, o posicionamento, Figura 5.3, e utilizar rampas de aceleração e desaceleração.

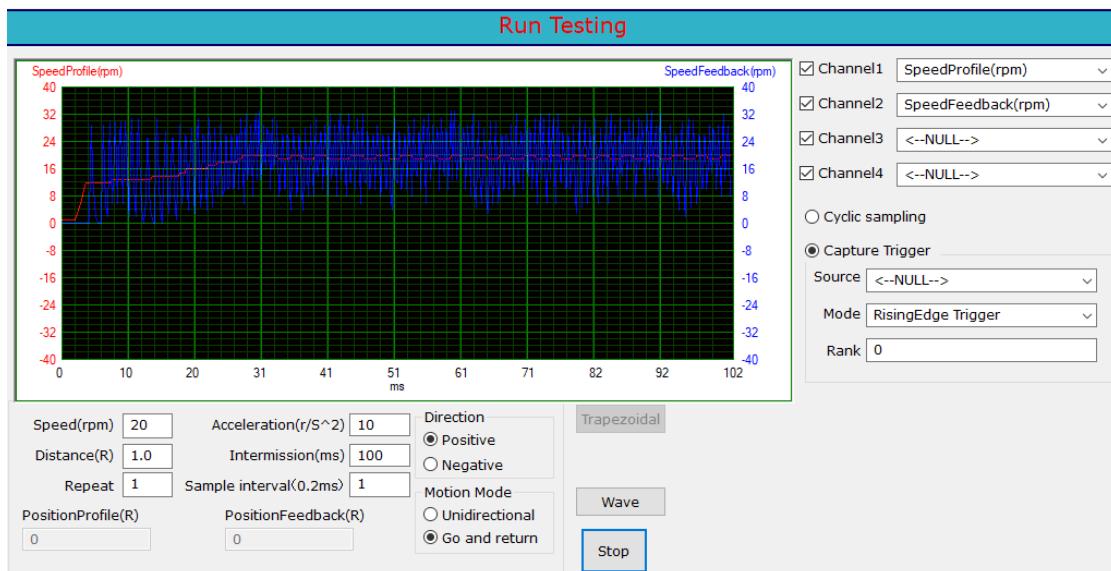


Figura 5.2: Software launch STEPPERONLINE: simulação da velocidade.

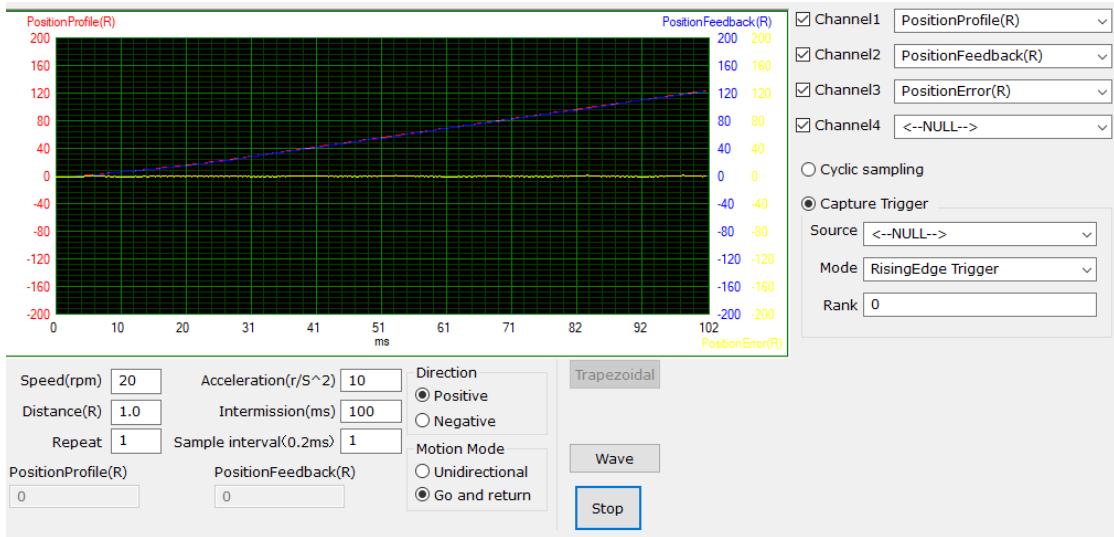


Figura 5.3: *Software launch STEPPERONLINE*: simulação da posição.

O *driver* selecionado é o modelo CL86T, fornecido pela mesma empresa dos motores, que atende aos requisitos do motor de passo NEMA 34. Este *driver* tem uma faixa de tensão de 20 V a 80V DC e fornece uma corrente de pico de 8,2 A, o que o torna adequado para o motor em questão. Além disso, o *driver* tem uma entrada que é compatível com o *encoder* do motor e duas saídas que podem ser conectadas ao controlador. Uma das saídas é responsável por emitir um sinal de alarme em caso de falha de sincronismo entre o *driver* e o motor, enquanto a outra saída avisa o controlador quando o motor está em movimento. O fornecedor também forneceu uma figura (Figura 5.4) que mostra as ligações entre os componentes, demonstrando que as entradas e saídas são ativadas por meio de fotodíodos e fototransistores.

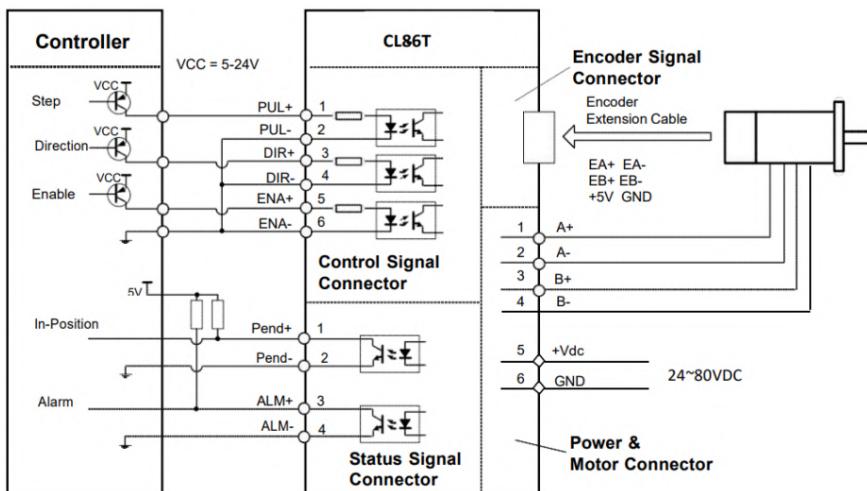


Figura 5.4: Conexões do *driver* CL86T com o controlador e o motor. Retirado de J. Fernandes [42].

Outras características do *driver* selecionado são [57]:

- Frequência de pulso de entrada: 200 kHz
- Corrente média do sinal lógico: 7 mA
- Resistência de isolamento: 500 MΩ
- Peso: 580 g

No *datasheet* do *driver*, localizado no Apêndice D, é possível encontrar outras características, como as dimensões e a configuração dos pinos da porta de comunicação RS232.

São incluídos no quadro elétrico três *drivers* CL86T, sendo cada um responsável pela movimentação de um motor. A Figura 5.5 representa fielmente o *driver* proposto.



Figura 5.5: *Drive* selecionado: CL86T. Retirado de STEPPERONLINE [57].

5.1.4 Elementos de Segurança

A estampagem incremental por ponto único é geralmente realizada em velocidades de conformação reduzidas, mas as forças envolvidas são significativas. Sendo assim, é crucial elaborar uma estimativa de risco adequada. A estimativa de risco é baseada na análise quantitativa de cada ocorrência perigosa identificada. A probabilidade de causar danos depende da exposição ao perigo, da ocorrência do evento perigoso e das capacidades técnicas e humanas para prevenir ou limitar os danos [58].

Um dos métodos mais conhecidos para estimativa de risco é *Risk Assessment Methodology IOSH Method/HRN*. Este é um método de avaliação numérica que permite quantificar variáveis qualitativas por meio da atribuição de uma pontuação que corresponde ao nível de risco para cada perigo (conforme Tabela 5.3) [58].

Tabela 5.3: HRN: pontuação correspondente ao nível de risco para cada perigo. Adaptado de H. Lopes [58].

HRN	Grau de risco
0 a 1	Insignificante
1 a 5	Muito Baixo
6 a 10	Baixo
11 a 50	Relevante
51 a 100	Elevado
101 a 500	Muito Elevado
501 a 1000	Extremos
> 1000	Inaceitável

O grau de risco (HRN) é calculado levando em consideração quatro parâmetros tabelados que combinam na gravidade da lesão e a probabilidade de ocorrência [42, 58]. Esses parâmetros são os seguintes:

- LO (*Likelihood of Occurrence*): Probabilidade de ocorrência do perigo, com um valor de 5 indicando que o perigo é casual e pode ocorrer.
- FE (*Frequency of Exposure*): Frequência de exposição ao perigo, com um valor de 5 indicando exposição constante.
- DPH (*Maximum Possible Loss*): Perda máxima possível, com um valor de 1 indicando que pode ocorrer quebra ou lesão de membros menores.
- NP (*Number of People Exposed*): Número de pessoas expostas, com um valor de 1 indicando uma a duas pessoas.

O cálculo do HRN é dado pela equação 5.1:

$$HRN = LO \times FE \times DPH \times NP \quad (5.1)$$

Resultando num valor de 25. Esse valor indica um nível relevante de risco de lesão. Dessa forma, é necessário utilizar uma barreira imaterial na área de acesso da máquina, sendo acionada sempre que a máquina está ligada e algo entre na área de conformação. O restante do perímetro da máquina pode ser envolto por uma parede de acrílico ou vedação de metal. Outra solução possível é o uso de uma vedação em todo o perímetro, onde na área de acesso da máquina seria acessada por uma porta com intertravamento. Em ambos os casos, um sinal elétrico é gerado caso haja acesso à zona de conformação da máquina, sendo usado para acionar o sistema de segurança e tomar uma ação imediata.

É proposto o uso de uma barreira imaterial de comprimento de 150 mm, instalada verticalmente e alimentada por uma tensão de 24 V. Essa barreira é composta por um emissor e um receptor e possui um sinal OSSD (*Output Signal Switching Device*) que está conectado a um relé de segurança.

O relé de segurança deve conter, no total, duas entradas de acionamento provenientes da barreira imaterial e do botão de emergência, além de uma entrada de rearme acionada

por um botão. O relé acionará a bobina auxiliar de um conjunto de quatro contatores. Os contatores permitem a passagem de corrente dos *drivers* para os motores, ou seja, eles permanecem conectados enquanto a energia estiver ligada e só serão desligados se o relé de segurança for acionado.

De forma adicional, são empregados dois sinais direcionados às entradas do controlador, ativados pelo botão de emergência e pelo botão de rearme, respectivamente. Esses botões podem ser fixados à porta do painel elétrico ou integrados a um dispositivo móvel.

Sinais diferentes são utilizados para o controlador poder distinguir entre o acionamento do botão de emergência e a passagem pela barreira imaterial.

5.1.5 Quadro Elétrico

O quadro elétrico destinado ao funcionamento e controlo da máquina abriga todos os componentes elétricos e eletrônicos. Ele é envolto por uma calha de plástico para facilitar a passagem dos condutores de ligação dos componentes. Os componentes são montados em calha DIN ou parafusados diretamente na chapa de montagem.

Para atender ao requisito de projeto de compatibilidade da máquina, é necessário compreender as dimensões mínimas necessárias do quadro elétrico.

Foi elaborada uma organização simplista, Figura 5.6, com base nas dimensões dos componentes, divididos em três zonas:

- Zona 1: elementos de entrada de potência, componentes de proteção e segurança e contatores de acionamento dos motores.
- Zona 2: *drivers*, bornes e controlador
- Zona 3: fontes de alimentação.

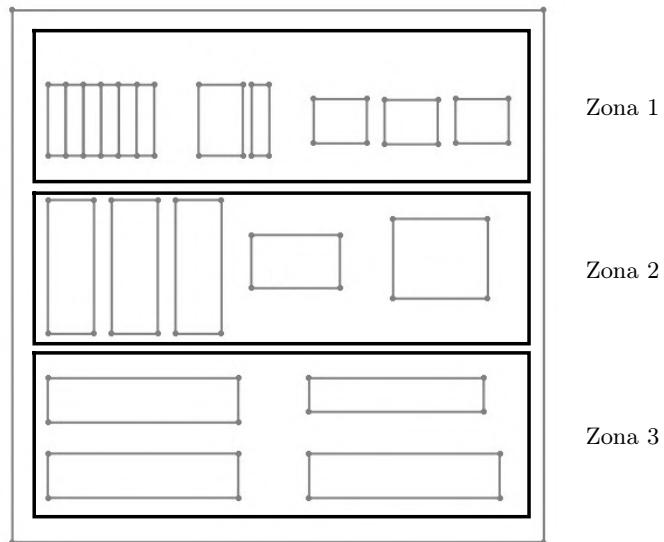


Figura 5.6: Organização do quadro elétrico.

Sendo assim, o quadro deve ter as dimensões mínimas de $600 \times 400 \times 250$ mm. Com essas dimensões, percebeu-se que o quadro elétrico pode ser posicionado em um dos lados

da estrutura, como mostrado na Figura 5.7, podendo ter até ao máximo de $750 \times 630 \times 250$ mm.

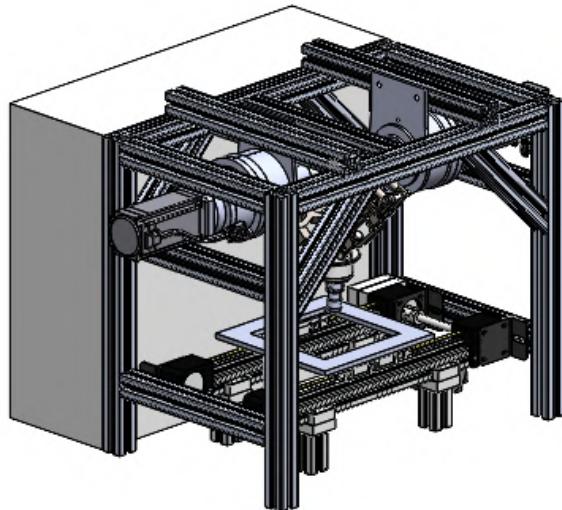


Figura 5.7: Posicionamento ideal do quadro elétrico na máquina.

5.2 Controlo de Movimento

Uma máquina de estampagem incremental por ponto único é equipada com dois modos distintos: modo manual e modo automático. Apesar dessa distinção, o princípio de gestão da trajetória é o mesmo em ambos os casos.

A gestão da trajetória é um conjunto de estudos e métodos que permitem determinar a velocidade de cada elo para atingir o movimento desejado no espaço de trabalho da máquina. No caso simples de um movimento linear entre dois pontos, a posição da máquina deve ser lida durante todo o tempo do seu movimento. Assim, é necessário realizar uma interpolação a cada instante de tempo para as coordenadas do *end-effector*.

Nas duas modalidades, é necessário implementar a cinemática, determinar o número de pulsos, controlar a aceleração e desaceleração, bem como realizar o posicionamento incremental. Durante a operação no modo manual, calculam-se e interpolam-se em tempo real as coordenadas finais da ferramenta, tendo em conta um ponto inicial e final. No modo automático, as coordenadas finais da ferramenta também são calculadas e interpoladas em tempo real, mas a partir de um ficheiro com pontos resultantes de uma etapa de pré-processamento. Esses pontos são calculados a partir de um arquivo em código-G, que representa a conformação da peça. A escolha da utilização do código-G foi feita devido à sua capacidade de converter de forma rápida e simples as peças modeladas em *software* de CAD para o código de máquina, utilizando *software* gerador de código-G.

5.2.1 Implementação da Cinemática

A implementação da cinemática na máquina de estampagem incremental visa controlar o movimento da extremidade da ferramenta de conformação. O objetivo é mover essa ferramenta para uma coordenada espacial definida (x, y, z), com controlo de aceleração e desaceleração do movimento. A cinemática inversa é usada para determinar os deslocamentos angulares (θ_1, θ_2) necessários para os motores alcançarem uma coordenada específica (y, z).

A ferramenta pode ser deslocada em até 100 milímetros em z , 200 milímetros em y e 200 milímetros em x para atender à área de trabalho requerida.

Conforme a representação da Figura 3.3 do Secção 3.3.1, há um ponto definido pelas equações da cinemática, com as coordenadas $y = 0$ e $z = 0$. Esse ponto está localizado no centro entre os motores responsáveis pelos eixos y e z , a uma distância de 290 milímetros do plano da base da mesa. Para simplificar as equações da cinemática em z , considerou-se a ponta da ferramenta na extremidade dos braços, em vez da ponta da própria ferramenta. De modo a simplificar o processo, será realizada uma compensação no valor do eixo z , adicionando 290 (distância real em z entre o centro dos motores e o plano da base da mesa) e subtraindo 50 (distância em z entre a extremidade dos braços e a ponta da ferramenta). Dessa forma, a referência $(0, 0, 0)$ é considerada o centro da mesa de trabalho, admitindo-se um deslocamento negativo nos eixos x e y . Portanto, os valores dos eixos podem variar da seguinte forma:

- Eixo x : de -100 a 100
- Eixo y : de -100 a 110
- Eixo z : de 0 a 100

5.2.2 Determinação do Número de Pulses

No caso dos eixos y e z , é possível determinar o deslocamento angular necessário para que o motor se move da posição atual para a posição desejada, utilizando as equações de cinemática inversa apresentadas no Secção 3.3.2. Considerando o deslocamento angular e o número de pulsos por revolução, é possível calcular o número de pulsos necessários. Supõe-se a utilização de uma caixa redutora com uma relação de 60:1 entre a saída do motor e a conexão com o braço, o que significa que a rotação do motor deve ser 60 vezes maior do que o deslocamento do braço. O número de pulsos para o motor $yz1$ e para o motor $yz2$ é calculado pelas Equações 5.2 e 5.3, respectivamente.

$$n^{\text{o}} \text{ de pulsos motor } yz1 = \theta_1[\text{deg}] \times \text{redução} \times \frac{\text{pulsos/rev}}{360^\circ} \quad (5.2)$$

$$n^{\text{o}} \text{ de pulsos motor } yz2 = \theta_2[\text{deg}] \times \text{redução} \times \frac{\text{pulsos/rev}}{360^\circ} \quad (5.3)$$

Já o eixo x é controlado pela movimentação de dois fuso coordenados. O cálculo do número de pulsos depende do passo do fuso, do número de pulsos por revolução e da distância desejada, conforme descrito na Equação 5.4.

$$n^{\text{o}} \text{ de pulsos motor } x = (x_f - x_i) \times \frac{\text{pulsos/rev}}{360^\circ} \quad (5.4)$$

5.2.3 Posicionamento Incremental

Em situações como o processo de SPIF, é crucial estabelecer uma trajetória precisa para a ponta da ferramenta. Em muitos casos, quando a ponta da ferramenta é enviada de um ponto para outro sem controlo da trajetória, ela tende a seguir um arco.

Para assegurar que um robô execute uma trajetória reta entre dois pontos, é usual utilizar técnicas de interpolação linear ou interpolação por segmentos retos. Essas técnicas são aplicadas na geração de trajetórias para controlar o movimento suave do robô ao longo de uma linha reta entre os pontos de partida e destino. A interpolação linear é a divisão da trajetória em segmentos retos e a determinação das posições intermediárias ao longo desses segmentos. Essas posições intermediárias são então usadas para comandar o robô a se mover suavemente ao longo da trajetória desejada.

No contexto prático, esse processo envolve o deslocamento da ferramenta por posições sucessivas. A cada movimento, a nova posição é recalculada com base na posição anterior, utilizando um valor incremental para o deslocamento. Esse procedimento é repetido até que a ferramenta se apresente na posição final.

Para uma dada posição final (X_f, Y_f, Z_f) , partindo de uma posição inicial (X_0, Y_0, Z_0) , é possível calcular a distância de deslocamento no plano yz ($dist$) através da Equação 5.5.

$$dist = \sqrt{(\Delta Y)^2 + (\Delta Z)^2} = \sqrt{(Y_f - Y_0)^2 + (Z_f - Z_0)^2} \quad (5.5)$$

Também é possível calcular o ângulo do vetor de deslocamento com a horizontal (δ) através da Equação 5.6. Esse valor depende se o braço está em avanço ou recuo, portanto, depende da posição final Y_f .

$$\delta = \begin{cases} \arctan \frac{\Delta Z}{\Delta Y} = \arctan \frac{Z_f - Z_0}{Y_f - Y_0} & Y_f > Y_0 \\ \arctan \frac{\Delta Z}{\Delta Y} + \pi = \arctan \frac{Z_f - Z_0}{Y_f - Y_0} + \pi & Y_f < Y_0 \end{cases} \quad (5.6)$$

Assumindo um valor para o incremento mínimo entre as posições (Δs), podemos escrever a Equação 5.7 para as posições dos eixos y e z .

$$\begin{cases} \Delta Y_i \\ \Delta Z_i \end{cases} = \begin{cases} Y_0 + i \times \Delta s \times \cos \delta \\ Z_0 + i \times \Delta s \times \sin \delta \end{cases} \quad (5.7)$$

Embora o posicionamento do eixo x seja independente dos demais movimentos, é desejável que os movimentos sejam coordenados entre os três eixos. Para isso, calcula-se o número total de incrementos (N_i) utilizando a Equação 5.8.

$$N_i = \frac{dist}{\Delta s} \quad (5.8)$$

A abordagem para este eixo consiste em determinar o valor do incremento (Δs_X) com base nas posições inicial (X_0) e final (X_f), juntamente com o número de incrementos nos eixos y e z , conforme definido pela Equação 5.9.

$$\Delta s_X = \frac{\Delta X}{N_i} = \frac{X_f - X_0}{N_i} \quad (5.9)$$

Portanto, o cálculo das posições sucessivas de ΔX_i é dado pela equação 5.10.

$$\Delta X_i = X_0 + i \times \Delta s_X \quad (5.10)$$

A fim de tornar a implementação do posicionamento incremental mais percutível, apresenta-se na Figura 5.8 o fluxograma detalhado que ilustra o processo passo a passo. Essa representação visual é essencial para facilitar a compreensão dos diferentes estágios do processo e auxiliar na sua correta execução.

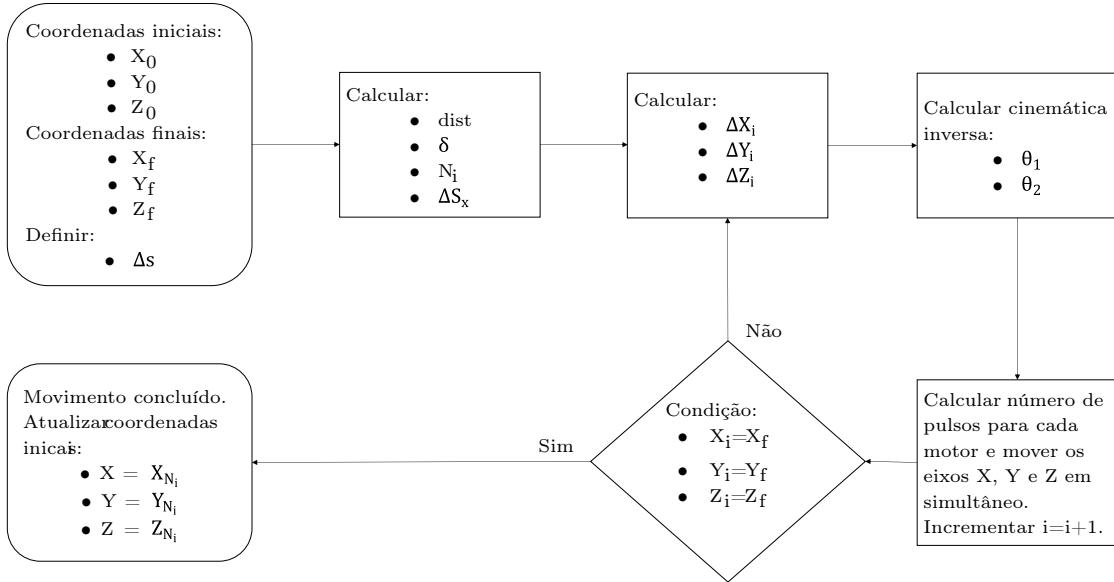


Figura 5.8: Fluxograma para a implementação do posicionamento incremental. Adaptado de J. Fernandes [42].

5.3 SPIF-A_v2 GUI

A criação de uma *Interface Gráfica do Utilizador* (GUI) é de extremamente importante no projeto de uma máquina, pois a torna acessível a um público mais amplo e simplifica a sua operação. Nessa etapa inicial do processo de fabricação, que envolve a criação dos arquivos CAD e CAM, é possível utilizar uma variedade de *softwares* CAD/CAM disponíveis. Apesar de ser possível criar uma interface CAD/CAM dedicada ao SPIF-A_v2, essa não é uma das prioridades. Portanto, é crucial criar uma GUI que oculte o código complexo e, ao mesmo tempo, familiarize o operador com a máquina por meio de elementos gráficos.

Entre as diversas opções de *softwares* disponíveis para projetar uma GUI, foi escolhido o MATLAB. Essa escolha é fundamentada na funcionalidade conhecida como “MATLAB App Designer”, que permite criar aplicativos profissionais de forma intuitiva e simples, aproveitando todas as funcionalidades disponíveis no MATLAB.

A GUI em questão será composta por três páginas distintas: o modo manual, o modo automático e uma página informativa.

5.3.1 Modo Manual

A primeira página, Figura 5.9, é denominada “Manual Mode”. Nessa página, encontra-se a opção de selecionar a porta do computador que se conecta ao controlador, bem como a opção de habilitar os motores (“Enable Motors”). Além disso, existe a funcionalidade de executar a rotina de “homing”, que posiciona a ponta da ferramenta na posição de casa, ou seja, com as coordenadas (0,0,0), e a opção de enviar a ponta da ferramenta para um ponto específico definido pelo utilizador.

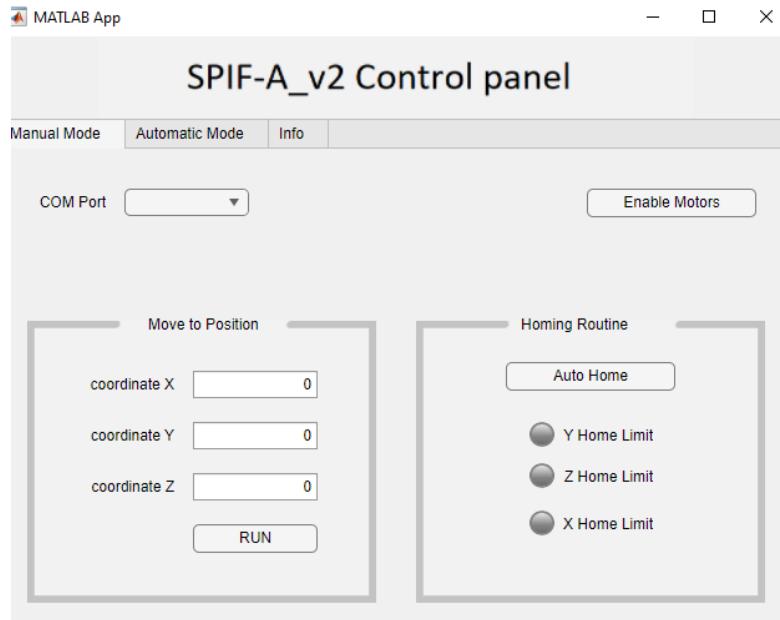


Figura 5.9: GUI página “Manual Mode”.

5.3.2 Modo Automático

A segunda página, Figura 5.10, é denominada “Automatic Mode”. Nessa página, é possível carregar um ficheiro do tipo .nc com o código-G e iniciar a execução do programa. Também é apresentado um cronómetro que fornece informações sobre o tempo decorrido desde o início da conformação da peça. Além disso, há uma opção para realizar a compensação da ferramenta, caso esta esteja posicionada de forma diferente daquela definida pelo código-G.

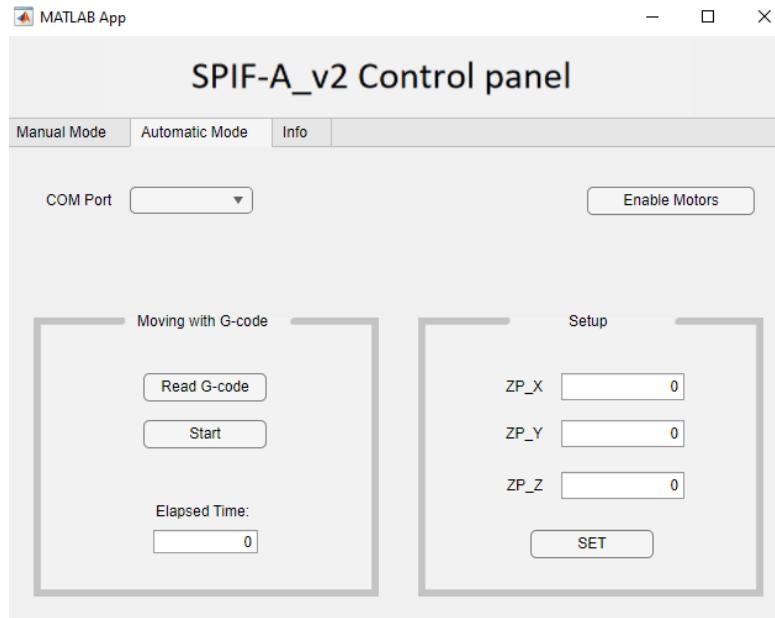


Figura 5.10: GUI página “Automatic Mode”.

5.3.3 Página Informativa

A terceira página, Figura 5.11, é denominada “Info”. Esta página contém informações concisas sobre a utilização da máquina em ambos os modos, além dos detalhes do autor da aplicação.

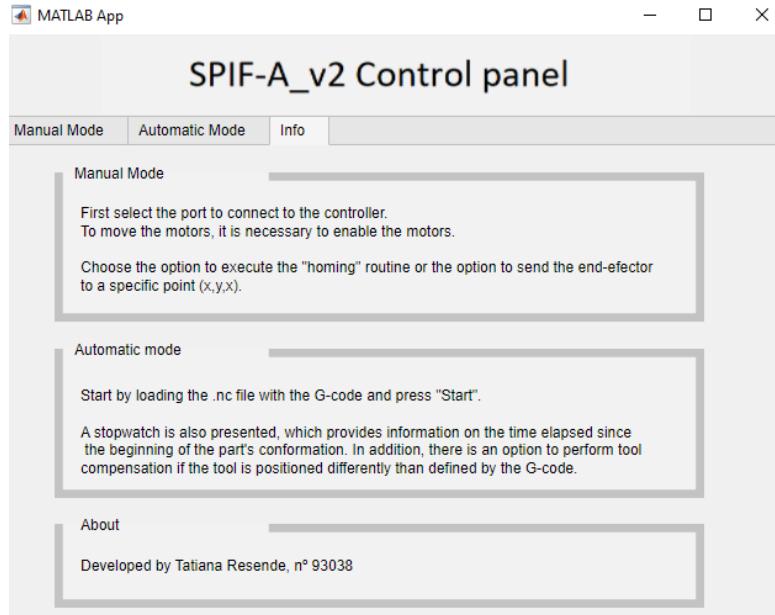


Figura 5.11: GUI página “Info”.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

Capítulo 6

Implementação e Resultados

Neste capítulo, é abordado a implementação e os resultados obtidos tanto no projeto mecânico como no projeto de automação. A implementação destes dois projetos culminaram na criação de um protótipo. Ao longo deste capítulo, são abordadas as etapas-chave e, por fim, apresentam-se os resultados alcançados.

6.1 Implementação do Projeto Mecânico

A implementação do projeto mecânico é crucial para o desenvolvimento de uma máquina, consistindo na transição do modelo em CAD para um protótipo físico. A implementação apresenta diversos desafios, como a tradução precisa do modelo CAD num protótipo físico, a seleção adequada de materiais e componentes, a consideração de aspectos ergonómicos e de segurança, além da otimização da eficiência e desempenho da máquina.

As etapas da implementação do projeto mecânico são:

- Análise e preparação do modelo CAD: Nesta etapa, o modelo CAD é minuciosamente revisto para identificar problemas ou melhorias necessárias antes da implementação. Também são realizadas verificações de tolerância, ajustes dimensionais e análises de interferências.
- Seleção de materiais e componentes: Com base nos requisitos do projeto, são escolhidos os materiais e componentes adequados para a construção do protótipo. Considerações como resistência, durabilidade, compatibilidade e custo são levados em conta durante esse processo.
- Fabricação do protótipo: A fabricação do protótipo envolve o uso de técnicas de fabricação para transformar o modelo CAD numa representação física da máquina. É importante garantir a precisão dimensional e a qualidade do acabamento nesta etapa.
- Montagem e integração: Após a fabricação dos componentes individuais, ocorre a montagem e integração para formar o protótipo. Isso envolve ajustes finos, conexões adequadas e a verificação do correto funcionamento dos sistemas mecânicos.

Ao prosseguir com estas etapas para adequar-se aos materiais e métodos de fabricação disponíveis, foram necessárias alterações em alguns componentes relativamente ao modelo CAD desenvolvido. Dada a limitação de prazos de entrega e o orçamento limitado, o protótipo não apresenta redutores nem atuadores lineares, o que também requer alterações e adaptações nos componentes.

A plataforma foi o componente que sofreu as maiores modificações, uma vez que esta foi concebida com o intuito de utilizar um método de fabrico por adição. No entanto, devido a dificuldades na disponibilidade desse método, optou-se por um método de subtração. Essa alteração exigiu uma reformulação completa da peça. Além disso, o alojamento do porta-ferramentas foi otimizado para se tornar o sistema mais compacto possível. Essas alterações são visíveis na Figura 6.1.

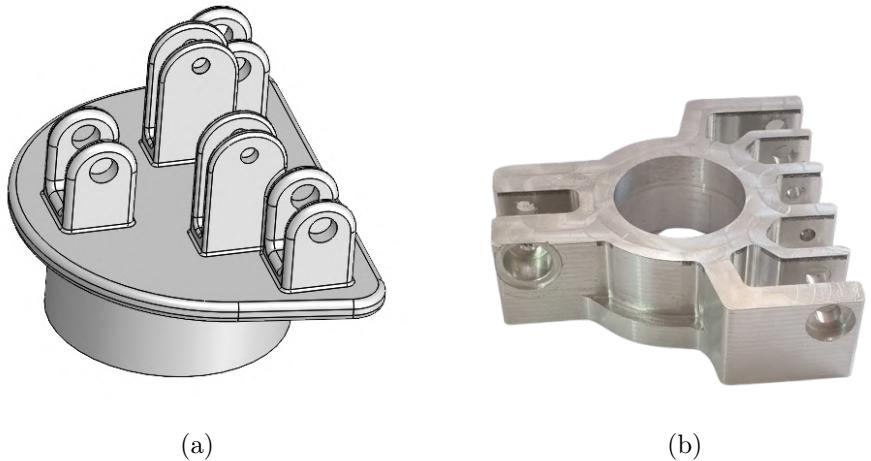


Figura 6.1: Componente — plataforma: (a) modelo original, (b) modelo final.

Com as modificações no componente plataforma, foi necessário adaptar outros componentes, como o componente que liga os braços de paralelismo ao braço principal direito, Figura 6.2. Essa adaptação envolveu a mudança da distância entre os furos e, consequentemente, a otimização da forma.

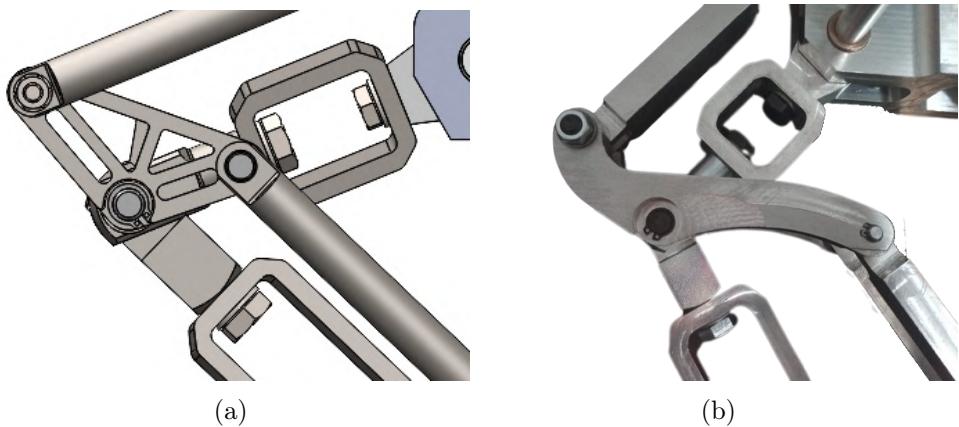


Figura 6.2: Componente — ligação entre os braços de paralelismo e o braço principal direito: (a) modelo original, (b) modelo final.

Outros componentes que sofreram alterações para facilitar o processo de fabrico foram ambos os braços de paralelismo, que inicialmente tinham uma forma circular sendo alterados para uma forma quadrada, uma vez que o material bruto é um paralelepípedo. Essa alteração não compromete a funcionalidade nem a resistência do componente.

A montagem e integração dos componentes não se limitaram a ajustes finos, pois ocorreram erros de maquinação em alguns dos elementos. Essa situação exigiu tempo e esforço adicionais para solucionar tais problemas, bem como realizar adaptações nas conexões necessárias. Não obstante, foi possível realizar a montagem individual de cada braço e a subsequente união dos mesmos no sistema. Desta forma, alcançou-se o objetivo de obter um protótipo mecânico, Figura 6.3. Apesar de se encontrar numa fase evolutiva entre o conceito inicial e o produto finalizado, este protótipo mecânico permite testar e validar a viabilidade técnica, funcionalidade e desempenho dos principais componentes da máquina.



Figura 6.3: Protótipo físico do projeto mecânico

6.2 Implementação do projeto de automação

A implementação do projeto de automação envolve uma série de etapas que abrangem desde a montagem do *hardware* até os testes e validação do sistema automatizado.

As etapas da implementação do projeto de automação são:

- Montagem do *Hardware*
- Programação do Controlador
- Implementação e Configuração do *Drive* do Motor
- Implementação do Controlo de Movimento
- Implementação da Interface Gráfica de Utilizador
- Testes e Validação
- Resultados

6.2.1 Montagem do Hardware

A montagem do *hardware* consiste na organização e conexão dos componentes físicos do sistema automatizado. Isso requer a instalação do controlador, o posicionamento adequado do *drive* do motor, das fontes de alimentação e a integração dos elementos de segurança, como disjuntores. É crucial seguir as especificações técnicas e os esquemas elétricos fornecidos para assegurar uma montagem correta e segura.

No âmbito do projeto, foi selecionado o Controllino MEGA como controlador, conforme mencionado na Secção 5.1.2. Contudo, o Controllino MEGA ainda não está disponível de momento. Dessa forma, foi necessário recorrer temporariamente ao uso de um Arduino UNO, que, apesar de apresentar algumas limitações, é suficiente para validar componentes específicos.

Na Figura 6.4, é possível ver um esquema que apresenta as principais ligações entre o controlador, os *drives*, os motores e as fontes de alimentação.

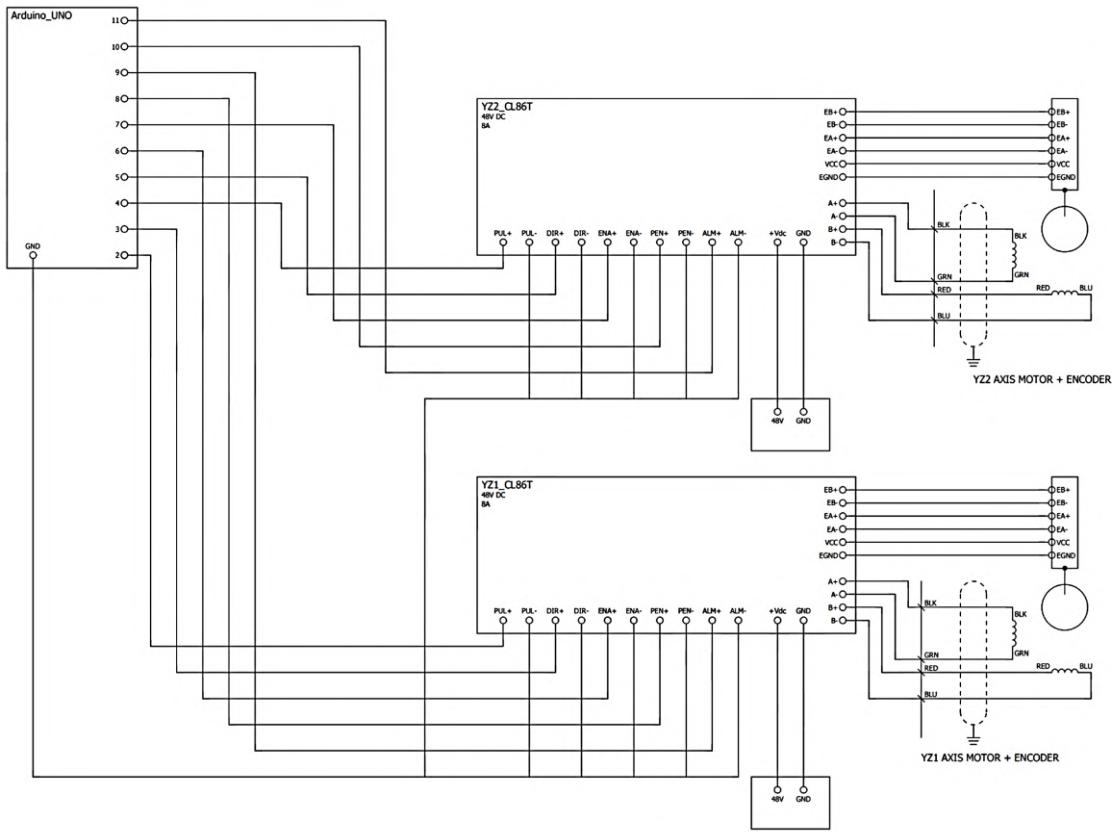


Figura 6.4: Esquemático das ligações entre os principais componentes elétricos.

6.2.2 Programação do Controlador

O controlador, no caso o Arduino UNO, tem um papel crucial no controlo do sistema automatizado. A programação do controlador envolve o desenvolvimento do código necessário para executar as funcionalidades desejadas, incluindo a comunicação com o *driver* do motor e a interação com a interface gráfica do utilizador.

O Arduino UNO é compatível com a plataforma Arduino IDE, assim como o Controlino. A plataforma Arduino IDE fornece um ambiente de desenvolvimento integrado que simplifica o processo de programação e facilita a implementação de funcionalidades complexas. Utiliza uma linguagem baseada em C++ e, com a utilização de bibliotecas como *AccelStepper* e *MultiStepper*, o código é desenvolvido para realizar tarefas específicas, tais como o planeamento de trajetórias, movimentação, aceleração e desaceleração.

A biblioteca *AccelStepper* oferece a possibilidade de planear trajetórias, acelerar e desacelerar suavemente os motores, garantindo um movimento suave e preciso. A biblioteca *MultiStepper*, por outro lado, permite o controlo simultâneo de vários motores de passo, o que é especialmente útil em aplicações com múltiplos eixos de movimento.

6.2.3 Implementação e Configuração do *Drive* do Motor

A implementação do *drive* num projeto de automação desempenha um papel crucial na conversão dos sinais de controlo do controlador em movimento físico. O *drive* do motor atua como uma ponte essencial entre o sistema de controlo e o motor, permitindo um controlo preciso e eficiente das operações.

Para implementar corretamente o *drive* do motor, é necessário realizar as ligações corretas (apresentadas na Secção 5.1.3). A configuração adequada do motor envolve a definição de parâmetros específicos, como o número de pulsos por revolução. No caso do *drive* selecionado, é estabelecido um valor de 400 pulsos por revolução para garantir um binário próximo do máximo.

Na Figura 6.5, é apresentada uma parte do painel de configuração do *drive*, onde é possível ajustar esses parâmetros conforme necessário. No Anexo E, encontram-se todos os parâmetros que podem ser ajustados.

Parameter Setting					
Open	Save As	Read	Download	Write	Restore
Number	Name	Value	Range	Unit	Remark
0.000000	Current loop bandwidth	1200	0~32767	--	Read only
1.000000	Current loop Ki	200	0~32767	--	Read only
2.000000	Microstep resolution	400	200~51200	P/R	Number of instructions required per turn
4.000000	Allowed max position error ...	4000	0~65535	--	Allowed max count of position error pulses
5.000000	Position loop Kp	45	0~3000	--	--
6.000000	Velocity loop Ki	0	0~3000	--	--
7.000000	Velocity loop Kp	15	0~3000	--	--
9.000000	Lock shaft current percenta...	100	0~100	%	--
10.000000	Locking duration time	200	0~1500	1ms	--
11.000000	Delay of loosening brake	250	0~1500	1ms	--
12.000000	Delay of closing brake	250	0~1500	1ms	--
13.000000	ENA input signal level setting	1	0~1	--	0 - high level, 1 - low level
14.000000	ALM output signal impedance...	1	0~1	--	0 - high impedance; 1 - low impedance
15.000000	PEND output signal impedance...	1	0~1	--	0 - high impedance; 1 - low impedance
16.000000	Internal filtering time	15	0~512	0.1ms	Internal smoothing time for control command
18.000000	Pulse effective edge	0	0~1	--	--
19.000000	Pulsemode	0	0~1	--	--
20.000000	Motor running direction	1	0~1	--	0- positive dir, 1-negative dir;
23.000000	Velocity point of closing brake	10	0~500	0.1r/s	--
24.000000	Over voltage limit	90	0~1000	V	--
25.000000	Velocity point for open loop ...	18	0~200	0.1r/s	--
27.000000	Distance to send "In Positio...	8	0~100	Pluses	Number of pulse
29.000000	Encoder resolution	4000	200~20000	--	4 times of encoder lines.

Figura 6.5: Software launch STEPPERONLINE: página parcial da configuração do *drive*.

6.2.4 Implementação do Controlo de Movimento e da GUI

O controlo do movimento envolve dois modos: o modo manual e o modo automático. O modo manual consiste essencialmente em definir uma trajetória entre dois pontos, o ponto em que se encontra (ponto inicial) e o ponto desejado (ponto final). No modo automático, a trajetória é composta por um conjunto de pontos definidos pelo código-G.

Ao abrir a aplicação, a primeira janela exibida é o modo manual. Nessa janela, é possível selecionar a porta de comunicação, a porta na qual o Arduino está conectado. Isso permite a comunicação entre a aplicação e o Arduino através do código desenvolvido no MATLAB. Em seguida, os motores são habilitados através do comando “*Enable Motors*”. Dependendo da função desejada, existe a opção de “*houme rotine*” ou escolha de mover para um ponto específico definido pelo utilizador.

No modo automático, o procedimento para seleção da porta e habilitação dos motores é o mesmo. Há a opção de carregar um arquivo contendo código-G. O programa

desenvolvido no MATLAB processa o código-G e o converte numa sequência de pontos que o Arduino reconhecerá.

Em ambos os casos, a implementação da trajetória é baseada no mesmo princípio, onde o movimento entre cada ponto é realizado através de um plano de trajetória dividido em pequenos segmentos, garantindo uma trajetória bem definida. A forma como essa divisão é realizada está descrita na Secção 5.2.3.

Para uma compreensão mais visual dos passos envolvidos no controlo de movimento, a Figura 6.6 apresenta um diagrama de fluxo ilustrativo da implementação do controlo de movimento.

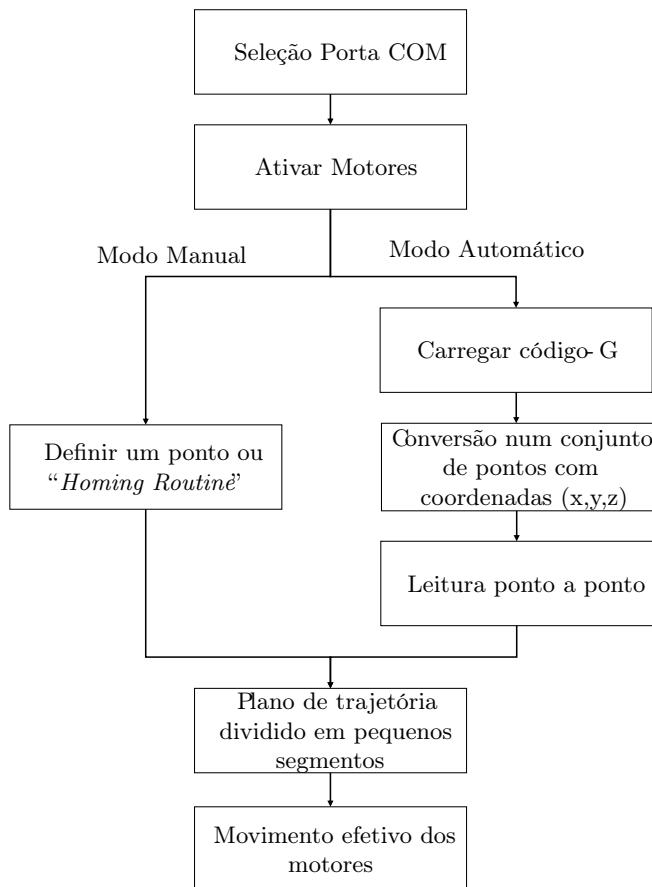


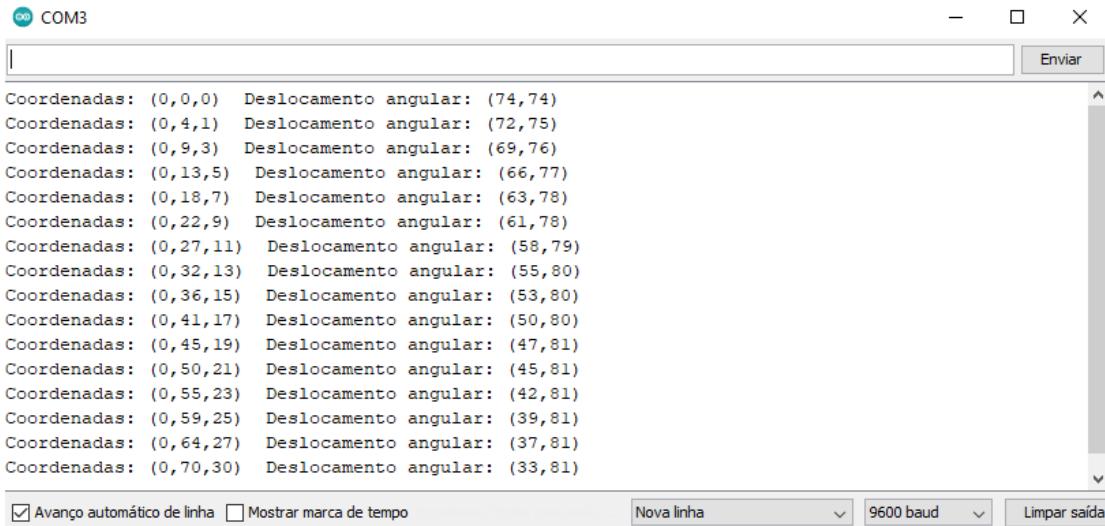
Figura 6.6: Diagrama de fluxo do controlo de movimento.

6.2.5 Testes, Validação e Resultados

Durante e após a implementação do projeto de automação, é imperativo realizar testes e validações para assegurar o seu correto funcionamento. Esses testes devem abranger todas as funcionalidades do sistema, incluindo a movimentação e a resposta aos comandos da GUI. À medida que cada funcionalidade foi implementada, procedeu-se à realização de testes de validação.

Nesse sentido, foi realizado um teste para verificar a trajetória definida pela ferramenta, um dos aspectos-chave e que requer validação. Esse teste consistiu na análise do

plano da trajetória criada entre um ponto inicial e um ponto final. Os pontos em questão foram as posições (0,0,0) e (0,70,30), com um espaçamento de 5 mm entre os pontos intermediários. O resultado desse teste é apresentado na Figura 6.7.



```

COM3
Enviar
Coordenadas: (0,0,0) Deslocamento angular: (74,74)
Coordenadas: (0,4,1) Deslocamento angular: (72,75)
Coordenadas: (0,9,3) Deslocamento angular: (69,76)
Coordenadas: (0,13,5) Deslocamento angular: (66,77)
Coordenadas: (0,18,7) Deslocamento angular: (63,78)
Coordenadas: (0,22,9) Deslocamento angular: (61,78)
Coordenadas: (0,27,11) Deslocamento angular: (58,79)
Coordenadas: (0,32,13) Deslocamento angular: (55,80)
Coordenadas: (0,36,15) Deslocamento angular: (53,80)
Coordenadas: (0,41,17) Deslocamento angular: (50,80)
Coordenadas: (0,45,19) Deslocamento angular: (47,81)
Coordenadas: (0,50,21) Deslocamento angular: (45,81)
Coordenadas: (0,55,23) Deslocamento angular: (42,81)
Coordenadas: (0,59,25) Deslocamento angular: (39,81)
Coordenadas: (0,64,27) Deslocamento angular: (37,81)
Coordenadas: (0,70,30) Deslocamento angular: (33,81)

Avanço automático de linha  Mostrar marca de tempo
Nova linha 9600 baud Limpar saída

```

Figura 6.7: Plano da trajetória criada entre dois pontos.

Como evidenciado na Figura 6.7, o programa consegue implementar corretamente os pontos intermediários do plano da trajetória, resultando numa trajetória bem definida. O uso de um espaçamento de 5 mm foi escolhido como exemplo demonstrativo, uma vez que um valor menor resulta num maior número de pontos intermediários, dificultando a validação inicial do processo devido à quantidade excessiva de informações a ser avaliada.

Outro teste realizado para validar foi a implementação da cinemática. O cálculo da cinemática é realizado pelo controlador. Com o intuito de realizar essa validação, procedeu-se ao movimento da ferramenta em direção aos pontos extremos da área de trabalho, bem como ao plano vertical central.

Para essa avaliação, foram considerados os seguintes pontos: (0,100,0), (0,-100,0), (0,73,100), (0,-73,100), (0,0,0) e (0,0,100). A Figura 6.8 apresenta os valores dos ângulos em cada um desses pontos.

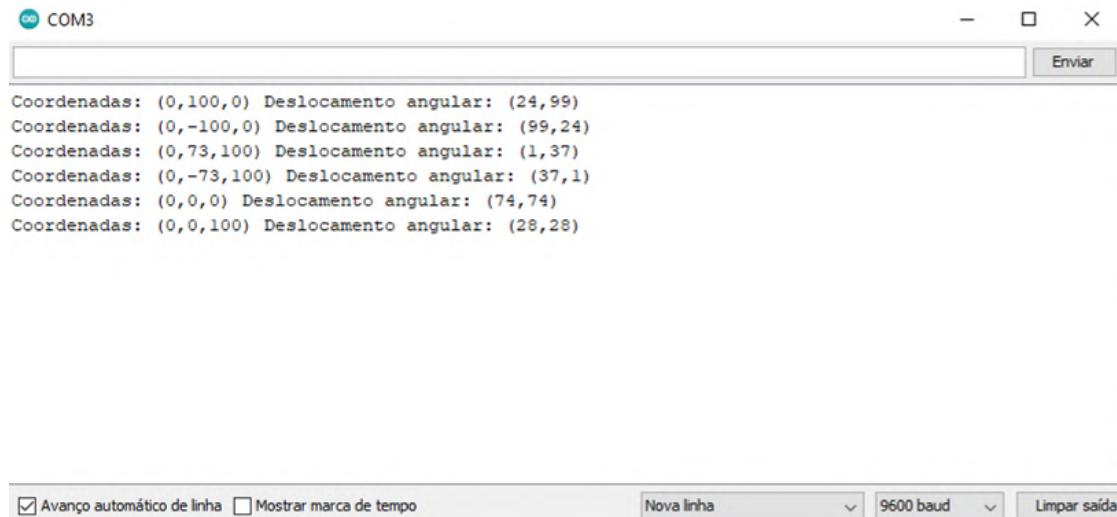


Figura 6.8: Valores dos ângulos provenientes da cinemática nos pontos de validação.

Através da análise da Figura 6.8, é possível constatar que a implementação está correta. Essa conclusão pode ser deduzida pelo fato de que existem valores nos pontos extremos e nos pontos extremos simétricos os ângulos são opostos. Por exemplo, os pontos (0,73,250) e (0,-73,250) correspondem a (22,54) e (54,22), respectivamente. Além disso, pode-se observar que no plano central — nos pontos (0,0,150) e (0,0,250) — os ângulos dos motores são iguais.

Adicionalmente, procedeu-se à realização de um teste para avaliar a resposta aos comandos da interface gráfica do utilizador, uma funcionalidade de suma importância no âmbito do projeto de automação. Durante esse teste, foram analisadas as respostas geradas pelo programa em resposta aos comandos inseridos na interface gráfica. Foram abrangidos diversos tipos de comandos, tanto no modo manual quanto no modo automático. Na Figura 6.9, é apresentada a resposta à seleção da porta COM enviada pelo MATLAB e a resposta à definição dos pontos no modo manual enviada pelo controlador (Arduino UNO), fornecendo uma demonstração clara da eficácia do sistema ao responder aos comandos provenientes da GUI.

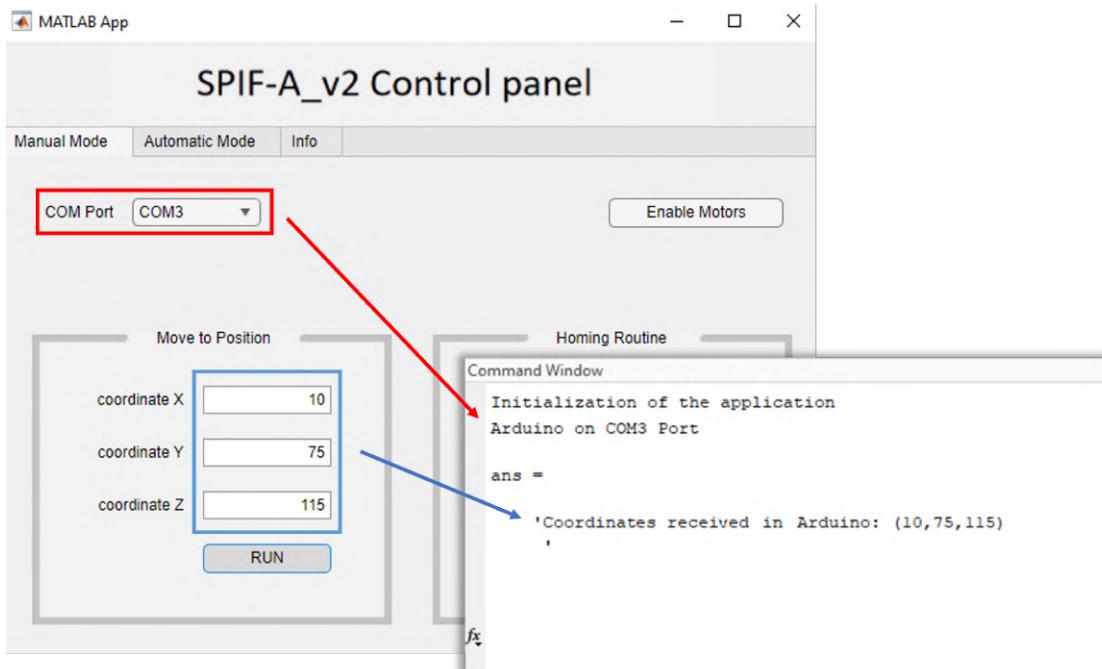


Figura 6.9: Respostas geradas pelo programa aos comandos da interface gráfica do usuário.

Ao finalizar esta etapa da implementação do projeto de automação, os testes e validações realizados garantiram o correto funcionamento do sistema implementado. A análise das trajetórias, a verificação da cinemática e a resposta precisa aos comandos da GUI evidenciaram a eficácia e a confiabilidade do programa. Dessa forma, pode-se afirmar com segurança que o sistema automatizado desenvolvido consegue desempenhar as suas tarefas de forma adequada e consistente.

Ao finalizar esta etapa da implementação do projeto de automação, os testes e validações realizados garantiram o correto funcionamento do sistema implementado. A análise das trajetórias, a verificação da cinemática e a resposta precisa aos comandos da GUI evidenciaram a eficácia e a confiabilidade do programa. Dessa forma, pode-se afirmar com segurança que o sistema automatizado desenvolvido consegue desempenhar as suas tarefas de forma adequada e consistente.

Capítulo 7

Conclusões

Visão geral da tese e resultados finais

Com base no desenvolvimento deste trabalho, cujo objetivo é desenvolver um equipamento para operações de estampagem incremental por ponto único, abrangendo o projeto da estrutura mecânica, o projeto mecânico e o projeto de automação, é possível concluir assertivamente que os objetivos propostos foram alcançados com êxito. Os três projetos resultaram na construção de um protótipo real, embora não finalizado, representando um marco significativo no avanço de equipamentos compactos, elétricos e silenciosos na área da estampagem incremental por ponto único. Mais detalhes sobre o projeto completo, incluindo documentação, *designs* e código-fonte, encontra-se no repositório do projeto no GitHub¹.

O processo SPIF é uma solução eficiente e económica para a produção de peças complexas em diferentes materiais e escalas. Ele supera os métodos convencionais e é ideal para pequenas séries e produtos personalizados. O SPIF pode ser implementado em diversas máquinas, como fresadoras adaptadas, robôs em série e máquinas dedicadas, cada uma com suas próprias vantagens. No entanto, uma máquina dedicada ao SPIF oferece um desempenho superior, embora exija um investimento inicial maior. A integração entre a estampagem incremental e outros processos, como a impressão 3D, reduz o tempo de comercialização, os custos e oferece maior liberdade de *design*. No contexto académico, é essencial que a máquina seja silenciosa, compacta e elétrica para facilitar a sua convivência com outras máquinas.

No projeto da estrutura mecânica, foram realizadas análises e definições arquiteturais, bem como otimização das dimensões dos braços do robô e análise cinemática direta e indireta. A conceção do sistema cinemático para atender ao requisito inicial de realizar a conformação sempre normal à superfície da chapa exigiu uma pesquisa exaustiva de soluções utilizadas na indústria para movimento em três eixos. Outro requisito que teve impacto na conceção do sistema cinemático foi a área de trabalho e as forças envolvidas no processo. Isso levou à adoção de um robô do tipo *D2 Delta robot* para os eixos y e z e atuadores lineares para o eixo x.

No projeto mecânico, foi realizado o *design* dos braços, a adaptação de componentes para o sistema de suporte do punção de conformação e a seleção e dimensionamento de motores, redutores e atuador linear. Também foram realizadas simulações e elaborada a configuração estrutural.

¹Link para o repositório do projeto: https://github.com/TatianaResend/SPIF-A_v2

O *design* dos braços foi objeto de especial atenção no que diz respeito às forças envolvidas no processo. A seleção dos vários elementos que compõem os braços teve em conta o uso de elementos padronizados e componentes de fácil maquinagem e montagem.

No que diz respeito ao sistema de suporte da punção de conformação, verificou-se a necessidade de possuir um amplo conhecimento prático no domínio da conceção de máquinas-ferramenta para elaborar uma proposta viável. Uma vez mais, os principais requisitos a considerar são as forças envolvidas no processo e a utilização de elementos normalizados.

A seleção e dimensionamento dos motores, redutores e atuadores lineares mostraram-se aspectos fundamentais do projeto, por serem responsáveis pelo movimento e força da máquina.

A estrutura foi concebida para acomodar os braços e a área de trabalho, permitindo a adição ou integração dos restantes elementos da máquina. Neste caso, uma construção fechada revela-se mais interessante, uma vez que a estabilidade da estrutura é mais importante do que a acessibilidade ideal à peça.

No âmbito do projeto de automação, foi elaborado o esquema elétrico, selecionados os principais componentes e abordados os componentes de segurança. Nesta etapa, a seleção dos componentes de potência e segurança foi realizada com base numa extensa pesquisa de mercado, tendo em conta as suas características e a relação preço/qualidade.

O foco principal foi dado ao controlo de movimento, com a implementação da cinemática, definição da trajetória e comunicação com o controlador. A implementação da cinemática teve em consideração a arquitetura da máquina e o requisito da área de trabalho. A definição da trajetória envolveu a determinação do número de impulsos e o posicionamento incremental, com o objetivo de criar uma trajetória bem definida, o que é essencial no processo SPIF.

Com o objetivo de tornar o equipamento acessível a um público mais alargado e simplificar a sua operação, foi desenvolvida uma interface gráfica do utilizador. Esta interface permite trabalhar em dois modos: modo manual e modo automático. Ela possibilita ao utilizador deslocar a ponta da ferramenta para pontos específicos, realizar rotinas de “homing” ou conformar uma peça através de um código-G gerado por um *software CAM*.

A concretização das metas, nomeadamente a implementação dos dois projetos — mecânico e de automação — enfrentou desafios e exigiu iterações e modificações ao longo do projeto para alcançar soluções viáveis, práticas e de baixa complexidade. O custo também se apresentou como um fator restritivo, considerando que a SPIF-A_v2 será construída a curto prazo.

No que diz respeito ao protótipo realizado, encontra-se numa fase evolutiva situada entre o conceito inicial e o produto finalizado, permitindo assim testar e validar a viabilidade técnica, funcionalidade e desempenho da máquina. No âmbito do projeto mecânico, o protótipo não incorpora os redutores nem os atuadores lineares, impedindo a realização do processo de estampagem em chapa. No entanto, foi possível realizar a montagem individual de cada braço e a subsequente união dos mesmos no sistema, o que permite testar e validar a viabilidade técnica da cinemática da máquina, bem como verificar a capacidade da máquina em cumprir com a área de trabalho definida nos requisitos do projeto.

No que se refere ao projeto de automação, o modo manual foi implementado com sucesso, porém o modo automático não está completo. Os esforços foram direcionados

para garantir o correto funcionamento do modo manual e criar uma base para a futura implementação do modo automático. Dessa forma, é possível selecionar o modo desejado, inserir e enviar as coordenadas e obter uma resposta por parte do motor.

Trabalho futuro

Levando tudo isto em consideração, sugere-se para trabalhos futuros:

- Continuação do projeto com a compra e implementação dos componentes restantes no projeto mecânico, ou seja, os redutores e o atuadores lineares.
- No projeto de automação, recomenda-se a aquisição de componentes de segurança, como barreira imaterial, e o fechamento do acesso pelos demais lados, a fim de evitar ferimentos.
- Além disso, é importante a interpretação, por parte do controlador, dos sinais de alarme provenientes dos *drivers* em caso de perda de passos no motor, bem como a implementação do acionamento de rearme em situações de aperto da botoeira de emergência ou quebra da barreira imaterial.
- A implementação de sensores de fim de curso para realizar a rotina de *Homing* e a calibração dos eixos.
- No modo automático, é recomendada a leitura por parte do controlador de um ficheiro .txt com as coordenadas (x, y, z) da trajetória definida pelo código-G.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

Referências

- [1] D. Afonso, R. A. de Sousa e R. Torcato. “Integration of design rules and process modelling within SPIF technology-a review on the industrial dissemination of single point incremental forming”. Em: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 94.9-12 (out. de 2017), pp. 4387–4399. DOI: 10.1007/s00170-017-1130-3.
- [2] D. G. Afonso. “Industrial applicability of single point incremental forming : functional and energetic approach”. Universidade de Aveiro, 2017. URL: <https://ria.ua.pt/handle/10773/21534>.
- [3] S. Marabuto et al. “Finding the Best Machine for SPIF Operations - a Brief Discussion”. Em: *Key Engineering Materials* 473 (mar. de 2011), pp. 861–868. DOI: 10.4028/www.scientific.net/kem.473.861.
- [4] R. A. Sousa et al. “SPIF-A: on the development of a new concept of incremental forming machine”. Em: *Structural Engineering and Mechanics* 49 (2014), pp. 645–660.
- [5] S. Marabuto. “Desenvolvimento de uma maquina para operacoes de estampagem incremental”. Universidade de Aveiro, 2010. URL: <http://hdl.handle.net/10773/4517>.
- [6] W. Emmens, G. Sebastiani e A. van den Boogaard. “The technology of Incremental Sheet Forming—A brief review of the history”. Em: *Journal of Materials Processing Technology* 210.8 (jun. de 2010), pp. 981–997. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2010.02.014.
- [7] G. Torres. “Development of an interface for operation and monitoring of an incremental forming machine”. Universidade de Aveiro, 2017. URL: <https://ria.ua.pt/handle/10773/23696>.
- [8] L. Edward. *Apparatus and process for incremental dieless forming*. Patent US3342054 (1964). ISBN: 1,930,56210/1.
- [9] A. K. Behera et al. “Single point incremental forming: An assessment of the progress and technology trends from 2005 to 2015”. Em: *Journal of Manufacturing Processes* 27 (jun. de 2017), pp. 37–62. DOI: 10.1016/j.jmapro.2017.03.014.
- [10] J. Jeswiet, E. Hagan e A. Szekeres. “Forming parameters for incremental forming of aluminium alloy sheet metal”. Em: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* 216.10 (out. de 2002), pp. 1367–1371. DOI: 10.1243/095440502320405458.

- [11] M. Ham e J. Jeswiet. “Single point incremental forming”. Em: *International Journal of Materials and Product Technology* 32.4 (2008), p. 374. DOI: 10.1504/ijmpt.2008.022141.
- [12] A. Fiorentino et al. “On forces, formability and geometrical error in metal incremental sheet forming”. Em: *International Journal of Materials and Product Technology* 40.3/4 (2011), p. 277. DOI: 10.1504/ijmpt.2011.039936.
- [13] R. Senthil e A. Gnanavelbabu. “Numerical Analysis on Formability of AZ61A Magnesium Alloy by Incremental Forming”. Em: *Procedia Engineering* 97 (2014), pp. 1975–1982. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.12.352.
- [14] P. Gupta e J. Jeswiet. “Observations on Heat Generated in Single Point Incremental Forming”. Em: *Procedia Engineering* 183 (2017), pp. 161–167. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.04.060.
- [15] P. I. Borkar e L. H. Patil. “Web Information Retrieval Using Genetic Algorithm-Particle Swarm Optimization”. Em: *International Journal of Future Computer and Communication* (2013), pp. 595–599. DOI: 10.7763/ijfcc.2013.v2.234.
- [16] L. M. Abualigah e A. T. Khader. “Unsupervised text feature selection technique based on hybrid particle swarm optimization algorithm with genetic operators for the text clustering”. Em: *The Journal of Supercomputing* 73.11 (abr. de 2017), pp. 4773–4795. DOI: 10.1007/s11227-017-2046-2.
- [17] L. M. Q. Abualigah. *Feature Selection and Enhanced Krill Herd Algorithm for Text Document Clustering*. Springer International Publishing, 2019. DOI: 10.1007/978-3-030-10674-4.
- [18] J. R. Duflou et al. “Single point incremental forming: state-of-the-art and prospects”. Em: *International Journal of Material Forming* 11.6 (dez. de 2017), pp. 743–773. DOI: 10.1007/s12289-017-1387-y.
- [19] J. Jeswiet et al. “Asymmetric Single Point Incremental Forming of Sheet Metal”. Em: *CIRP Annals* 54.2 (2005), pp. 88–114. DOI: 10.1016/s0007-8506(07)60021-3.
- [20] N. G. Azevedo et al. “Lubrication aspects during Single Point Incremental Forming for steel and aluminum materials”. Em: *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing* 16.3 (mar. de 2015), pp. 589–595. DOI: 10.1007/s12541-015-0079-0.
- [21] M. Skjødt. “Rapid Prototyping by Single Point Incremental Forming of Sheet Metal”. English. Dez. de 2008. ISBN: 978-87-89502-81-6.
- [22] M. Skjoedt et al. “Multi Stage Strategies for Single Point Incremental Forming of a Cup”. Em: *International Journal of Material Forming* 1.S1 (mar. de 2008), pp. 1199–1202. DOI: 10.1007/s12289-008-0156-3.
- [23] J. Allwood, N. Houghton e K. Jackson. “The Design of an Incremental Sheet Forming Machine”. Em: *Advanced Materials Research* 6-8 (mai. de 2005), pp. 471–478. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amr.6-8.471.

- [24] J. R. Duflou, A. Szekeres e P. Vanherck. “Force Measurements for Single Point Incremental Forming: An Experimental Study”. Em: *Advanced Materials Research* 6-8 (mai. de 2005), pp. 441–448. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amr.6-8.441.
- [25] M. Rauch et al. “Tool path programming optimization for incremental sheet forming applications”. Em: *Computer-Aided Design* 41.12 (dez. de 2009), pp. 877–885. DOI: 10.1016/j.cad.2009.06.006.
- [26] K. Jackson, J. Allwood e M. Landert. “Incremental forming of sandwich panels”. Em: *Journal of Materials Processing Technology* 204.1-3 (ago. de 2008), pp. 290–303. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2007.11.117.
- [27] M. Durante et al. “The influence of tool rotation on an incremental forming process”. Em: *Journal of Materials Processing Technology* 209.9 (mai. de 2009), pp. 4621–4626. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2008.11.028.
- [28] A. V. Bael et al. “Forming Limit Predictions for Single-Point Incremental Sheet Metal Forming”. Em: *AIP Conference Proceedings*. AIP, 2007. DOI: 10.1063/1.2729530.
- [29] P. Tayebi et al. “Formability study and metallurgical properties analysis of FSWed AA 6061 blank by the SPIF process”. Em: *SN Applied Sciences* 3.3 (fev. de 2021). DOI: 10.1007/s42452-021-04378-x.
- [30] T. Schafer e R. D. Schraft. “Incremental sheet metal forming by industrial robots”. Em: *Rapid Prototyping Journal* 11.5 (dez. de 2005), pp. 278–286. DOI: 10.1108/13552540510623585.
- [31] H. Meier, O. Dewald e J. Zhang. “Development of a Robot-Based Sheet Metal Forming Process”. Em: *steel research international* 76.2-3 (fev. de 2005), pp. 167–170. DOI: 10.1002/srin.200505990.
- [32] G. S. Racz, V. S. Oleksik e R. E. Breaz. “Incremental forming – CAE/CAM approaches and results”. Em: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 591.1 (ago. de 2019), p. 012065. DOI: 10.1088/1757-899x/591/1/012065.
- [33] M. Amino et al. “Current Status of “Dieless” Amino’s Incremental Forming”. Em: *Procedia Engineering* 81 (2014), pp. 54–62. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.09.128.
- [34] N. V. Reddy, R. Lingam e J. Cao. “Incremental Metal Forming Processes in Manufacturing”. Em: *Handbook of Manufacturing Engineering and Technology*. Springer London, set. de 2014, pp. 411–452. DOI: 10.1007/978-1-4471-4670-4_45.
- [35] X. Yang et al. “D2 Delta Robot Structural Design and Kinematics Analysis”. Em: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 274 (dez. de 2017), p. 012009. DOI: 10.1088/1757-899x/274/1/012009.
- [36] Rudmin. *Parallel Axis Tripteron Concept*. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=6EtXycVGJg4>. (Acedido em: 01.02.2023).
- [37] X. Yang et al. “D2 Delta Robot Structural Design and Kinematics Analysis”. Em: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 274 (dez. de 2017), p. 012009. DOI: 10.1088/1757-899x/274/1/012009.
- [38] SolidWorks Corporation. *SOLIDWORKS*. n.d. URL: <https://www.solidworks.com/>. (Acedido em: 15.02.2023).

- [39] "SKF". *NKIB 5906 - rolamentos de rolos de agulhas combinados*. URL: <https://www.skf.com/pt/products/rolling-bearings/roller-bearings/needle-roller-bearings/combined-needle-roller-bearings/productid-NKIB%205906>. (Acedido em: 15.03.2023).
- [40] Instructables. *Tools and Tool Holders*. n.d. URL: <https://www.instructables.com/Tools-and-Tool-Holders/>. (Acedido em: 27.03.2023).
- [41] Sandes Blanes. *HSK-A32 - PORTA FERRAMENTAS FORMA B (WELDON)*. n.d. URL: <https://sanchesblanes.com.br/busca?s=HSK-A32>. (Acedido em: 14.04.2023).
- [42] J. Fernandes. “Projeto e controlo de uma máquina de estampagem incremental compacta”. Universidade de Aveiro, 2021. URL: https://github.com/TatianaResend/SPIF-A_v2/blob/main/Ma%C3%A7quina_Estampagem_Incremental_Compacta_JorgeFernandes_104580%5B6921%5D.pdf.
- [43] G. Russel. *The Pros and Cons to Different Gear Motors*. Nov. de 2016. URL: <https://www.gordonrussell.com/articles-10-the-pros-and-cons-to-different-gear-motors#>. (Acedido em: 25.03.2023).
- [44] J. Nazzaro, P. Hannifin e E. Eitel. “The Benefits of Gearboxes — and When to Pick Integrated Gearmotors | Machine Design”. Em: *MachineDesign* (abr. de 2013). URL: <https://www.machinedesign.com/motors-drives/article/21833641/the-benefits-of-gearboxes-and-when-to-pick-integrated-gearmotors>. (Acedido em: 25.03.2023).
- [45] Tecnopolyer. *Serie ABR / Tecnopolyer*. n.d. URL: <https://www.tecnopolyer.es/producto/serie-abr>. (Acedido em: 14.04.2023).
- [46] Tecnopolyer. *Serie AER / Tecnopolyer*. n.d. URL: <https://www.tecnopolyer.es/producto/serie-aer>. (Acedido em: 15.04.2023).
- [47] Tecnopolyer. *Serie AE / Tecnopolyer*. n.d. URL: <https://www.tecnopolyer.es/producto/serie-ae>. (Acedido em: 15.04.2023).
- [48] J. Romanishin, J. M. Bern e D. Rus. “Self-Reconfiguring Robotic Gantry Powered by Modular Magnetic Lead Screws”. Em: *2022 International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. IEEE, mai. de 2022. DOI: [10.1109/icra46639.2022.9811863](https://doi.org/10.1109/icra46639.2022.9811863).
- [49] W. Gastreich. *What is a linear motion control?* Set. de 2018. URL: <https://realpars.com/motion-control/>. (Acedido em: 25.04.2023).
- [50] Unimotion. *Linear unit MTJ40 ECO / Unimotion*. n.d. URL: <https://unimotion.eu/product/MTJ40ECO>. (Acedido em: 27.04.2023).
- [51] Unimotion. *Linear unit MTV40 / Unimotion*. n.d. URL: <https://unimotion.eu/product/MTV40>. (Acedido em: 27.04.2023).
- [52] A. Sharma et al. “Structural analysis and optimization of machine structure for the measurement of cutting force for wood”. Em: *Alexandria Engineering Journal* 64 (fev. de 2023), pp. 833–846. DOI: [10.1016/j.aej.2022.09.030](https://doi.org/10.1016/j.aej.2022.09.030).

- [53] D. Nedelcu, M.-D. Nedeloni e D. Daia. “The kinematic and dynamic analysis of the crank mechanism with solidworks motion”. Em: *Proceedings of the 11th WSEAS International Conference on Signal Processing, Computational Geometry and Artificial Vision*. Vol. 2011. 2011, pp. 245–250.
- [54] World Material. *ASTM SAE AISI 1045 Carbon Steel Material*. n.d. URL: <https://www.theworldmaterial.com/astm-sae-aisi-1045-carbon-steel-material/>. (Acedido em: 13.05.2023).
- [55] A. A. Siyad. “Design and development of IP based automatic bottle inspection system using controllino maxi automation”. University of Malaya, 2019. URL: <http://studentsrepo.um.edu.my/11449/>.
- [56] CONTROLLINO. *CONTROLLINO Instruction Manual*. 2018. URL: <https://www.controllino.com/wp-content/uploads/2019/02/CONTROLLINO-Instruction-Manual-V1.5-2018-12-14.pdf>. (Acedido em: 15.05.2023).
- [57] STEPPERONLINE. *User Manual CL86T(V3.0) Closed Loop Stepper Driver*. 2017. URL: <https://www.omc-stepperonline.com/download/CL86T.pdf>. (Acedido em: 17.05.2023).
- [58] H. L. C. Lopes. “Aplicação de conceitos e regras de segurança de máquinas na concepção e fabrico de uma prensa elétrica”. Faculdade de Engenharia do Porto, 2019. URL: <https://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/123447>.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

Apêndice A

Otimização do comprimento de braços em função do binário

A otimização dos braços é um processo iterativo. O modelo baseia-se na premissa de que existem dois braços do tipo RR planar, equidistantes do centro, com uma distância de 45 mm. Como o código desenvolvido procura o estudo do binário, a cinemática implementada considera cada braço separadamente, tornando-a mais simples. A área de trabalho é um trapézio com uma altura de 100 mm, um comprimento maior de 200 mm (na parte superior) e uma parede inclinada a 75 graus.

Para iniciar o processo iterativo, são definidos valores iniciais: um comprimento de braço L1 de 120 mm e um comprimento de braço L2 de 150 mm. Além disso, podem ser consideradas variáveis de deslocamento nos eixos y e z da área de trabalho.

O código desenvolvido produz um *output* na forma de uma lista com 15 linhas. Cada linha representa o binário de cada motor num ponto específico. A primeira linha corresponde ao ponto (0,0,0) da máquina, seguida por quatro linhas para os cantos da área de trabalho e, por fim, dez linhas para pontos internos da área de trabalho.

Realizando iterações adicionais com diferentes valores iniciais, é possível otimizar o comprimento dos braços relativamente ao binário, considerando a área de trabalho e medidas realistas para uma implementação adequada.

```
clc, clear, close all
addpath("Lib\")

figure(1); grid on ;hold on; axis equal
% -----
% Arms configuration:
L1=120;
L2=150;

% Work area configuration:
y_AreaWork = -280;
x_AreaWork = -100;
DrawTrapeze (x_AreaWork,y_AreaWork,75)

% -----
x1=-25;      % x initial arm 1
x2=25;       % x initial arm 2

jtypes=[0 0 0];
[P_b, F]=seixos3(3);
colors = 'wbg';
```

```

BinM1 = [];
BinM2 = [];

P_x = 0; P_y = y_AreaWork;

% Point (0,0,0)
[H_eix1,h_eix1,P_eix1,...]
[H_eix2,h_eix2,P_eix2] = InitRobot(P_x,P_y,x1,x2,L1,L2);
BinM1 = [BinM1 ; abs(P_y) + 3*abs(P_x-x1)];
BinM2 = [BinM2 ; abs(P_y) + 3*abs(P_x-x2)];

% Top left corner
P_x = x_AreaWork + 200; P_y = y_AreaWork;
CurrentRobot(P_x,P_y,x1,x2,L1,L2,H_eix1,h_eix1,P_eix1,H_eix2,h_eix2,
P_eix2)
BinM1 = [BinM1 ; abs(P_y) + 3*abs(P_x-x1)];
BinM2 = [BinM2 ; abs(P_y) + 3*abs(P_x-x2)];

% Top right corner
P_x = x_AreaWork ; P_y = y_AreaWork;
CurrentRobot(P_x,P_y,x1,x2,L1,L2,H_eix1,h_eix1,P_eix1,H_eix2,h_eix2,
P_eix2)
BinM1 = [BinM1 ; abs(P_y) + 3*abs(P_x-x1)];
BinM2 = [BinM2 ; abs(P_y) + 3*abs(P_x-x2)];

% Bottom left corner
P_x = x_AreaWork + 200 - (100 / tan(1.3)); P_y = y_AreaWork - 100;
CurrentRobot(P_x,P_y,x1,x2,L1,L2,H_eix1,h_eix1,P_eix1,H_eix2,h_eix2,
P_eix2)
BinM1 = [BinM1 ; abs(P_y) + 3*abs(P_x-x1)];
BinM2 = [BinM2 ; abs(P_y) + 3*abs(P_x-x2)];

% Bottom right corner
P_x = x_AreaWork + (100 / tan(1.3)); P_y = y_AreaWork - 100;
CurrentRobot(P_x,P_y,x1,x2,L1,L2,H_eix1,h_eix1,P_eix1,H_eix2,h_eix2,
P_eix2)
BinM1 = [BinM1 ; abs(P_y) + 3*abs(P_x-x1)];
BinM2 = [BinM2 ; abs(P_y) + 3*abs(P_x-x2)];

for i = 1:10
    P_x = randi([-61 61]);
    P_y = randi([(y_AreaWork - 100) y_AreaWork]);
    CurrentRobot(P_x,P_y,x1,x2,L1,L2,H_eix1,h_eix1,P_eix1,H_eix2,h_eix2,
P_eix2)
    BinM1 = [BinM1 ; abs(P_y) + 3*abs(P_x-x1)];
    BinM2 = [BinM2 ; abs(P_y) + 3*abs(P_x-x2)];
end

BinM12 = [BinM1 BinM2]

```

Código A.1: Código para otimização do cumprimento de braços em função do binário

No código, são utilizadas funções como "InitRobot" e "CurrentRobot", responsáveis pelo cálculo da cinemática e pela representação gráfica. Essas funções podem ser encontradas no repositório GitHub SPIF-A_V2 / Configurations study.

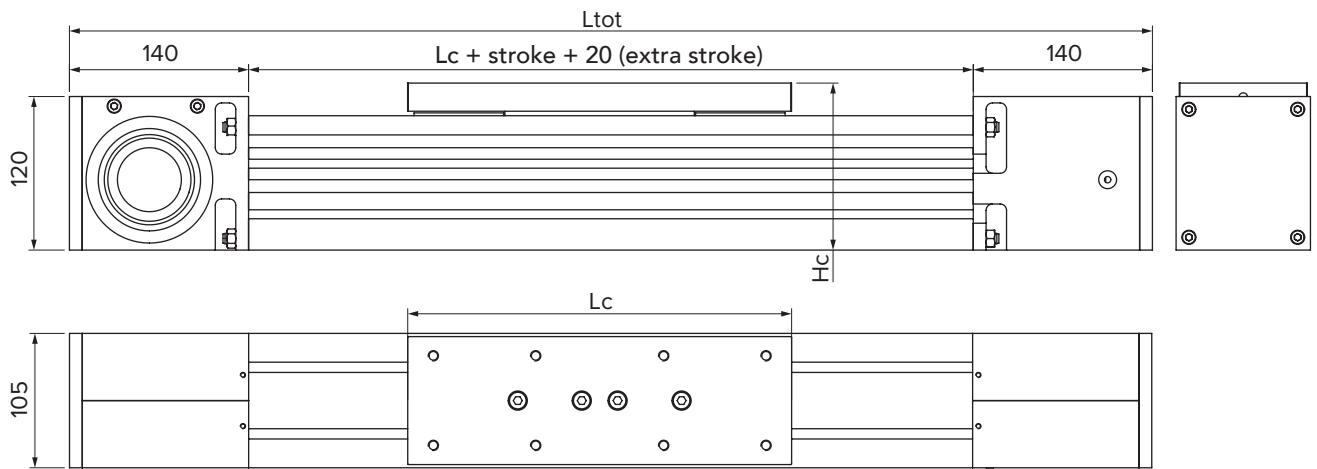
Apêndice B

Características do módulo linear de correia TLM105G

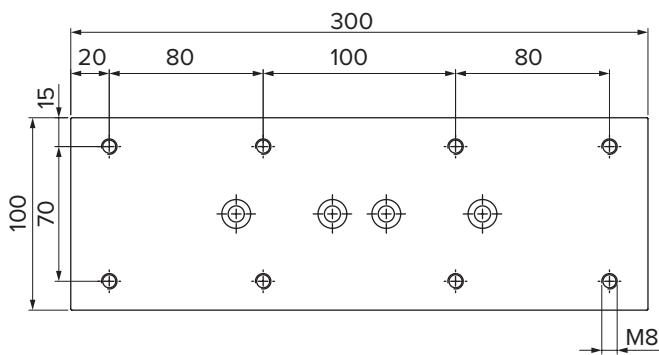
O presente apêndice contém a ficha técnica do módulo linear de correia TLM105G, fornecendo informações detalhadas sobre este componente específico. Esta documentação oferece uma visão abrangente e precisa das especificações e funcionalidades do referido módulo.

Destacam-se, na ficha técnica, as principais características técnicas, tais como a sua capacidade de carga, velocidade máxima, curso útil e outros parâmetros imprescindíveis para uma avaliação aprofundada do produto. Adicionalmente, são disponibilizados pormenores relativos às dimensões físicas do mencionado módulo.

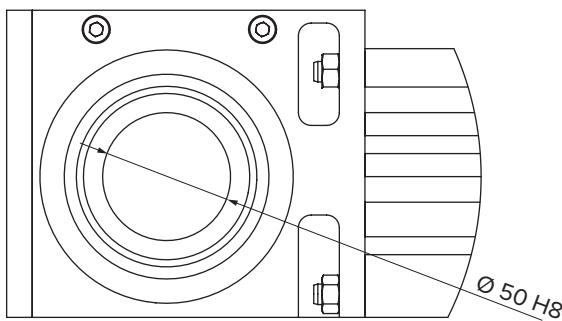
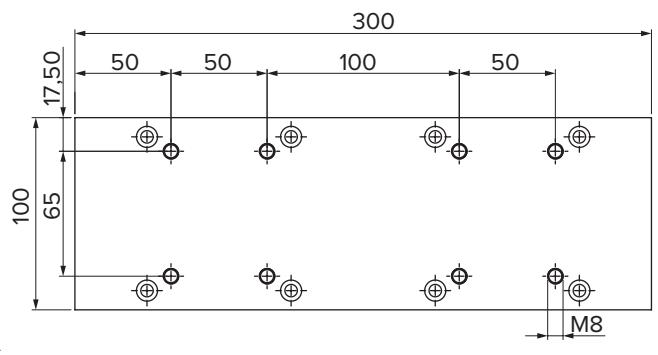
2.8 TLM105G



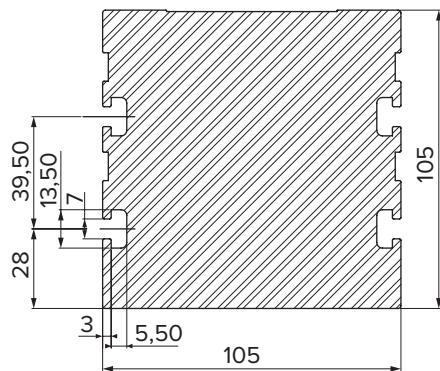
CARRIAGE WITHOUT A PROTECTION PLATE



CARRIAGE WITH A PROTECTION PLATE



Option for customised head boring, depending on the construction of the head itself



GENERAL DIMENSIONS

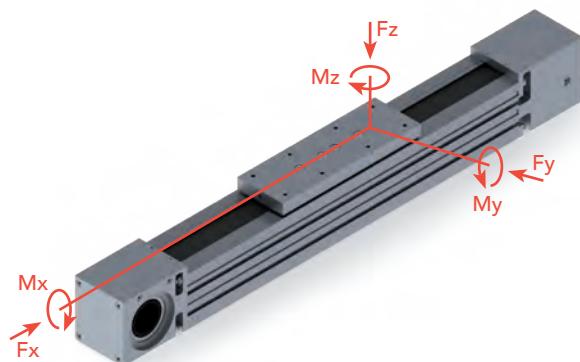
	Without a protection plate	With a protection plate
Total carriage length Lc [mm]	300	300
Total guide length L _{tot} [mm]	Stroke + 600	Stroke + 600
Total carriage height Hc [mm]	130,5	139,5

LOAD CAPACITY BLOCK/RAIL BELT SYSTEM

TLM105G

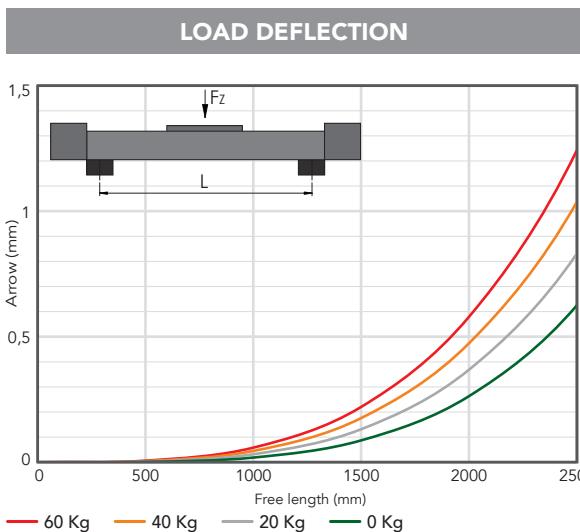
	Theoretic		Maximum recommended	
	Static	Dynamic	Static	Dynamic
Fx [N]	5752	4314	4601	3451
Fy [N]	72980	52960	14596	6355
Fz [N]	72980	52960	14596	6355
Mx [Nm]	840	630	168	76
My [Nm]	3394	2463	679	296
Mz [Nm]	3394	2463	679	296

To be considered as non-combined loads.



GENERAL TECHNICAL DATA	
Repeatability [mm]	± 0,1
Maximum speed [m/s]	3
Maximum acceleration [m/s ²]	30
Maximum stroke [mm]	7580
Typical load applied [Kg]*	60
Profile section [mm]	105 x 105
JX profile moment of inertia [cm ⁴]	472,55
JY profile moment of inertia [cm ⁴]	596,2

*Load applied in the centre of the carriage, which does not generate moments in the 3 main directions. Stroke 1 metre, speed 0.5 m/s, acceleration 0.5 m/s².



LINEAR GUIDE	
Type of block	HGH25CA
C0 static load coefficient [KN]	36,49
Cdin dynamic load coefficient [KN]	26,48

TOOTHED BELT	
Type of belt	AT10-50
Type of pulley	Z28 AT10
Pulley primitive diameter Dp [mm]	89,13
Linear displacement per pulley revolution [mm]	280
Maximum belt traction [N]	7670

MECHANICAL PROPERTIES		
	Without a protection plate	With a protection plate
Weight of carriage [kg]	5,3	6,9
Weight of stroke guide 0 [kg] *	18,8	20,4
Weight of guide every 100 mm stroke [kg]		2,15

*including weight of carriage

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

Apêndice C

Esquema elétrico da SPIF-A_v2

O esquema elétrico desempenha um papel fundamental no entendimento do funcionamento e controlo do sistema. A sua elaboração foi realizada com o objetivo de proporcionar uma representação visual clara e precisa de todos os componentes elétricos e eletrónicos envolvidos, assim como das suas interconexões. Através desta apresentação sistemática e organizada, busca-se viabilizar uma análise minuciosa e uma compreensão aprofundada da arquitetura e do circuito elétrico adotado.



EPLAN GmbH & Co. KG

An der alten Ziegelei 2
40789 Monheim am Rhein
Phone +49 (0)2173 - 39 64 - 0

Company / customer

Project description

Job number

Commission

SPIF-A_v2: Máquina de estampagem incremental

IEC_bas003

EPLAN

Manufacturer (company)

EPLAN GmbH & Co. KG

Path

EPLAN sample project

Project name

SPIF

Make

Type

Place of installation

Responsible for project

Part feature

Created on

29/03/2023

Edit date

27/05/2023

by (short name) TatianaR

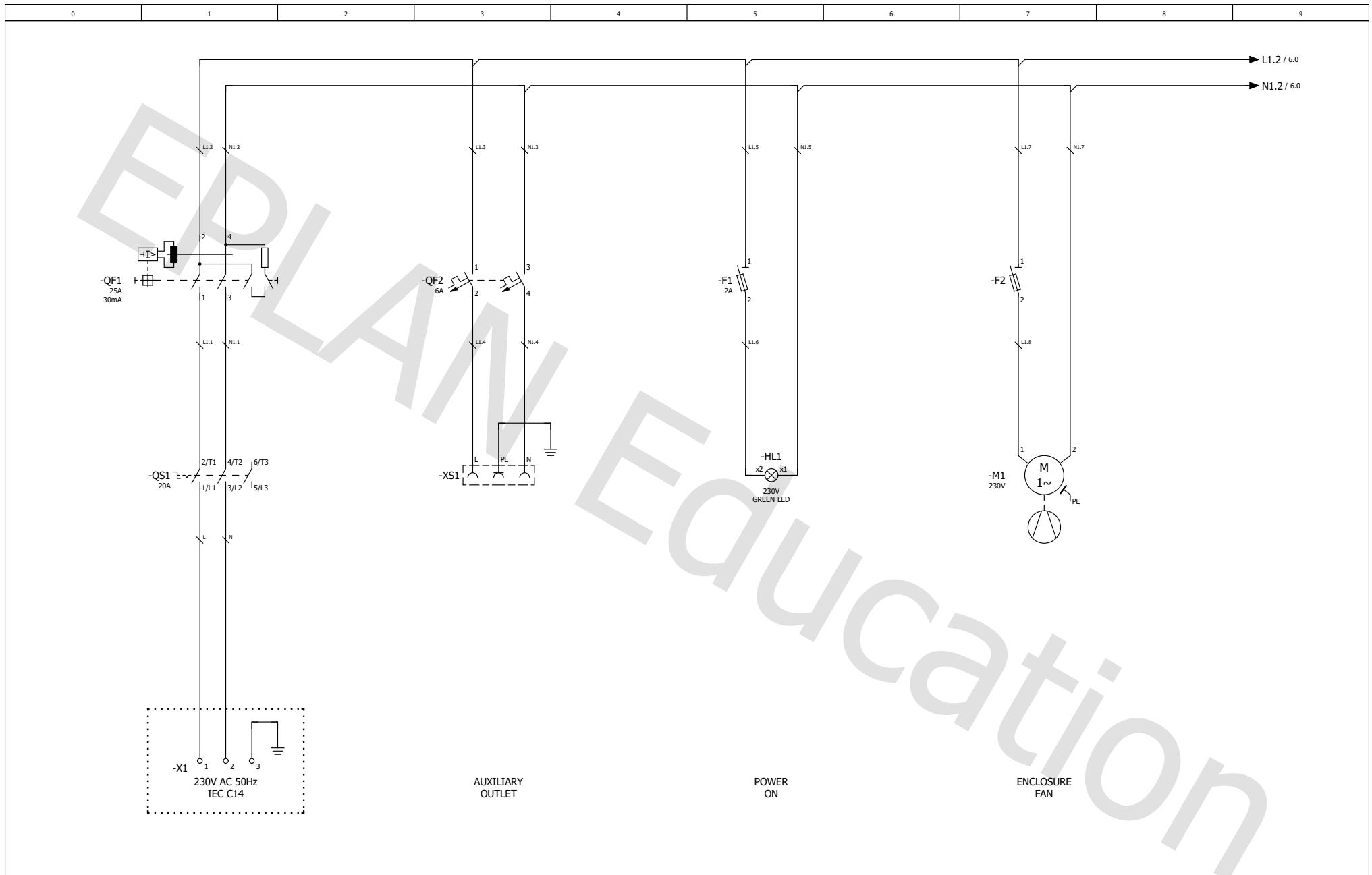
Number of pages 16

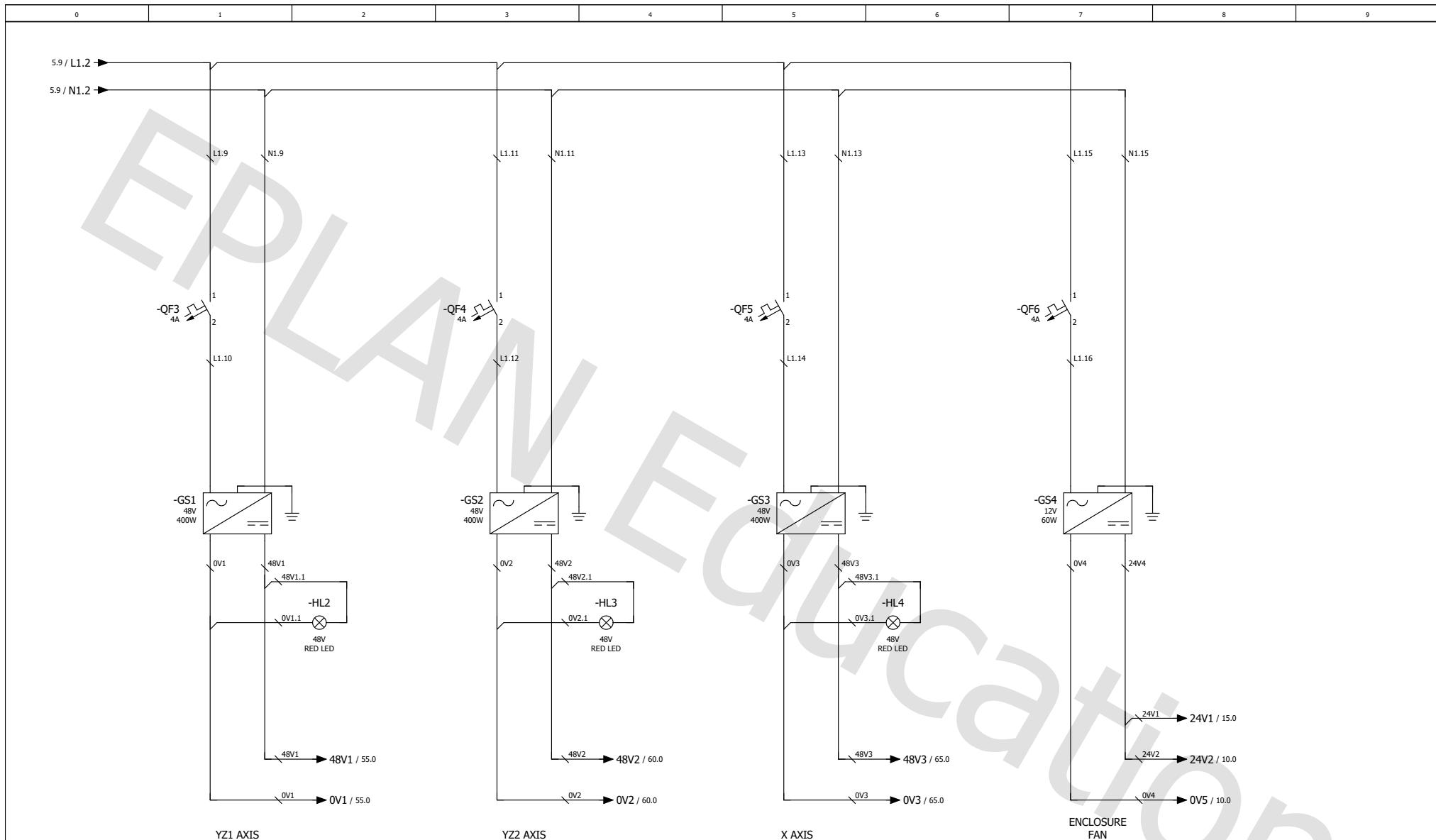
			Project name SPIF	Job number IEC_bas003	EPLAN GmbH & Co. KG		Title page	=	&EAA
			SPIF-A_v2: Máquina de estampagem incremental	Drawing number					Administrative documents
Modification	Date	Name	Creator TatianaR	Approved by		Date 17/03/2022 Ed.	EPL	+	Page 1

Table of contents

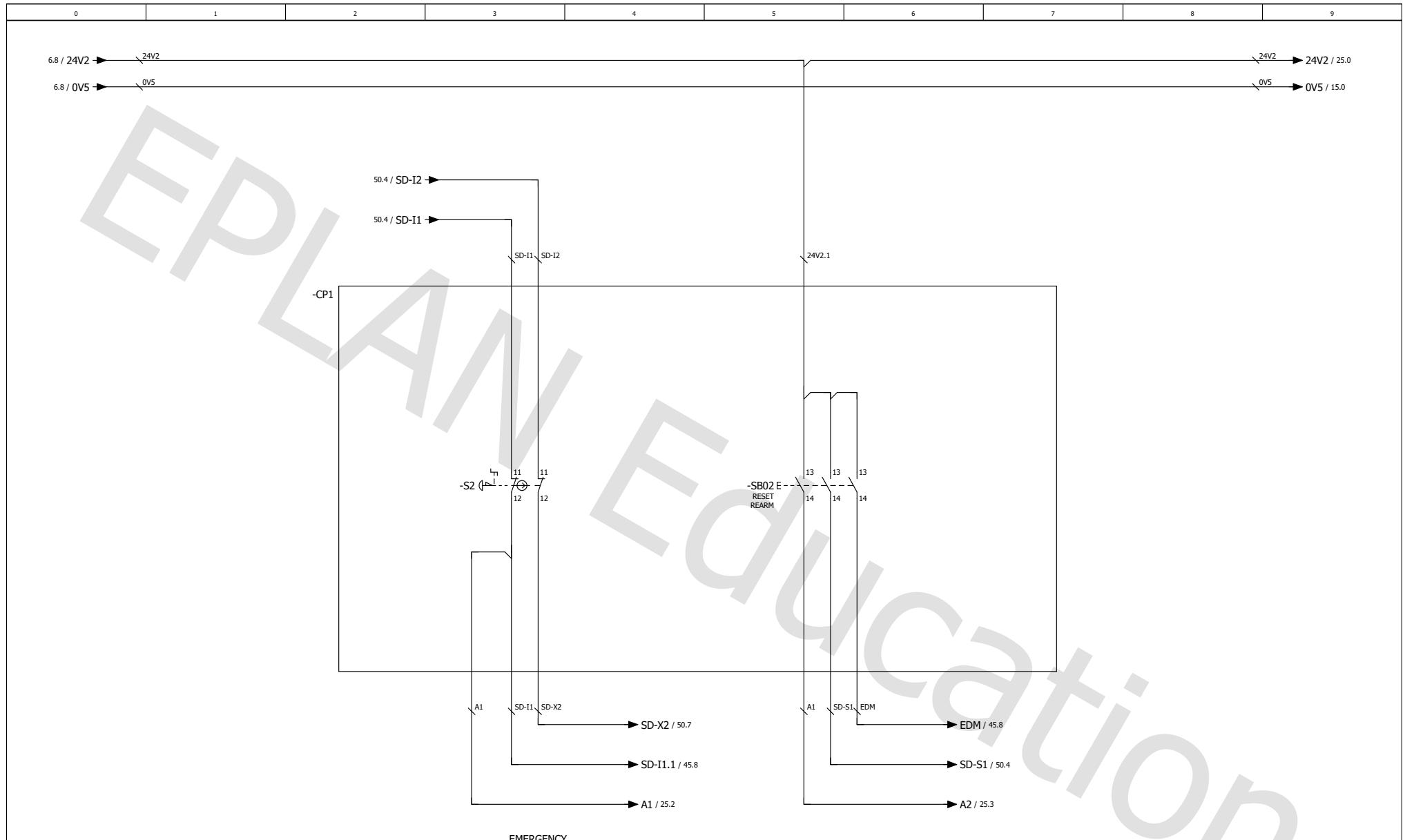
Column X: An automatically generated page was edited

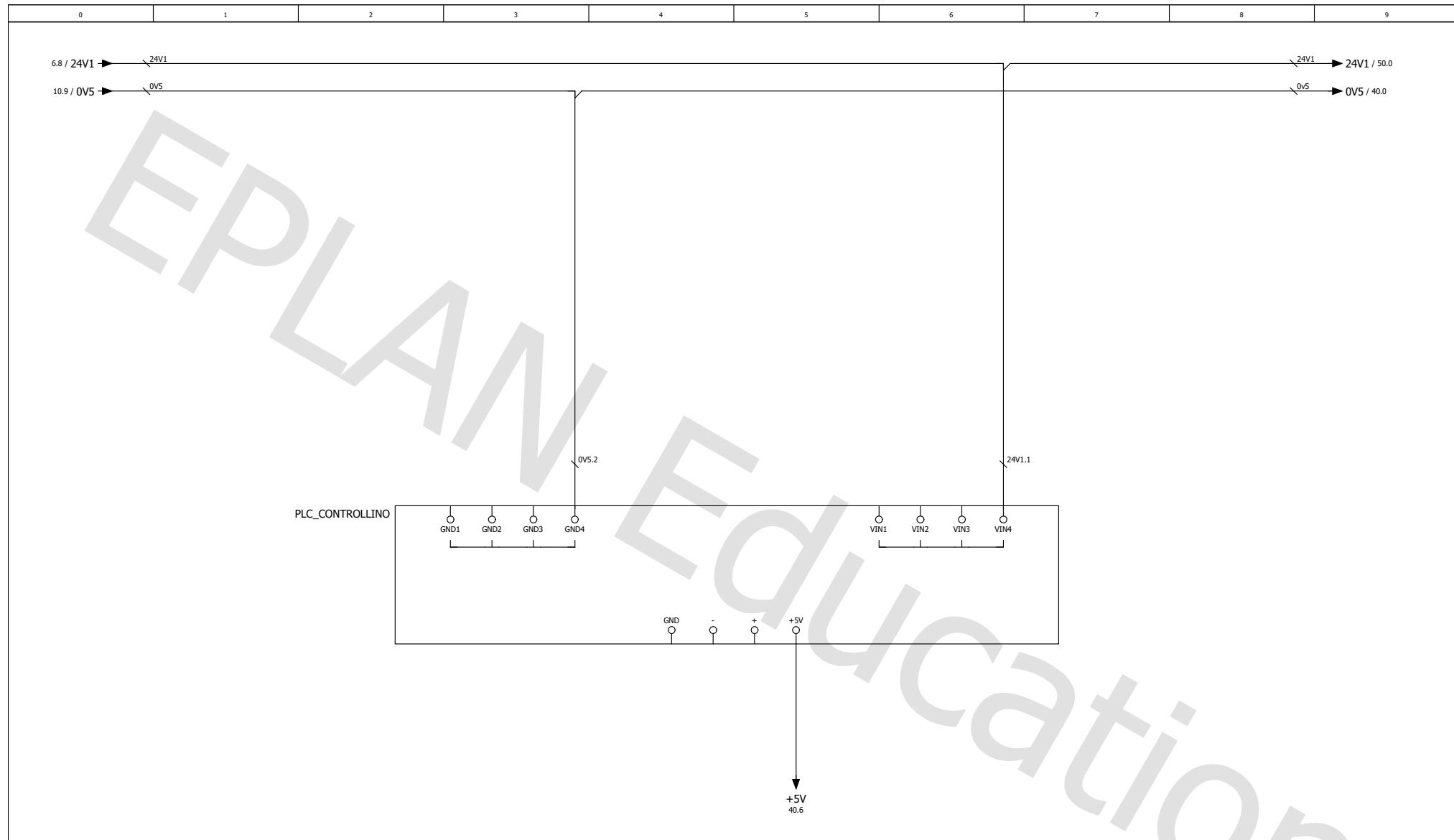
F06_001

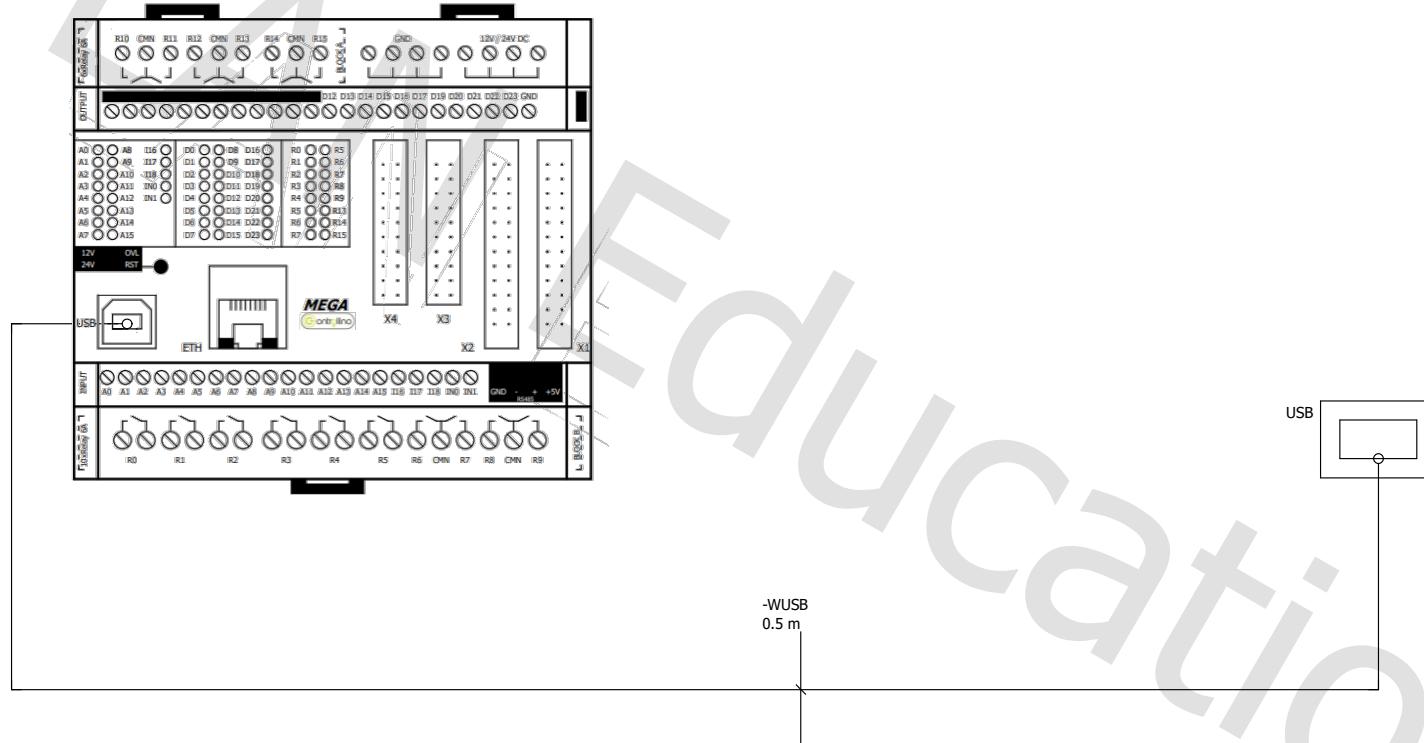


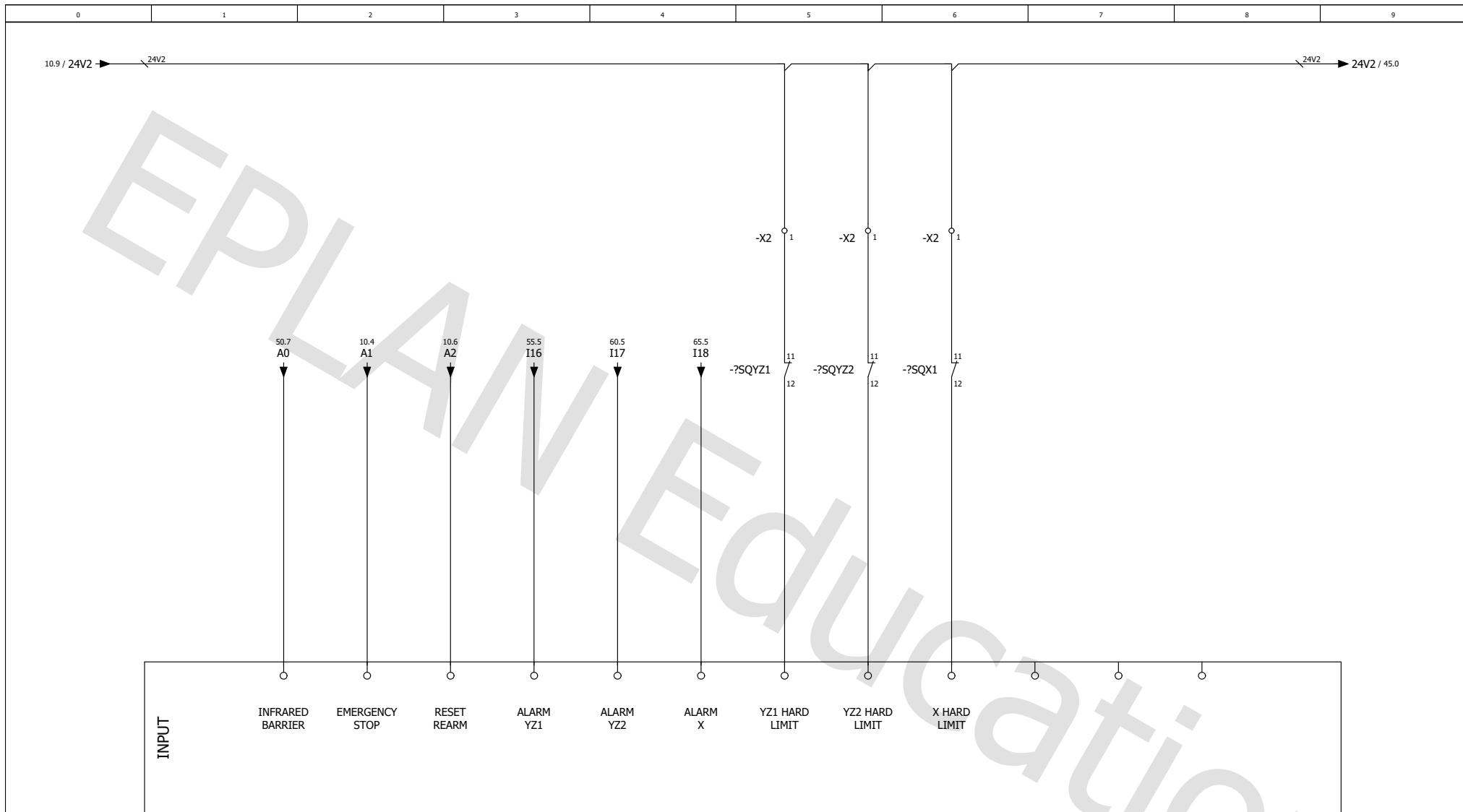


		Date	27/05/2023	EPLAN	EPLAN GmbH & Co. KG	Power distribution	=
		Ed.	TatianaR	SPIF-A_v2: Máquina de estampagem incremental			+
Modification	Date	Name	Original	Appr.	Replacement of	Replaced by	IEC_bas003





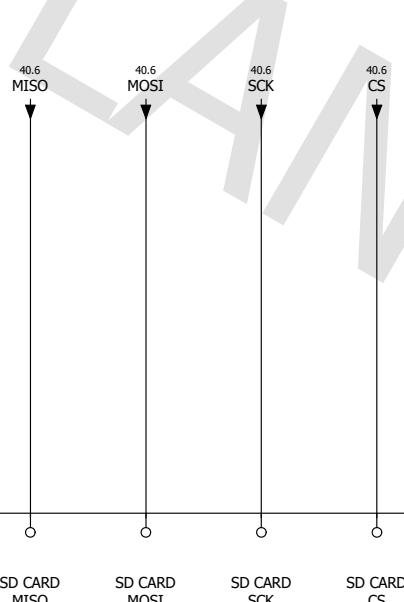




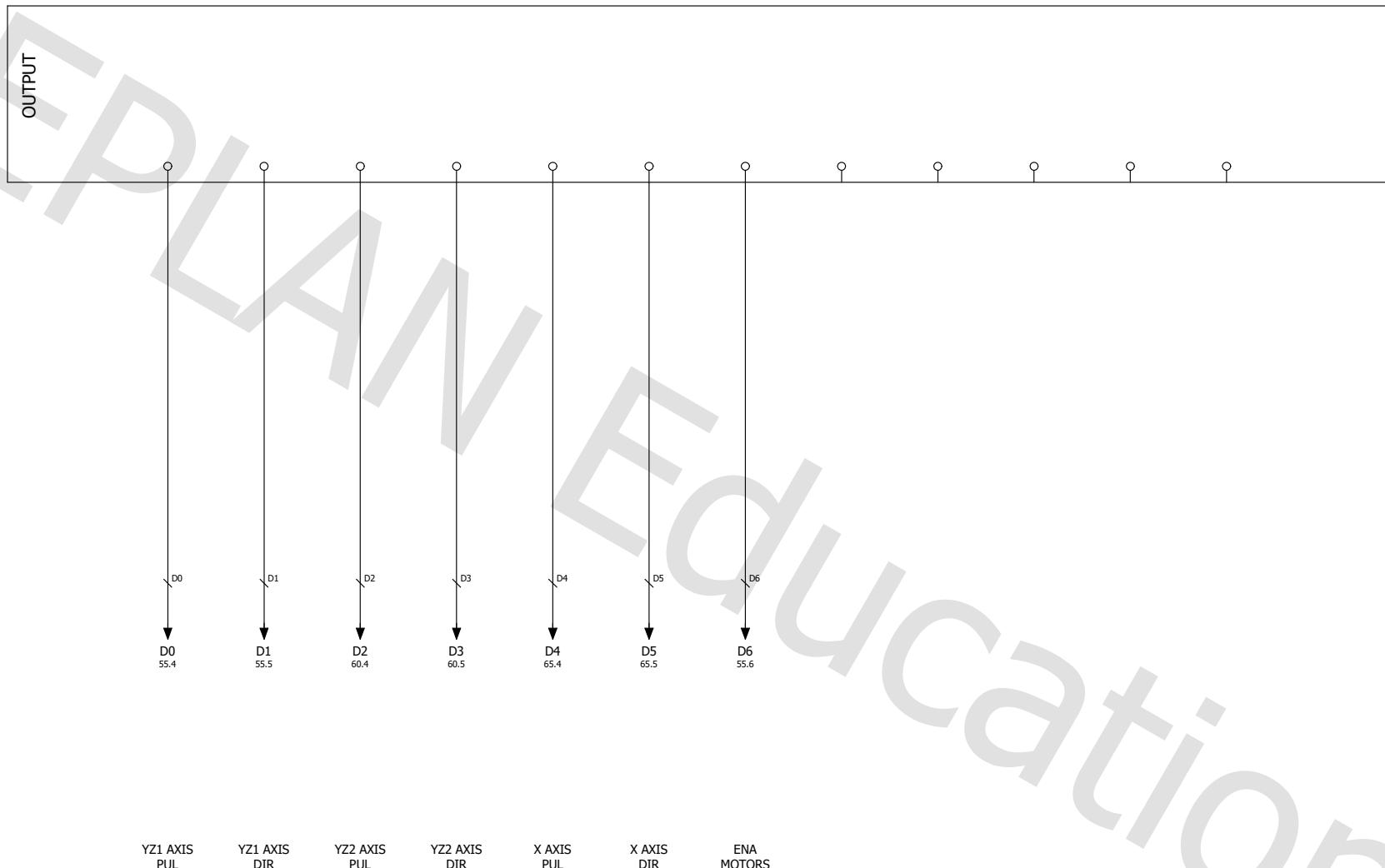
		Date	27/05/2023	EPLAN	EPLAN GmbH & Co. KG	Input controller	=
		Ed.	TatianaR	SPIF-A_v2: Máquina de estampagem incremental			+
		Appr.		Replacement of	Replaced by	IEC_bas003	Page 25

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

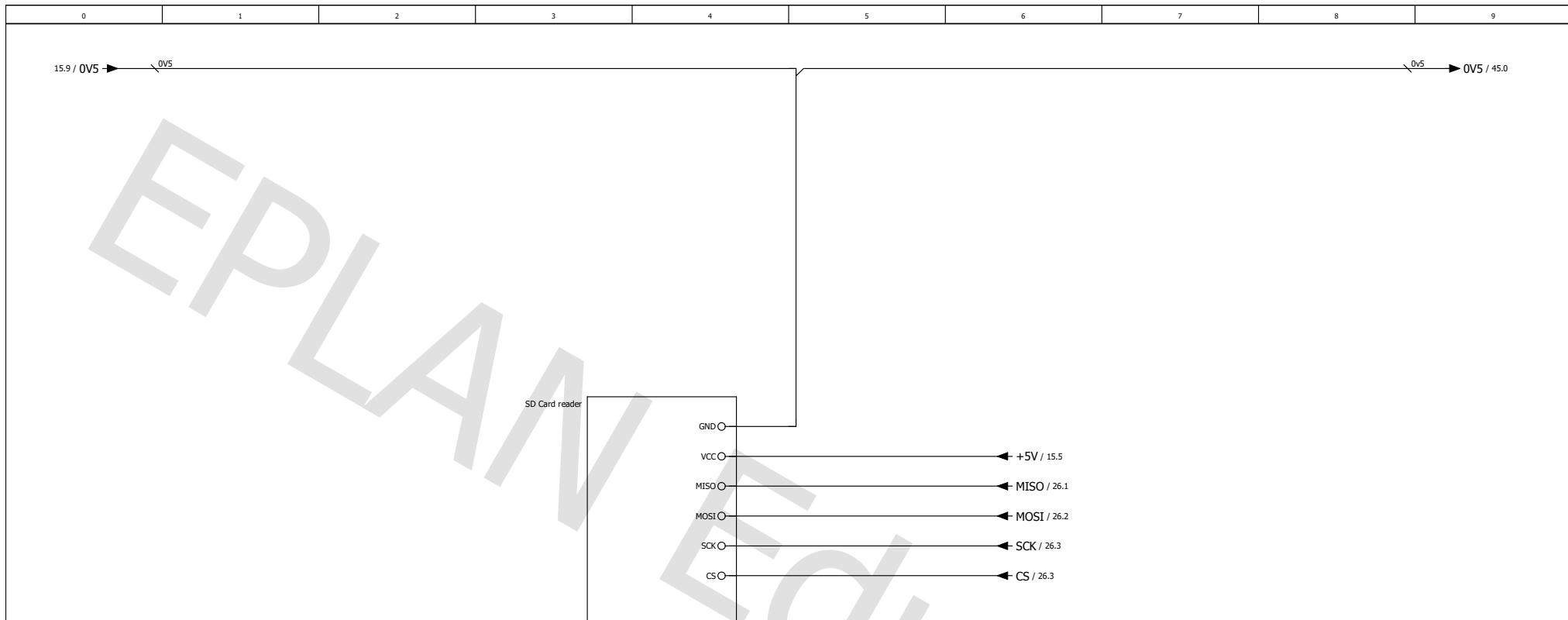
INPUT

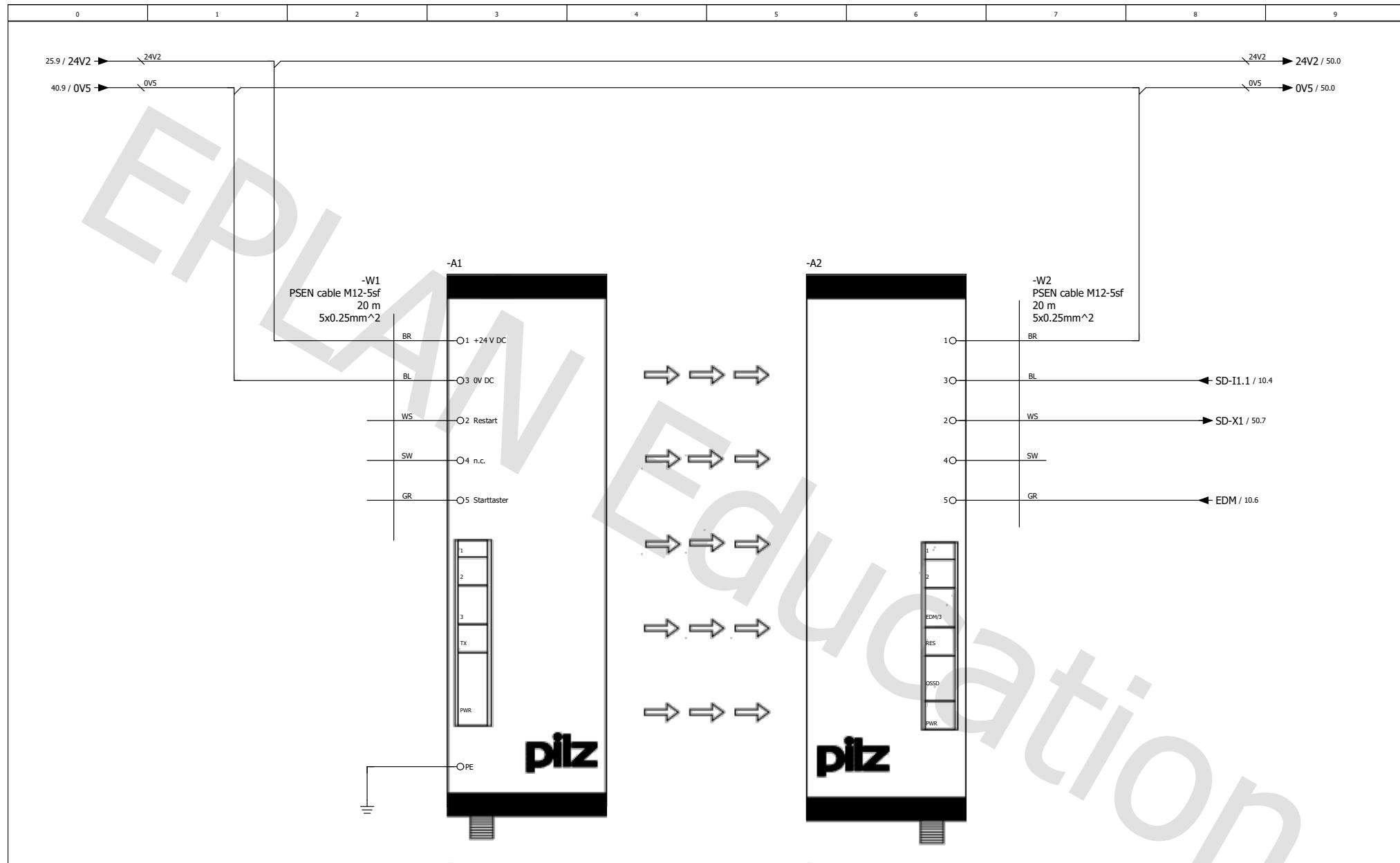


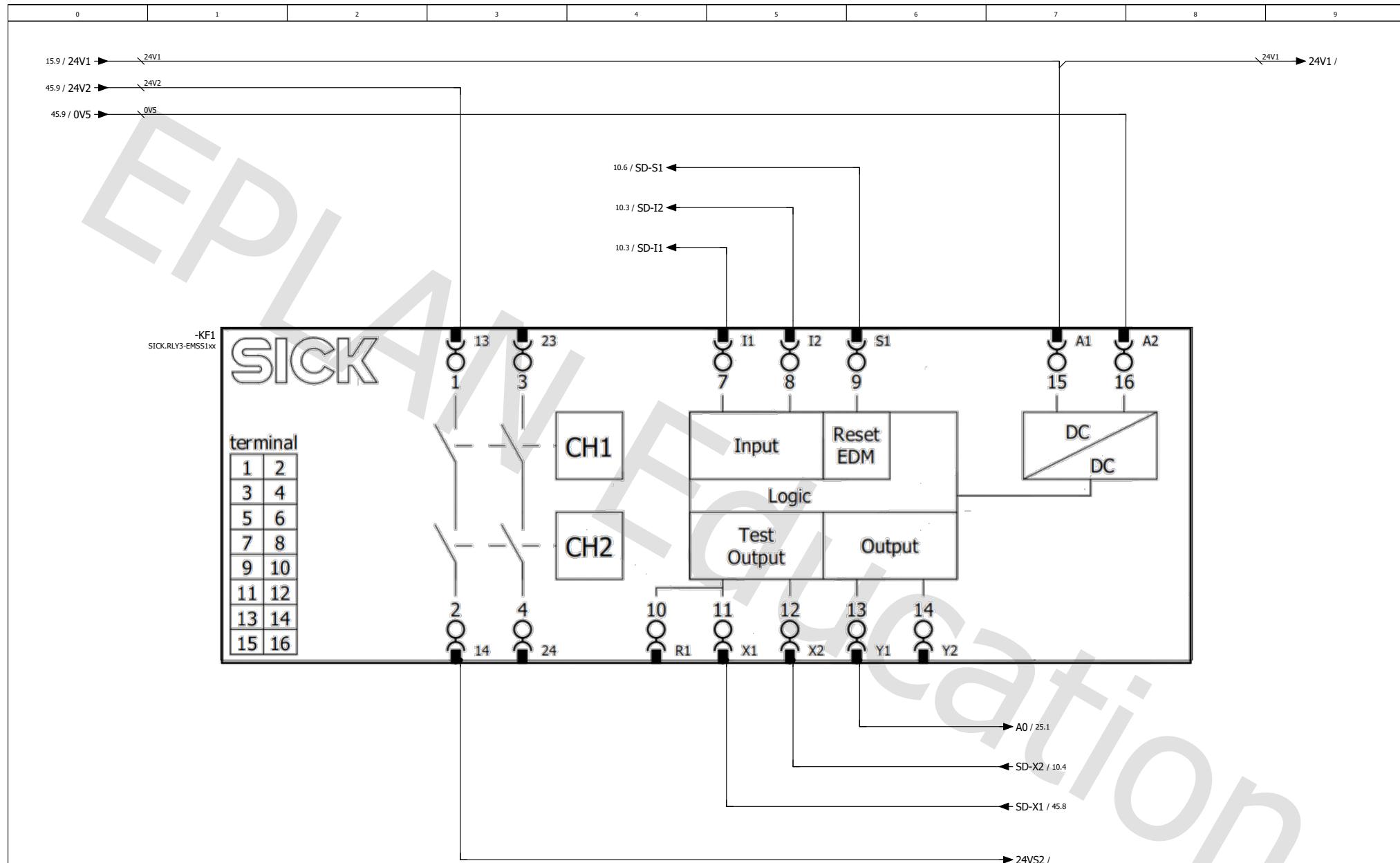
		Date	27/05/2023	EPLAN	EPLAN GmbH & Co. KG	Input controller	=	
		Ed.	TatianaR	SPIF-A_v2: Máquina de estampagem incremental			+	
		Appr.						
Modification	Date	Name	Original	Replacement of	Replaced by		IEC_bas003	Page 26
								Page 9 / 16

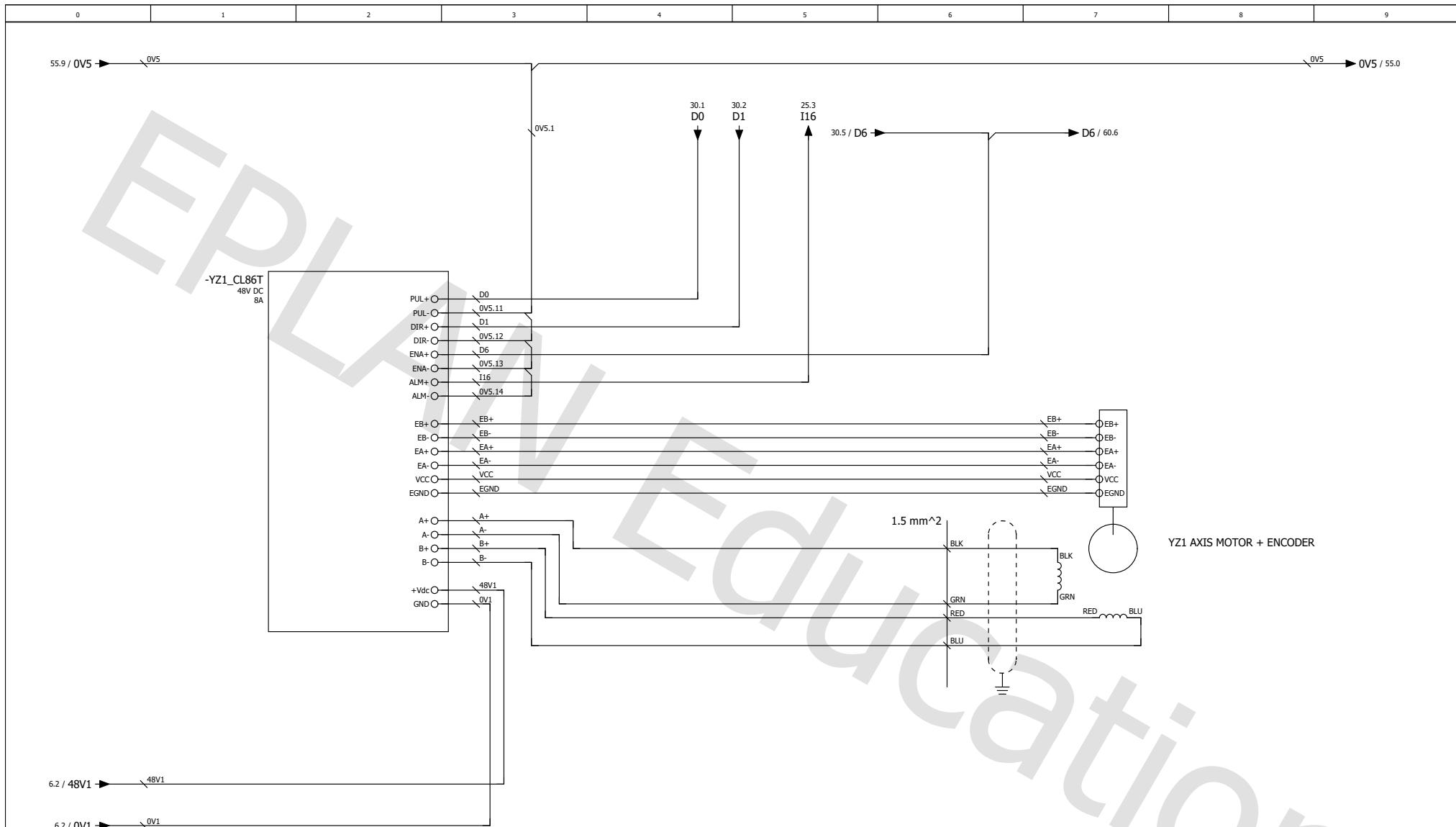


		Date	27/05/2023	EPLAN	EPLAN GmbH & Co. KG	Output controller	=
		Ed.	TatianaR	SPIF-A_v2: Máquina de estampagem incremental			+
		Appr.		Replacement of	Replaced by	IEC_bas003	Page 30

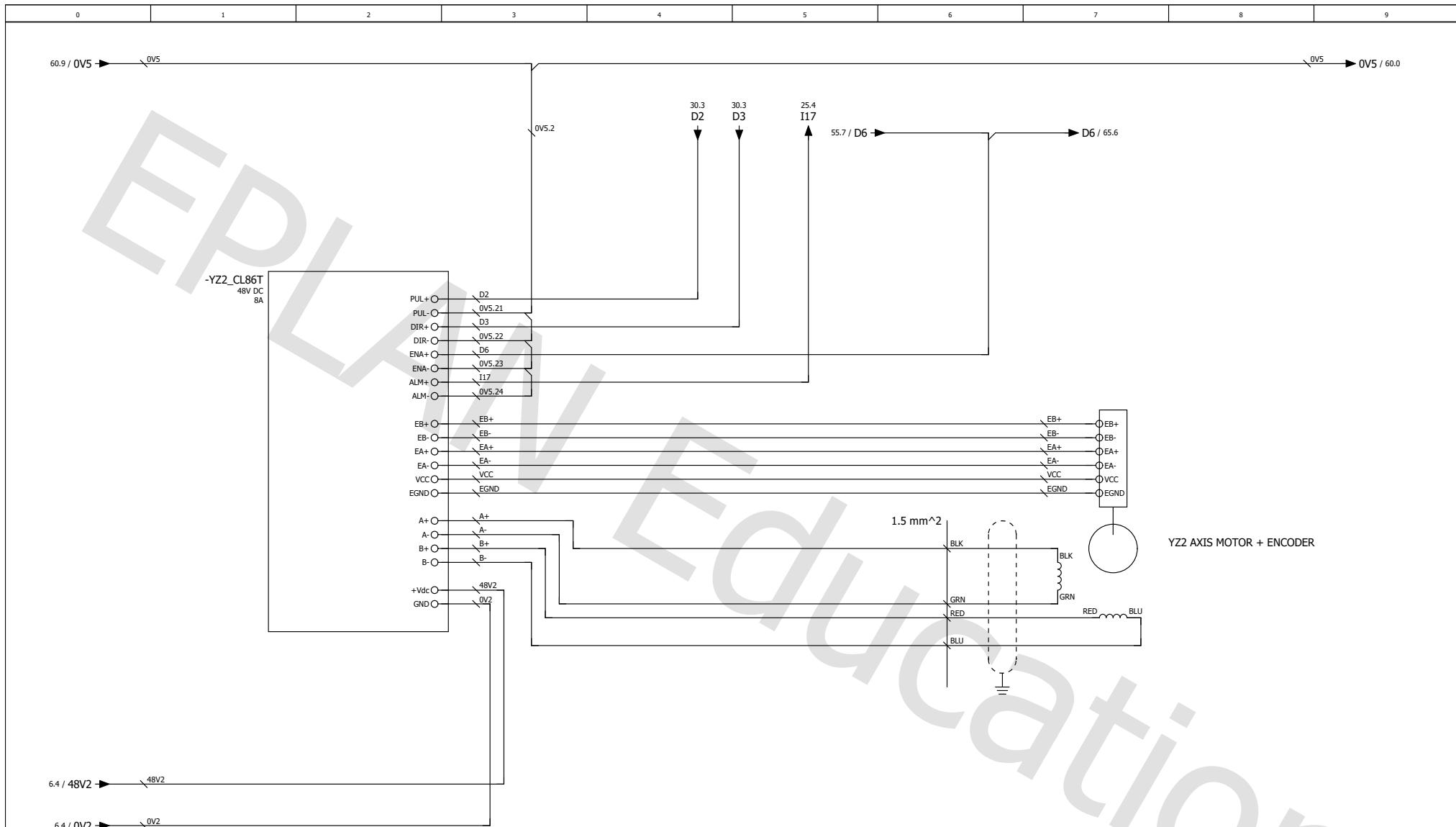




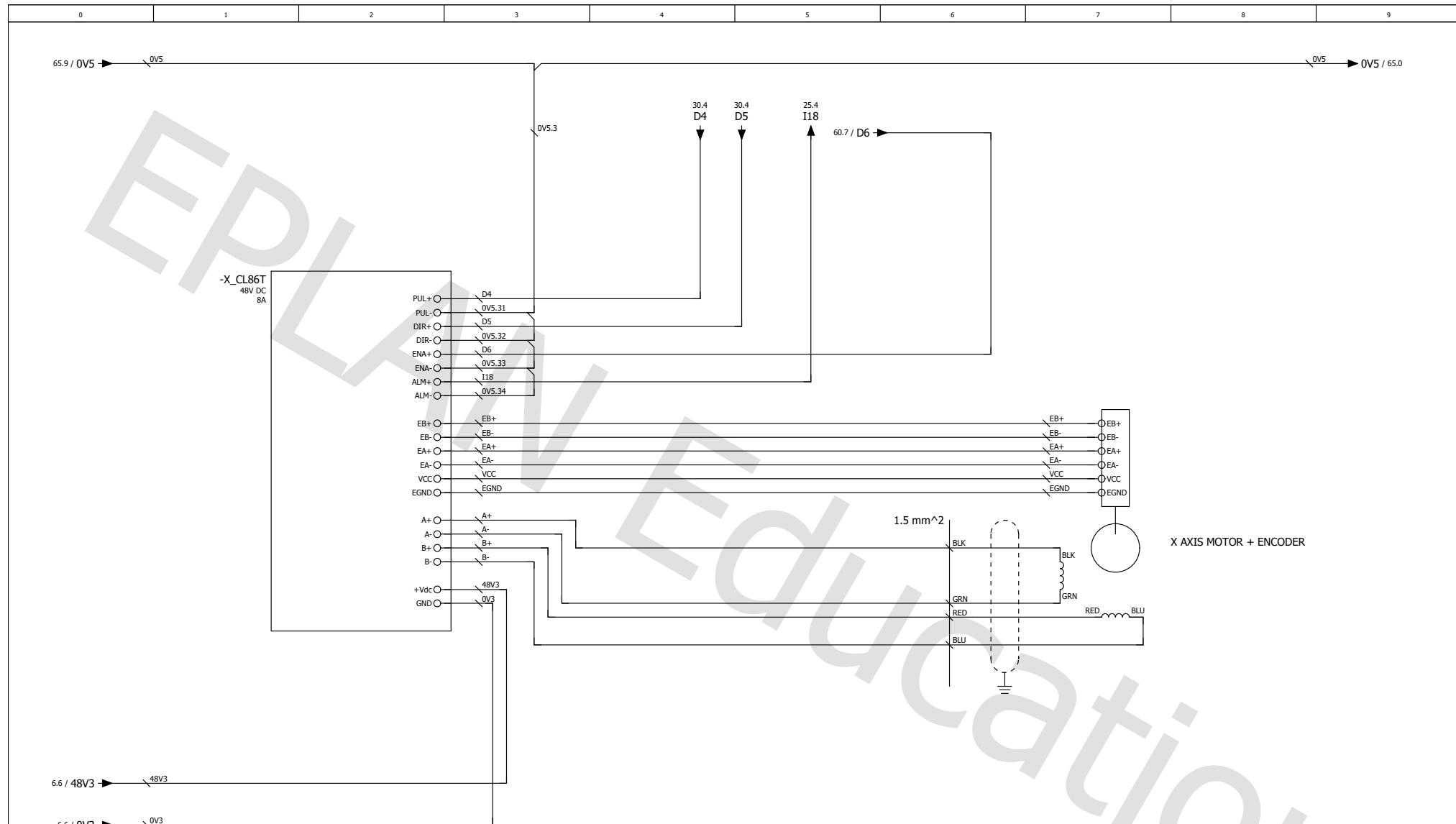




Date	27/05/2023	EPLAN	EPLAN GmbH & Co. KG	YZ1 axis drives	=
Ed.	TatianaR				+
Appr.		SPIF-A_v2: Máquina de estampagem incremental			
Modification	Date	Name	Original	Replacement of	Replaced by
					IEC_bas003
					Page 55
					Page 14 / 16



		Date	27/05/2023	EPLAN	EPLAN GmbH & Co. KG	YZ2 axis drives	=
		Ed.	TatianaR	SPIF-A_v2: Máquina de estampagem incremental			+
		Appr.		Replacement of	Replaced by	IEC_bas003	Page 60



Date	27/05/2023	EPLAN	EPLAN GmbH & Co. KG	X axis drives	=
Ed.	TatianaR				+
Appr.		SPIF-A_v2: Máquina de estampagem incremental			
Modification	Date	Name	Original	Replacement of	Replaced by
					IEC_bas003
					Page 65 / 16 / 16

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

Apêndice D

User Manual CL86T(V3.0) Closed Loop Stepper Driver

O presente apêndice contém a ficha técnica do *Driver* CL86T, fornecendo informações detalhadas sobre este componente específico. Esta documentação oferece uma visão abrangente e precisa das especificações e funcionalidades do referido módulo.

Destacam-se, na ficha técnica, as principais características técnicas, tais como tensão de alimentação, corrente de saída, comunicação, resolução de passo e outros parâmetros imprescindíveis para uma avaliação aprofundada do produto. Adicionalmente, são disponibilizados pormenores relativos às dimensões físicas do mencionado *drive*.



User Manual

CL86T(V3.0)

Closed Loop Stepper Driver



#7 Zhongke Road, Jiangning, Nanjing, China

T: 0086-2587156578

©2017 All Rights Reserved

Web site: www.omc-stepperonline.com

E-Mail: sales@stepperonline.com

CL86T

Closed-loop Stepper Driver

24~80VDC, 8.2A Peak, Closed-loop, No Tuning

1. Introductions

This Closed-loop Stepper Driver offers an alternative for applications requiring high performance and high reliability when the servo was the only choice, while it remains cost-effective. The system includes a 2-phase stepper motor combined with a fully digital, high performance drive and an internal encoder which is used to close the position, velocity and current loops in real time, just like servo systems. It combines the best of servo and stepper motor technologies, and delivers unique capabilities and enhancements over both, while at a fraction of the cost of a servo system.

1.1 Features

- Closed-loop, eliminates loss of synchronization
- Broader operating range – higher torque and higher speed
- Reduced motor heating and more efficient
- Smooth motion and super-low motor noise
- Do not need a high torque margin
- No Tuning and always stable
- Quick response, no delay and almost no settle time
- High torque at starting and low speed, high stiffness at standstill
- Offer servo-like performance at a much lower cost

1.2 Applications

Its great feature of quick response and no hunting make this Closed-loop Stepper Driver ideal for applications such as bonding and vision systems in which rapid motions with a short distance are required and hunting would be a problem. And it is ideal for applications where the equipment uses a belt-drive mechanism or otherwise has low rigidity and you don't want it to vibrate when stopping.

2. Specifications

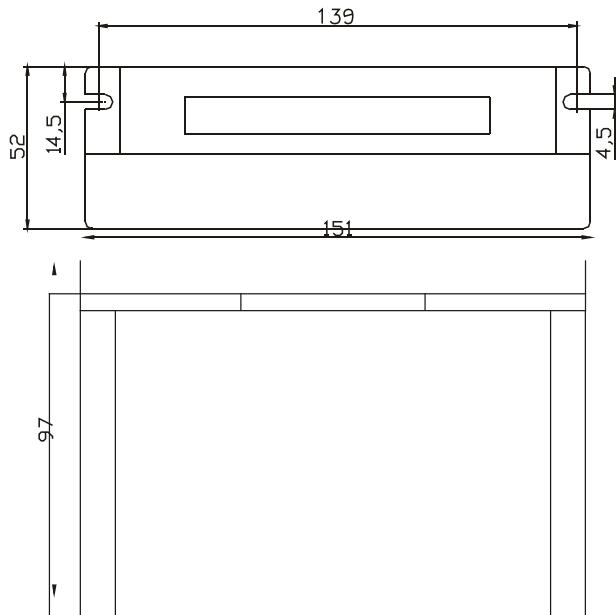
2.1 Electrical Specifications

Parameter	Min	Typical	Max	Unit
Input Voltage	24	48	80	VDC
Output Current	0	-	8.2	A
Pulse Input Frequency	0	-	200	kHz
Logic Signal Current	7	10	16	mA
Isolation Resistance	500	-	-	MΩ

2.2 Operating Environment

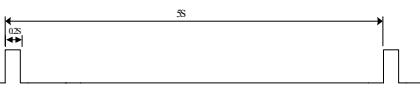
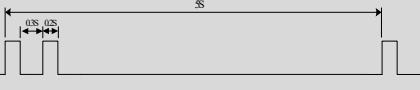
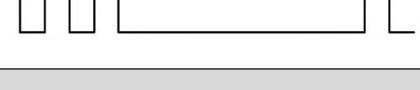
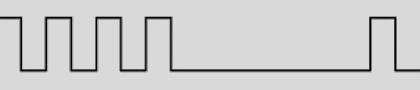
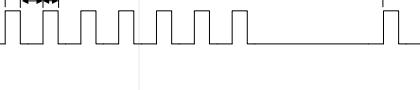
Cooling	Natural Cooling or Forced cooling	
Operating Environment	Environment	Avoid dust, oil fog and corrosive gases
	Storage Temperature	-20°C — 65°C (-4°F — 149°F)
	Ambient Temperature	0°C — 50°C (32°F — 122°F)
	Humidity	40%RH — 90%RH
	Operating Temperature (Heat Sink)	70°C (158°F) Max
Storage Temperature	-20°C — 65°C (-4°F — 149°F)	
Weight	580 g (20.5 oz)	

2.3 Mechanical Specifications



2.4 Protection and Troubleshooting

The green indicator turns on when power-up. When drive protection is activated, the red LED blinks periodically to indicate the error type.

Blink time(s)	Sequence wave of red LED	Description	Trouble shooting
1		Over-current	Turn off the power immediately. a) Check wiring is short-circuited or not; b) Check motor is short-circuited or not.
2		Over-voltage	Turn off the power immediately. a) Check if the power voltage is higher than 110VDC
3		Chip error	Restart the power supply, if the drive is still alarm, please contact after-sale
4		Fail to lock motor shaft	a) The drive is not connected to a motor; b) If alarm is occurred when connect a motor , set DIP switch SW6 to 'on' and restart power supply; If it still alarm, please check the motor power cable.
5		EEPROM error	Restart the power supply, if the drive is still alarm, please contact after-sale
6		Fail to auto tuning	Set DIP switch SW6 to 'on'
7		Position following error	a) The value of position following error is set too small; b) Motor torque is not enough or motor speed is too high; c) Motor wiring error, check wiring
Always	-	PCB board is burned out	Contact after-sale a) Power supply connection is wrong

3. Connectors and Pin Assignment

The CL86T has four connectors, connector for control signals connections, connector for status signal connections, connector for encoder feedback and connector for power and motor connections.

Pin Name	I/O	Details
PUL+	I	Pulse signal: (1) In single pulse (pulse & direction) control mode, this input represents pulse signal. A pulse signal is active at the rising or falling voltage edge (set by PC software). (2) In double-pulse (CW/CCW) control mode (set by PC software), this signal input represents clockwise (CW) pulse, and is active at both high voltage level and low voltage level. (3) 4.5-5V for voltage HIGH, 0-0.5V for voltage LOW (same for DIR and ENA signals). (4) Pulse width should be set to 2.5µs or longer.
PUL-	I	Direction signal: (1) In single pulse (step & direction) control mode, this signal's low and high voltage levels represent the two directions of motor rotation (e.g. clockwise and counterclockwise). (2) In double-pulse (CW & CCW) control mode, this signal represents counterclockwise (CCW) rotation. It is active at both voltage high level and low level. (3) Minimal DIR signal setup time should be at least 5µs. (4) Rotation direction is related to your motor/drive wiring. You can reverse the default rotation direction by toggling the SW5 DIP switch.
DIR+	I	
DIR-	I	
ENA+	I	Enable signal: This signal is used for enabling/disabling the drive. High voltage level of 4.5-24V (NPN control signal) for enabling the drive and low voltage level of 0-0.5VDC for disabling the drive. PNP and Differential control signals are on the contrary, namely Low level for enabling. By default this signal is left UNCONNECTED & ENABLED .
Pend+	O	Configurable Digital Output Signal: A configurable OC output signal. It takes a sinking or sourcing 20mA current at 5-24V. It can be configured as one of the 2 types, <i>IN POSITION</i> (default), or <i>BRAKE CONTROL</i> through PC software.
Pend-	O	
ALM+	O	Fault Signal: An OC output signal which is active when one of the following error protection is activated: over-voltage, over-current, and position following error. This port can sink or source 20mA current at 5-24V. The resistance between ALM+ and ALM- is low impedance in normal operation, and will change to high when the drive goes into error protection. The voltage active level of this fault output signal can be configured by configuration software.
ALM-	O	

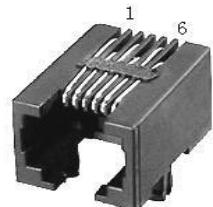
Encoder Feedback Connector – Screw Terminal			
Pin	Name	I/O	Description
1	EB+	I	Encoder channel B+ input
2	EB-	I	Encoder channel B- input
3	EA+	I	Encoder channel A+ input
4	EA-	I	Encoder channel A- input
5	VCC	O	+5V @ 100 mA max.
6	EGND	GND	Signal ground

Power and Motor Connector – Screw Terminal			
Pin	Name	I/O	Description
1	A+	O	Motor Phase A+
2	A-	O	Motor Phase A-
3	B+	O	Motor Phase B+
4	B-	O	Motor Phase B-
5	+Vdc	I	Power Supply Input (Positive) 30-72VDC recommended, leaving rooms for voltage fluctuation and back-EMF.
6	GND	GND	Power Ground (Negative)

RS232 Communication Port

It is used to configure the close-loop current, open-loop current, position following error limit and etc. See Closed-loop Stepper Driver software operational manual for more information.

RS232 Communication Port				
Pin	Name	I/O	Description	
1	NC	-	Not connected.	
2	+5V	O	+5V power only for STU (Simple Tuning Unit).	
3	TxD	O	RS232 transmit.	
4	GND	GND	Ground.	
5	RxD	I	RS232 receive.	
6	NC	-	Not connected.	



4. DIP Switch Settings

4.1 Microstep Resolution (SW1-SW4)

Steps/Revolution	SW1	SW2	SW3	SW4
Software Configured (Default 1600)	on	on	on	on
800	off	on	on	on
1600	on	off	on	on
3200	off	off	on	on
6400	on	on	off	on
12800	off	on	off	on
25600	on	off	off	on
51200	off	off	off	on
1000	on	on	on	off
2000	off	on	on	off
4000	on	off	on	off
5000	off	off	on	off
8000	on	on	off	off
10000	off	on	off	off
20000	on	off	off	off
40000	off	off	off	off

4.2 Motor Direction (SW5)

	ON	OFF
SW5	Motor direction is positive.	Motor direction is negative.

Note: The actual motor direction is also related to DIR level.

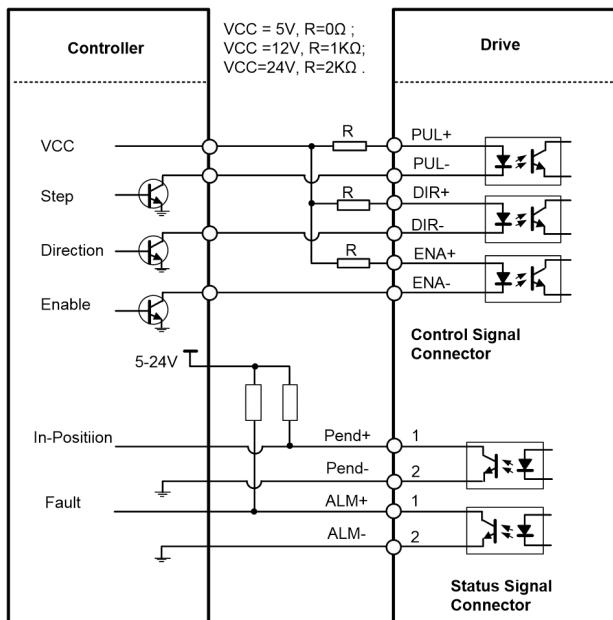
4.3 Motor Selection (SW6)

	Function	On	Off
SW6	Auto Tuning	No	Yes

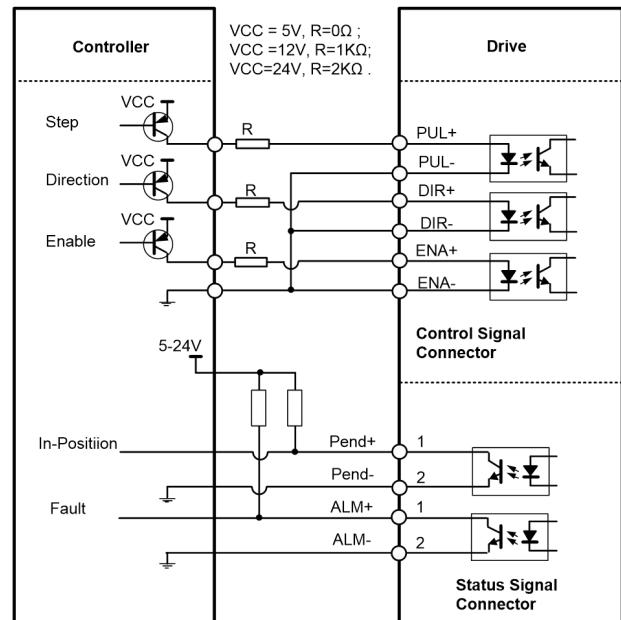
4.4 Current Control

The motor current will be adjusted automatically regarding to the load or the stator-rotor relationship. However, the user can also configure the current in the tuning software. The configurable parameters include close-loop current, holding current, encoder resolution, micro step and etc.

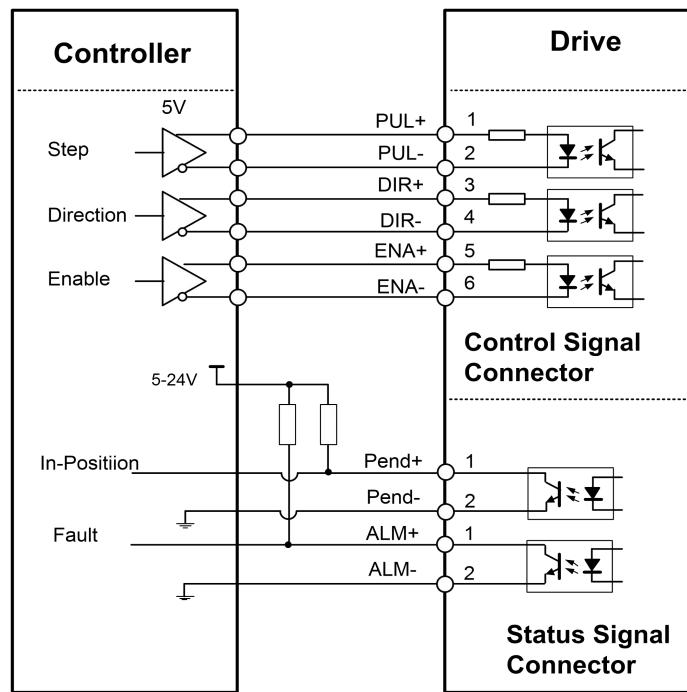
5. Typical Connections



Connections to open-collector signal
(common-anode)



Connections to controller of sourcing output
(common-cathode)



Connections to controller of differential output

Apêndice E

Painel de configuração do *drive* do motor

Através do uso de *software* adequado, como o *launch STEPPERONLINE*, é possível realizar a configuração do *drive*. Essa configuração é feita com base nas especificações do motor e nos requisitos do sistema. Na Figura E.1, estão representados todos os parâmetros que podem ser ajustados utilizando o *software*.

Parameter Setting						
Open	Save As	Read	Download	Write	Restore	All parameter
Number	Name	Value	Range	Unit	Remark	
0.000000	Current loop bandwidth	1200	0~32767	--	Read only	
1.000000	Current loop Ki	200	0~32767	--	Read only	
2.000000	Microstep resolution	400	200~51200	P/R	Number of instructions required per turn	
4.000000	Allowed max position error ...	4000	0~65535	--	Allowed max count of position error pulses	
5.000000	Position loop Kp	45	0~3000	--	--	
6.000000	Velocity loop Ki	0	0~3000	--	--	
7.000000	Velocity loop Kp	15	0~3000	--	--	
9.000000	Lock shaft current percenta...	100	0~100	%	--	
10.000000	Locking duration time	200	0~1500	1ms	--	
11.000000	Delay of loosening brake	250	0~1500	1ms	--	
12.000000	Delay of closing brake	250	0~1500	1ms	--	
13.000000	ENA input signal level setting	1	0~1	--	0 - high level; 1 - low level	
14.000000	ALM output signal impedance	1	0~1	--	0 - high impedance; 1 - low impedance	
15.000000	PEND output signal impedance	1	0~1	--	0 - high impedance; 1 - low impedance	
16.000000	Internal filtering time	15	0~512	0.1ms	Internal smoothing time for control command	
18.000000	Pulse effective edge	0	0~1	--	--	
19.000000	Pulsemode	0	0~1	--	--	
20.000000	Motor running direction	1	0~1	--	0 - positive dir; 1 - negative dir;	
23.000000	Velocity point of closing brake	10	0~500	0.1r/s	--	
24.000000	Over voltage limit	90	0~1000	V	--	
25.000000	Velocity point for open loop ...	18	0~200	0.1r/s	--	
27.000000	Distance to send "In Position" ...	8	0~100	Pluses	Number of pulse	
29.000000	Encoder resolution	4000	200~20000	--	4 times of encoder lines.	
30.000000	Peak current	80	0~200	100mA	--	
31.000000	Closed loop holding current...	50	0~100	%	--	
34.000000	Velocity point for closed loo...	12	0~200	0.1r/s	--	
35.000000	Delay of open loop switch ...	5	0~32767	ms	--	
36.000000	Delay of closed loop switch ...	250	0~32767	ms	--	
37.000000	Velocity feedback of open lo...	50	0~200	0.1r/s	--	
38.000000	ALM output type	1	1~3	--	1 - Alarm; 2 - In position; 3 - Brake.	
39.000000	Soft-starting time	8	1~30	100ms	Internal smoothing time for starting current.	
40.000000	Current loop Kc	300	0~32767	--	Anti-saturation coefficient of the current loop	
42.000000	PEND output type	0	0~1	--	0 - In position; 1 - Brake.	
43.000000	Selected fault detection	65535	0~65535	--	1 - Over current; 2 - Over voltage; 4 - Position follow ...	
44.000000	Allow/disallow clearing pos...	1	0~1	--	0 - No, 1 - Yes.	
45.000000	Self test at power on	0	0~1	--	0-No, 1-Yes;	
46.000000	Back EMF coefficient	100	0~32767	100mV/rps	--	
47.000000	Flux-weakening coefficient 0	4059	0~255	--	--	
48.000000	Flux-weakening coefficient 1	0	0~255	--	--	
55.000000	Delay of output signal of in ...	3	0~100	ms	--	
56.000000	Open loop output current ...	60	0~100	%	--	
57.000000	Max time to close brake	1000	100~10000	ms	--	
58.000000	Zero speed point	10	0~500	0.1r/s	--	
59.000000	Control mode	2	0~255	--	0 - Open loop, 2 - Closed loop; 1 - Reserved	
60.000000	Motor inductance	1999	0~100000	uH	--	
61.000000	Auto-tuning at power-on	0	0~1	--	0-No, 1-Yes;	
62.000000	Manufacturers parameter 1	0	0~10	--	--	
63.000000	Motion type	0	0~10	--	0 - Normal motion, 1 - Fast response motion, 2 - Low ...	
67.000000	Locking shaft phase	0	0~45	--	electric degress	
72.000000	Z axis torquecompensation ...	0	0~2	--	0-No compensation, 1-positive compensation, 2- neg...	
73.000000	Z axis torquecompensation ...	0	0~100	--	%	

Figura E.1: *Software launch STEPPERONLINE*: página completa da configuração do *drive*.