

Desenvolvimento de uma plataforma de impressão 3d baseada em braço robótico

João Pedro Henriques Camões Sobral

Dissertação de Mestrado

Orientador: Professor Fernando Gomes de Almeida

Coorientador no INEGI: Engenheiro João Paulo Pereira



Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Fevereiro de 2019

Resumo

O desenvolvimento de tecnologias de Fabrico Aditivo encontra-se, atualmente, numa fase de grande expansão. A simplificação dos processos, associada à facilidade em se obterem objetos de geometria complexa, resultam na afirmação das tecnologias de Fabrico Aditivo enquanto processo complementar às técnicas de fabrico tradicional. A sua utilização inclui inúmeras aplicações tanto a nível industrial, como a nível doméstico, o que tem contribuído para a democratização e divulgação deste conjunto de processos.

A presente dissertação foi desenvolvida no INEGI e está inserida numa estratégia do instituto de investigação em desenvolver sistemas avançados de Fabrico Aditivo. Assim, o trabalho proposto consiste na elaboração do projeto de um sistema de impressão tridimensional baseada na tecnologia de FDM, com recurso a um braço robótico. Trata-se de uma proposta inovadora e multidisciplinar que visa ultrapassar algumas limitações típicas do processo de FDM através da utilização de um braço robótico.

O elemento central do trabalho consistiu na seleção de uma solução de automação para controlo de todo o sistema. Esta resultou de um estudo alargado de várias soluções possíveis, sustentadas por uma análise cuidada, tanto da tecnologia de FDM e de robótica, como de *software* e *hardware* de controlo e eletrónica.

A solução proposta é de natureza industrial, sendo, por isso, bastante robusta e, simultaneamente, flexível. Esta arquitetura possibilita uma fácil implementação e a introdução de melhoramentos, sem necessidade de alterar o sistema base.

O trabalho do qual resulta a presente dissertação abrangeu também o projeto da respetiva instalação elétrica e estrutura mecânica de suporte, como parte essencial à implementação do sistema real. Para além disso, a definição da solução da perspetiva do *software* constitui um elemento preponderante, ao definir a lógica de integração de todos os sistemas num único.

O projeto final destaca-se pelo seu carácter diferenciador, distinguindo-se no panorama atual de sistemas de impressão tridimensional domésticos e industriais. Esta solução possui um elevado potencial e apresenta-se como um recurso de grande valor para a implementação de braços robóticos em processos de fabrico aditivo.

Development of a 3d printing platform based on a robotic arm

Abstract

The development of Additive Manufacturing technologies is currently undergoing a phase of great expansion. The simplification of the processes associated with the ease of obtaining objects of complex geometry results in the affirmation of Additive Manufacturing technologies as complementary processes to traditional manufacturing techniques. Its use includes numerous applications both at industrial and domestic level, which has contributed to the democratization and dissemination of these processes.

The present dissertation was developed at INEGI and is part of this research institute's strategy to develop advanced Additive Manufacturing systems. Thus, the proposed work consists in the design of a three-dimensional printing system for FDM technology, based on a robotic arm.

The central element of the work was the selection of an automation solution to control the entire system. This resulted from a study of several possible solutions, supported by a careful consideration of both FDM and robotics technology, as well as control and electronic software and hardware.

The proposed solution is of industrial kind and therefore it is robust and flexible. This architecture enables easy implementation and future improvements, without the need to change the base system.

The work that resulted in this dissertation also covered the design of its electrical installation and a mechanical support structure, as an essential part of the real system implementation. Furthermore, the definition of the software solution is a capital element in defining the logic for integrating all systems into one.

The final project stands out for its differentiating character, distinguishing itself from the state of the art three-dimensional industrial and domestic printing systems. This solution has a high potential and presents itself as a valuable resource for the implementation of robotic arms in Additive Manufacturing processes.

Agradecimentos

Em primeiro lugar, ao Professor Fernando Gomes de Almeida, ao Engenheiro João Paulo Pereira e ao Engenheiro Luís Oliveira, na qualidade de meus orientadores, agradeço a disponibilidade, conhecimentos transmitidos, motivação e opiniões, essenciais para a realização da presente dissertação.

De uma forma geral, a todos os colaboradores do INEGI que me ajudaram em diversas fases do projeto. Em especial, ao Engenheiro João Matos, pela disponibilidade e paciência no esclarecimento de dúvidas e pelo apoio dado em diversas partes do projeto, em particular nas diversas tarefas da implementação prática. Também ao Francisco Tenreiro, pelas críticas construtivas, companheirismo e ajuda na sistematização de tarefas.

À Mariana, por estar sempre presente, pelo carinho e preocupação de todos os momentos e por me ajudar a encarar as minhas fragilidades.

À minha família e em particular aos meus pais por todo o apoio durante o meu percurso escolar e, especialmente pela atenção e confiança com que sempre me acompanharam.

A todos os meus amigos, pela amizade e companheirismo ao longo deste percurso.

A presente dissertação de mestrado foi desenvolvida no âmbito do projeto POCI-01-0145-FEDER-016414, cofinanciado pelo programa Operacional Competitividade e Internacionalização e pelo Programa Operacional Regional de Lisboa, através do Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER) e por Fundos Nacionais através da FCT – Fundação para a Ciência e Tecnologia.

Índice de Conteúdos

1	Introdução	1
1.1	Enquadramento do projeto e motivação	1
1.2	Fabrico Aditivo no INEGI.....	1
1.3	Objetivos do projeto	2
1.4	Método seguido no projeto.....	2
1.5	Estrutura da dissertação.....	3
2	Fabrico Aditivo	5
2.1	Classificação dos processos	5
2.2	FDM- Fused Deposition Modeling	7
2.2.1	Descrição do processo	7
2.2.2	Caracterização do processo	9
2.2.3	Materiais.....	12
2.3	Estrutura das impressoras.....	15
2.3.1	Cabeça de extrusão	15
2.3.2	Base de impressão	16
2.3.3	Arquitetura.....	16
2.3.4	Componentes elétricos	19
2.4	Limitações do processo	20
3	Estudo de robôs industriais	23
3.1	Introdução à robótica.....	23
3.2	Fundamentos de robótica	23
3.2.1	Estrutura mecânica	24
3.2.2	Atuadores.....	24
3.2.3	Sensores.....	25
3.2.4	Controlador.....	25
3.3	Tipos de estruturas robóticas.....	26
3.4	Caracterização de robôs	27
3.5	Aplicações robóticas em Fabrico Aditivo	28
3.5.1	Stratasys Robotic Composite 3D Platform.....	28
3.5.2	Compound Fabrication (Fabrico Composto).....	29
3.5.3	RoboFDM.....	30
3.5.4	Plataformas de impressão robóticas	31
3.5.5	Braços articulados em outros processos	33
4	Braço robótico para a plataforma de impressão.....	35
4.1	Componentes.....	36
4.1.1	Motores passo-a-passo	36
4.1.2	Elementos de transmissão.....	37
4.1.3	Fins-de-curso	39
4.1.4	Encoders	39
4.1.5	Elementos de ligação.....	41
4.2	Descrição cinemática.....	41
4.2.1	Representação de Denavit-Hartenberg (DH).....	42
4.2.2	Cinemática de posição direta [117]	43
4.2.3	Cinemática diferencial direta [83, 117]	45
4.2.4	Cinemática de posição inversa [117-119]	46
4.2.5	Cinemática diferencial inversa [83, 117].....	49
4.2.6	Singularidades Cinemáticas.....	51
4.3	Calibração do robô	52

4.3.1	Calibração cinemática.....	53
4.3.2	Aquisição de dados	56
4.3.3	Proposta de método de calibração	56
5	Solução de Automação	59
5.1	Estudo de soluções	59
5.1.1	Programmable Physical Circuit Boards.....	59
5.1.2	Arduino Industrial Shield	60
5.1.3	LinuxCNC.....	60
5.1.4	ROS (Robotic Operating System).....	62
5.1.5	Beckhoff	64
5.1.6	RoboDK.....	65
5.2	Escolha da solução	66
5.3	Detalhe da solução.....	68
6	Projeto de instalação elétrica	69
6.1	Movimento da base.....	69
6.2	Processo de extrusão.....	70
6.2.1	Movimento.....	70
6.2.2	Aquecimento.....	70
6.2.3	Sensorização	71
6.3	Acessórios.....	71
6.4	PC Industrial.....	72
6.5	Componentes Beckhoff	72
6.6	Fontes de alimentação	73
6.7	Elementos de proteção.....	75
6.7.1	Proteção de equipamentos	75
6.7.2	Proteção de pessoas	77
6.8	Outros elementos elétricos	78
6.9	Implementação	79
7	Projeto da estrutura mecânica	81
7.1	Base de impressão	81
7.1.1	Requisitos	81
7.1.2	Componentes	82
7.1.3	Verificações	88
7.2	Estrutura mecânica	90
7.2.1	Requisitos	90
7.2.2	Dimensões da estrutura.....	90
7.2.3	Mesa da estrutura	92
7.2.4	Cabeça de extrusão	94
7.2.5	Estrutura global.....	95
7.3	Implementação	96
8	Projeto de software.....	99
8.1	Software CAD	99
8.2	Slicer.....	99
8.2.1	Código G.....	99
8.2.2	Pós-processador de Código G.....	100
8.3	TwinCAT 3.....	101
8.3.1	Estrutura do software	102
8.3.2	Arquitetura do sistema	103
8.3.3	Implementação.....	108
9	Conclusões e Trabalhos futuros	117
9.1	Conclusões.....	117
9.2	Trabalhos futuros.....	118

Referências	121
ANEXO A: Fichas técnicas do braço robótico.....	131
ANEXO B: Modelação Cinemática do Braço Robótico	137
ANEXO C: Documento de apoio ao projeto da instalação elétrica	147
ANEXO D: Documento de apoio ao projeto da instalação mecânica.....	159
ANEXO E: Pós-processador de Código G	161

Siglas e Acrónimos

3D – Tridimensional
ABS - Acrilonitrilo-butadieno-estireno
AMF - *Additive Manufacturing File Format*
ASA - Acrilonitrila-estireno-acrilato
ASTM – *American Society for Testing and Materials*
BRA - *British Robot Association*
CAD – *Computer Aided Design*
CFD – *Computational Fluid Dynamics*
DED – *Direct Energy Deposition*
DH – Denavit Hartenberg
DMLS - *Direct Metal Laser Sintering*
EBM - *Electro Beam Melting*
EBW - *Electronic Beam Welding*
EIA - *Electronics Industry Association*
FA – Fabrico Aditivo
FDC - *Fused Deposition of Ceramics*
FDM – *Fused Deposition Modelling*
FDMet - *Fused Deposition of Metals*
FFF - *Fused Filament Fabrication*
FGM - *Functionally Graded Materials*
GUI - *Graphical User Interface*
HAL – *Hardware Abstraction Layer*
HIPS – Poliestireno de alto impacto, do inglês *High Impact Polystyrene*
I/O – Entrada/Saída, do inglês *Input/Output*
JIRA - *Japanese Industrial Robot Association*
LAN – *Local Area Network*
LBDMD - *Laser Based Direct Metal Deposition*
LED – *Light Emitting Diode*
LENS - *Laser Engineered Net Shaping*
LOM - *Laminated Object Manufacturing*
LVDT - *Linear Variable Differential Transformer*
MAC – *Medium Access Control*
MPP – Motor passo-a-passo
PA – Poliamida
PC - Policarbonato
PCB – *Printed Circuit Board*
PCI - *Peripheral Component Interconnect*
PEEK - Poliéter-éter-cetona
PEI - Polietimida
PLA - Ácido Polilático
PLC – *Programmable Logic Controller*
PPR – *Pulses Per Revolution*
PVA - Álcool polivinílico
PWM – *Pulse Width Modulation*
RIA - *Robot Institute of America*
ROS – *Robotic Operating System*
ROSAM – *Robotic Operating System Additive Manufacturing*
SCARA – *Selective Compliance Assembly Robot Arm*
SCF – *Shrinkage Correction Factor*

SLM - *Selective Laser Melting*
SLA - *Estereolitografia*
SLS - *Selective Laser Sintering*
STL – *Standard Triangle Language ou Stereolithography*
SVD – *Singular Value Decomposition*
TRIAC - *Triode for Alternating Current*
TwinCAT - *The Windows Control and Automation Technology*
URDF - *Universal Robot Description File*
USB – *Universal Serial Bus*
XAR - *eXtended Automation Runtime*
XAE – *eXtended Automation Engineering*
XML - *Extensible Markup Language*

Índice de Figuras

Figura 2.1 - Volume de vendas de impressoras 3D de baixo custo [13].	7
Figura 2.2 - Esquema de um sistema de extrusão com a tecnologia de FDM [26].	10
Figura 2.3 - Inclusão de suportes em impressão tridimensional. Imagem sem suporte (à esquerda); Imagem com suportes para superfícies suspensas (centro e direita) [34].	12
Figura 2.4 - Esquema de uma cabeça extrusora de extrusão direta [53]. 1 - MPP; 2 - Polia dentada; 3 - Ventoinha; 4 - Cartucho de aquecimento; 5 - Engrenagem intermédia; 6 - Filamento de termoplástico; 7 - Dissipador de calor; 8 - Bloco de aquecimento; 9 - Bico de extrusão.	16
Figura 2.5 - Impressoras FDM com geometria Cartesiana. a) Esquema de movimento impressora cartesiana tradicional [65]; b) Impressora cartesiana <i>Prusa i3</i> [62]; Impressora Cartesiana Core XY [66].	17
Figura 2.6 - Impressoras FDM com geometria Delta. a) Esquema de movimento impressora delta [63]; b) Impressora Delta <i>ORION</i> [70]; c) Impressora Delta <i>Rostock Max</i> [71].	18
Figura 2.7 - Impressora FDM Polar [72].	19
Figura 2.8 - Esquema elétrico e eletrónico de uma impressora 3D [60].	19
Figura 2.9 - Esquema exemplificativo do defeito de construção em degrau - <i>Stair-stepping effect</i> . Diferença entre superfície desejada e superfície real [48].	21
Figura 3.1 - <i>Stratasys Robotic Composite 3D Platform</i> . Plataforma de impressão 3D desenvolvida em parceria pela <i>Stratasys</i> e pela <i>Siemens</i> [92].	29
Figura 3.2 - Sistema de Impressão 3D <i>Compound Fabrication</i> . a) Utilização de braço robótico para o fabrico de peças sem suportes. Sistema com base móvel e cabeça fixa. b) Sistema para o fabrico de peças utilizando tecnologia de FA e subtrativo de forma automática. Estação de FA à esquerda e estação de fabrico subtrativo à direita [93].	30
Figura 3.3 - Sistema de impressão 3D <i>RoboFDM</i> . a) Construção de um "coelho", onde é possível observar a divisão do modelo em diferentes regiões (à esquerda) e a construção de um "coelho" com uma impressora 3D convencional (à direita); b) Fase do processo de impressão onde é visível ao extrusor fixo e a base de extrusão móvel [94].	31
Figura 3.4 - Objetos obtidos por impressão 3D através do sistema <i>RoboFDM</i> em que a decomposição do modelo é baseada num algoritmo de redução de dimensão [95].	31
Figura 4.1 - Representação do braço robótico <i>Igus® Robolink</i> . a) Imagem do robô real; b) Modelo CAD do robô.	35
Figura 4.2 - Curva característica Binário-Velocidade de um MPP [108].	37
Figura 4.3 - Secção central de uma engrenagem constituída por um parafuso em fim e roda de coroa [109].	38
Figura 4.4 - Esquema de uma engrenagem harmónica com os respetivos componentes	38
Figura 4.5 - Diagrama de sequência de pulsos de encoder incremental [113].	40
Figura 4.6 - Representação esquemática do braço robótico com representação dos vários referencias das juntas.	42
Figura 4.7 - Vista lateral (plano YZ) de representação esquemática do braço robótico para valores hipotéticos do espaço das juntas.	48
Figura 4.8 - Vista superior (plano XY) de representação esquemática do braço robótico para valores hipotéticos do espaço das juntas.	48
Figura 4.9 - Máquina da medição de coordenadas proposta para a aquisição de dados para o método de calibração proposto.	57
Figura 5.1 - Sugestão de solução de automação para controlo do braço robótico e cabeça de extrusão, baseado em [149] e [146]. Fontes de imagens:[151-157].	63
Figura 6.1 - Várias fases da montagem dos componentes elétricos.	79
Figura 6.2 - Instalação elétrica da plataforma de impressão 3d.	80

Figura 7.1 - Orientação da base de impressão em relação ao órgão terminal do robô. a) Plataforma de impressão paralela ao órgão terminal. b) Plataforma de impressão perpendicular ao órgão terminal	81
Figura 7.2 - Estrutura de alumínio para ligação à flange do órgão terminal.....	83
Figura 7.3 - Vista lateral em corte da estrutura de alumínio para ligação à flange do órgão terminal.	83
Figura 7.4 - Vista frontal da estrutura de suporte intermédia.	84
Figura 7.5 - Base de aquecimento de silicone circular do fabricante Keenovo [172].	85
Figura 7.6 - Vista lateral em corte do suporte intermédio para suporte da base de impressão. Representação da superfície superior com ranhura para inclusão de termopar.	85
Figura 7.7 - Base de impressão em alumínio.	86
Figura 7.8 - Vista explodida em corte da plataforma de impressão com base de alumínio.....	87
Figura 7.9 - Apoio em plástico para fixação da base de impressão.	87
Figura 7.10 - Vista explodida em corte da plataforma de impressão com base de vidro.	88
Figura 7.11 – Distribuição da temperatura dos vários componentes da plataforma de impressão em vista frontal em corte.....	89
Figura 7.12 - Distribuição da temperatura da estrutura de ligação à flange do robô.	89
Figura 7.13 - Esquema no plano da análise entre a distância entre a base do robô e ponto de extrusão. Distâncias apresentadas em mm.	91
Figura 7.14 - Cargas aplicadas na mesa da estrutura.	92
Figura 7.15 - Diagrama de momentos fletores da viga [Nmm].	93
Figura 7.16 - Vista em corte da estrutura de montagem do braço robótico, incluindo pernas da estrutura, mesa e barra de reforço. Fonte modelo 3D perfil alumínio Bosch®: [178].	94
Figura 7.17 - Infraestrutura de montagem do extrusor montada na estrutura global. Fonte modelo 3D do extrusor: [180].	95
Figura 7.18 - Estrutura global do sistema de impressão 3D. Fonte modelo 3D armário elétrico: [181]	96
Figura 7.19 - Montagem da estrutura mecânica para o sistema de impressão tridimensional.	96
Figura 8.1 - Esquema de transformação de coordenadas a desenvolver para a aplicação.	101
Figura 8.2 - Esquema de interligação dos vários módulos do software TwinCAT 3 para aplicação.....	103
Figura 8.3 - Variáveis de parametrização de estrutura de seis eixos articulada disponível no módulo ‘Kinematic Transformation’ do software TwinCAT 3 [199].	105
Figura 8.4 - Conjunto de funções necessárias ao controlador dos eixos de movimento do sistema a partir do PLC.....	106
Figura 8.5 - Conjunto de funções necessárias para ativação e controlo do módulo NC I a partir do PLC.	106
Figura 8.6 - Conjunto de funções necessárias para ativação e controlo do módulo KT a partir do PLC.	107
Figura 8.7 - Conjunto de funções necessárias para ativação e controlo de temperatura a partir do PLC.	107
Figura 8.8 - Posição de braço robótico após <i>homing</i> de todas as suas juntas.	108
Figura 8.9 - Robô na posição <i>Home</i> . a) Introdução da referência “zero” em cada junta; b) Robô real na posição <i>home</i>	109
Figura 8.10 - - Movimento da junta 1. a) Posição de referência definida igual a 90°; b) Robô na posição definida.	109
Figura 8.11 - Movimento da junta 2. a) Posição de referência definida igual a -45°; b) Robô na posição definida.	110
Figura 8.12 - Movimento da junta 3. a) Posição de referência definida igual a 45°; b) Robô na posição definida.	110
Figura 8.13 - Movimento da junta 4. a) Posição de referência definida igual a 45°; b) Robô na posição definida.	111

Figura 8.14 - Movimento da junta 5. a) Posição de referência definida igual a 180°; b) Junta 5 na posição 0°; c) Robô na posição 180°.....	111
Figura 8.15 - Posição do braço robótico em: a) P1; b) P2.....	113
Figura 8.16 – Posição do braço robótico em: a) P3; b) P4;	114
Figura 8.17 - Posição do braço robótico em: a) P5; b) P6.....	115
 Figura A. 1 – Desenho de conjunto do braço robótico.....	131
Figura A. 2 - Características elétricas dos MPP e encoders do braço robótico.....	132
 Figura B. 1 - Formulário do método de <i>Denavit-Harteberg</i>	137
 Figura C. 1 - Ficha técnica do módulo Beckhoff EL7047 [161].....	147
Figura C. 2 - Ficha técnica do módulo Beckhoff EL7037 [161].....	147
Figura C. 3 - Ficha técnica do módulo Beckhoff EL2008 [200].....	148
Figura C. 4 - Ficha técnica do módulo <i>Beckhoff</i> EL3318 [201].....	148
Figura C. 5 - Ficha técnica do PC Industrial Beckhoff C6015-0010 [202].....	149
Figura C. 6 - - Ficha técnica do módulo Beckhoff EK1100 [166].	149
Figura C. 7 - Ficha técnica do módulo Beckhoff EL9100 [203].....	150
Figura C. 8 - Ficha técnica das fontes de alimentação da série RSP-500, referente às fontes RSP-500-48 e RSP-500-24 [204].....	150
Figura C. 9 - Ficha técnica da fonte de alimentação HDR-15-5 [205].....	151
Figura C. 10 - Ficha técnica de interruptor e sinal luminoso para ligar PC [206].....	152
Figura C. 11 - Esquema de disposição e ligação dos componentes do quadro elétrico.	156
 Figura E. 1 - Algoritmo de desenvolvimento de pós-processador de código G.....	161
Figura E. 2 - Script desenvolvido em <i>Matlab</i> ® para pós-processamento de código G. Parte 1/2.	162
Figura E. 3 - Script desenvolvido em <i>Matlab</i> ® para pós-processamento de código G. Parte 2/2.	163
Figura E. 4 – Trajetória do extrusor resultante do <i>slicing</i> de um prisma piramidal.	164
Figura E. 5 - Trajetória da base de impressão após pós-processamento do código G inicial; a) Construção da primeira camada; b) Construção da última camada.....	164

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 - Propriedades dos materiais mais utilizados na impressão 3D por FDM [43, 52].	15
Tabela 4.1 - Parâmetros DH do braço robótico.	42
Tabela 5.1 - Tabela resumo das soluções de automação estudadas.	66
Tabela 6.1 - Tabela auxiliar para determinação do tipo de disjuntor a utilizar em cada fonte de alimentação.	75
Tabela 6.2 - Tabela auxiliar para ajuste dos valores de disparo do módulo de seletividade.	76
Tabela 7.1 - Tabela auxiliar para estimativa da massa da plataforma de impressão.	88
Tabela 8.1 - Tabela com resumo dos principais comandos de Código G para o processo de FDM e seu significado[187].	100
Tabela 8.2 - Valores de referência para parametrização do braço robótico.	105
Tabela 8.3 - Referências de posição, no espaço cartesiano e no espaço de juntas, para uma trajetória linear do robô no eixo Y.	113
Tabela 8.4 - Referências de posição, no espaço cartesiano e no espaço de juntas, para uma trajetória linear do robô no eixo X.	114
Tabela 8.5 - Referências de posição, no espaço cartesiano e no espaço de juntas, para uma trajetória linear do robô no eixo Z.	115
 Tabela A. 1 – Massa dos motores passo a passo e das juntas do braço robótico <i>Igus®</i>	 133
Tabela A. 2 - Massa dos elementos de conexão, dos elementos de ligação e acessórios do braço robótico <i>Igus®</i>	135
 Tabela C. 1 - Tabela resumo das ligações elétricas do sistema com inclusão de bornes.	 153
 Tabela D. 1 - Tabela- resumo dos componentes mecânicos da estrutura mecânica do sistema de impressão.	 159

1 Introdução

1.1 Enquadramento do projeto e motivação

O aparecimento das tecnologias de Fabrico Aditivo (FA), vulgarmente conhecidas por impressão tridimensional, vieram transformar a forma como novos produtos são concebidos e produzidos. O seu princípio de funcionamento intuitivo e flexível, e a possibilidade de se obterem objetos personalizados, permite a obtenção de peças de forma rápida, com rentabilização máxima das matérias-primas. Estes fatores tornam as tecnologias de FA particularmente apelativas no contexto económico em que nos encontramos, abrindo portas à criação de produtos inovadores e à otimização de recursos. Neste sentido, o seu potencial tem despertado o interesse de várias indústrias e tem-se assistido a uma forte evolução destes processos, fomentada por uma investigação mais exaustiva, tanto por empresas líder no seu setor de atividade, como por centros de investigação e universidades.

As suas contribuições consolidam a impressão tridimensional enquanto tecnologia de fabrico alternativo, com aplicação na indústria automóvel, aeronáutica e aeroespacial, biomédica entre outras. Por outro lado, surgem aplicações não-convencionais, como por exemplo, a impressão de alimentos, medicamentos ou tecidos vivos, que podem ter enorme impacto nas próximas gerações, mas que, simultaneamente, levantam questões de natureza ética que deverão ser devidamente debatidas e regulamentadas com o evoluir da tecnologia [1].

A presente dissertação enquadra-se numa visão global de estudar os processos de Fabrico Aditivo, com o intuito de alargar o seu campo de aplicações, por via do desenvolvimento de novos equipamentos. Desta forma, pretende-se desenvolver uma plataforma de impressão baseada num braço robótico, sendo a cabeça de impressão fixa e a base de impressão móvel, comandada por um braço robótico.

Este projeto apresenta um carácter duplamente inovador. Por um lado, a impressão tridimensional com recurso a braços robóticos articulados constitui um nicho de aplicações, pouco explorado, tendo-se feito o devido levantamento de alguns trabalhos desenvolvidos em ambiente laboratorial. Por outro lado, a configuração do funcionamento proposta, isto é, cabeça de impressão fixa e base móvel, tem igualmente pouca expressão no âmbito das máquinas de impressão 3d disponíveis comercialmente.

Desta forma, o trabalho tem um enorme potencial, porque, por um lado, permite tirar partido das principais vantagens do ramo da robótica e adaptá-las à área do fabrico tridimensional. A liberdade de movimentos, característica de um braço robótico, é fundamental para a geração de trajetórias complexas, que possibilitam a eliminação de alguns dos defeitos típicos de impressão tridimensional. Por outro lado, a utilização de uma base móvel possibilita um estudo posterior ao nível do processo de extrusão, nomeadamente com a criação de novas cabeças de extrusão, mais avançadas, e com o estudo de novos materiais para FA. No contexto do projeto, é considerada a tecnologia de FDM (*Fused Deposition Modeling*) como referência, contudo, não é de descartar a adaptação do conceito de impressora a desenvolver para outros processos, como a impressão de metais.

1.2 Fabrico Aditivo no INEGI

O INEGI, Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial, é um Centro de Interface Tecnológico (CIT) dedicado ao desenvolvimento de novas tecnologias, vocacionado para a realização de atividades de investigação e de inovação (I&I), e transferência de tecnologia orientada para o tecido industrial. A realizar a sua atividade desde 1986, este instituto foi criado no seio dos atuais Departamento de Engenharia Mecânica (DEMec) e de Engenharia e Gestão Industrial (DEGI) da Faculdade de Engenharia da

Universidade do Porto (FEUP) e conta atualmente com mais de 200 colaboradores, que trabalham no desenvolvimento de conhecimento e produtos de base tecnológica.

Na sua estratégia de investimento, o INEGI, nomeadamente a unidade de Desenvolvimento de Produto e Sistemas, tem vindo a apostar na exploração de tecnologias de FA, com particular enfoque nos processos de extrusão de termoplásticos, sinterização seletiva e ainda impressão de materiais metálicos. O trabalho realizado centra-se no estudo dos vários processos e dos seus parâmetros, bem como no desenvolvimento de novos equipamentos para os processos de impressão por extrusão, que visem utilizar novos materiais (como, por exemplo polímeros de elevado desempenho) e aumentar a qualidade das peças obtidas e, consequentemente, aumentar também o campo de aplicações da tecnologia [2].

1.3 Objetivos do projeto

Tendo em conta a missão do INEGI de realizar avanços tecnológicos na área do FA, o trabalho desenvolvido insere-se numa linha de investigação mais alargada, que visa o desenvolvimento de sistemas avançados de impressão tridimensional. Em particular, o projeto inclui-se numa estratégia de desenvolvimento de equipamentos de impressão com múltiplos eixos de movimento (mais de três eixos), os quais têm um grande potencial de melhorar as peças fabricadas por este processo. Este desenvolvimento é alicerçado numa abordagem multidisciplinar para a implementação de tecnologias de impressão de termoplásticos.

O equipamento com múltiplos eixos a utilizar trata-se de um robô articulado de uso geral, já existente. O respetivo robô é constituído por uma estrutura mecânica, motores elétricos e sensores, sendo desprovido de um controlador e sistema elétrico de alimentação. Por conseguinte, é necessário definir uma solução para a sua alimentação e controlo.

O trabalho da presente dissertação tem como principal objetivo a elaboração do projeto de uma plataforma de impressão tridimensional baseado no referido braço robótico. Sendo um trabalho de cariz exploratório, tenciona projetar-se um sistema funcional, flexível, que permita uma fácil implementação e possibilite a realização de alterações e melhoramentos no futuro.

De uma perspetiva funcional, pretende-se que a cabeça de extrusão se encontre fixa e a plataforma de impressão seja movida pelo braço robótico. Quanto à geração de referências para o processo, nomeadamente, a criação de código G, utilizar-se-ão recursos típicos de impressão 3d em máquinas ditas convencionais, sendo que o presente trabalho tem também o objetivo de adaptar essa informação a um sistema funcionalmente diferente.

Neste sentido, as principais tarefas a desenvolver prendem-se com a definição de conceitos necessários à implementação do sistema, tanto da perspetiva da manipulação do braço robótico, como da adaptação dos parâmetros do processo de FDM a uma estrutura mecânica diferente.

Além disso, tem-se o objetivo de definir uma solução de automação do sistema, que inclua tanto *hardware* como *software* necessários à sua realização, bem como uma correta articulação entre ambos. Tendo em vista o fim último da implementação do sistema, a solução de automação deverá ser devidamente sustentada por um detalhado projeto elétrico, e ainda um correto projeto mecânico que possibilite a integração de todos os sistemas e criação da desejada estrutura de impressão tridimensional.

1.4 Método seguido no projeto

A metodologia seguida para realização do projeto, numa primeira fase, centrou-se na análise do processo de FDM, as suas vantagens e limitações, e no tipo de impressoras normalmente utilizadas para implementação desta tecnologia. Seguidamente, foi elaborado um estudo sobre manipuladores robóticos e um estado da arte acerca da utilização de robôs deste tipo com a tecnologia de FDM, por forma a enquadrar o projeto em desenvolvimento nas soluções que já foram desenvolvidas.

Partindo de um conhecimento sólido acerca do processo de fabrico e da sua implementação com estruturas robóticas, foi estudado o braço robótico a utilizar, nomeadamente foi feita a caracterização dos seus componentes e do respetivo princípio de funcionamento, e foi feita a sua descrição cinemática.

Com vista à definição de uma arquitetura do sistema, foi feito o levantamento de possíveis soluções de controlo do sistema, tendo por base sistemas de controlo do processo de FDM e sistemas de controlo de braços robóticos. Deste levantamento resultou uma proposta de solução global para implementação da plataforma de impressão 3d.

A partir da solução estabelecida, foi feito o projeto da instalação elétrica necessária ao sistema, incluindo todos os componentes principais e auxiliares necessários a uma correta instalação. Nesta sequência, foi também elaborado um projeto da estrutura mecânica idealizada para instalação do sistema. Por fim, foi feita a análise de todos os *softwares* necessários à implementação do sistema, focada essencialmente na adaptação do código G para o sistema e na análise e parametrização do *software* de controlo principal.

Todo o trabalho foi realizado com vista a uma futura implementação de todos os sistemas projetados, tendo sido possível a concretização dos principais componentes do projeto elétrico, mecânico e do *software*.

1.5 Estrutura da dissertação

De acordo com a metodologia seguida, a presente dissertação encontra-se dividida em nove capítulos.

No primeiro capítulo, “Introdução”, é feito um enquadramento do projeto e os seus princípios objetivos, destacando-se os aspetos diferenciadores do trabalho e a sua importância na instituição onde foi desenvolvido.

O segundo capítulo, denominado “Fabrico Aditivo”, pretende contextualizar os processos de fabrico aditivo enquanto processos de fabrico com aplicação industrial. Neste é detalhado o processo de FDM, as suas principais características, materiais utilizados e limitações e é feito um estudo dos componentes e da estrutura típica de impressoras que implementam este processo.

No terceiro capítulo, “Estudo de robôs industriais”, é completado o estado da arte com um estudo geral acerca de estruturas robóticas, a sua importância e aplicações, dando-se particular enfoque à aplicação destas estruturas em processos de FA e FDM.

O quarto capítulo, “Braço robótico para plataforma de impressão”, é dedicado à caracterização do braço robótico, tanto de uma perspetiva funcional, com a descrição de todos os seus componentes e respetivo princípio de funcionamento, como de uma perspetiva analítica, com a elaboração do respetivo modelo cinemático, baseado no método de *Denavit-Hartenberg*. Neste capítulo, é também proposto um método de calibração do robô, tendo em vista a sua utilização como elemento central de uma impressora 3d.

No quinto capítulo, “Solução de Automação”, é realizado um estudo aprofundado de possíveis soluções de controlo do sistema. Esta análise contempla soluções consistentes, que abrangem soluções conjuntas de *hardware* e *software*, tendo em vista o processo de impressão 3d e o controlo do braço robótico. Este capítulo encerra com a escolha da solução, devidamente justificada de acordo com o contexto e objetivos do projeto.

Tendo por base a solução escolhida, no sexto capítulo, “Projeto de instalação elétrica”, é feita a escolha dos componentes elétricos principais e auxiliares necessários à implementação do sistema, bem como dos elementos de proteção fundamentais.

No sétimo capítulo, “Projeto de estrutura mecânica”, é realizado o projeto dos componentes de natureza mecânica do sistema. Nele incluem-se o suporte do braço robótico e da cabeça de extrusão, e ainda uma plataforma de impressão, tendo em conta o projeto de uma estrutura única que integre todos os elementos.

O oitavo capítulo, “Projeto de *software*”, é dedicado à análise de todos os *softwares* necessários à impressão de um determinado objeto no sistema proposto. Esta secção aborda o tratamento de código G necessário para o efeito, e dá particular enfoque ao *software* de controlo global, a forma como está organizado, a parametrização dos sistemas reais no *software* e as funções necessárias para a sua implementação.

Por fim, no nono capítulo “Conclusões e Trabalhos futuros”, são apresentadas as conclusões da dissertação e as perspectivas de trabalhos futuros que deem seguimento ao trabalho realizado.

2 Fabrico Aditivo

A impressão tridimensional, também conhecida por Fabrico Aditivo (FA), engloba um conjunto de processos de fabrico que têm revolucionado a forma como os produtos são desenhados, produzidos e distribuídos para o utilizador final. Esta tecnologia tem despertado interesse crescente da comunidade académica e da indústria, que tem conduzido a grandes desenvolvimentos nesta área. Em paralelo, e com o advento das comunidades cibernéticas, tem-se assistido a um crescente interesse de utilizadores domésticos, o que conduz à democratização e mediação do processo [3].

O Comité Técnico ASTM F42 (Comité criado pela *American Society for Testing and Materials*, responsável por criar normas para tecnologias de fabrico aditivo) define o FA como o “processo de juntar materiais para fazer objetos a partir de um modelo tridimensional (3D), normalmente camada sobre camada, em oposição a tecnologias de fabrico subtrativo” [4]. No que diz respeito à sua denominação, este era inicialmente conhecido por Prototipagem Rápida (do inglês *Rapid Prototyping*), pois foi um processo originalmente desenvolvido com o objetivo de se obter de forma expedita protótipos, dos quais resultariam outros modelos ou produtos finais. Os vários desenvolvimentos que se sucederam tornaram os produtos obtidos mais próximos do produto final do que de protótipos, o que justificou a alteração da sua denominação para Fabrico Aditivo (do inglês *Additive Manufacturing*), como sugerido pelo referido Comité [5]. No entanto, nomes como Fabricação Aditiva (*Additive Fabrication*), Processos Aditivos (*Additive Processes*), Fabrico Digital Direto (*Direct Digital Manufacturing*), Fabrico Rápido (*Rapid Manufacturing*), Fabrico em Camadas (*Layer Manufacturing*) e Fabrico de Forma Livre (*Solid Freeform Fabrication*) também podem ser encontrados para referir este conjunto de processos [6].

O FA distingue-se dos chamados processos de fabrico convencionais, apresentando algumas vantagens que o tornam bastante atrativo. O facto de se basear na deposição de material em camadas permite a criação de praticamente qualquer forma geométrica, o que significa que, em comparação com o fabrico subtrativo, impõe menos constrangimentos e permite uma maior flexibilidade de *design*. Também neste sentido, não existe uma relação entre o custo de produção e a complexidade do produto, o que significa que este processo é especialmente competitivo na produção de peças com grande complexidade. Para além disto, a sua filosofia de fabrico pode dispensar operações de montagem de subpeças, que no fabrico tradicional seriam indispensáveis. Assim, o FA é particularmente indicado para a produção de peças em pequenas quantidades, preferencialmente *on-demand* (pois, dispensa ferramentas prévias) com complexidade elevada, permitindo uma redução de custos, numa perspetiva de redução de stocks e redução do desperdício de matéria-prima [3].

Os primórdios do FA remontam ao século XIX com o registo das primeiras patentes nas áreas da foto escultura (na década de 1860) e topografia (na década de 1890). O desenvolvimento destas áreas teve um ponto comum em 1951 quando O. J. Munz registou a patente “*Photo-glyph recording*” [7], referente a uma técnica que envolvia exposição seletiva de camadas de uma emulsão transparente, sendo esta varrida por secções horizontais do objeto a ser replicado. Esta técnica constituiu a base do processo de Estereolitografia, um dos mais importantes no contexto do FA [3] [8].

2.1 Classificação dos processos

Como foi referido, o conceito de FA engloba diferentes tecnologias. Este fator deve-se não só à diferente natureza dos processos, mas também à intenção dos fabricantes em desenvolver processos próprios, que os tornem mais competitivos. Existe, portanto, uma multiplicidade de processos, cuja classificação é difícil e pode ser feita segundo vários critérios. Uma dessas tentativas foi levada a cabo por Kruth [9] em 1991, na qual dividia os processos

com base no estado físico em que o material era aplicado: em pó, no estado líquido ou no estado sólido; ou ainda de acordo com a forma como o objeto é construído, isto é, se era obtido diretamente no espaço tridimensional (3D) ou pela construção de sucessivas camadas 2D, umas em cima das outras. Outras classificações podem ser feitas tendo em conta a forma como o material é depositado (uni ou bidireccionalmente), como se dá adesão entre camadas subsequentes e a utilização de suportes para a peça durante o processo [10, 11]. Atualmente, a divisão que reúne maior consenso é a proposta pelo Comité F42 da ASTM, a qual divide os processos de FA em sete categorias [4]:

- **Binder Jetting** – Esta técnica implica a deposição, pulverização ou impressão de gotículas de um agente aglutinante no estado líquido, o qual é depositado seletivamente num recipiente contendo a matéria-prima em pó (*powder bed*). A aglutinação do pó vai criar camadas transversais sucessivas até se obter o produto final desejado. A técnica de *Indirect Inkjet Printing* (Binder 3DP) é um exemplo da utilização deste processo [3, 4].

- **Direct Energy Deposition (DED)** – Processo que executa de forma simultânea a deposição do material e o fornecimento de energia para o seu processamento. O material é geralmente depositado sobre a forma de pó (metálico ou polimérico) ou fio e a fonte de energia que o derrete pode ser um laser ou um feixe de eletrões. Nesta área destacam-se as técnicas de *Laser Engineered Net Shaping* (LENS) e *Electronic Beam Welding* (EBW) [3-5].

- **Processos de Extrusão** – Processo que se baseia na extrusão de um termoplástico fundido através de um orifício de tamanho reduzido, criando uma secção transversal de uma determinada camada. Desta família de processos faz parte o FDM (*Fused Deposition Modeling*) que será abordado em detalhe no presente trabalho [3, 4]. Neste ramo também pode ser incluído o processo de construção por contornos (*Contour Crafting*) que, apesar de ser utilizado na construção civil, tem o mesmo princípio de funcionamento [5, 12].

- **Material Jetting** – Processo semelhante à impressão a jato (*ink-jet printing*). Dá-se a extrusão seletiva de gotículas de cera ou de um foto-polímero num substrato que é posteriormente sujeito a um processo de cura por aquecimento ou raios UV [3, 4].

- **Powder Bed Fusion** – Este tipo de técnicas usam um feixe de energia (laser ou feixe de eletrões) para, de forma seletiva, fundir um pó, metálico ou polimérico, que se encontra num recipiente. Após o varrimento de uma cama de pó uma nova é espalhada, e o processo repete-se, havendo não só a formação de uma nova camada como a sua ligação à anterior. Deste grupo de processos fazem parte tecnologias como: *Selective Laser Sintering* (SLS), *Direct Metal Laser Sintering* (DMLS), *Selective Laser Melting* (SLM) *Electro Beam Melting* (EBM) [3, 4].

- **Sheet Lamination** – Processo em que camadas de um determinado material (papel, metal ou termoplásticos) são cortadas com um determinado contorno (por exemplo recorrendo a um raio laser) que constitui uma camada da peça com uma respetiva secção transversal. As diferentes camadas são fixadas por soldadura, brasagem, colas ou adesivos estruturais. O processo de LOM (*Laminated Object Manufacturing*) é o que mais se destaca deste grupo [4, 5].

- **Foto-polimerização** – Processos em que se recorre a um feixe de luz (normalmente UV, mas também poderá ser luz visível) para fazer a cura seletiva de uma resina líquida. O efeito da luz provoca uma reação química na resina que faz com que ela passe ao estado sólido. A resina encontra-se confinada num recipiente e a cura seletiva é feita camada-a-camada. Dos processos desta área, o de estereolitografia (SLA) é o que tem maior visibilidade [3-5].

2.2 FDM- Fused Deposition Modeling

O processo de FDM é atualmente bastante reconhecido no contexto do FA, sendo o processo utilizado na maioria das impressoras 3D disponíveis no mercado, especialmente nas de baixo custo [13].

Esta técnica foi desenvolvida e patenteada em 1992 por S. Scott Crump, cofundador da empresa *Stratasys* [14]. Desde essa altura, esta empresa é a principal construtora deste tipo de impressoras, tendo lançado vários modelos e tendo-se também expandido através da aquisição de outras empresas da área [13].

Apesar disso, este processo apenas ganhou maior popularidade a partir de 2009, com a expiração da respetiva patente, o que levou ao aparecimento de novos fabricantes e projetos, tais como: *MakerBot*, *Ultimaker*, *RepRap Project* e *Fab@Home* [13, 15, 16]. O efeito concorrencial resultou numa diminuição acentuada do custo das impressoras FDM, o que originou um aumento da procura não só para a indústria, mas também para o público em geral. O gráfico da Figura 2.1 demonstra este crescimento, indicando o aumento de vendas de impressoras 3D de baixo custo desde 2007 até 2015 [13].

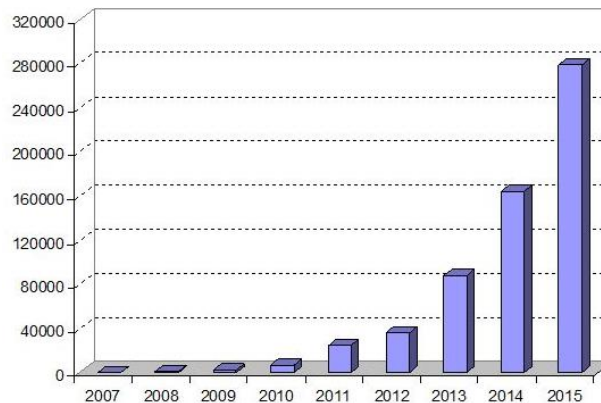


Figura 2.1 - Volume de vendas de impressoras 3D de baixo custo [13].

Atualmente é comum encontrar a designação FFF (*Fused Filament Fabrication*) para referir o processo de fabrico de algumas impressoras 3D por extrusão. No essencial, este é igual ao FDM, tendo esta nomenclatura sido adotada com o intuito de distanciar o processo da empresa que o criou, a *Stratasys*, e com isso contornar eventuais restrições de utilização [17].

2.2.1 Descrição do processo

O aparecimento do processo de FDM veio colmatar uma falha dos processos de fabrico existentes no final da década de 80, que residia na necessidade de uma técnica relativamente simples e eficiente, cujos instrumentos fossem igualmente simples e de pequenas dimensões, de modo a que os *designers* pudessem desenhar e criar objetos na sua estação de trabalho [14].

O princípio de funcionamento deste processo consiste na deposição de um fio de um material fundido (normalmente um termoplástico) num substrato, fazendo uso de uma cabeça móvel. Trata-se de um processo de deposição por camadas, o que significa que cada camada é criada por um varrimento da cabeça no plano horizontal XY, após o qual esta é deslocada na direção vertical (Z) para se proceder à adição de uma nova camada [5, 6, 14, 18].

Apesar de a impressão 3d por FDM ter princípios que a distinguem dos demais processos, a obtenção de peças finais depende de um procedimento mais vasto, que compreende várias etapas, a maioria delas comuns a outras técnicas de FA. Assim, é possível distinguir nove passos que caracterizam o procedimento de impressão tridimensional [5].

1º. Conceptualização e Modelação CAD

A primeira fase no desenvolvimento de qualquer produto consiste na idealização do seu aspeto visual e da forma como irá funcionar. Assim, na conceptualização pretende-se uma

definição da finalidade do produto, como por exemplo, se será um protótipo ou um produto final. A conceptualização é seguida da definição de um esboço que poderá ser representado sob a forma de desenhos, textos descritivos ou modelos representativos. Por fim, a última tarefa desta etapa requer a modelação exata da peça a fabricar em formato CAD 3D. Para se obter este modelo, pode-se recorrer a um *software* adequado de desenho CAD 3D, ou então a um *scanner* 3D, que permite a criação de um modelo digital a partir de um elemento real [5, 19].

2º. Conversão para STL/AMF

Tendo o modelo num formato CAD 3D, é necessário convertê-lo num formato compatível com os *softwares* necessários nas fases seguintes. Para este efeito, existe o formato STL, que permite uma descrição geométrica simples do modelo 3D, pois aproxima as suas superfícies por um conjunto de facetas triangulares. A criação destes triângulos é geralmente feita de forma automática pelos próprios *softwares* de CAD. O tamanho dos triângulos influencia a precisão da peça obtida, sendo preferível a utilização de triângulos menores para uma representação mais fiel da geometria da peça.

A utilização de ficheiros STL, apesar de ter origem no processo de estereolitografia (e daí a semelhança entre o nome de processo e a designação “STL”), é bastante consensual e, por isso, utilizado pela maioria dos processos de FA. Contudo, estes apenas contêm informação acerca da geometria do modelo e, por esse motivo, foi criado um formato *standard*, o AMF (*Additive Manufacturing File Format*). Este novo formato também faz uso das facetas triangulares, mas para além disso, inclui informação sobre as dimensões, a cor, o material, a sua textura e outras características importantes. A forma como foi pensado permite a conversão dos ficheiros STL em AMF, pelo que este formato está a receber uma boa aceitação e é provável que seja o mais utilizado no futuro [5, 20-23].

3º. Conversão do ficheiro STL em código G

Tendo definidas as superfícies da peça através do ficheiro STL, é necessário converter essa informação em instruções de impressão que possam ser interpretadas pela impressora 3D. Essa conversão é feita por um *software* denominado *slicer*. Este divide a peça em camadas horizontais com base nas definições introduzidas pelo utilizador, calcula a quantidade de material necessária à impressão e o tempo que esta irá demorar. Para cada camada, é gerado um conjunto de instruções em código G (definição de posição, velocidade de avanço e de extrusão) que irá definir o percurso da cabeça extrusora [5, 24].

4º. Manipulação e transferência do ficheiro para a impressora 3D

Antes de o ficheiro poder ser enviado para a máquina de impressão, pode ser preciso tomar algumas medidas. A primeira delas diz respeito à verificação da peça, por forma a garantir que esta tem a forma desejada. O utilizador poderá também querer alterar a orientação e posição da mesma no prato de impressão para, por exemplo, imprimir várias peças em simultâneo ou então poderá haver necessidade de aplicar um fator de escala para compensar efeitos de compressibilidade ou eventuais acabamentos finais [5].

5º. Configuração da impressora 3D

A maior parte das impressoras têm parâmetros que são ajustáveis e que permitem otimizar a impressão em função de determinadas variáveis operacionais. Assim, pode-se proceder à configuração da impressora através do *software* de *slicing*, selecionando o material a imprimir ou a altura das camadas, sabendo que existirá uma relação de compromisso entre a velocidade de fabrico e a resolução da peça. Ao nível físico da máquina, aspetos como o nivelamento do prato de impressão e a verificação da quantidade de matéria-prima existente são outras tarefas geralmente desempenhadas manualmente, mas que em impressoras mais sofisticadas são feitas automaticamente [5].

6º. Construção da peça

Esta etapa corresponde ao fabrico propriamente dito da peça. No caso do processo de FDM, o material é depositado através da cabeça de extrusão e o seu movimento é assegurado pelos eixos da máquina, que a fazem percorrer os contornos da peça e o seu enchimento, tal

como definido pelo código G. Se nenhum erro for detetado, a extrusão dar-se-á camada-a-camada até que o produto final esteja concluído [5].

7º. Remoção da peça e limpeza de excessos

Após a impressão da peça, é necessário proceder a um conjunto de tarefas elementares nas quais se incluem a retirada da peça do prato e remoção de excessos de material. Estes excessos são maioritariamente suportes, isto é, estruturas construídas juntamente com a peça com o objetivo de a sustentar durante o processo de fabrico. A sua remoção deve ser cuidadosa, para evitar danificar a peça [5].

8º. Pós-processamento

A fase de pós-processamento inclui todo um conjunto de etapas que tornam a peça adequada para a sua finalidade. Por este motivo, os acabamentos variam muito consoante a aplicação. Podem-se recorrer a tratamentos químicos ou térmicos para se adquirirem determinadas propriedades, bem como operações de maquinagem, para garantir maior rigor dimensional ou ainda a aplicação de revestimentos para reforçar a peça [5].

9º. Testes de qualidade e aplicação

Nesta última fase, pode-se justificar a realização de alguns testes mecânicos ou visuais para assegurar que a peça não tem defeitos e que cumpre todos os requisitos necessários [5].

2.2.2 Caracterização do processo

A impressão por FDM inclui um conjunto de características que os distinguem dos demais processos de FA. Estas são resultado da sua estrutura de funcionamento e de determinados parâmetros de impressão característicos. Uma análise destes princípios será feita com vista a uma caracterização mais profunda do processo em estudo.

Carregamento do material

Uma vez que se trata de um processo de extrusão, o material deverá ser fornecido do exterior para um compartimento no interior da impressora. A forma como é feita a alimentação depende do estado físico da matéria-prima, sendo mais frequente que esta esteja no estado sólido. Assim, esta pode-se encontrar sob a forma de *pellets*, granulado, pó ou de um filamento contínuo, geralmente armazenado em bobines.

O custo de uma bobine de filamento é significativamente mais elevado do que o dos *pellets*, pois é a partir destes que se obtém o filamento. Com a utilização de *pellets* (tal como com granulados ou pós) a circulação do material na cabeça de extrusão dá-se por gravidade e recorrendo a sistemas mecânicos como parafusos sem-fim, êmbolos ou gases para forçar a extrusão do material. Contudo, estes sistemas são mais complexos, de maiores dimensões e acrescentam peso à máquina, o que dificulta a sua utilização. Por este motivo, as impressoras FDM atuais utilizam maioritariamente alimentação por bobine de filamento, sendo importante referir que com futuros desenvolvimentos a solução por *pellets* poderá vir a ser comercialmente mais competitiva [5, 16, 25].

Processo de fusão

O material utilizado encontra-se no estado sólido e, por isso, este tem de ser aquecido até um estado em que seja possível a sua extrusão. O aquecimento é feito quando este se encontra a montante do bico extrusor. O controlo de temperatura é bastante delicado, uma vez que o material tem de ser mantido a uma temperatura precisa. Se esta for demasiado baixa, o termoplástico não funde e não escoar, mas se for demasiado elevada, o material pode deteriorar-se, levando à contaminação da câmara e à interrupção do processo [5].

Processo de extrusão

A extrusão propriamente dita corresponde à etapa em que o material é depositado no substrato da impressora. O filamento é forçado através da cabeça extrusora por um sistema de alimentação e este escoar pelo orifício de extrusão devido à diferença de pressão entre a câmara

e o exterior. O diâmetro do orifício constitui um parâmetro importante desta fase, uma vez que determina a forma e o tamanho do filamento extrudido, influenciando desta forma a velocidade de deposição, a qualidade do acabamento da peça e dimensão mínima dos seus detalhes. A Figura 2.2 mostra uma representação esquemática do conjunto do sistema de extrusão, que inclui também o movimento da cabeça, mecanismo de alimentação e a fusão do filamento [5].

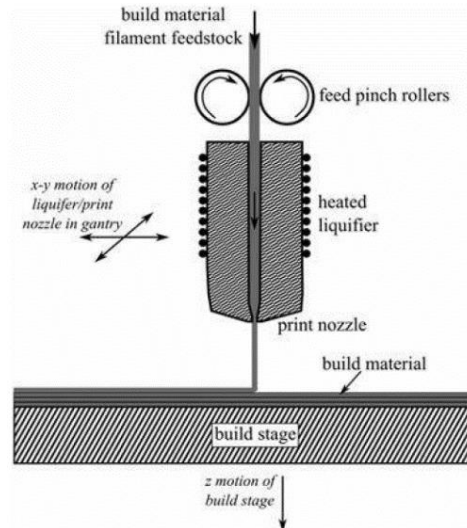


Figura 2.2 - Esquema de um sistema de extrusão com a tecnologia de FDM [26].

No caso do FDM, o material de impressão encontra-se normalmente sob a forma de filamento armazenado em bobine e este é posto a circular na impressora por meio de um mecanismo de rolos de aperto, tal como representado na Figura 2.2. Estes rolos têm a função de criar fricção suficiente para agarrar o filamento e empurrá-lo através da cabeça extrusora, onde será aquecido. O movimento destes rolos é comandado por motores passo-a-passo (MPP) que, por sua vez, podem estar acoplados aos dois ou a apenas um rolo. À medida que o filamento contínuo é puxado pela câmara de extrusão, este mesmo funciona como um pistão que exerce pressão suficiente para que o material semilíquido seja extraído [27]. No entanto, se a força de compressão for demasiado elevada, poderá verificar-se o fenómeno de encurvadura do filamento, o que leva à interrupção do processo e necessidade de intervenção de um operador [26, 28].

Para dar resposta a esta limitação do FDM, têm sido desenvolvidos novos sistemas de extrusão baseados nos processos tradicionais de extrusão de plásticos que, recorrem a um mecanismo de parafuso sem-fim de passo variável. Indo de encontro ao que foi descrito na secção “Carregamento do material”, a sua alimentação é feita através de *pellets* granulados que também são aquecidos ao longo do percurso do parafuso e extraídos a uma velocidade controlada [28].

Solidificação do material

Após a extrusão do material previamente fundido, dá-se a solidificação do mesmo numa superfície, sendo que a maior preocupação nesta fase vai no sentido de garantir que o objeto mantenha a sua forma e tamanho. O efeito da gravidade e da tensão superficial têm tendência a alterar a sua forma, e o seu tamanho pode ser afetado por efeitos de arrefecimento e secagem [5]. É normal nestes casos verificar-se o encolhimento da peça com o seu arrefecimento e, por isso, os *softwares* de design CAD podem incluir um fator multiplicativo, SCF (*Shrinkage Correction Factor*), que permite acomodar esta variação dimensional, sem, no entanto, ter em conta a natureza anisotrópica do arrefecimento dos materiais extrudidos [26].

Uma solução mais rigorosa para este problema tem por base a minimização de gradientes térmicos durante a produção da peça, uma vez que estes são os principais causadores de empenos e do baixo rigor dimensional. Em sistemas avançados a impressão dá-se dentro de uma câmara com temperatura controlada. Alternativamente, podem ser utilizadas bases de

impressão aquecidas para diminuir o gradiente de temperatura na própria peça. Esta abordagem, sendo mais econômica, é também mais limitativa, no sentido em que faz com que o tamanho das peças seja menor e reduz a temperatura à qual se pode aquecer o material [26, 29].

Para evitar estes problemas, podem também ser tidos em conta alguns fatores que diminuam o gradiente térmico da peça durante o arrefecimento. Isto é, zonas com maior quantidade de material são aconselháveis em detrimento de paredes finas e protuberâncias, uma vez que arrefecem mais lentamente e resultam em menores gradientes térmicos. Outra medida, prende-se com a inclusão de nervuras de reforço na construção de paredes verticais de espessura fina para evitar empenos [26, 30].

Ligação entre camadas

O fenómeno de ligação entre camadas subentende um processo macro e microscópico que permite a adesão do material que vai sendo sucessivamente depositado. A deposição de material é feita sob a forma de linhas (do termo em inglês “roads”) e estas têm de aderir tanto às superfícies inferiores como às laterais para construção do objeto tridimensional.

O mecanismo de formação de ligações entre os filamentos é despoletado pela energia térmica do material extrudido, o qual promove a ligação entre linhas consecutivas e a difusão molecular entre estas para garantir a adesão [29, 31].

Nesta fase, a temperatura do material é um parâmetro crítico, que deve ser superior à temperatura de transição vítrea do material, de modo a garantir que este tenha energia térmica suficiente para iniciar o processo. A sua temperatura mais elevada irá elevar a temperatura das linhas já depositadas e permitir assim que haja a ligação. Contudo, se a temperatura for demasiado elevada, poderá originar defeitos na peça devido a fenómenos de fluência ou deterioração de propriedades. Em sentido inverso, uma temperatura demasiado baixa poderá não desencadear as reações microscópicas referidas e resultar em ligações fracas, afetando a integridade estrutural da peça final. Neste sentido, é desejável que o tempo decorrido entre a deposição de camadas sucessivas seja reduzido para que a temperatura do substrato não seja demasiado baixa e permita uma temperatura de extrusão ideal [5, 29, 31].

Controlo de posição

No processo de FDM, o movimento da cabeça de extrusão efetua-se de forma alternada no eixo Z e no plano horizontal XY. Enquanto que no eixo vertical o movimento é incremental e influencia apenas a altura da camada, o movimento no plano horizontal é contínuo, o que faz com que seja necessário considerar efeitos dinâmicos do sistema, para garantir uma deposição uniforme. Neste sentido, é necessário garantir sincronização entre a taxa de deposição de material e o movimento horizontal, sendo esta situação crítica nos casos em que há mudanças de direção e a influência da inércia da cabeça de extrusão origina um movimento não-uniforme.

O mecanismo de movimento horizontal é constituído por dois eixos lineares montados ortogonalmente e comandados por um sistema de correia de transmissão ou por um fuso. É necessário que estes tenham capacidade de movimentar a cabeça à velocidade requerida bem como capacidade de resposta para permitir mudanças de direção rápidas e ainda fiabilidade para permitir o movimento constante durante várias horas. O uso contínuo provoca desgaste dos componentes do sistema, o que deve também ser acautelado, pois origina folgas que introduzem imprecisões no controlo de posição da cabeça e consequentemente defeitos na peça final.

Os potenciais defeitos causados pela dinâmica do sistema podem também ser acomodados pela própria sequência de fabrico. Isto é, primeiro é executada a deposição da fronteira exterior da peça, a uma velocidade menor, o que garante um melhor controlo posicional e melhor acabamento superficial. O interior do contorno é preenchido a uma velocidade mais elevada, com requisitos menos apertados [5].

Controlo de trajetórias

A trajetória percorrida pela cabeça de extrusão é determinada pelo *slicer* que divide o ficheiro STL em camadas e define os respetivos contornos. Para uma deposição sem defeitos é

necessário que a trajetória seja tal que não haja interseções com o material previamente depositado, mas que seja próxima o suficiente para assegurar a ligação.

O enchimento diz respeito à quantidade de material que é depositada no interior da peça e é quantificada pela sua percentagem. Esta percentagem, tal como o padrão de deposição, são determinados em função da aplicação da peça, pois têm uma forte influência no seu comportamento mecânico. Tipicamente a percentagem de enchimento é cerca de 20% e os padrões mais usados são trajetórias lineares, diagonais ou hexagonais (em ninho de abelha), sendo que a diagonal apresenta uma ligeira vantagem em relação às restantes [32, 33].

Um dos maiores constrangimentos da fase de preenchimento prende-se com as mudanças de direção associadas às respetivas trajetórias. Existe a possibilidade de criarem vazios na peça ou zonas de “sobre-deposição” de material, que podem ser minimizadas alterando a taxa de deposição [5, 31].

A influência da trajetória no comportamento mecânico da peça final também pode ser avaliada pelas suas propriedades anisotrópicas. O facto de este ser um processo de deposição por camadas faz com que as peças sejam estruturalmente mais frágeis na direção vertical Z em relação ao plano horizontal XY. Sendo este facto uma característica intrínseca ao processo, a trajetória de deposição é responsável por assegurar isotropia no plano horizontal e é por esse motivo que é mais vantajoso recurso a padrões de deposição cruzados, em vez de, por exemplo, trajetórias de enchimento em espiral [5, 33].

Construção de suportes

No processo FDM, a construção das peças é feita em camadas, em que a nova camada é sustentada pela anteriormente depositada. No entanto, pode haver casos em que é necessária a adição de suportes que auxiliem a construção da peça. A sua utilização justifica-se para quando se pretende obter zonas suspensas ou superfícies com inclinação superior a 45° (Figura 2.3). A construção dos suportes pode ser feita no mesmo material da peça final ou então num material diferente, adequado à futura remoção.

No caso de suportes do mesmo material, que corresponde a impressoras de menor custo com apenas uma cabeça extrusora, a sua conceção tem de ser mais cuidadosa para permitir minimizar os defeitos da sua remoção. Pode-se também ajustar a temperatura do material depositado como suporte em relação ao resto para criar uma superfície de fratura ou então aumentar a distância de deposição entre um suporte e a peça para criar ligações mais frágeis.

Para otimizar a utilização de suportes, a melhor opção passa por imprimir-los noutro material. Esta solução implica uma impressora mais avançada, com duas cabeças de extrusão, que podem funcionar simultaneamente. A diferença das propriedades dos materiais é utilizada para os distinguir quer visual (usando um material de uma cor diferente), quer mecânica (usando um material mais frágil para os suportes), quer quimicamente (usando um material que pode ser removido usando um solvente, sem que afete o material principal) [5, 34].



Figura 2.3 - Inclusão de suportes em impressão tridimensional. Imagem sem suporte (à esquerda); Imagem com suportes para superfícies suspensas (centro e direita) [34].

2.2.3 Materiais

A crescente popularidade a tecnologia FDM está diretamente relacionada com fatores como a sua fiabilidade, segurança, simplicidade, baixo custo dos materiais e a sua variedade [13, 35].

As propriedades das peças construídas são dependentes de vários parâmetros de impressão (altura das camadas, orientação da peça, trajetória de deposição, espessura do orifício de extrusão, etc.), sendo que vários estudos são feitos com o intuito de investigar a sua influência [36-38]. O desenvolvimento de novos materiais é também bastante frequente, no sentido de alargar as aplicações dos processos de FA, e importante, pois a natureza do processo afeta negativamente as propriedades mecânicas dos materiais (construção por camadas) e, por isso, a criação de materiais especialmente pensados para esta tecnologia poderá minimizar esse defeito [36].

No processo de FDM são normalmente usados termoplásticos devido à sua mais baixa temperatura de fusão e às propriedades mecânicas aceitáveis para o campo típico de aplicações. As cabeças de extrusão normalmente limitam a temperatura de extrusão a cerca de 300 °C. As várias evoluções feitas permitem que atualmente se possa trabalhar com um espectro de materiais bastante alargado que vai desde os termoplásticos tradicionais aos de alta performance, tal como metais, cerâmicos e materiais compósitos [39, 40].

ABS (Acrilonitrilo-butadieno-estireno)

O ABS foi utilizado no primeiro sistema FDM e é um dos termoplásticos mais usados para a impressão 3d. Este é particularmente indicado para a produção de peças que requeiram grande durabilidade e capacidade de suportar temperaturas elevadas. Trata-se de um material moderadamente flexível, com boa resistência à abrasão e permite a obtenção de peças com um bom acabamento superficial. Contudo, a sua impressão implica uma temperatura de extrusão maior e o facto de não garantir uma boa adesão entre camadas, tornam-no propício a empenos.

Por este motivo, o ABS é mais utilizado na produção de objetos que sejam frequentemente manuseados, sujeitos a quedas e/ou a calor. Isto significa também que é um material utilizado no fabrico de produtos finais e não tanto de protótipos [5, 41, 42].

PLA (Ácido Polilático)

O PLA é atualmente o material mais utilizado no processo de FDM. O seu baixo custo, associado a um bom compromisso de características mecânicas fazem dele um material bastante apelativo para ser usado por profissionais e entusiastas amadores.

O PLA é tido como um termoplástico *low-cost* e amigo do ambiente, uma vez que é biodegradável e produzido a partir de resíduos renováveis. O facto de possuir uma temperatura de fusão baixa faz com que a peça produzida seja menos propensa a empenos, e também reduz a potência térmica necessária à impressão.

Tem como principal desvantagem a baixa flexibilidade, no entanto, tem maior rigidez e resistência à radiação UV que o ABS. As suas principais aplicações residem na a criação de protótipos e modelos conceptuais, bem como de projetos amadores [41-43].

Nylon (Poliamida)

O Nylon, um termoplástico do grupo das poliamidas, é um polímero sintético bastante utilizado em aplicações industriais. No campo dos materiais para impressoras 3D, apresenta a melhor relação entre resistência, flexibilidade e durabilidade. Este destaca-se também pela elevada resistência à fadiga, ao impacto e química, o que faz com que seja utilizado para fabrico de peças com bom acabamento superficial e que requeiram grande durabilidade.

Apesar dos seus pontos fortes, o seu armazenamento merece atenção, devido às suas características higroscópicas e ao facto de a adesão entre camadas ser baixa [41-45].

PC (Policarbonato)

O PC é um termoplástico frequentemente utilizado na indústria e que apresenta características semelhantes ao ABS, mas melhoradas. Por isso, destaca-se a sua durabilidade e resistência térmica e ao impacto, que garante grande precisão e estabilidade aos componentes.

Este polímero tem uma flexibilidade moderada e translucidez, o que pode ser aproveitado para a construção de painéis. Apresenta como defeitos principais a tendência para encolhimento e empenamentos e o facto de ser higroscópico.

As suas propriedades mecânicas superiores fazem dele uma escolha primordial para peças que necessitem de manter a sua elevada resistência, dureza e forma a elevadas temperaturas. Por esse motivo, é usado para construir produtos acabados e protótipos funcionais [41-43, 45].

Materiais dos suportes

Para se conseguirem fabricar peças mais elaboradas, com saliências e geometrias mais complexas, são construídos suportes. Existem materiais específicos para a sua construção e as propriedades desejadas incluem não só uma cor diferente, que os diferencie visualmente, mas acima de tudo baixa adesão e solubilidade em água ou banhos alcalinos, para que sejam removidos durante o pós-processamento. Neste ramo, os materiais mais utilizados são o PVA e o HIPS, para suportar peças em termoplástico ou ainda o ST-130 usado especificamente para suportes de materiais compósitos [39, 43, 44].

Termoplásticos de elevado desempenho

A evolução da tecnologia FDM e as suas potencialidades abrem portas à utilização de polímeros com propriedades melhoradas, os chamados polímeros de elevado desempenho. Estes apresentam melhores propriedades mecânicas, tais como a tensão de cedência e módulo de Young, o que permite a obtenção de peças mais resistentes. A desvantagem da sua utilização prende-se com a necessidade de uma temperatura de extrusão mais elevada, o que implica dispositivos mais potentes e um projeto de construção mais cuidado.

A utilização de termoplásticos de alto desempenho adquire maior importância no contexto de impressão 3d com máquinas de cinco eixos, uma vez que ambos estão direcionados para a obtenção de peças de elevada qualidade estrutural e superficial.

Os principais termoplásticos de alta performance que já são comercializados sob a forma de filamento, ou seja, especificamente para FDM, são o PEEK e o ULTEM.

O PEEK (Poliéter-éter-cetona) apresenta resistência mecânica e térmica elevada, bem como tenacidade e resistência ao desgaste apreciáveis. As suas propriedades permitem a produção de peças com grande resistência química e ao calor e com boa estabilidade dimensional. Para além disso, trata-se de um material biocompatível, ideal para o uso em aplicações biomédicas, bem como para a indústria aeroespacial, automóvel e eletrónica [43, 46].

Por outro lado, o ULTEM (Polieterimida, que pode ser abreviada por PEI), apresenta propriedades semelhantes ao PEEK, com o prejuízo de ter menor resistência ao impacto e requerer uma maior temperatura de extrusão. Apesar disso, destaca-se pela capacidade de retardamento de chama, estabilidade térmica e por uma elevada resistência específica. Pode ser usado na indústria aeroespacial e automóvel e, dependendo da variante, pode ser considerado biocompatível e utilizado na produção de alimentos e dispositivos médicos [43, 47].

Outros materiais

Ainda que o processo de FDM tenha sido criado e seja otimizado para a utilização de polímeros, foram sendo desenvolvidas algumas variantes do mesmo de modo a permitir a extrusão de materiais cerâmicos e metálicos em processos designados de *Fused Deposition of Ceramics* (FDC) e *Fused Deposition of Metals* (FDMet), respetivamente.

Este conjunto de processos recorre à utilização de pós metálicos ou cerâmicos juntamente com um aglutinante orgânico formando um composto que é posteriormente extrudido para formar os filamentos que alimentaram as impressoras. Após a impressão o aglutinante é removido e as peças são sinterizadas. Estas técnicas recorrem a materiais cerâmicos como o nitreto de silício, sílica e alumina, e de metais como aço inoxidável [48, 49].

Podem também ser utilizados materiais compósitos como o caso dos FGM (*Functionally Graded Materials*), materiais com propriedades graduadas. Para tal, são usados materiais compósitos multi-fase que possibilitam o controlo local das propriedades mecânicas de uma determinada peça, obtendo diferentes propriedades em diferentes zonas da peça. Sendo uma técnica usada em algumas tecnologias de FA, esta pode ser usada no contexto do FDM através do controlo da densidade da peça e da orientação da deposição das camadas [50, 51].

Na Tabela 2.1, estão resumidos os principais materiais utilizados em FDM e as respetivas propriedades (térmicas, físicas e mecânicas), que relevam não só para a caracterização do processo, mas também para a escolha do material para uma dada aplicação.

Tabela 2.1 - Propriedades dos materiais mais utilizados na impressão 3D por FDM [43, 52].

Sigla	Designação	Temperatura de transição Vítreia (Tg) [°C]	Densidade [kg/m ³]	Módulo de Young [GPa]	Tensão de cedência [MPa]
ABS	Acrilonitrilo-butadieno-estireno	108	1,02-1,20	2,2	33
PLA	Ácido Polilático	63	1,00-2,47	3,1	26
PA 6	Nylon 6	60	1,09-1,29	2,2	68
PC	Polycarbonato	161	1,18-1,26	1,9	57
ASA	Acrilonitrila-estireno-acrilato	108	1,00-1,24	2,0	33
PEEK	Poliéter-éter-cetona	149	1,26-1,50	3,1	93
ULTEM	Polieterimida	215	0,06-1,78	2,7	81

Os valores apresentados na tabela representam valores indicativos das propriedades dos materiais, tendo em conta variantes disponibilizadas pela empresa *Stratasys*. De acordo com a mesma, os resultados obtidos resultam de testes executados segundo normas da ASTM.

2.3 Estrutura das impressoras

As impressoras utilizadas em FDM têm características particulares decorrentes das especificidades do processo. No entanto, existe alguma diversidade no que diz respeito ao tipo de impressoras disponíveis, sendo que as vantagens e desvantagens de cada uma determina o tipo de aplicação para o qual esta será mais adequada. Apesar disso, as impressoras têm componentes comuns que determinam o seu funcionamento.

Em seguida, serão apresentados os componentes base, necessários à construção de impressoras 3d, bem como algumas variantes, quando aplicável.

2.3.1 Cabeça de extrusão

A cabeça extrusora é o elemento responsável pela extrusão do filamento. Para tal, esta compreende vários componentes que tornam possível essa tarefa. Esta pode ser dividida em secção fria (*cold-end*) e secção quente (*hot-end*).

A secção fria tem a função de puxar o filamento e alimentar a secção quente. Esta é constituída por um MPP (Item 1, Figura 2.4), uma polia dentada (Item 2, Figura 2.4) e uma engrenagem intermédia (Item 5, Figura 2.4). A polia, acoplada ao motor, possui estrias que, com o auxílio da engrenagem intermédia, puxam o filamento. A engrenagem intermédia pode ser carregada por uma mola ajustável para garantir maior aderência [53, 54].

Os extrusores podem ser de dois tipos, tendo em conta a localização da secção fria. Se o conjunto que puxa o filamento estiver montado junto da secção quente, designa-se extrusor direto. Se, por outro lado, a secção fria não estiver acoplada à zona quente, designa-se extrusor *bowden*. Neste caso, o conjunto do motor e engrenagens encontra-se fixo e puxa o filamento da bobina até à secção quente por intermédio de um tubo. Esta configuração permite reduzir o peso da cabeça móvel, conseguindo um posicionamento mais preciso. Em contrapartida, esta solução não é indicada para materiais flexíveis, pois é mais difícil forçá-los ao longo de um comprimento maior [55, 56].

Na secção quente (*hot-end*), o polímero é aquecido e depositado. Os componentes desta secção são maioritariamente metais não reativos como o alumínio, latão e aço inoxidável [56]. O bico extrusor (Item 9, Figura 2.4) é o elemento por onde o material sai para o exterior. Esta peça é substituível e determina a resolução da impressão. Acima do bico está localizado o bloco de aquecimento (Item 8, Figura 2.4), que através do cartucho (Item 4, Figura 2.4) fornece

energia para elevar a temperatura do termoplástico. O controlo da sua temperatura é monitorizado pela colocação de um sensor de temperatura [53, 54, 57].

O bom funcionamento do processo de extrusão só é possível se o aquecimento do material for localizado junto ao bico extrusor, sem que se estenda ao longo de todo o filamento. Por este motivo, a montante do bloco de aquecimento estão localizados elementos de arrefecimento, tais como dissipadores de calor com alhetas (Item 7, Figura 2.4) e, eventualmente, uma ventoinha (Item 3, Figura 2.4) [53, 57].

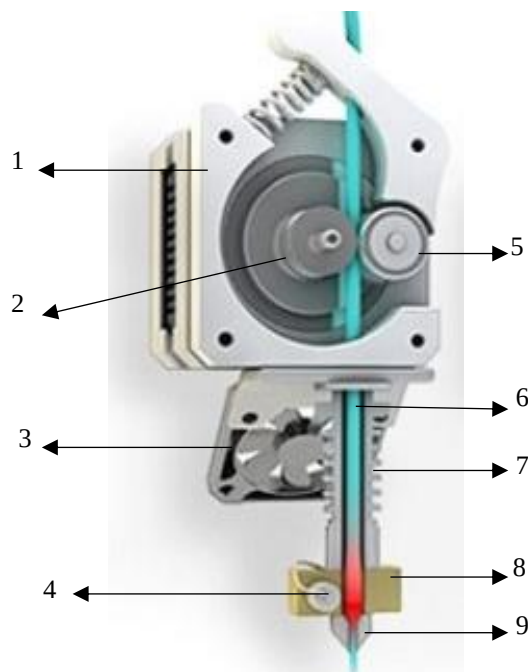


Figura 2.4 - Esquema de uma cabeça extrusora de extrusão direta [53]. 1 - MPP; 2 - Polia dentada; 3 - Ventoinha; 4 - Cartucho de aquecimento; 5 - Engrenagem intermédia; 6 - Filamento de termoplástico; 7 - Dissipador de calor; 8 - Bloco de aquecimento; 9 - Bico de extrusão.

2.3.2 Base de impressão

A base de impressão (também designada por *build plate* ou *print bed*) é a superfície sobre a qual o polímero é extrudido, sendo que esta determina a área útil de impressão. O principal fator que distingue os vários tipos de bases é a possibilidade de estas serem aquecidas.

Uma base aquecida, como referido na Secção 2.2.2, permite retardar o arrefecimento das peças e assim prevenir a ocorrência de empenos, e ainda ajudar a uma maior adesão das primeiras camadas. A sua utilização é fundamental para a impressão de certos materiais, como o ABS e o Nylon, e a sua temperatura pode variar entre os 40 °C e 110 °C [57]. Normalmente, estas são de alumínio ou vidro temperado, podendo ocasionalmente ser de aço inoxidável [56].

O recurso a bases não aquecidas é uma solução mais económica, mas apenas possível para impressão de materiais menos suscetíveis a empenos, como é o caso do PLA [57].

Independentemente do aquecimento da base, pretende-se que o seu material não deforme ao longo do tempo, para que ele próprio sirva de referência à calibração da cabeça de impressão. Por esse motivo, o vidro é o material mais utilizado [56].

2.3.3 Arquitetura

A geometria das impressoras é uma característica que faz uma distinção clara entre as máquinas de impressão. A sua estrutura influencia o seu modo de funcionamento, os componentes necessários e performance. Os principais tipos de geometria de impressora são a cartesiana, delta, polar e com braço robótico.

Cartesiana

A sua designação provém do sistema de eixos cartesiano (X, Y e Z) e neste tipo de arquitetura são usadas apenas juntas prismáticas, o que, em termos matemáticos simplifica a caracterização do espaço de trabalho. É devido a esta simplicidade que, atualmente, este tipo de impressora é o mais popular, existindo inúmeros fabricantes que o disponibilizam [58-60].

As suas principais vantagens incluem a simplicidade cinemática, que a tornam mais fácil de operar (*user friendly*), o custo mais reduzido e uma área de trabalho relativamente grande, que permite a impressão de vários objetos em simultâneo [61].

Dentro das impressoras cartesianas, podem existir várias combinações, em relação à definição das partes fixas e móveis. No arranjo mais frequente, a cabeça extrusora movimenta-se de forma independente nos eixos X e Y e a base desloca-se na eixo vertical, Z [56, 58]. A patente original seguia esta filosofia e, atualmente, esta pode ser encontrada em impressoras *MakerBot*, *Ultimaker* (Figura 2.5 a)) [14, 56, 58]. Em alternativa, a cabeça pode movimentar-se nos eixos X (ou Y) e Z e a base apenas no eixo Y (ou X), obtendo-se uma estrutura mais compacta, mas menos rígida, como é o caso da impressora *Prusa i3* (Figura 2.5 b) [24, 56, 62].

Uma outra configuração que tem vindo a ganhar popularidade é a estrutura cartesiana Core XY (Figura 2.5 c)). Ao contrário das construções anteriores, trata-se de um manipulador paralelo que se movimenta num sistema de eixos cartesianos. É caracterizado por ser atuado por motores estacionários que promovem o movimento coordenado da cabeça no plano XY por meio de um conjunto de correias, que garantem grande estabilidade de posicionamento. O movimento vertical é assegurado de forma independente. A reduzida inércia da cabeça móvel e consequente capacidade de aceleração são as suas principais vantagens [63, 64].



Figura 2.5 - Impressoras FDM com geometria Cartesiana. a) Esquema de movimento impressora cartesiana tradicional [65]; b) Impressora cartesiana *Prusa i3* [62]; Impressora Cartesiana Core XY [66].

Delta

As impressoras do tipo delta trabalham igualmente no espaço cartesiano, no entanto, a sua estrutura e funcionamento são diferentes da estrutura anterior.

As impressoras do tipo delta são estruturas com uma cadeia cinemática fechada, o que significa que o órgão terminal se encontra ligado a uma plataforma fixa com recurso a pelo menos duas cadeias cinemáticas independentes [67]. Nestas impressoras, o elemento móvel é a cabeça extrusora, a qual se encontra ligada por três braços paralelos em forma triangular, justificando assim a designação delta. Os eixos de movimento são montados na vertical e funcionam como carril para uma carruagem que faz a ligação entre o eixo vertical e o órgão terminal [68]. Desta forma, a cabeça de extrusão encontra-se suspensa acima da base de impressão, que geralmente tem a forma circular e é estacionária, e pode movimentar-se para qualquer local físico do volume trabalho pela alteração da posição relativa entre os braços [56].

O facto de a estrutura responsável pelo movimento da cabeça de extrusão se encontrar montada na plataforma constitui uma grande vantagem deste tipo de impressoras, uma vez que reduz muito o seu peso e a inércia. Por este motivo, a impressora terá melhores tempos de resposta e consegue assegurar maiores velocidades de impressão sem afetar a precisão.

Devido ao seu *design*, o volume de trabalho é grande, permitindo a construção de objetos em altura. No entanto, a impressora tem de ser muito maior para poder acomodar a estrutura de movimento [58, 61].

De uma forma geral, as impressoras delta distinguem-se das cartesianas por conseguirem tempos de construção mais curtos e melhor acabamento superficial de peças. Em sentido inverso, a precisão das cartesianas é ligeiramente melhor [69].

A popularidade das impressoras delta tem crescido nos últimos anos e atualmente é possível encontrar vários fabricantes a comercializá-las. São disso exemplo a impressora *ORION Delta 3D Printer* (Figura 2.6 b)) e a *Rostock Max™ 3D Printer* (Figura 2.6 c)).

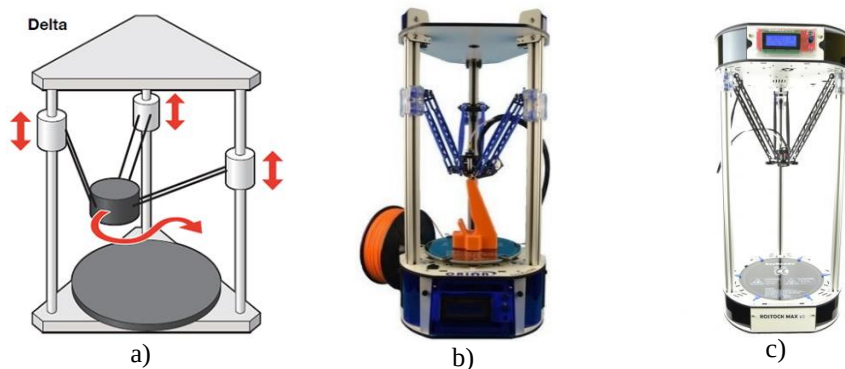


Figura 2.6 - Impressoras FDM com geometria Delta. a) Esquema de movimento impressora delta [63]; b) Impressora Delta *ORION* [70]; c) Impressora Delta *Rostock Max* [71].

Polar

As impressoras polares são um tipo de impressora emergente que usa um sistema de coordenadas cilíndricas e, por isso, faz uso de uma distância e um ângulo para descrever a posição de um ponto no plano e uma distância vertical (Z), em vez de coordenadas X, Y e Z, como no caso das impressoras anteriores. Esta característica permite uma estrutura de funcionamento em que a base efetua movimento de rotação e translação e a cabeça é movida independentemente, na vertical.

A sua grande vantagem reside no facto de se poderem usar apenas dois motores para assegurar o movimento total, ao invés das impressoras anteriores em que é necessário pelo menos um motor para cada eixo, o que a torna numa impressora energeticamente mais eficiente. Esta particularidade é conseguida usando um fuso roscado, com uma configuração que permita que o movimento tangencial da base seja comandado pelo mesmo motor que assegura o movimento vertical da cabeça. O passo do fuso deverá ser de tal forma pequeno de forma a que, quando este é acionado para movimento da base, a deslocação vertical da cabeça não seja significativa ao ponto de afetar a qualidade da impressão. Nesta configuração, uma rotação completa da mesa desloca a cabeça uma distância igual ao passo do fuso.

Para além disso, estas impressoras podem ter um grande volume de impressão para uma estrutura física relativamente pequena, aliada a uma qualidade de impressão razoável.

A sua utilização é menos intuitiva quando comparada com a cartesiana, o que influencia negativamente a sua popularidade e comercialização.

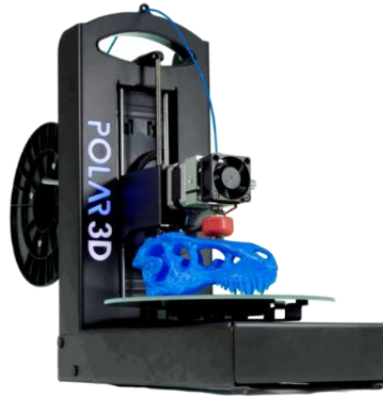


Figura 2.7 - Impressora FDM Polar [72].

Braço Robótico

A utilização de braços robóticos no contexto do FA não é muito comum, contudo, tem-se vindo a assistir ao seu crescimento. Este fenómeno espelha os desenvolvimentos que têm sido feitos na área do FA, com o objetivo de explorar novas potencialidades e melhorar as características do processo.

Este tipo de impressoras FDM não se encontram disponíveis comercialmente, sendo usadas essencialmente em ambiente de investigação científica, sem reprodução em escala. A sua utilização visa tirar partido da grande flexibilidade dos braços robóticos, tornando mais fácil a construção de peças complexas, sabendo-se de antemão que a sua precisão será menor do que se fosse usada uma impressora cartesiana. Na Secção 3.5, e por estar diretamente relacionado com o objeto de estudo do trabalho, será feita uma análise mais aprofundada de sistemas de impressão por FDM desenvolvidos com recurso a braços robóticos.

2.3.4 Componentes elétricos

A inclusão de elementos elétricos é fundamental para a integração e sincronização de todos os sistemas e assegurar o funcionamento de uma impressora 3d. Esta secção incluirá uma abordagem geral destes componentes. A Figura 2.8 ilustra um esquema de componentes eletrónicos de uma impressora e a forma como eles se interconectam.

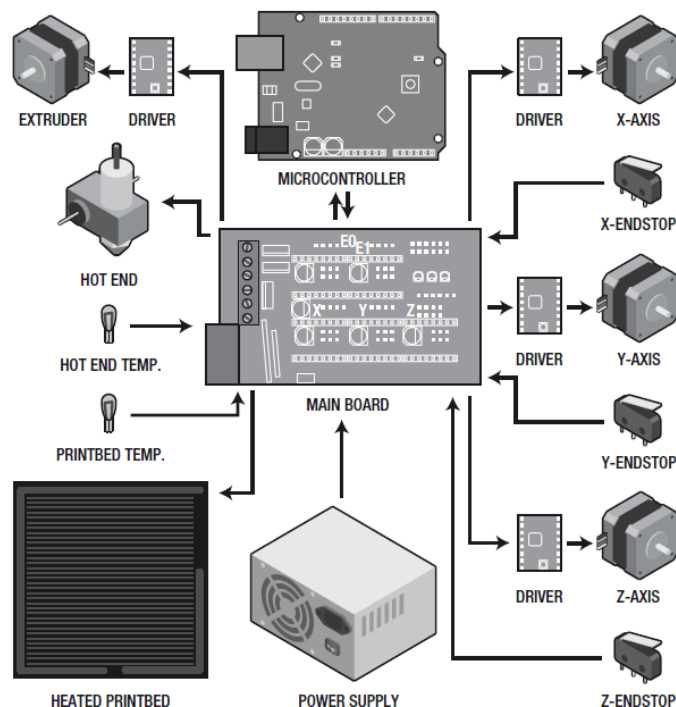


Figura 2.8 - Esquema elétrico e eletrónico de uma impressora 3D [60].

A fonte de alimentação é um elemento elétrico indispensável que fornece corrente contínua a todos os componentes elétricos da impressora. A tensão disponibilizada é normalmente de 12 V ou 24 V, dependendo dos requisitos da impressora [53].

O elemento central da estrutura eletrónica é a placa principal (*main board*), a qual estabelece a ligação entre o *hardware* e o microcontrolador, o cérebro de todo o sistema. A placa principal funciona como um ponto central de distribuição de energia, recebendo-a da fonte de alimentação e distribuindo-a para os outros sistemas, conforme as necessidades [60].

O microcontrolador consiste num computador que corre um dado *firmware*, que lhe permite interpretar os sinais provenientes dos sensores e enviar sinais para controlo dos vários subsistemas (movimento dos MPP e aquecimento). No caso dos MPP, o seu funcionamento é feito por intermédio de *drivers*. Estes podem ser incluídos na placa principal ou serem ligados enquanto módulos separados.

Da mesma forma, também o microcontrolador pode ser incluído numa placa única juntamente com a placa principal [60, 73]. Neste sentido, existem soluções que agrupam todos os elementos eletrónicos num único componente, como são exemplo as placas Duet3D que correm o *firmware RepRap*, ou as placas Smoothieboard, que correm o *firmware Smoothieware*. Um outro exemplo de solução de eletrónica conjunta consiste na utilização da placa *Arduino Mega* com o *shield RAMPS*, específico para sistemas de impressão 3d [74-76].

As impressoras usam também dispositivos como leitores de cartões SD, portas USB ou interfaces *wi-fi*, permitindo uma via de comunicação entre estas e um computador. Neste sentido, é frequente encontrarem-se ecrãs digitais e botões, como interface, que permitem controlar a impressora sem ter de estar diretamente conectada a um computador [53, 73].

2.4 Limitações do processo

O processo de FDM é muito inovador e apresenta vantagens que o tornam atrativo e com grande potencial de crescimento, destacando-se pela capacidade de produzir peças de geometria complexa, colmatando, desta forma, algumas falhas típicas dos processos subtrativos. No entanto, apresenta igualmente limitações que condicionam a sua utilização, tanto de um ponto de vista da natureza do processo como dos equipamentos utilizados. Esta secção pretende enfatizar os defeitos do processo associados à natureza dos equipamentos utilizados, nomeadamente identificar os defeitos decorrentes da utilização de impressoras com 3 eixos de movimento e perceber como o recurso a dispositivos que façam uso de mais eixos podem minimizar os mesmos.

De uma forma geral, o processo de FDM compreende tempos de construção elevados, diretamente relacionado com as dimensões do orifício de extrusão. O tempo de construção de uma peça pode ser controlado através da alteração de trajetórias de enchimento, numa relação de compromisso com a qualidade estrutural da peça. O facto de os orifícios serem redondos também impossibilita que se construam arestas externas precisas, pois existirá sempre um raio equivalente ao do orifício em cada canto ou aresta [5].

A qualidade superficial de peças produzidas por FDM é geralmente baixa. Este facto é devido à construção em camadas que origina um efeito de construção em degrau (*stair-stepping effect*). Este efeito é particularmente acentuado na construção de superfícies curvas e oblíquas, em que a respetiva superfície é aproximada pela interpolação de várias camadas lineares (Figura 2.9). Este problema pode ser minimizado se forem utilizadas mais camadas, de espessura menor, ou seja, utilizando orifícios de menor diâmetro que resulta numa maior precisão na direção vertical e um consequente tempo de construção maior, ou através de uma plataforma de impressão com mais eixos, uma vez que permite a deposição do material numa superfície paralela à pretendida [3, 48, 77].

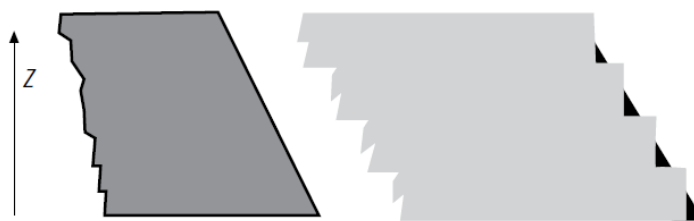


Figura 2.9 - Esquema exemplificativo do defeito de construção em degrau - *Stair-stepping effect*. Diferença entre superfície desejada e superfície real [48].

O mecanismo de deposição em camadas origina um problema de anisotropia nas peças a serem produzidas. As propriedades do material irão depender da direção de deposição, sendo que a peça apresentará uma resistência significativamente inferior na direção vertical em relação ao plano onde se dá a deposição e a respetiva direção de deposição [78, 79]. A atenuação deste problema pode ser conseguida recorrendo a uma máquina de impressão com mais eixos, em que é possível proceder à deposição de camadas em direções diferentes, permitindo otimizar as propriedades mecânicas da peça a produzir em função dos esforços a que será sujeita [80].

A necessidade de construção de suportes é outra limitação típica do processo de FDM. Os suportes são indispensáveis no fabrico de peças que compreendam saliências, zonas suspensas ou pequenos detalhes. A sua utilização implica um desperdício significativo de materiais, energia e tempo, uma vez que estes não fazem parte da peça e, por isso, devem ser removidos numa fase de pós-processamento. A sua remoção é, na maior parte dos casos, feita de forma manual, o que acresce mais tempo ao processo, e pode danificar a superfície de onde estes são arrancados, podendo ser necessário um acabamento superficial posterior. A utilização de máquinas de impressão com mais eixos não elimina o problema da necessidade de suportes, contudo, a maior liberdade que concede ao posicionamento da peça, permite orientar a peça numa posição ótima de forma a minimizar a sua utilização, podendo inclusive a orientação ser alterada durante o processo de fabrico [48, 77, 81].

O processo de FDM tem ainda como desvantagem o facto de não ser possível construir à volta de estruturas já existentes (como por exemplo, fios elétricos), porque a liberdade de movimento do extrusor é limitada, em particular nos mecanismos de impressão tradicionais que utilizam apenas 3 eixos em que a orientação da peça é fixa. Tal como os defeitos referidos anteriormente, este pode ser minimizado se for utilizada uma máquina com mais eixos que conceda maior liberdade de posicionamento e orientação da peça e/ou do extrusor [78]

3 Estudo de robôs industriais

Esta secção visa introduzir a área da robótica na presente dissertação, enquanto disciplina fundamental para o desenvolvimento do projeto. Esta irá abordar a robótica enquanto disciplina de engenharia, um pouco da sua história, a sua definição e conceitos fundamentais. O objetivo principal prende-se com o estudo de aplicações de robótica, nomeadamente robôs articulados, na área do FA, em particular no processo de FDM, por forma a contextualizar o projeto da presente dissertação.

3.1 Introdução à robótica

O conceito de robótica possui raízes culturais profundas que se cruzam com a história da humanidade. Ao longo dos séculos, o Homem tem tentado constantemente procurar substitutos que imitem o seu comportamento nas várias instâncias de comunicação com o ambiente que o envolve. Os primeiros passos dados para o surgimento da robótica foram dados com a Revolução Industrial e com o surgimento de autómatos, estruturas mecânicas encarregues de substituir o ser humano em tarefas de trabalho subordinadas. Contudo, o termo “robô” surgiu apenas no início do século XX, introduzido pelo dramaturgo checo Karel Capek, na sua obra “Rossum’s Universal Robots”. O termo “Robota”, que em Checo significa servidão ou escravo, foi utilizado para denominar máquinas desenhadas para a realização de tarefas humanas. Desde então, o termo tem sido aplicado a uma grande variedade de dispositivos mecânicos com algum grau de autonomia, geralmente controlados por um computador [82, 83].

A evolução do conceito de “robô” foi influenciada por literatura de ficção-científica, que criou mitos e princípios que perduram até hoje. Em particular, o escritor russo Isaac Asimov teve um papel importante ao criar três leis fundamentais de robótica, compatíveis com uma conduta ética de utilização de robôs. Segundo a sua formulação:

1. Um robô nunca deverá atacar um Homem ou, por inação, permitir que um ser humano seja posto em perigo;
2. Um robô deverá sempre obedecer a ordens dadas por humanos, desde que estas não entrem em conflito com a primeira lei;
3. Um robô deve proteger a sua própria existência, desde que esta proteção não entre em conflito com a primeira e segunda lei.

Estas leis são de grande importância e ainda hoje são tidas como basilares para o desenvolvimento de robôs [83].

O desenvolvimento de robôs foi massivo no decorrer do século XX e a respetiva implementação em meios industriais trouxe a necessidade de criar normas que os caracterizassem. Neste sentido, a norma ISO estabelece que um Robô Industrial é um manipulador com vários graus de liberdade, de posicionamento automático e reprogramável. Este é igualmente capaz de transportar materiais, peças ou ferramentas através de movimentos programados, no desempenho de tarefas variadas. Outras instituições como a RIA (*Robot Institute of America*), a BRA (*British Robot Association*) ou a JIRA (*Japanese Industrial Robot Association*) têm as suas próprias definições de robô industrial, no entanto, o elemento fundamental e transversal a todas elas é a capacidade de estes serem reprogramáveis [82].

3.2 Fundamentos de robótica

De uma forma geral, os componentes principais de um robô industrial são: uma estrutura mecânica, atuadores, sensores e um controlador.

3.2.1 Estrutura mecânica

A estrutura mecânica ou manipulador de um robô consiste numa sequência de corpos rígidos (elos) ligados por meio de articulações (juntas). Um dos extremos da cadeia está fixo e é considerado a base, e no outro extremo está montado o órgão terminal. O movimento da estrutura é, por isso, obtido através da composição dos movimentos elementares de cada elo em relação ao anterior. Esta relação pode ser traduzida matematicamente através de conceitos de álgebra linear para a formulação de equações de cinemática direta. Estas equações relacionam a posição e orientação do órgão terminal com as variáveis do espaço das juntas. O espaço das juntas consiste no conjunto das juntas do robô e nos valores que elas tomam. A posição e orientação do órgão terminal definem o espaço operacional, onde normalmente as tarefas do robô são definidas. Em sentido inverso às equações de cinemática direta, é possível formular as equações de cinemática inversa, que permitem calcular o valor das variáveis do espaço das juntas a partir de variáveis do espaço operacional.

Como referido, as juntas têm a função de estabelecer uma articulação entre dois elos consecutivos e podem ser prismáticas (P) ou rotativas (R) (ou revolutas). Uma junta prismática possibilita um movimento de translação relativo entre dois elos, enquanto que uma junta rotativa possibilita um movimento de rotação relativo entre os mesmos. As juntas, são, por isso, o elemento que induz movimento numa estrutura robótica e acrescentam à respetiva estrutura graus de mobilidade (GDM). Os graus de mobilidade devem ser dispostos na estrutura de forma a garantirem os graus de liberdade (GDL) necessários ao desempenho de uma tarefa. Por vezes estes termos são utilizados de forma incorreta, e, por isso, é necessário ter em conta que, por um lado, os graus de liberdade indicam o número de movimentos independentes que o órgão terminal pode realizar em relação aos eixos do seu sistema de coordenadas. No caso mais geral, um robô apresenta seis graus de liberdade, três para posicionamento do órgão terminal e outros três para a sua orientação. Por outro lado, os graus de mobilidade indicam o número de elementos móveis do robô. Se um manipulador possuir mais graus de movimento do que graus de liberdade, ele é considerado cinematicamente redundante.

A estrutura mecânica de um robô é responsável por definir o espaço de trabalho do mesmo, que consiste no volume total do ambiente envolvente a que o órgão terminal consegue aceder. A forma do espaço de trabalho e o seu volume efetivo são determinados pela cinemática do robô, o número de graus de liberdade e pelos limites mecânicos das juntas.

Tendo em conta a sua estrutura mecânica, os robôs podem ser de dois tipos. Por um lado, podem ser robôs série, de cadeia cinemática aberta, em que existe apenas uma sequência de braços que liga os dois extremos da cadeia (base e órgão terminal). Em alternativa, existem os robôs paralelos, de cadeia cinemática fechada, em que a sequência de braços do robô forma um ciclo fechado [82-84]. Na secção 3.3, será feita uma análise mais detalhada das diferentes estruturas robóticas existentes

3.2.2 Atuadores

O movimento do robô é assegurado pela atuação das juntas, e para esse efeito são utilizados atuadores, que fornecem a energia que será convertida em movimento. Os principais requisitos dos atuadores são baixa inércia, elevada aceleração, uma gama de velocidade alargada, boa relação peso-potência, manutenção simples, eficiência energética e custo adequado. A tecnologia de acionamento dos atuadores pode ser elétrica, hidráulica ou pneumática. Os atuadores hidráulicos garantem um bom tempo de resposta e um binário elevado e, por isso, são primariamente indicados para o levantamento de cargas elevadas. Esta tecnologia de acionamento tem como desvantagens a necessidade de equipamentos periféricos (tais como bombas, que requerem maior manutenção), a propensão para fugas e o ruído. A atuação elétrica através de servomotores AC e DC e motores passo-a-passo é bastante comum, na medida em que estes são mais baratos, mais limpos, menos ruidosos e mais fáceis de controlar do que os anteriores. O recurso a energia pneumática também é possível,

apresentando-se como uma solução simples e de baixo custo. No entanto, devido à compressibilidade do ar, não é possível fazer um controlo preciso e, por isso, a sua gama de aplicações é limitada [82, 85].

3.2.3 Sensores

Um robô vem igualmente equipado com um conjunto de sensores adequado, que monitoriza o estado do próprio e do ambiente, assegurando uma interação flexível entre eles. A função dos sensores dos robôs pode ser dividida em duas categorias: estado interno e estado externo. Os sensores de estado interno são responsáveis pela deteção de variáveis utilizadas no controlo do robô, como, por exemplo, a posição das juntas. Por outro lado, os sensores de estado externo intervêm na interação do robô com o meio envolvente, em tarefas como guiamento do robô, identificação e manipulação de objetos, medindo variáveis como distância e proximidade.

Os sensores mais utilizados em robótica são sensores de posição (angular e linear), sensores de velocidade, sensores de força e aceleração e detetores de posição. O sinal de saída destes pode ser analógico ou digital, dependendo do tipo de sensor. Para medição da posição angular, podem ser usados *encoders* absolutos ou incrementais, *resolvers* ou potenciômetros. A medição de posição linear pode ser feita com recurso a réguas incrementais, *encoders* lineares, potenciômetros ou transdutores de deslocamento linear como o LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*). A medição de velocidade geralmente é feita com sensores dínamo-taquímetro, a medição de aceleração com acelerómetros e a medição de força e binário com dispositivos mecânicos equipados com extensómetros. Para a deteção de posição podem ser utilizados detetores de proximidade como sensores indutivos, de efeito *hall*, capacitivos, ultrassónicos ou óticos, ou detetores eletromecânicos, como interruptores de fim-de-curso [83, 86].

3.2.4 Controlador

O componente responsável por integrar todos os componentes de um robô é o seu controlador, o elemento central de todo o sistema, que permite o controlo e supervisão do movimento do robô. O controlador é tido como um computador capaz de desempenhar múltiplas tarefas necessárias à operação de robôs. Neste sentido, um controlador, numa primeira análise, necessita de uma unidade de processamento e elementos de memória para processar toda a informação que recebe e poder transformá-la em ações de controlo e, por isso, também requer interfaces com as entradas e as saídas. O controlador contém também pelo menos uma fonte de alimentação para distribuir energia por todos os seus componentes elétricos e, no caso de robôs acionados eletricamente, o controlador também tem incorporados os *drivers* dos motores. De um ponto de vista lógico e integração de *software*, o controlador é responsável pela geração de trajetórias e implementação de algoritmos de controlo.

O controlo de um robô pode ser feito em posição, se for requerido ao manipulador que este mova o órgão terminal ao longo de uma determinada trajetória, com ou sem uma carga, sendo esta a filosofia de controlo mais utilizada. Em alternativa, este pode ser controlado em força.

O objetivo do planeamento de trajetórias é gerar leis no tempo para as variáveis relevantes ao controlo do robô (juntas ou órgão terminal), tendo em conta o movimento desejado. As trajetórias geradas serão *inputs* de referência para o sistema de controlo de movimento. A geração de trajetórias pode ser feita ponto-a-ponto ou através de trajetórias contínuas. Numa trajetória ponto-a-ponto, é indicado um conjunto de pontos discretos no espaço, mas não existe controlo da trajetória do órgão terminal entre estes. O algoritmo deve gerar uma trajetória que seja capaz de otimizar o desempenho das juntas. Por outro lado, em trajetórias contínuas, todo o percurso do órgão terminal pode ser controlado, por exemplo, para seguir uma linha reta entre dois pontos ou seguir um contorno circular. O problema da geração

de trajetórias contínuas pode ser interpretado como a especificação de um grande conjunto de pontos que o órgão terminal deve atingir em determinados instantes de tempo. É possível simplificar a criação de trajetórias contínuas utilizando polinômios de interpolação que aproximem os pontos alvo por uma trajetória contínua.

O controlo de movimento tem como objetivo, a partir das trajetórias geradas, definir o comportamento no tempo das forças e binários das juntas de forma a garantir a execução da trajetória. Este problema é particularmente complexo, uma vez que um manipulador é um sistema articulado em que o movimento de um braço influencia o movimento dos restantes.

De uma forma geral, o controlo do robô pode ser feito no espaço das juntas ou no espaço operacional. O problema de controlo no espaço das juntas pode ser dividido em dois. Em primeiro lugar, os requisitos de movimento do espaço operacional são convertidos em variáveis do espaço de juntas. Em seguida, um esquema de controlo no espaço das juntas é implementado, de forma a monitorizar os *inputs* de referência. Esta solução tem a desvantagem de não influenciar as variáveis do espaço operacional que são controladas em anel aberto através da sua estrutura mecânica. O controlo no espaço operacional segue uma abordagem global que requer um algoritmo complexo. Neste caso, a conversão do espaço operacional em espaço das juntas está incluída no anel de *feedback*. Conceptualmente, este tipo de controlo possibilita a intervenção direta no espaço operacional, no entanto, como na maior parte das vezes a medição de variáveis do espaço operacional não é direta, esta tem de ser feita pela avaliação de variáveis do espaço das juntas pelas equações da cinemática direta [82, 83, 87].

3.3 Tipos de estruturas robóticas

Na Secção 2.3.3, foi feito o levantamento do tipo de arquiteturas de impressoras 3D existentes no mercado. As arquiteturas existentes são baseadas em estruturas robóticas de diferentes tipos. Nesta secção, pretende-se fazer uma abordagem geral dos diferentes tipos de estruturas robóticas, dando-se especial atenção às estruturas antropomórficas, uma vez que não corresponderem a nenhuma arquitetura de impressão 3D comercial e por serem objeto de estudo do presente trabalho. Neste sentido, esta secção serve como complemento para a informação apresentada para a arquitetura das impressoras 3D.

Serão apresentadas as estruturas cartesiana, cilíndrica, esférica, SCARA e antropomórfica, correspondendo todas a estruturas robóticas em série.

A estrutura cartesiana (PPP) é um exemplo de estrutura em série bastante comum. Esta é constituída por três juntas prismáticas mutuamente ortogonais, em que cada grau de mobilidade corresponde a um grau de liberdade, o que facilita deslocações lineares no espaço. Devido à boa rigidez mecânica, a precisão de posicionamento do órgão terminal é constante em todo o espaço de trabalho, que tem a forma paralelepípedica. Manipuladores cartesianos são utilizados no manuseamento de materiais e tarefas de montagem. A sua atuação é normalmente feita com motores elétricos e ocasionalmente com atuadores pneumáticos.

A estrutura esférica (RRP) pode ser definida a partir de uma estrutura cartesiana se a primeira e segunda juntas, prismática, forem substituídas por juntas revolutas. No caso de a tarefa ser descrita em coordenadas esféricas, cada grau de movimento corresponde a um grau de liberdade e o seu espaço de trabalho é uma porção de uma esfera oca. A rigidez mecânica é mais baixa que a geometria anterior e a construção mecânica é mais complexa. Os manipuladores esféricos são maioritariamente usados para operações de maquinaria e são normalmente atuados eletricamente.

A estrutura SCARA (RRP) (*Selective Compliance Assembly Robot*) corresponde a uma geometria especial utilizada em robótica que pode ser obtida dispondo duas juntas revolutas e uma prismática de forma a que todos os eixos de movimento sejam paralelos. Esta estrutura apresenta elevada rigidez mecânica na direção vertical e conformidade na direção horizontal, o que lhe permite adaptar o posicionamento nesta posição de forma mais flexível. O seu espaço de trabalho tem a forma de um cardioide e é indicada para operações de montagem e

manipulação de objetos de pequena dimensão. Por este motivo, é normalmente atuada por motores elétricos.

A geometria antropomórfica (RRR), a mais frequentemente associada ao conceito de robô industrial, é constituída por três juntas rotativas. O eixo rotativo da primeira junta é perpendicular aos eixos das outras duas, que são paralelos entre si. Por semelhança com o braço humano, a segunda junta é também designada por ombro e a terceira por cotovelo, porque faz a ligação entre o braço e o antebraço. Esta estrutura é a que apresenta maior destreza, o que lhe confere elevada flexibilidade e consequente capacidade de ser utilizada para uma larga gama de tarefas. Em contrapartida, a sua rigidez é menor, não existe conformidade entre graus de mobilidade e graus de movimento, o que dificulta o seu controlo, e a precisão de posicionamento varia ao longo do espaço de trabalho. O espaço de trabalho, por sua vez, constitui uma porção de uma esfera e é maior que o seu atravancamento. A sua atuação é tipicamente feita por motores elétricos [83, 85].

A descrição apresentada diz respeito ao levantamento das estruturas típicas para o posicionamento de uma estrutura robótica. Se é desejada uma qualquer orientação para o órgão-terminal é necessário um punho com três juntas rotativas. Se os seus eixos se intersetarem num mesmo ponto, é designado por punho esférico (tipo de punho mais comum em robótica). Como o punho constitui a parte terminal do manipulador, este deve ser compacto, o que dificulta o respetivo desenho mecânico. A característica fundamental de um punho esférico é a possibilidade de se decompor a localização do órgão terminal e definir a respetiva posição e orientação de forma independente. A estrutura geométrica é responsável pelo posicionamento e o punho pela orientação. Quando o punho não é esférico, a construção mecânica é simplificada, mas o posicionamento e orientação são interdependentes, o que dificulta a coordenação entre o movimento do braço e do punho ao desempenhar uma tarefa.

Com exceção para a estrutura cartesiana e SCARA, os outros tipos de estruturas são frequentemente utilizados em conjunto com punhos esféricos para a construção de braços robóticos articulados, com seis graus de liberdade. Tipicamente, estes robôs apresentam elevada flexibilidade e velocidade de operação e são utilizados em tarefas de instalação e remoção complexas, devido à sua capacidade de atingir posições à volta de estruturas já existentes e poderem rodar o órgão terminal, ou ainda soldadura, pintura, descarregamento de moldes e tarefas de manutenção de máquinas. O manipulador de Stanford (RRPRR) e o manipulador PUMA (RRRRR) são exemplos clássicos de robôs constituídos por estruturas diferentes e um punho esférico.

3.4 Caracterização de robôs

A escolha de um robô para uma determinada aplicação é feita tendo em conta as características do mesmo. Esta escolha considera vários fatores que caracterizam o seu desempenho e o tornam apto a cumprir uma determinada tarefa.

As variáveis que caracterizam o desempenho dos robôs são indicadas pelos respetivos fabricantes. Apesar de não existirem normas que regulem os testes feitos para a avaliação de performance e cada fabricante usar os seus próprios métodos de caracterização de desempenho, tipicamente são utilizadas as mesmas variáveis de referência e a comparação dos respetivos valores é essencial para a seleção adequada de um robô.

As características de performance de manipuladores robóticos dependem do efeito combinado da estrutura cinemática, do mecanismo de acionamento e do tipo de controlo de movimento em tempo-real implementado.

Uma das principais características é a carga útil (*payload*), dada em kg e que indica a carga máxima que o robô pode suportar. Este valor deve considerar o peso e inércia do órgão terminal (ferramenta) e cabos. No caso de robôs industriais série existe uma gama muito alargada que este valor pode tomar, variando desde cerca de um 1 kg até mais de 1000 kg.

O alcance do robô, geralmente dado em mm, é também uma característica importante, que define a máxima distância a que um robô pode ser extensível para desempenhar uma tarefa. O conceito de alcance está diretamente relacionado com a definição do seu espaço de trabalho e dos seus limites. O valor do alcance de braços robóticos é muito variável e pode ir desde cerca de 500 mm até mais de 3000 mm.

A caracterização da velocidade diz respeito à velocidade com que o órgão terminal pode ser posicionado no espaço operacional ou a velocidade máxima de uma junta. No caso de juntas prismáticas, este valor é dado em mm/s e para juntas rotativas este valor é apresentado em °/s (graus por segundo). Um valor médio para a velocidade de uma junta rotativa ronda os 500 °/s.

A precisão de um robô é uma variável difícil de caracterizar em robôs antropomórficos e geralmente não é especificada pelos fabricantes. Como alternativa, é usual definir-se a repetibilidade de um robô, que indica a capacidade de este localizar o seu órgão terminal num determinado ponto de forma repetida. Este valor é apresentado em mm, na forma de intervalo ($\pm$ mm) e normalmente é da ordem de grandeza da centésima do milímetro ou décima de milímetro. A repetibilidade é universalmente aceite para caracterização da precisão de robôs, contudo, admite-se que a precisão de um robô, que indica a diferença de posição entre um ponto definido no controlador e o respetivo ponto atingido no espaço de trabalho real, é pelo menos quatro vezes maior que a repetibilidade [67, 83, 84, 88, 89].

3.5 Aplicações robóticas em Fabrico Aditivo

Nesta secção pretende-se fazer um estudo de sistemas de FA envolvendo estruturas robóticas. Tendo em conta o projeto no qual se insere a presente dissertação, dar-se-á particular atenção a soluções envolvendo o processo de FDM e estruturas robóticas articuladas. Não obstante, analisar-se-ão outros projetos e soluções que possam acrescentar informação importante.

A utilização de estruturas robóticas em FA tem vindo a aumentar, fruto da maior popularidade dos métodos, da necessidade de melhorar as características dos processos, minimizar os seus defeitos e aumentar o seu campo de aplicações. Além disso, existe o interesse das entidades de desenvolvimento dos sistemas em ficarem bem posicionadas para dominar uma tecnologia que se prevê que venha a ter de grande importância no futuro.

O campo de aplicações de tecnologia FDM com recurso a estruturas robóticas articuladas ainda é algo reduzido. Contudo, atualmente já existem sistemas muito inovadores, com provas dadas, que acrescentam grande valor a esta tecnologia.

3.5.1 Stratasys Robotic Composite 3D Platform

A “*Stratasys Robotic Composite 3D Platform*” é uma plataforma de impressão 3D muito avançada, destinada ao fabrico de peças em materiais compósitos e que resulta de uma parceria entre duas empresas-líder no respetivo setor de atividade. Nesta colaboração, tecnologias avançadas de extrusão de materiais compósitos são desenvolvidas pela *Stratasys* e estas são integradas com *hardware* industrial de controlo de movimento e destinado a *design* para FA, desenvolvidos pela *Siemens*.

Este sistema apresenta um caráter duplamente inovador. Por um lado, ao nível do *software* de controlo de movimento e geração de trajetórias e por outro ao nível do material.

Do ponto de vista do movimento, esta plataforma é constituída por um sistema de oito eixos de movimento (um braço robótico KUKA com seis graus de liberdade e uma base móvel com dois graus de liberdade), que permite uma deposição precisa de material em várias direções, por forma a maximizar a resistência da peça e o seu tempo de construção. Devido à liberdade de movimento introduzida pelo robô, este método de impressão 3D diferencia-se dos métodos tradicionais, por não ser feita em camadas, evitando o efeito de *stair stepping* e melhorando o acabamento superficial. Para além disso, a otimização das trajetórias de

deposição evita a construção de suportes e leva à redução de tarefas de pós-processamento e do tempo de produção total.

Simultaneamente, o facto de serem produzidos materiais compósitos permite a construção de peças de uma elevada gama de materiais e a construção de estruturas muito resistentes de peso reduzido.

A integração de *software* é feita com recurso ao gestor de ciclo do produto (PLM – *Product Lifetime Managemet*) da Siemens e ainda o *software* CAD, *Siemens NX*. O controlo de movimento é assegurado pelo *Siemens Sinumerik 840D sl CNC*, cuja arquitetura aberta combina o sistema *Siemens NC* com cinemáticas de robôs.

Este sistema de impressão ainda não está comercialmente disponível, no entanto, estão a ser feitos testes para o desenvolvimento de aplicações para a indústria automóvel e aeronáutica [90-92].

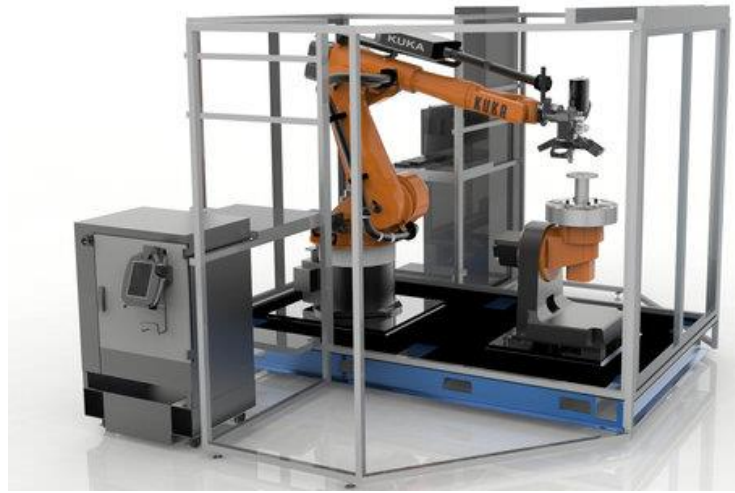


Figura 3.1 - *Stratasys Robotic Composite 3D Platform*. Plataforma de impressão 3D desenvolvida em parceria pela *Stratasys* e pela *Siemens* [92].

3.5.2 Compound Fabrication (Fabrico Composto)

A utilização de robôs articulados em operações de FA, foi já desenvolvida sob a forma de estruturas de fabrico composto (*Compound Fabrication*), que integram as principais tecnologias de FA, subtrativo e por conformação. Esta abordagem foi desenvolvida por S. Keating e N. Oxman [93] e permite alternar entre os diferentes métodos de fabrico, usando órgãos terminais diferentes, possibilitando assim uma solução global de fabrico de peças, capaz de executar a sua construção e também acabamentos.

Neste sistema, é utilizado um braço robótico articulado com seis graus de liberdade (KUKA KR5 sixxR850), programado na linguagem do próprio robô (*KUKA Robot Language – KRL*).

O projeto desenvolvido envolveu a realização de ensaios para a utilização do robô e dos órgãos terminais adequados com cada um dos três tipos de fabrico e ainda um ensaio final com a integração de todas.

Do ponto de vista do FA, foram utilizados sistemas com diferentes configurações. Numa primeira fase, foram feitos testes para a impressão de ABS numa configuração em que ao órgão terminal do robô estava acoplado um extrusor e o seu posicionamento foi feito de forma convencional no espaço XYZ, tendo-se obtido peças de qualidade equivalente às de impressoras 3D comerciais. Numa segunda fase, foi implementada uma configuração em que a cabeça de extrusão se encontrava fixa e a base de impressão era movida pelo robô, com o objetivo de conseguir imprimir peças em ABS com saliências sem a necessidade de suportes. A Figura 3.2 a) mostra a implementação bem-sucedida deste sistema com a construção de uma peça curva.

Neste trabalho, a inclusão dos diferentes tipos de fabrico foi implementada efetuando uma rotina de impressão tridimensional seguida de um processo de acabamento por subtração de material. Para assegurar a automatização de todo o processo e contornar o constrangimento derivado da necessidade de ferramentas diferentes para cada um dos processos, foi adotada uma arquitetura do sistema em que o braço robótico move a base de impressão e as respetivas ferramentas se encontram fixas em pontos distintos do espaço de trabalho (Figura 3.2b)).

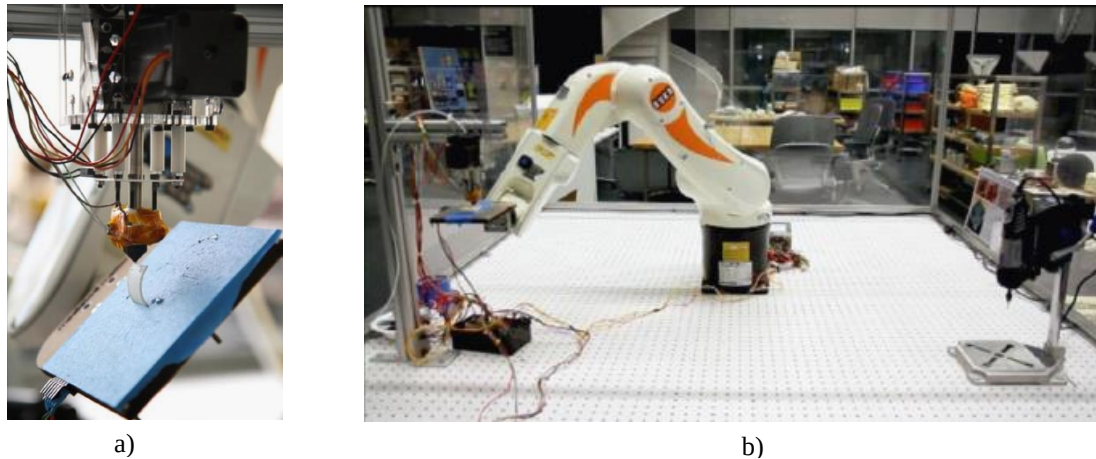


Figura 3.2 - Sistema de Impressão 3D *Compound Fabrication*. a) Utilização de braço robótico para o fabrico de peças sem suportes. Sistema com base móvel e cabeça fixa. b) Sistema para o fabrico de peças utilizando tecnologia de FA e subtrativo de forma automática. Estação de FA à esquerda e estação de fabrico subtrativo à direita [93].

3.5.3 RoboFDM

No sentido de evitar a construção de suportes no processo de FDM, na Universidade Tecnológica de Delft, na Holanda foi criado o “*RoboFDM*”, um sistema de impressão baseado num braço articulado, controlado por um algoritmo de impressão inovador.

Para o efeito, foi utilizado um braço robótico UR3 do fabricante *Universal Robots*, com seis graus de liberdade, de pequena dimensão e carga útil. A configuração deste trabalho foi implementada com um extrusor de PLA fixo numa armação e uma base movida pelo robô.

A lógica de impressão é feita recorrendo a um algoritmo de decomposição do modelo. Isto é, é feita a segmentação do modelo 3D em partes. Numa primeira fase, este é dividido ponderando aquilo que será o seu esqueleto, ou seja, uma estrutura central e ramificações. Seguidamente, é gerada a sequência de construção das respetivas partes de modo a evitar colisões e finalmente é feita uma segmentação mais rigorosa em cada parte, para refinar a sua sequência de impressão. Cada parte do modelo é dividida em camadas por um processo de *slicing* convencional, gerando-se o respetivo código G.

O sistema foi implementado para a construção de um “coelho” sem estruturas de suporte, o que seria impossível por um processo convencional (Figura 3.3 a)) A rigidez global da peça fabricada com o *RoboFDM* é menor devido à baixa adesão dos materiais entre regiões do modelo decompostas, contudo a adesão entre camadas de uma mesma zona é equivalente nos dois casos [94].



Figura 3.3 - Sistema de impressão 3D *RoboFDM*. a) Construção de um "coelho", onde é possível observar a divisão do modelo em diferentes regiões (à esquerda) e a construção de um "coelho" com uma impressora 3D convencional (à direita); b) Fase do processo de impressão onde é visível ao extrusor fixo e a base de extrusão móvel [94].

No seguimento deste trabalho e também com o objetivo de evitar a construção de suportes em peças obtidas por FDM, foi desenvolvido na mesma universidade um novo método para a geração de trajetórias de estruturas robóticas para impressão 3D. Este algoritmo é baseado numa estratégia de redução da dimensão de um modelo sólido. Um dado modelo é primeiro decomposto numa sequência de camadas curvas (transformação 3D em 2D), que são posteriormente convertidas em trajetórias de ferramenta curvas (transformação 2D em 1D). Uma vez que existem inúmeras possibilidades para a decomposição em superfícies e posteriormente em trajetórias, o sucesso deste algoritmo reside na otimização da trajetória de deposição final. Este método foi testado para a obtenção de alguns objetos, como é o caso de um “coelho” semelhante ao da experiência anterior e outros objetos, observáveis na Figura 3.4. O braço robótico utilizado, bem como os restantes equipamentos são os mesmos do estudo anterior [95].



Figura 3.4 - Objetos obtidos por impressão 3D através do sistema *RoboFDM* em que a decomposição do modelo é baseada num algoritmo de redução de dimensão [95].

3.5.4 Plataformas de impressão robóticas

A investigação no âmbito da utilização de braços articulados tem também sido feita no sentido de contornar o efeito anisotrópico de peças obtidas por FDM, alinhando a direção de extrusão com a solicitação mecânica a que estará sujeita. Estudos neste sentido foram levados a cabo por Joseph R. Kubalak et al., com o desenvolvimento de uma plataforma de extrusão que utiliza um braço robótico com o objetivo de explorar novas estratégias de deposição de material e o processamento de polímeros compósitos avançados. Para o efeito foi utilizado um braço articulado da ABB de alcance reduzido e baixa carga útil (ABB IRB 1200-7/0.7), ao qual se encontra acoplada uma cabeça extrusora desenvolvida especificamente para o projeto. O controlo do sistema de impressão é baseado em ROS (*Robotic Operating System*), com uma

interface que permite controlar os seus subsistemas (controlo e geração de trajetórias, mecanismo de extrusão, etc.)[96].

O equipamento utilizado neste projeto foi também utilizado para desenvolver uma técnica para reforço de provetes produzidos por FDM. No estudo realizado, foi criado um algoritmo de geração de trajetórias que permite, também pelo método de extrusão de termoplástico, adicionar uma camada exterior de reforço ao provete. A adição deste reforço foi feita por extrusão de ABS e teve efeitos ao nível do aumento da respetiva tensão de cedência e módulo de elasticidade. A utilização do braço robótico com seis graus de liberdade foi especialmente vantajosa, pois permitiu a impressão em torno de estruturas já existentes (uma das limitações do processo de FDM tradicional) e consequentemente atenuar o efeito anisotrópico das mesmas (também um defeito característico do processo de FDM) [97].

A utilização de um robô numa plataforma de impressão 3D também se encontra documentada no trabalho de Andi Dine et al. Neste trabalho foi criada uma cabeça de extrusão que possibilita a impressão de vários materiais, a qual é suportada por um braço robótico com seis graus de liberdade (Stäubli RX90L), que irá cumprir as trajetórias de impressão. Estas trajetórias são obtidas a partir de um *software* de *slicing* convencional, que permitiram obter peças com boa precisão, com um erro dimensional médio na ordem dos 3% [98].

No âmbito da produção de estruturas com materiais biocompatíveis também já foi desenvolvida uma estrutura de impressão baseada num braço robótico. Neste sistema, é utilizado um extrusor de *pellets*, fixo, que procede à deposição de um biopolímero num mandril que é suportado por um robô com seis graus de liberdade (ABB IRB 120). O método de impressão consiste na projeção de imagens 2D no modelo matemático do mandril, tornando possível a deposição sob superfícies curvas. Com esta técnica foi possível obter carapaças de biopolímero com elevado grau de semelhança com o modelo original e com carapaças obtidas por SLS [99].

O recurso a estruturas robóticas cartesianas e estruturas robóticas paralelas tem também expressão no campo das plataformas de impressão 3D com mais de três eixos. Projetos desenvolvidos neste âmbito tiveram como objetivo ultrapassar as referidas limitações típicas do processo de FDM. Na Universidade de Oslo, na Noruega, foi desenvolvida uma impressora de 5 eixos, a partir de uma estrutura cartesiana. O extrusor movimenta-se nas direções XYZ e a base contém dois graus de liberdade (rotação A e B). Neste trabalho foi possível obter peças sem estruturas de suporte e que minimizam o efeito de escada (*staircase effect*) no objeto [100]. Também se encontram documentados sistemas de impressão 3D baseados em estruturas delta (paralelas). Nos laboratórios de desenvolvimento da *Mitsubishi Electric*, a partir de uma impressora 3D do tipo delta foram adicionados dois graus de liberdade à base (rotações em relação aos eixos X e Y). Neste trabalho foi possível construir peças mais resistentes, alinhando a trajetória de deposição de material com a direção da solicitação a que a peça estará sujeita [80]. Outro exemplo da aplicação de impressoras do tipo delta foi desenvolvido por Hermes Giberti et al., com uma estrutura em que a cabeça de extrusão se encontra fixa e o movimento é assegurado pela base. A base possui os três graus de liberdade típicos de uma estrutura paralela acrescidos de dois graus de liberdade de rotação (rotação em relação aos eixos X e Z). Esta configuração possibilita a impressão de pós cerâmicos e metálicos numa estrutura multi-axial, tirando partido da cabeça extrusora fixa alimentada por *pellets* [77]. Com o objetivo de construir peças sem a necessidade de suportes, sem o efeito de construção em camadas e de forma a que se possa construir à volta de estruturas existentes, Xuan Song et al. desenvolveram um sistema em que a base de impressão é movida por uma plataforma *Stewart* com seis graus de liberdade e podem ser usadas ferramentas de deposição diferentes (sistema modular) [78].

3.5.5 Braços articulados em outros processos

Para além dos processos de extrusão referidos, direta ou indiretamente relacionados com o FDM, também é possível utilizar robôs industriais noutros processos de FA, em particular em processos derivados do DED (*Direct Energy Deposition*, ver Secção 2.1).

Um sistema robótico constituído por um robô articulado KUKA com seis graus de liberdade e uma base independente com dois graus de liberdade (rotação em torno de dois eixos da base) foi desenvolvido para implementação com o processo de LBDMD (*Laser Based Direct Metal Deposition*). Este sistema de oito eixos permite a reorientação da base de impressão pela combinação da reorientação da cabeça laser e da rotação do sistema de posicionamento, permitindo a redução do tempo de produção global. A execução deste projeto compreendeu um método de *slicing* específico, tendo-se obtido uma peça geometricamente complexa com elevada concordância com o modelo CAD original [101].

Importa também destacar uma solução comercial avançada que envolve a utilização de um braço robótico com seis graus de liberdade da ABB com o processo de DMD (*Direct Metal Deposition*). Este permite a construção de peças metálicas a partir de pós metálicos curados com uma cabeça laser. Esta combinação tem aplicação na reparação de componentes de precisão, como lâminas de turbinas, utilizando ligas metálicas de diversos materiais como aço de ferramentas, inconel e titânio [102, 103].

4 Braço robótico para a plataforma de impressão

Para o desenvolvimento do sistema de impressão foi utilizado um braço robótico de cinco eixos já existente, que será a base do sistema. O braço robótico é do fabricante *Igus®* da série *Robolink®* e corresponde a uma solução de robótica bastante flexível e não-convencional, uma vez que não corresponde a um fabricante típico de robôs e é comercializado sem um sistema de controlo incorporado. O sistema robótico *Robolink®* distingue-se por ser uma solução robótica de baixo custo, que disponibiliza vários componentes do robô de forma modular. Isto significa que o braço robótico pode ser configurado de acordo com as preferências do utilizador, de forma económica e com a possibilidade de obter um conjunto completo. A utilização deste tipo de robôs num contexto de impressão 3d revela-se adequada, uma vez que a flexibilidade de construção e de controlo do robô permitem a sua adequação a uma aplicação inovadora [104]. Assim, é possível utilizá-lo para a construção de um demonstrador do conceito de impressão 3d com um robô articulado.

O braço robótico tem a referência *Igus®* RL-DQ-RBT-5532S-BC e o seu desenho de conjunto está disponível no Anexo A.1. Este foi fornecido como uma solução completa de um braço articulado que inclui juntas *Robolink® D*, kits de motores passo-a-passo (MPP) *Igus®*, chapas metálicas quinadas como elementos de conexão, e cabos *Igus® e-chains®* e *chainflex®* [105]. Na sua constituição, o robô apresenta cinco juntas, quatro delas equipadas com um sistema parafuso sem fim/ roda de coroa e uma com engrenagem harmónica. A atuação é feita eletricamente com cinco MPP com *encoders*, sendo que dois são do tipo NEMA23XL, um NEMA 23, um NEMA 17 e um NEMA 11. Além disso, são incluídos cinco fins-de-curso que indicam a posição zero de cada junta, e quatro elos do robô, de comprimento variável que fazem a ligação entre as juntas. A cablagem é feita com cabos *Igus®* com um comprimento de 5m. O braço robótico tem uma carga útil máxima de cerca de 3 kg, um alcance próximo dos 750 mm e uma massa de cerca de 18 kg¹ [106].

O robô constitui uma solução eletromecânica, sem controlador ou qualquer unidade de processamento, o que requer uma solução de controlo independente, que pode ser bastante flexível, desde que cumpra com os requisitos do robô.

Na Figura 4.1 encontram-se, respetivamente, uma imagem do robô real e do seu modelo CAD.



a)



b)

Figura 4.1 - Representação do braço robótico *Igus® Robolink*. a) Imagem do robô real; b) Modelo CAD do robô.

¹ A massa do braço robótico, um dado que será importante para secções futuras, não é especificada pelo fabricante, sendo que, por isso, o seu valor foi estimado de acordo com o exposto no Anexo A.3.

4.1 Componentes

Nas secções seguintes será feita uma análise detalhada de cada um dos componentes do robô com uma introdução ao seu princípio de funcionamento e sua caracterização no contexto do projeto.

4.1.1 Motores passo-a-passo

Princípio de funcionamento

Os MPP são atuadores eletromecânicos que convertem impulsos elétricos em deslocamentos mecânicos. A cada impulso de comando corresponde um deslocamento incremental designado “passo”. Os principais componentes destes motores são um rotor, ligado a um veio de saída, um estator, que restringe concentricamente o rotor, e enrolamentos.

Os MPP híbridos são um tipo de motores que combina as características de MPP de íman permanente e MPP de relutância variável. Neste sentido, o seu rotor é constituído por um íman permanente e duas massas polares nas extremidades, com dentes, de polaridade magnética oposta. O estator é composto por polos com enrolamentos que são alimentados eletricamente com uma determinada sequência [107].

Tipicamente, os MPP possuem duas fases, mas versões de três e cinco fases também podem existir. A sua alimentação pode ser unipolar, quando cada enrolamento é excitado por uma corrente positiva, ou bipolar se as correntes de excitação forem bidirecionais. Os motores bipolares com duas fases têm um enrolamento por fase [107, 108].

O binário produzido por um MPP é gerado pela rotação do rotor devido ao alinhamento dos seus polos magnéticos com o fluxo magnético gerado pelos enrolamentos do estator, e, por isso, o binário é proporcional à intensidade do fluxo magnético. Por sua vez, a intensidade do fluxo magnético e, consequentemente o binário, aumentam com a intensidade da corrente e com o número de espiras.

A resolução de um MPP é dada pelo menor incremento de rotação que se consegue impor ao veio e é dada por um ângulo. Este é definido por:

$$S = \frac{2\pi}{N_{ph} * Ph} \quad (4.1)$$

E que:

S é o ângulo de passo [rad],
 N_{ph} o número de polos do rotor, e
 Ph o número de fases.

Os motores bipolares comuns de duas fases têm um rotor com 100 dentes e um ângulo de passo de 1,8 ° [16, 108].

As características dinâmicas destes motores estabelecem uma relação entre o binário do motor e a sua velocidade de rotação que se divide em três zonas: arranque/paragem, instabilidades e “sobrevelocidade”. Na zona de arranque/paragem é possível parar ou inverter o sentido de rotação do MPP em sincronismo com o sistema de alimentação elétrico. Na zona de sobrevelocidade verificam-se velocidades elevadas, e é impossível parar ou inverter o sentido do motor sem perder sincronismo com o sistema de controlo. Os MPP normalmente funcionam nesta zona, o que significa que o deslocamento do motor se deve iniciar na zona de arranque/paragem e a sua velocidade deve ser progressivamente aumentada até atingir a zona de sobrevelocidade. O mesmo tipo de operação deve ser feito na paragem. A localização das três zonas de funcionamento depende não só das características do MPP, mas também da carga, da sequência de excitação dos enrolamentos e do circuito de alimentação. A sua forma geral é a apresentada na Figura 4.2 [107, 108].

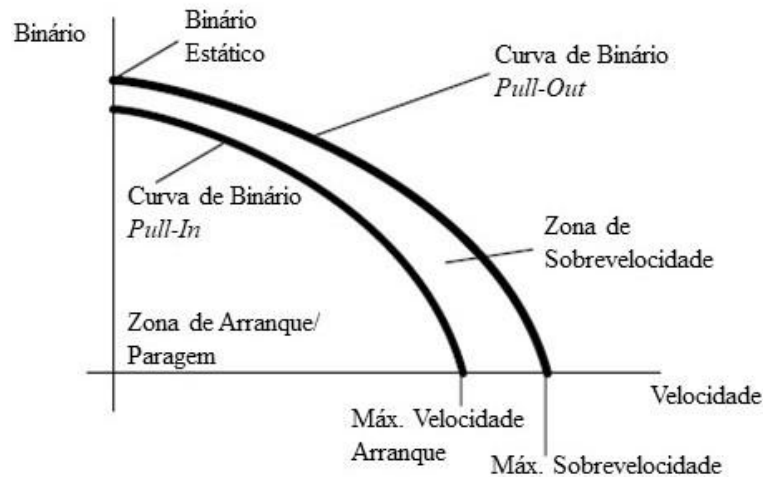


Figura 4.2 - Curva característica Binário-Velocidade de um MPP [108].

O binário *pull-in* define a zona de arranque/paragem e define a máxima frequência para a qual o motor pode arrancar/parar instantaneamente, sem perda de sincronismo. O binário *pull-out* define a zona de sobrevelocidade e os limites máximos de operação do motor sem que haja perda de sincronismo.

No que diz respeito à alimentação de um MPP, cada enrolamento constitui um circuito com resistência R , indutância L e força contraelectromotriz. A constante de tempo de cada enrolamento é dada por L/R e afeta a resposta do motor essencialmente para altas frequências de comutação, uma vez que a presença de indutância impede a injeção ou drenagem da corrente em tempo nulo. Além disso, a força contraelectromotriz, cujo valor depende da velocidade do motor, opõe-se à tensão de alimentação, o que também dificulta a rápida excitação dos enrolamentos [107].

Caracterização

O braço robótico do sistema é constituído por cinco MPP híbridos bifásicos bipolares do fabricante *Igus®* da série *drylin®*. Destes, existem dois motores do tipo NEMA23XL (com a referência MOT-AN-S-060-035-060-M-C-AAAC), um do tipo NEMA23 (com a referência MOT-AN-S-060-020-056-M-C-AAAC), um do tipo NEMA17 (com a referência MOT-AN-S-060-005-042-M-C-AAAC) e um do tipo NEMA11 (com a referência MOT-AN-S-060-001-028-L-C-AAAC). A designação C-AAAC, na referência de cada um dos MPP, serve para indicar que todos os motores têm incluído um *encoder* do tipo incremental. As características elétricas dos motores, disponibilizadas pela *Igus®*, encontram-se resumidas no Anexo A.2.

4.1.2 Elementos de transmissão

Na construção do robô são utilizados elementos mecânicos de transmissão acoplados aos veios dos motores e que asseguram o movimento das juntas. Para esse efeito, no robô em estudo são utilizadas engrenagens do tipo parafuso sem fim/roda de coroa e engrenagens harmónicas.

Princípio de funcionamento

Parafuso sem fim/roda de coroa

A engrenagem parafuso sem fim/roda de coroa é usada para transmitir o movimento em veios não concorrentes, em geral fazendo um ângulo reto entre eles. Este tipo de engrenagem é caracterizado por elevadas razões de transmissão e elevada capacidade de carga.

Encontram-se diversas soluções para a forma do dente do parafuso da engrenagem, contudo, a mais comum é a equivalente a um parafuso de rosca em V. A roda correspondente tem um dentado helicoidal. A Figura 4.3 mostra uma secção transversal deste tipo de

engrenagem contendo o eixo do parafuso, normal ao eixo da roda, uma forma tipo cremalheira e dentes da roda uma forma curva [109].

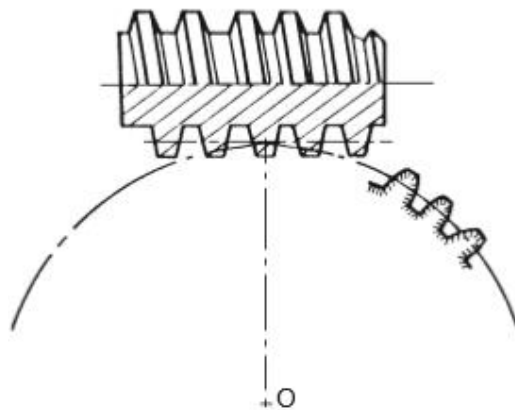


Figura 4.3 - Secção central de uma engrenagem constituída por um parafuso em fim e roda de coroa [109].

O comprimento de contacto da engrenagem (*length-of-action*) que assegura a transmissão mecânica é aumentado pelo facto de a roda ter uma forma de ‘garganta’ que envolve o dentado do parafuso, o que aumenta a razão de condução e, assim, a área de contacto.

Este tipo de engrenagem tem a grande vantagem de poder ser irreversível. Esta característica impede o parafuso de ser atuado pela coroa, o que pode ser vantajoso em aplicações robóticas ao impedir o escorregamento da engrenagem em sentido inverso, quando o parafuso se encontra parado. No entanto, esta é uma particularidade de natureza geométrica que se verifica apenas para ângulos de avanço da hélice do parafuso baixos.

Engrenagem Harmónica

As engrenagens harmónicas com engrenamento por onda de tensão conseguem elevadas razões de redução num conjunto bastante compacto e leve. As suas principais vantagens residem na ausência de folgas (*zero backlash*), elevado binário e uma excelente precisão e repetibilidade.

Este tipo de engrenagem é constituído por três elementos: gerador de ondas, *flexspline* e *circular spline*, que se encontram representados na Figura 4.4.

O gerador de ondas é composto por um rolamento de esferas que é encaixado num cubo elíptico. Este componente é acoplado ao motor e é a entrada da engrenagem. A *flexspline* é um cilindro em forma de copo, de parede fina, com dentes externos na extremidade aberta do cilindro. O gerador de ondas é colocado no interior da *flexspline*, que assume a sua forma elíptica. Este componente é a saída da engrenagem. A *circular spline* é um anel rígido com dentes internos que encaixam nos dentes da *flexspline* quando a engrenagem é montada.

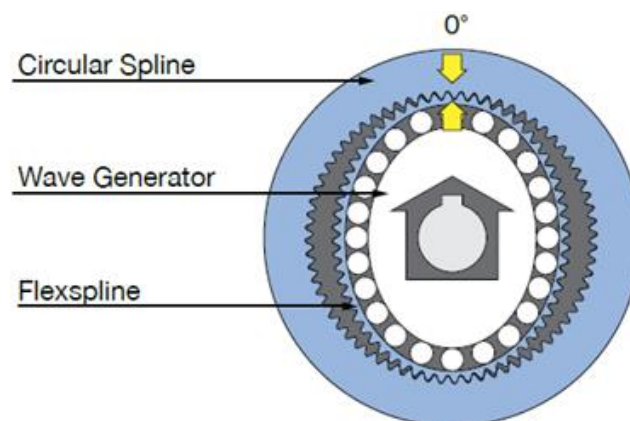


Figura 4.4 - Esquema de uma engrenagem harmónica com os respetivos componentes [110].

Para assegurar o funcionamento, a *flexspline* tem menos dois dentes que o *circular spline* e um diâmetro ligeiramente inferior. A forma elíptica do gerador de ondas faz com que os dentes do *flexspline* engrenem nos dentes da *circular spline* em duas posições diametralmente opostas ao longo do eixo principal da elipse. Desta forma, quando o gerador de ondas faz uma rotação completa, a *flexspline* desloca-se dois dentes no sentido oposto. É devido ao facto de os dentes estarem sempre engrenados numa região ao longo do eixo principal da elipse que estas engrenagens não apresentam folgas [110].

Caracterização

O braço robótico é constituído por cinco sistemas de transmissão de engrenagens de quatro variantes diferentes da *Igus®*, dependendo do MPP que faz o acionamento.

Para os motores NEMA23XL, NEMA 23 e NEMA17 são usados redutores rotativos do tipo parafuso sem fim/roda de coroa, com razões de transmissão de 48:1, 30:1 e 38:1, respetivamente.

Neste sentido, para os motores NEMA23XL são usados os sistemas de transmissão com a referência RL-D-50-102-48-01004, para o motor NEMA23 é utilizado o sistema RL-D-30-102-30-01004 e para o motor NEMA17 é usado o sistema RL-D-20-102-38-01004.

Acoplado ao motor NEMA11 está uma engrenagem harmónica com razão de transmissão de 28:1, com a referência RS-S-N11-00-28-020K0.

A ligação entre os veios dos motores e os veios dos sistemas de transmissão é assegurada por acopladores do tipo RPX.

4.1.3 Fins-de-curso

Os sistemas mecânicos de transmissão vêm equipados com sensores de fim-de-curso (referidos como *initiators*) que tem o objetivo de referenciar o “zero” de cada uma das juntas.

Estes sensores são baseados em detetores de proximidade indutivos, tratando-se de sensores de três fios com conexão do tipo PNP. Este tipo de conexão é feita com lógica positiva, o que significa que o interruptor (elemento que fecha o circuito quando atuado) está montado na zona de polaridade positiva [111].

Os sensores utilizados no robô têm todos a referência INI-AB-I-025-A-AA, que serve para identificar interruptores mecânicos com contacto normalmente aberto, com ligação do tipo PNP e contactos de alumínio anodizado. O alojamento dos sensores é feito em plástico, sendo uma solução compacta e leve.

4.1.4 Encoders

Os MPP do braço robótico têm instalados *encoders* incrementais que, sendo o seu elemento de *feedback*, permitem a monitorização da sua posição e velocidade.

Princípio de funcionamento

Um *encoder* é um dispositivo eletromecânico utilizado para medir deslocamentos angulares ou lineares. O seu método de funcionamento permite converter a posição angular de um elemento rotativo (como o caso de um motor) num sinal elétrico digital. Para tal pode-se recorrer a técnicas baseadas em princípios óticos ou eletromagnéticos. No caso dos *encoders* em estudo são utilizados sensores óticos.

Estes são constituídos por um díodo emissor de luz (LED), um disco e um detetor luminoso colocado do lado oposto ao disco. O disco, montado num eixo rotativo, apresenta padrões formados por setores opacos e transparentes codificados no disco. Conforme este gira, os segmentos opacos bloqueiam a luz e onde o vidro é transparente, a luz pode passar. Esse movimento gera pulsos de ondas quadradas, que podem ser interpretadas em posição ou movimento [112].

A resolução do *encoder* é medida pelo número de pulsos por revolução, PPR (do inglês *pulses per revolution*), e define o menor deslocamento angular que é possível medir.

Um *encoder* incremental tem tipicamente dois canais de saída, designados “A” e “B”. A sua implementação é feita com duas faixas de código, com setores posicionados com desfasamento de 90°. Esta configuração é necessária para indicar a posição e o sentido de rotação do motor. Se o sinal “A” aparece adiantado do sinal “B” o motor está a rodar no sentido horário (Figura 4.5). Se for a sequência inversa o motor está a rodar no sentido anti-horário.

Além disso, este tipo de *encoders* apresenta frequentemente um terceiro canal de saída, denominado sinal zero ou de referência (“Z” ou “N”), que fornece um pulso por revolução. Este é principalmente usado para colocar o sistema na posição zero, por fornecer *feedback* preciso de uma posição de referência.

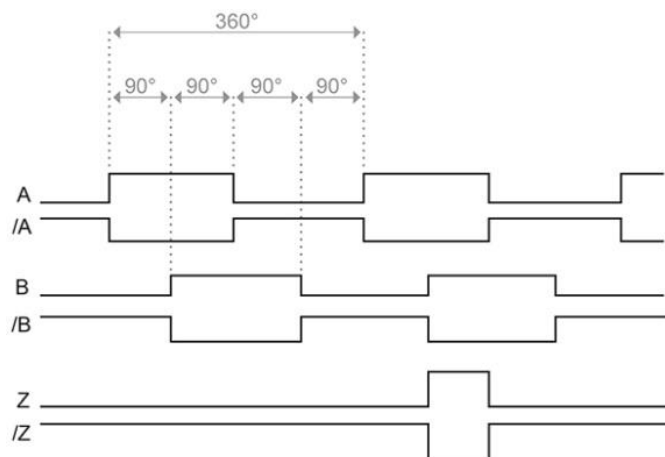


Figura 4.5 - Diagrama de sequência de pulsos de encoder incremental [113].

Juntamente com os canais principais, podem ser usados sinais diferenciais, nos quais existem duas linhas para cada um dos canais (“A” e “A/”, “B” e “B/”, “Z” e “Z/”). O sinal extra é complementar do sinal original o que possibilita a monitorização de erros na transmissão do sinal e compensar efeitos de ruído.

No que diz respeito à modulação do sinal de cada um dos canais, esta é feita por via de *outputs push-pull* (HTL) ou pelo protocolo de comunicação RS422.

Com o tipo de *output* HTL estes sinais são comandados por transístores, de tal forma que o nível “alto” do sinal de saída é igual à tensão de alimentação do *encoder* e este sinal é dado em relação ao nível “zero” da fonte de alimentação (0V). As saídas HTL podem ser ligadas na forma simples ou diferencial.

Os *outputs* do tipo RS422 são referidos como sendo saídas de linha diferencial balanceada, cujas características são determinadas pelo *standard* da EIA (*Electronics Industry Association*), que define as especificações elétricas características do sinal e taxas de transmissão. Este tipo de sinal é sempre usado como um par de sinais diferenciais (A, A/), (B, B/), (Z, Z/), o que, por natureza, assegura imunidade ao ruído. Neste tipo de ligações o nível “alto” é definido para tensões superiores a 2,5 V, e o nível “baixo” para tensões inferiores a 0,5 V. Devido aos requisitos do emissor e recetor do *standard* e as características de cablagem, esta configuração tem a vantagem de possibilitar frequências de saída mais elevadas [112-114].

Caracterização

No braço robótico em estudo, os *encoders* são montados juntamente com os MPP, sendo fornecidos em conjunto. Cada motor tem um *encoder* associado para medição da respetiva posição e velocidade e todos apresentam uma resolução intrínseca de 500 impulsos por rotação e são alimentados a 5 V DC.

Na sua configuração, estes possuem três canais (A, B e N) com os respetivos sinais complementares (A/, B/ e N/) e, por isso, permitem que os sinais de saída sejam transmitidos pelo protocolo de comunicação RS422. Neste sentido, cada um dos *encoders* possui oito fios.

4.1.5 Elementos de ligação

A estrutura mecânica do braço robótico é constituída pela base do robô e pelos elos do robô, que garantem ligação física entre as diferentes juntas.

A base do braço robótico, onde está inserida a primeira junta e respetivo motor, tem forma paralelepípedica construída em chapa metálica. As suas dimensões globais são 330x220x120 [mm] e a referência do fabricante é RL-DC-BL-50-BX-AA-02.

O primeiro elo do robô é montado sobre a base do robô e também é construído numa estrutura em chapa metálica que eleva a junta 2 em cerca de 300 mm em relação à superfície superior da base. A referência deste elemento é RL-DQ-50-50-L-01.

Para a ligação entre as restantes juntas do robô, são utilizados perfis de alumínio *Bosch*®, com secção quadrada de dimensão 30x30 e comprimentos diferentes. A sua referência tem a forma RL-DQ-30-GM-AA-①, sendo que o número ① indica o comprimento do respetivo braço e que toma os valores de 370, 300 e 160 para a ligação entre as juntas 2 e 3, 3 e 4, 4 e 5, respetivamente.

4.2 Descrição cinemática

Um determinado manipulador robótico é esquematicamente representado como uma cadeia cinemática constituída por corpos rígidos (elos) ligados entre si por juntas. Numa das extremidades da cadeia encontra-se a base do manipulador e na outra o órgão terminal. O movimento da estrutura é composto pelo movimento elementar de cada elo em relação ao anterior. Desta forma, para movimentar um determinado objeto no espaço, é necessário descrever a posição e orientação do órgão terminal.

A posição é geralmente representada por um vetor, que define a localização de um determinado ponto em relação a um referencial fixo, expresso em coordenadas cartesianas, cilíndricas ou esféricas.

A orientação pode ser representada a partir de:

- Matrizes de Rotação, que permitem relacionar a orientação de dois referenciais com a mesma origem a partir de rotações elementares segundo os seus eixos;
- Ângulos de Euler, que constituem uma representação mínima da orientação de um referencial;
- Quaterniões, que possibilitam a definição da orientação de dois referenciais com a mesma origem, a partir de um ângulo e um vetor.

Além destas soluções, é possível recorrer a matrizes de transformação homogéneas, que permitem uma representação da posição e orientação numa única matriz, em que a posição é dada em coordenadas cartesianas e a orientação por matrizes de rotação.

Tendo por base esta representação, J. Denavit e R. S. Hartenberg, propuseram um método que relaciona a posição e orientação de dois elos consecutivos de um robô de cadeia cinemática aberta através de quatro parâmetros (duas distâncias e dois ângulos). Este método popularizou-se por ser expedito e sistemático, possibilitando uma representação simples do modelo cinemático de um robô [86, 115].

Para a caracterização cinemática do braço robótico, será utilizada a abordagem por matrizes de transformação homogéneas, a partir do método de Denavit-Hartenberg, cujo algoritmo se encontra em anexo (Anexo B.1)²[116].

² Os parâmetros utilizados para implementação do método de Denavit-Hartenberg são baseados na notação 'Distal Variant' e não na representação originalmente definida, que deu nome ao método.

4.2.1 Representação de Denavit-Hartenberg (DH)

A partir da aplicação do método DH, é elaborada uma representação esquemática do braço robótico (Figura 4.6), onde estão representados os sistemas de coordenadas de cada elo do robô e permite a obtenção dos parâmetros de DH, que, por sua vez, se encontram definidos na Tabela 4.1.

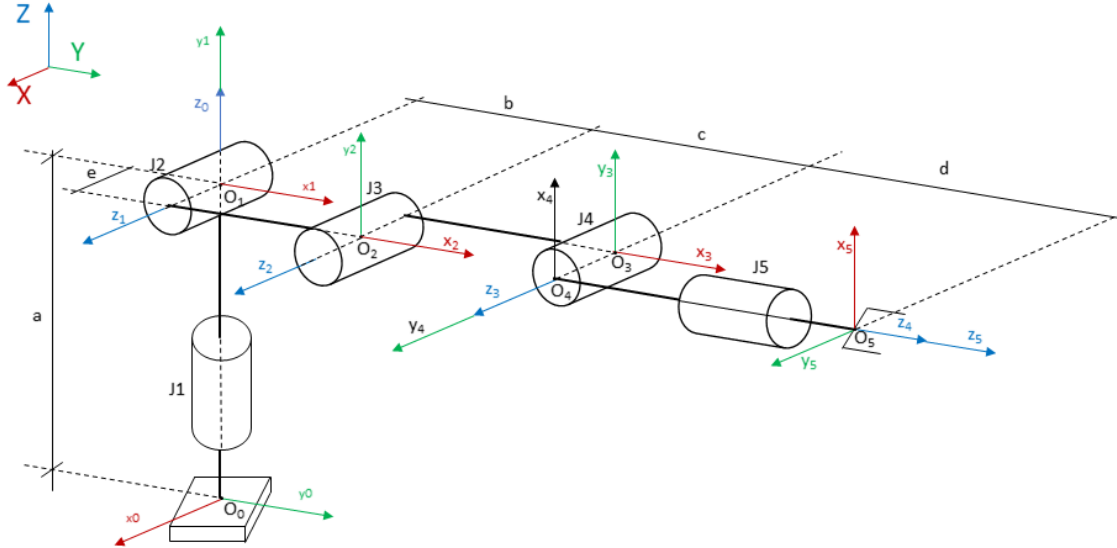


Figura 4.6 - Representação esquemática do braço robótico com representação dos vários referencias das juntas.

Tabela 4.1 - Parâmetros DH do braço robótico.

Juntas	d [mm]	a [mm]	θ [°]	α [°]
1	a	0	$90 + \theta_1$	90
2	e	b	$0 + \theta_2$	0
3	-e	c	$0 + \theta_3$	0
4	e	0	$90 + \theta_4$	90
5	d	0	$0 + \theta_5$	0

Tendo em conta dos dados da Tabela 4.1, é possível estabelecer as matrizes de transformação homogêneas, que relacionam dois elos consecutivos do manipulador. Na secção seguinte, estão representadas cada uma das matrizes de transformação.

Matrizes de Transformação

$$A_1^0 = \begin{bmatrix} -\sin(\theta_1) & 0 & \cos(\theta_1) & 0 \\ \cos(\theta_1) & 0 & \sin(\theta_1) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & a \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

$$A_2^1 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_2) & -\sin(\theta_2) & 0 & b * \cos(\theta_2) \\ \sin(\theta_2) & \cos(\theta_2) & 0 & b * \sin(\theta_2) \\ 0 & 0 & 1 & e \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

$$A_3^2 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_3) & -\sin(\theta_3) & 0 & c * \cos(\theta_3) \\ \sin(\theta_3) & \cos(\theta_3) & 0 & c * \sin(\theta_3) \\ 0 & 0 & 1 & -e \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

$$A_4^3 = \begin{bmatrix} -\sin(\theta_4) & 0 & \cos(\theta_4) & 0 \\ \cos(\theta_4) & 0 & \sin(\theta_4) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & e \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

$$A_5^4 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_5) & -\sin(\theta_5) & 0 & 0 \\ \sin(\theta_5) & \cos(\theta_5) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

A relação entre o sistema de eixos fixo, que contém a base do robô, e o órgão terminal do manipulador robótico é dada por:

$$T_5^0 = A_1^0 * A_2^1 * A_3^2 * A_4^3 * A_5^4 \quad (4.7)$$

Desta forma, a matriz de transformação que define a posição e orientação do órgão terminal é³:

$$T_5^0 = \begin{bmatrix} S1S234C5 + C1S5 & -S1S234S5 + C1C5 & -S1C234 & eC1 - S1(dC234 + cC23 + bC2) \\ -C1S234C5 + S1S5 & C1S234S5 + S1C5 & C1C234 & C1(dC234 + cC23 + bC2) + eS1 \\ C234C5 & -C234S5 & S234 & dS234 + cS23 + bS2 + a \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

No cálculo desta matriz são utilizadas algumas propriedades de operações com funções trigonométricas, nomeadamente:

$$\cos(\theta_i + \theta_j) = \cos(\theta_i) \cos(\theta_j) - \sin(\theta_i) \sin(\theta_j) \quad (4.9)$$

$$\sin(\theta_i + \theta_j) = \sin(\theta_i) \cos(\theta_j) + \cos(\theta_i) \sin(\theta_j) \quad (4.10)$$

Os cálculos auxiliares feitos para definir a matriz de transformação T_5^0 encontram-se no anexo B.1.

4.2.2 Cinemática de posição direta [117]

A matriz T_5^0 consiste numa representação da cadeia cinemática do robô por uma matriz de transformação homogênea. A interpretação do seu significado matemático pode ser feita através de:

$$T = \begin{bmatrix} R_{3 \times 3} & p_{3 \times 1} \\ f_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{matriz rotação} & \text{vetor posição} \\ \text{efeito de perspectiva} & \text{fator escala} \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

Onde:

$R_{3 \times 3}$, é a submatriz de rotação, de dimensão $[3 \times 3]$, que representa a orientação do referencial móvel do órgão terminal, em relação ao referencial fixo da base do robô

$p_{3 \times 1}$, é uma submatriz de dimensão $[3 \times 1]$, que representa o vetor posição da origem do referencial móvel em relação ao referencial fixo

$f_{1 \times 3}$, é o efeito de perspectiva, e

1, representa o fator de escala, que é unitário no contexto da cinemática de manipuladores robóticos.

A solução das equações da cinemática direta resume-se ao cálculo da matriz T_5^0 . Para um dado vetor de coordenadas no espaço das juntas, $q = [q_1 \ q_2 \ q_3 \ q_4 \ q_5]^T$, onde $q_i = \theta_i$, é possível saber as respetivas coordenadas e orientação no espaço operacional (cartesiano).

Se uma tarefa for especificada para o órgão terminal, é necessário atribuir a sua posição e orientação, eventualmente em função do tempo, no caso de uma trajetória. Esta atribuição é simples quando se trata de especificar a posição, no entanto, é mais complicada quando se trata de especificar a orientação. Tal é possível se for adotada uma representação mínima, como a formulação por Ângulos de Euler, que descreve a rotação do referencial do órgão terminal em relação ao referencial da base com apenas três componentes.

Assim, é possível representar o posicionamento do manipulador através de um vetor de dimensão $(m \times 1)$, com $m \leq n$:

$$x = \begin{bmatrix} p \\ \phi \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

³ Na representação desta matriz são utilizadas algumas simplificações na notação matemática, seguindo o exemplo: $C_{ijk} = \cos(\theta_i + \theta_j + \theta_k)$.

Onde:

- m , é a dimensão do espaço operacional
- n , é a dimensão do espaço de juntas
- x , é o vetor que define a localização do órgão terminal
- p , é a posição do órgão terminal, e
- ϕ , é a orientação do órgão terminal

Esta representação da posição e orientação permite a descrição da localização do órgão terminal em função de parâmetros independentes. O vetor x é definido no chamado espaço operacional, isto é, no espaço onde as suas tarefas são especificadas.

Por outro lado, o espaço das juntas denota o espaço em que o vetor q , de dimensão $(n \times 1)$, é definido:

$$q = \begin{bmatrix} q_1 \\ \dots \\ q_n \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

Tendo em conta a dependência da posição e orientação das variáveis das juntas, a equação que expressa a cinemática direta pode ser escrita de forma diferente da formulação da Equação (4.8):

$$x = k(q) \quad (4.14)$$

Em que a função k é expressa como um vetor de dimensão $(m \times 1)$, geralmente não linear, e permite a computação das variáveis do espaço operacional em função do valor das variáveis no espaço das juntas.

No caso do braço robótico em estudo, o número de juntas do robô é cinco, $n = 5$, o que significa que apenas cinco componentes do vetor que representa o posicionamento do órgão terminal no espaço operacional podem ser obtidos de forma independente e, por isso, um desses componentes será dependente dos restantes. Esta condição significa que o robô tem menos um grau de liberdade em relação ao que seria necessário para que este pudesse atingir qualquer posição e orientação no espaço cartesiano de forma independente. Por outras palavras, a orientação e posição do órgão terminal são função uma da outra.

Ângulos de Euler

As Matrizes de Rotação representam uma descrição redundante da orientação de um referencial, sendo caracterizadas por nove elementos que não-independentes. Tal como para a posição, apenas três parâmetros são suficientes para descrever a orientação de um corpo rígido em relação a um referencial fixo, constituindo uma representação mínima.

A representação mínima da orientação pode ser expressa usando um conjunto de três ângulos, $\phi = [\varphi \ \theta \ \psi]^T$. Considerando que a matriz de rotação representa uma rotação elementar em relação a um dos eixos coordenados, uma matriz de rotação genérica pode ser obtida a partir da sequência de rotações elementares de cada das rotações. Os conjuntos destes três ângulos são designados ângulos de Euler e existem 12 conjuntos distintos disponíveis (dependendo da sequência de rotações escolhida) para caracterizar a orientação de um corpo.

Com o objetivo de caracterizar a orientação por meio de ângulos de Euler, escolhe-se o conjunto de ângulos ZYZ, que é caracterizado pela seguinte sequência de rotações elementares:

- Rotação do referencial de referência de um ângulo ϕ em relação ao eixo OZ expresso pela matriz $R_z(\varphi)$;
- Rotação do referencial móvel de um ângulo θ , segundo o eixo rodado OY' , expressa pela matriz $R_{y'}(\theta)$;
- Rotação do referencial móvel de um ângulo ψ , segundo o eixo rodado OZ'' , expressa pela matriz de rotação $R_z(\psi)$.

A matriz de rotação resultante desta sequência de Ângulos de Euler é:

$$R(\phi) = R_z(\varphi)R_{y'}(\theta)R_z(\psi)$$

$$R(\phi) = \begin{bmatrix} C_\phi C_\theta C_\psi - S_\phi S_\psi & -C_\phi C_\theta S_\psi - S_\phi C_\psi & C_\phi S_\theta \\ S_\phi C_\theta C_\psi - C_\phi S_\psi & -S_\phi C_\theta S_\psi + C_\phi C_\psi & S_\phi S_\theta \\ -S_\theta C_\psi & S_\theta S_\psi & C_\theta \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

Sendo uma matriz de rotação genérica dada por:

$$R = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x \\ n_y & o_y & a_y \\ n_z & o_z & a_z \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

É então possível determinar os Ângulos de Euler a partir da Matriz de Rotação. Esta equivalência é feita a partir da igualdade entre as Equações (4.15) e (4.16), de forma a que:

$$\phi = \text{Atan2}(a_y, a_x) \quad (4.17)$$

A função $\text{Atan2}(x, y)$ é a função arcotangente de dois argumentos⁴[115].

$$\theta = \text{Atan2}\left(\sqrt{a_x^2 + a_y^2}, a_z\right) \quad (4.18)$$

Da mesma forma, o ângulo ψ é calculado por:

$$\psi = \text{Atan2}(s_z, -n_z) \quad (4.19)$$

Os Ângulos de Euler que caracterizam a orientação do braço robótico em estudo são obtidos substituindo os dados da Equação (4.8) nas Equações (4.17-4.19):

$$\phi = \text{Atan2}(C1C234, -S1C234) \quad (4.20)$$

$$\theta = \text{Atan2}\left(\sqrt{(C1C234)^2 + (-S1C234)^2}, S234\right) \quad (4.21)$$

$$\psi = \text{Atan2}(-C234S5, -C234C5) \quad (4.22)$$

4.2.3 Cinemática diferencial direta [83, 117]

A cinemática diferencial direta compreende um problema importante na modelação matemática de robôs, uma vez que permite estabelecer uma relação entre a velocidade no espaço das juntas e a velocidade no espaço operacional. A expressão que traduz esta relação é:

$$\begin{bmatrix} v_{n|0}^0 \\ \omega_{n|0}^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_P \\ J_O \end{bmatrix} \dot{q} = J(q) \dot{q} \quad (4.23)$$

Onde:

$v_{n|0}^0$, é o vetor da velocidade linear do órgão terminal em relação ao referencial da base, expressa no referencial da base,

$\omega_{n|0}^0$, é o vetor da velocidade angular do órgão terminal em relação ao referencial da base, expressa no referencial a base,

$\dot{q}$, é o vetor da velocidade das juntas,

J_P , representa a contribuição da velocidade das juntas para a velocidade linear do órgão terminal,

J_O , representa a contribuição da velocidade das juntas para a velocidade angular do órgão terminal,

e

J , representa a matriz do Jacobiano global

Através das leis da cinemática, podemos deduzir as equações que permitem calcular a velocidade linear e angular de uma dada junta do manipulador:

$$v_{i|0}^0 = v_{i-1|0}^0 + \omega_{i|0}^0 \times p_{i|0}^{i-1} \quad (4.24)$$

$$\omega_{i|0}^0 = \omega_{i-1|0}^0 + \dot{\theta}_i z_{i-1} \quad (4.25)$$

Onde:

⁴ A função $\text{Atan2}(x, y)$ computa o arcotangente da razão y/x , tendo em conta o sinal de cada argumento, para determinar o quadrante ao qual o ângulo correspondente pertence.

$v_{i|0}^0$, é o vetor da velocidade linear da junta, i , em relação ao referencial da base e expressa no mesmo,
 $\omega_{i|0}^0$, é o vetor da velocidade angular da junta, i , em relação ao referencial da base e expressa no mesmo,
 $v_{i-1|0}^0$, é o vetor da velocidade linear da junta, $i - 1$, em relação ao referencial da base e expressa no mesmo,
 $\omega_{i-1|0}^0$, é o vetor da velocidade angular da junta, $i - 1$, em relação ao referencial da base e expressa no mesmo,
 $p_{i|0}^{i-1}$, é o vetor posição da origem do referencial i , em relação ao referencial $i - 1$,
 $\dot{\theta}_i$, é a velocidade angular da junta i , e
 z_{i-1} , é o vetor unitário segundo o eixo da junta i

Atendendo à Equação (4.23), a resolução do problema de cinemática diferencial direta é obtida determinando-se a matriz do Jacobiano, J , do robô. O Jacobiano é uma matriz do tipo:

$$J = \begin{bmatrix} J_{P1} & \dots & J_{Pn} \\ J_{O1} & \dots & J_{On} \end{bmatrix} \quad (4.26)$$

Em que J_{Pi} e J_{Oi} são vetores de dimensão $[3 \times 1]$ e, no caso em estudo, $n = 5$, uma vez que se trata de um robô com 5 juntas.

A expressão $\dot{q}_i J_{Pi}$ representa a contribuição da junta i para a velocidade linear do órgão terminal, enquanto que $\dot{q}_i J_{Oi}$ representa a contribuição da mesma para a sua velocidade angular.

No que diz respeito ao Jacobiano, este pode ser determinado por via geométrica, a partir do modelo geométrico do manipulador. Assim, o Jacobiano é dado por: [83, 115]

$$J_i(q) = \begin{bmatrix} z_{i-1} \times (p - p_{i-1}) \\ z_{i-1} \end{bmatrix} \quad (4.27)$$

Onde:

z_{i-1} é o vetor unitário definido segundo o eixo da junta i e expresso no referencial da base, que pode ser lido na 3ª coluna da matriz de rotação R_{i-1}^0 , ou seja, os três primeiros elementos da 3ª coluna da matriz de transformação homogênea A_{i-1}^0 .

p é o vetor posição correspondente ao vetor posição do órgão terminal, que pode ser lido através dos três primeiros elementos da 4ª coluna da matriz de transformação homogênea A_5^0 .

p_{i-1} é o vetor posição da origem do referencial $i - 1$, que corresponde aos três primeiros elementos da 4ª coluna da matriz de transformação homogênea A_{i-1}^0 .

Desta forma, podemos estabelecer o Jacobiano do braço robótico em estudo como sendo:

$$J = \begin{bmatrix} -C1(dC234 + cC23 + bC2) - eS1 & S1(dS234 + cS23 + bS2) & S1(dS234 + cS23) & dS1S234 & 0 \\ -S1(dC234 + cC23 + bC2) + eC1 & -C1(dS234 + cS23 + bS2) & -C1(dS234 + cS23) & -dC1S234 & 0 \\ 0 & dC234 + cC23 + bC2 & dC234 + cC23 & dC234 & 0 \\ 0 & C1 & C1 & C1 & -S1C234 \\ 0 & S1 & S1 & S1 & C1C234 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & S234 \end{bmatrix} \quad (4.28)$$

Os cálculos auxiliares para a determinação da matriz do Jacobiano encontram-se no Anexo B.3.

4.2.4 Cinemática de posição inversa [117-119]

Ao contrário do problema da cinemática direta, em que o vetor de coordenadas operacionais é obtido diretamente, conhecendo o vetor no espaço das juntas, o problema da cinemática de posição inversa é mais complexo. Este consiste na determinação do vetor de coordenadas do espaço das juntas que corresponde a um dado vetor de coordenadas operacionais. Neste tipo de problemas, as equações a resolver são, regra geral, não lineares, pelo que nem sempre é possível uma solução analítica. Pode dar-se o caso de existirem soluções múltiplas, ou uma infinidade de soluções (redundância, singularidades) ou pode ainda não existir qualquer solução, no caso de a posição especificada estar fora do espaço de trabalho.

A resolução deste problema pode ser feita através da utilização de métodos analíticos ou métodos numéricos iterativos.

No presente texto será apresentada uma proposta de solução com base em métodos analíticos. Estes permitem a obtenção de todas as soluções para um dado vetor de coordenadas no espaço operacional.

A resolução do problema de cinemática de posição inversa tem por base alguns pressupostos já enunciados no problema da cinemática direta, nomeadamente as Equações (4.11) e (4.16) e a igualdade:

$$T_5^0 = \begin{bmatrix} nx & ox & ax & Px \\ ny & oy & ay & Py \\ nz & oz & az & Pz \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.29)$$

E que os elementos n , o e a representam a orientação do órgão terminal em relação ao referencial da base e os elementos p representam o vetor de coordenadas do mesmo.

Cálculo de θ_1

Para a obtenção de θ_1 , parte-se da Equação (4.7), pré-multiplicando ambos os lados da igualdade por $A_1^{0^{-1}}$, de forma a eliminar as referências a θ_1 do lado direito da equação. Desta forma:

$$A_1^{0^{-1}} * T_5^0 = A_1^{0^{-1}} * A_1^0 * A_2^1 * A_3^2 * A_4^3 * A_5^4 = T_5^1 \quad (4.30)$$

Considerando as Equações (4.29) e (4.30), podemos escrever esta última da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} nyC1 - nxS1 & oyC1 - oxS1 & ayC1 - axS1 & PyC1 - PxS1 \\ nz & oz & az & Pz - a \\ nxC1 + nyS1 & oxX1 + oyS1 & axC1 + ayS1 & PxX1 + PyS1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -S234C5 & S234S5 & C234 & dC234 + cC23 + bC2 \\ C234C5 & -C234S5 & S234 & dS234 + cS23 + bS2 \\ S5 & C5 & 0 & e \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.31)$$

O cálculo de θ_1 é feito a partir da igualdade do terceiro elemento da quarta coluna da Equação (4.31), ou seja:

$$PxX1 + PyS1 = e \quad (4.32)$$

Parametrizando a variável t , sendo $t = \tan(\frac{\theta_1}{2})$, de forma a que:

$$C1 = \frac{1 - t^2}{1 + t^2}; S1 = \frac{2t}{1 + t^2} \quad (4.33)$$

E assim, substituindo os valores da Equação (4.33) na Equação (4.32), o valor de θ_1 pode ser formulado como sendo:

$$\theta_1 = 2 \operatorname{atan2}(Py \pm \sqrt{(Py^2 + Px^2 - e^2)}, Px + e)$$

Se o discriminante da raiz quadrada for positivo, existem duas soluções possíveis para a primeira junta.

Cálculo de θ_3

O cálculo de θ_3 é feito retomando a Equação (4.31), em particular as igualdades entre o primeiro e segundo elementos da quarta coluna:

$$PyC1 - PxS1 = dC234 + cC23 + bC2 \quad (4.34)$$

$$Pz - a = dS234 + cS23 + bS2 \quad (4.35)$$

Reformulando a igualdade e rearranjando a equação, é possível escrever:

$$C3 = \frac{(PyC1 - PxS1 - dC234)^2 + (Pz - a - dS234)^2 - c^2 - b^2}{2bc} \quad (4.36)$$

É possível encontrar uma solução para $C3$, se se definir o valor da soma de θ_2 , θ_3 e θ_4 , sendo este constante. Esta condição verifica-se, porque θ_{234} representa a orientação do órgão

terminal em relação ao referencial da base, que, é constante para cada vetor do espaço operacional, como ilustrado na Figura 4.7 e na Figura 4.8.

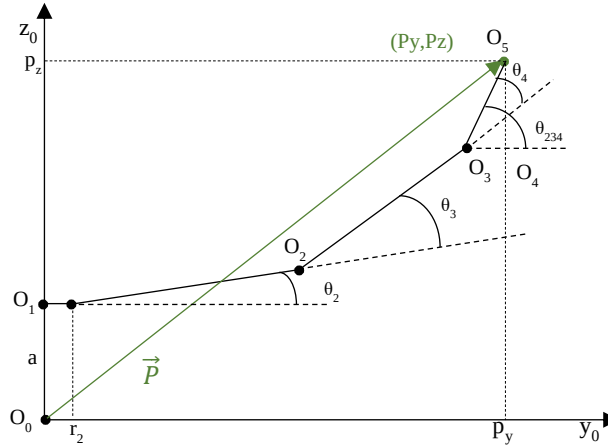


Figura 4.7 - Vista lateral (plano YZ) de representação esquemática do braço robótico para valores hipotéticos do espaço das juntas.

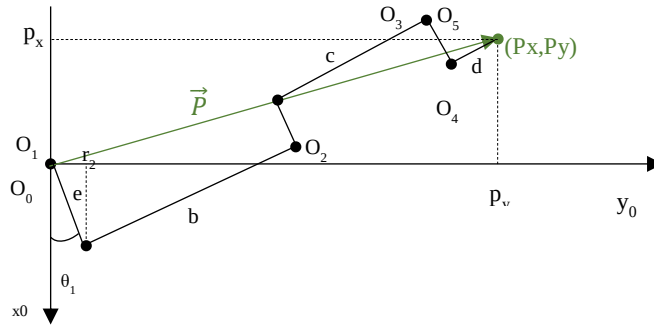


Figura 4.8 - Vista superior (plano XY) de representação esquemática do braço robótico para valores hipotéticos do espaço das juntas.

A solução da Equação (4.36) é obtida definindo o valor de θ_{234} na forma:

$$\theta_{234} = k \quad (4.37)$$

Retomando o cálculo de θ_3 podemos finalmente escrever:

$$S3 = \pm\sqrt{1 - C3^2} \quad (4.38)$$

$$\theta_3 = \text{atan2}(S3, C3) \quad (4.39)$$

Cálculo de θ_2

Após conhecido o valor de θ_3 , é possível calcular θ_2 considerando novamente as Equações (4.34) e (4.35), sob a forma de sistema de equações:

$$\begin{cases} PyC1 - PxS1 = dC234 + cC23 + bC2 \\ Pz - a = dS234 + cS23 + bS2 \end{cases} \quad (4.40)$$

Resolvendo o sistema, é possível definir:

$$C2 = \frac{(cC3 + b)(PyC1 - PxS1 - dC234) + cS3(Pz - a - dS234)}{(cC3 + b)^2 + c^2S3^2} \quad (4.41)$$

Assim, o cálculo de θ_2 vem dado por:

$$S2 = \pm\sqrt{1 - C2^2} \quad (4.42)$$

$$\theta_2 = \text{atan2}(S2, C2) \quad (4.43)$$

Cálculo de θ_4

Como referido anteriormente, considera-se $\theta_{234} = k$ e, por isso, θ_4 calcula-se de forma direta:

$$\theta_4 = \theta_{234} - \theta_3 - \theta_2 \quad (4.44)$$

Cálculo de θ_5

Para descobrir o valor de θ_5 recorreremos novamente à igualdade da Equação (4.31) de onde podemos verificar que:

$$S5 = nx C1 + ny S1 \quad (4.45)$$

$$C5 = ox C1 + oy S1 \quad (4.46)$$

$$\theta_5 = \text{atan2}(S5, C5) \quad (4.47)$$

4.2.5 Cinemática diferencial inversa [83, 117]

O problema da cinemática diferencial inversa, à semelhança do problema da cinemática de posição inversa, consiste na determinação dos vetores de velocidade no espaço das juntas, tendo em conta os valores da velocidade do órgão terminal no espaço cartesiano.

A partir da Equação (4.23), a expressão para a cinemática diferencial direta pode ser resumida por:

$$v = J * \dot{q} \quad (4.48)$$

De uma forma geral, a determinação do problema de cinemática diferencial inversa, é resolvido de forma simples, invertendo a matriz do Jacobiano:

$$\dot{q} = J^{-1} * v \quad (4.49)$$

Contudo, o Jacobiano do manipulador em causa é uma matriz retangular de dimensão [6x5], por isso, não invertível.

Um método normalmente usado para contornar este facto é recorrer a uma matriz pseudo-inversa, uma generalização da matriz inversa, que garante que:

$$\dot{q} = J^+ * v \quad (4.50)$$

Para esse efeito, considera-se a matriz pseudo-inversa de Moore-Penrose, enunciada da seguinte forma:

$$J^+ = (J * J^T)^{-1} * J^T \quad (4.51)$$

O cálculo numérico de J^+ é complexo e, por esse motivo é indicado para ser computado por *softwares* de cálculo numérico avançado, como é o caso do *Matlab®*.

No entanto, a utilização da matriz pseudo-inversa consiste numa abordagem típica de problemas de manipuladores redundantes, isto é, $n > 6$, com mais de seis graus de liberdade. Apesar da utilização de inversas generalizadas não constituir nenhum impedimento do ponto de vista algébrico, do ponto de vista mecânico, estas não refletem as características cinemáticas de um robô com menos de 6 graus de liberdade, uma vez que a Equação (4.51) consiste numa aproximação pelos mínimos quadrados da velocidade das juntas e não calcula soluções exatas [120].

Assim, será utilizada a abordagem sugerida por Y. Fang e L. Tsai [120] para a análise cinemática de robôs com menos de seis graus de liberdade. Os desenvolvimentos introduzidos pelos autores têm como objetivo colmatar falhas na literatura acerca de manipuladores robóticos, que se centra essencialmente na análise de estruturas com seis (ou mais) graus de liberdade. O recurso a este método baseia-se na teoria dos *srews* recíprocos (*theory of reciprocal screws*), que estabelece uma analogia entre as juntas de um robô e parafusos.

Para os manipuladores em estudo, apenas n ($n < 6$) componentes do vetor velocidade, v , conseguem ser especificados de forma independente e os restantes ($6 - n$) componentes são considerados variáveis dependentes. Neste sentido, o vetor velocidade pode ser parcelado em duas partes: $v_1 \in \mathbb{R}^n$ e $v_2 \in \mathbb{R}^{6-n}$, em que v_1 , vetor de velocidade independente, contém os componentes independentes e v_2 , vetor de velocidade dependente, contém os componentes

dependentes de v . Neste sentido, o vetor de velocidade dependente pode ser escrito como função do vetor de velocidade independente na forma:

$$v_2 = f(v_1) \quad (4.52)$$

Tendo em conta a divisão enunciada, é possível reescrever a Equação (4.48):

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix}_{n \times 1} = \begin{bmatrix} J_1 \\ J_2 \end{bmatrix}_{6 \times n} * \dot{q} \quad (4.53)$$

Em que $J_1 \in \mathbb{R}^{n \times n}$ e $J_2 \in \mathbb{R}^{(6-n) \times n}$. Cada linha de J_2 é linearmente dependente das linhas de J_1 . Assim, a parte superior da equação anterior pode ser escrita da seguinte forma:

$$v_1 = J_1 * \dot{q} \quad (4.54)$$

Para configurações não-singulares, J_1 é invertível e podemos então calcular a velocidade no espaço das juntas:

$$\dot{q} = J_1^{-1} * v_1 \quad (4.55)$$

As Equações (4.53) e (4.54) estabelecem um mapeamento exato entre o vetor de velocidade do órgão terminal, no espaço cartesiano, e o vetor velocidade das juntas, no espaço das juntas. Um aspeto fundamental desta formulação prende-se com uma decomposição apropriada do vetor de velocidade, v . A decomposição do vetor velocidade é definida para cada tarefa, e, por isso, J_1 assumirá uma forma diferente dependendo da tarefa especificada.

Neste sentido, é fundamental uma correta identificação dos componentes de velocidade independentes. Este será obtido recorrendo ao conceito de *reciprocal screws*, que, por sua vez, é definido a partir do conceito de núcleo (espaço nulo) de uma transformação linear.

A aplicação deste método é feita a partir dos conceitos de *screw* e de *wrench*, que se encontram explicitados no Anexo B.5. O seu enunciado é baseado na premissa de que o movimento de um dado corpo rígido pode ser descrito por uma rotação em torno de uma linha (eixo) juntamente com uma translação ao longo da mesma [121].

Aplicação da teoria screws recíprocos no braço robótico

A teoria dos *screws* recíprocos permite, em primeiro lugar, obter o Jacobiano do manipulador, através do cálculo dos respetivos *screws* de junta unitários, $\hat{\$}_i = \begin{bmatrix} z_i \\ p_i \times z_i \end{bmatrix}$. Como esta matriz já foi calculada anteriormente, utilizamos os seus valores para encontrar os respetivos *screws* de junta unitários.

Assim:

$$\begin{aligned} \hat{\$}_1 &= \begin{bmatrix} -C1(dC234 + cC23 + bC2) - eS1 \\ -S1(dC234 + cC23 + bC2) + eC1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} & \hat{\$}_2 &= \begin{bmatrix} S1(dS234 + cS23 + bS2) \\ -C1(dS234 + cS23 + bS2) \\ dC234 + cC23 + bC2 \\ C1 \\ S1 \\ 0 \end{bmatrix} \\ \hat{\$}_3 &= \begin{bmatrix} S1(dS234 + cS23) \\ -C1(dS234 + cS23) \\ dC234 + cC23 \\ C1 \\ S1 \\ 0 \end{bmatrix} & \hat{\$}_4 &= \begin{bmatrix} dS1S234 \\ -dC1S234 \\ dC234 \\ C1 \\ S1 \\ 0 \end{bmatrix} & \hat{\$}_5 &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -S1C234 \\ C1C234 \\ S234 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Como o Jacobiano consiste num sistema de cinco *screws* de junta unitários, existe um *screw* que é recíproco a todos os cinco *screws* de junta. A determinação do *screw* recíproco é feita seguindo a metodologia descrita no Anexo B.5.

Desta forma, e de acordo com a Equação (B.37), a matriz J^* é enunciada por:

$$J^* = [\hat{\$}_1 \quad \hat{\$}_2 \quad \hat{\$}_3 \quad \hat{\$}_4 \quad \hat{\$}_5] \quad (4.56)$$

Dividindo a matriz J^* , segundo a Equação (B.48):

$$J_p = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & -C1(dC234 + cC23 + bC2) - eS1 & -S1(dC234 + cC23 + bC2) + eC1 \\ C1 & S1 & 0 & S1(dS234 + cS23 + bS2) & -C1(dS234 + cS23 + bS2) \\ C1 & S1 & 0 & S1(dS234 + cS23) & -C1(dS234 + cS23) \\ C1 & S1 & 0 & dS1S234 & -dC1S234 \\ -S1C234 & C1C234 & S234 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.57)$$

$$J_s = \begin{bmatrix} 0 \\ dC234 + cC23 + bC2 \\ dC234 + cC23 \\ dC234 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.58)$$

Tendo em conta a divisão da matriz J^* e a Equação (B.52), o screw recíproco será da forma:

$$\hat{\$}_r = [1 \quad S_{r2} \quad S_{r3} \quad S_{r4} \quad S_{r5} \quad 0] \quad (4.59)$$

Em que os respetivos valores são calculados aplicando a Equação (B.52), para $j = 1$ e $k = 1,2,3,4,5$. Este cálculo é complexo, uma vez que implica a determinação do determinante de matrizes de dimensão 5, e por isso, é indicado para ser computado por *softwares* de cálculo matemático (*Matlab*®).

Se substituirmos o resultado da Equação (B.52) na Equação (B.43), temos:

$$\hat{\$}_r^T \$_n = S_{r4}\omega_x + S_{r5}\omega_y + v_x + S_{r2}v_y + S_{r3}v_z = 0 \quad (4.60)$$

A Equação (4.60) indica que as componentes de velocidade ω_x , ω_y , v_x , v_y e v_z estão linearmente relacionadas e, por isso, um destes componentes pode ser designado como variável dependente e os outros quatro como variáveis independentes. Como a componente ω_z não aparece na equação, ela é automaticamente considerada como independente, formando-se assim o grupo de cinco variáveis independentes.

Dependendo de qual das cinco variáveis for escolhida como dependente, a determinação da velocidade das juntas será diferente, bem como as condições de singularidade. A título de exemplo, demonstra-se o caso em que ω_x é escolhida como variável dependente.

Neste caso, ω_x pode ser escrita em função das restantes variáveis da seguinte forma:

$$\omega_x = -\frac{S_{r5}\omega_y + v_x + S_{r2}v_y + S_{r3}v_z}{S_{r4}} \quad (4.61)$$

Para esta escolha, $v_1 = [\omega_y \quad \omega_z \quad v_x \quad v_y \quad v_z]^T$ e $v_2 = \omega_x$ e a Equação (4.54) assume a forma:

$$\begin{bmatrix} \omega_y \\ \omega_z \\ v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -S1(dC234 + cC23 + bC2) + eC1 & -C1(dS234 + cS23 + bS2) & -C1(dS234 + cS23) & \dots & \dots \\ 0 & dC234 + cC23 + bC2 & dC234 + cC23 & \dots & \dots \\ 0 & C1 & C1 & \dots & \dots \\ 0 & S1 & S1 & \dots & \dots \\ 1 & 0 & 0 & \dots & \dots \\ \dots & -dC1S234 & 0 & \dots & \dots \\ \dots & dC234 & 0 & \dots & \dots \\ \dots & C1 & -S1C234 & \dots & \dots \\ \dots & S1 & C1C234 & \dots & \dots \\ \dots & 0 & S234 & \dots & \dots \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \\ \dot{q}_4 \\ \dot{q}_5 \end{bmatrix} \quad (4.62)$$

Desta forma, sendo conhecidos os valores desejados para o vetor v_1 , as respetivas velocidades de cada junta podem ser determinadas aplicando a Equação (4.55), com recurso à inversão da matriz J_1 , que será quadrada e, admitindo que é não-singular, invertível.

4.2.6 Singularidades Cinemáticas

O conceito de singularidades desempenha um papel importante na modelação e controlo de manipuladores robóticos. Estas representam configurações do manipulador para as quais a mobilidade é reduzida, isto é, não é possível impor um movimento arbitrário do elemento terminal do manipulador. Para além disso, quando um manipulador se encontra numa

configuração singular, podem existir soluções infinitas para a solução do problema de cinemática inversa. A existência de singularidades tem também a particularidade de, na sua vizinhança, pequenas velocidades no espaço de trabalho originam velocidades elevadas no espaço das juntas.

As singularidades podem ser de dois tipos: [83]

- Singularidades de fronteira, que definem os limites do espaço de trabalho, e que se verificam quando este se encontra totalmente estendido ou retraído. Estas são de fácil identificação e podem ser evitadas de forma simples.
- Singularidades internas são geralmente causadas pelo alinhamento de dois ou mais eixos de movimento. Ao contrário do tipo anterior, estas singularidades constituem um problema, na medida em que se situam dentro do espaço de trabalho.

O conceito de singularidade está matematicamente relacionado com a matriz do Jacobiano. Isto porque este define o mapeamento entre velocidades no espaço de trabalho e velocidade no espaço de juntas sob a forma de uma combinação linear das colunas do Jacobiano. Neste sentido, sendo a característica da matriz definida pelo número de linhas (ou colunas) linearmente independentes, quando a característica da matriz do Jacobiano é menor do que o seu valor máximo, estamos na presença de uma configuração singular. Por outro lado, quando o determinante do Jacobiano é nulo, significa igualmente que se trata de uma configuração singular. No contexto do problema, sendo o jacobiano uma matriz não-quadrada, não é possível calcular o seu determinante.

Tal como para a determinação da velocidade no espaço de juntas, também pode ser feita uma abordagem a partir do conceito de inversa generalizada, como é o caso da matriz pseudo-inversa de Moore-Penrose, utilizado anteriormente. Nesta formulação, a condição de singularidade é dada por:

$$\det(J(q)^T * J(q)) = 0 \quad (4.63)$$

No entanto, à semelhança do caso anterior, esta formulação não reflete totalmente as características cinemáticas de um manipulador com menos de seis graus de liberdade, pelo que se recorrerá ao particionamento da equação matricial que relaciona a velocidade no espaço cartesiano com a velocidade no espaço das juntas.

Observando esta relação expressa nas Equações (4.53) e (4.54), temos:

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix}_{n \times 1} = \begin{bmatrix} J_1 \\ J_2 \end{bmatrix}_{6 \times n} * \dot{q}$$

$$v_1 = J_1 * \dot{q}$$

Desta forma, a condição de singularidade de um manipulador com menos de seis graus de liberdade é dada por:

$$\det(J_1) = 0 \quad (4.64)$$

Como foi visto, a matriz J_1 depende da decomposição do vetor velocidade v , que é específico para cada tarefa, o que significa que as condições de singularidade também serão dependentes da tarefa.

De acordo com a análise da cinemática diferencial inversa do braço robótico em estudo, existem quatro variáveis que podem ser consideradas como dependentes, o que implica formulações diferentes da matriz J_1 .

Independentemente da constituição desta matriz, as condições de singularidade serão definidas pela Equação (4.64), ou seja, quando o determinante de J_1 se anula.

4.3 Calibração do robô

A calibração é um processo essencial da operação com robôs, uma vez que permite estabelecer uma relação entre o seu comportamento previsto e o comportamento verificado na

realidade. Este processo permite melhorar a precisão de robôs por via de alterações, por *software*, do posicionamento do robô, em vez de alterações na estrutura real. Este envolve a identificação de uma relação funcional mais precisa entre o posicionamento estimado para o robô e o seu posicionamento real. Geralmente, a calibração é uma operação levada a cabo pelo fabricante do robô para garantir a precisão documentada nas fichas técnicas.

Numa abordagem global aos métodos de calibração de manipuladores robóticos, estes podem ser divididos em três níveis, segundo Z. Roth [122]. O primeiro nível pode ser definido como calibração ao nível das juntas, e o seu objetivo é determinar uma relação correta entre o sinal produzido pelo transdutor de deslocamento da junta e o deslocamento real da mesma. O segundo nível é considerado o modelo de calibração global do robô. Este é efetuado para determinar a geometria elementar do robô, bem como para corrigir as relações junta-ângulo. O terceiro nível é considerado um nível de calibração não-geométrica e são considerados erros de posicionamento do robô devidos a efeitos como fricção e tolerâncias. Além disso, se for efetuado um controlo dinâmico do robô (para além de cinemático), as correções no respetivo modelo constituem uma calibração de nível 3. Os níveis de calibração são interdependentes e apresentam uma estrutura hierárquica, na medida em que, os resultados da calibração num determinado nível incluem a calibração dos níveis anteriores.

No contexto do projeto em desenvolvimento, importa considerar o nível de calibração 2, visto que se pretende compensar as diferenças entre o modelo teórico e a sua representação real, numa perspetiva de posicionamento e controlo cinemático. Por esse motivo, este tipo de calibração também pode ser designado de calibração cinemática [122]. O objetivo desta secção é o de propor um método de calibração simples e de fácil implementação, que permita aumentar a precisão do robô, corrigindo os seus parâmetros.

Para a calibração de um determinado manipulador, existem diferentes métodos que variam em relação ao custo, precisão conseguida, complexidade, procedimento de medição e processamento de dados. Estes métodos podem ser implementados recorrendo a duas abordagens distintas: através da medição precisa da posição do robô, recorrendo a um sistema de medição externo, que não contacta com o órgão terminal, também designado método de cadeia aberta (*open-loop*) ou forçando o robô para posições conhecidas, restringindo a sua mobilidade pela colocação de restrições físicas no órgão terminal, também designado método de cadeia fechada (*closed-loop*) [123, 124].

4.3.1 Calibração cinemática

A equação da cinemática direta pode ser escrita a partir da dependência das variáveis do espaço operacional, em relação aos parâmetros de DH fixos. Sendo $a = [a_1 \ \dots \ a_n]^T$, $\alpha = [\alpha_1 \ \dots \ \alpha_n]^T$, $d = [d_1 \ \dots \ d_n]^T$, e $v = [\theta_1 \ \dots \ \theta_n]^T$ os vetores dos parâmetros de toda a estrutura, a equação da cinemática direta (Equação (4.14)) tem a forma:

$$x = k(a, \alpha, d, v) \quad (4.65)$$

Assumindo x_m , como uma localização medida para o órgão terminal e x_n , como a respetiva localização nominal, que é obtida a partir da Equação (4.65), para os valores nominais dos parâmetros a, α, d, v . Os valores nominais dos parâmetros fixos são considerados iguais aos dados provenientes do desenho da estrutura mecânica, enquanto que os valores nominais das variáveis das juntas (parâmetros variáveis) são considerados iguais aos dados provenientes dos transdutores de posição, para uma dada localização do manipulador. Neste sentido, o desvio $\Delta x = x_m - x_n$ dá uma medida da precisão para uma dada configuração. Assumindo pequenos desvios deste valor, a partir da Equação (4.65), é possível derivar a seguinte relação:

$$\Delta x = \frac{\partial k}{\partial a} \Delta a + \frac{\partial k}{\partial \alpha} \Delta \alpha + \frac{\partial k}{\partial d} \Delta d + \frac{\partial k}{\partial v} \Delta v \quad (4.66)$$

Em que Δa , $\Delta \alpha$, Δd , Δv traduzem os desvios entre os valores dos parâmetros da estrutura real e os respetivos valores nominais. Além disso, os elementos $\partial k / \partial a$, $\partial k / \partial \alpha$,

$\partial k/\partial d, \partial k/\partial v$ representam as matrizes de dimensão $[mxn]$, cujos elementos são as derivadas parciais dos componentes da função de cinemática direta (Equação (4.8)), em relação a cada um dos próprios parâmetros.

Uma vez que existem quatro parâmetros de DH para cada elo da estrutura, é possível agrupar todos os valores num vetor de dimensão $[mxn]$:

$$\rho = \begin{bmatrix} a^T \\ \alpha^T \\ d^T \\ v^T \end{bmatrix} \quad (4.67)$$

Assim, podemos escrever as variações dos parâmetros de DH em relação aos respetivos valores nominais como:

$$\Delta\rho = \rho_m - \rho_n \quad (4.68)$$

Para além disso, podemos admitir $J = [\partial k/\partial a \quad \partial k/\partial \alpha \quad \partial k/\partial d \quad \partial k/\partial v]$ como a matriz de calibração cinemática, designada por Jacobiano do modelo do erro, de dimensão $[mx4n]$. Se esta for calculada para os valores nominais dos parâmetros de ρ_n , podemos escrever a Equação (4.66) na forma matricial:

$$\Delta x = J\Delta\rho \quad (4.69)$$

O cálculo de $\Delta\rho$ deve ser feito a partir do conhecimento de ρ_n, x_n e das medições de x_m . A matriz J representa o Jacobiano de posição completo (posição e orientação), isto é, uma matriz de dimensão $[6x4n]$ das derivadas parciais de $k(\rho)$, em relação a cada um dos $4n$ parâmetros de DH. Caso se considere apenas a posição do manipulador, esta matriz será de dimensão $[3x4n]$.

$$J \equiv \begin{bmatrix} \frac{\partial k_1}{\partial a_1} & \dots & \frac{\partial k_1}{\partial a_5} & \frac{\partial k_1}{\partial \alpha_1} & \dots & \frac{\partial k_1}{\partial \alpha_5} & \frac{\partial k_1}{\partial d_1} & \dots & \frac{\partial k_1}{\partial d_5} & \frac{\partial k_1}{\partial \theta_1} & \dots & \frac{\partial k_1}{\partial \theta_5} \\ \frac{\partial k_2}{\partial a_1} & \dots & \frac{\partial k_2}{\partial a_5} & \frac{\partial k_2}{\partial \alpha_1} & \dots & \frac{\partial k_2}{\partial \alpha_5} & \frac{\partial k_2}{\partial d_1} & \dots & \frac{\partial k_2}{\partial d_5} & \frac{\partial k_2}{\partial \theta_1} & \dots & \frac{\partial k_2}{\partial \theta_5} \\ \frac{\partial k_3}{\partial a_1} & \dots & \frac{\partial k_3}{\partial a_5} & \frac{\partial k_3}{\partial \alpha_1} & \dots & \frac{\partial k_3}{\partial \alpha_5} & \frac{\partial k_3}{\partial d_1} & \dots & \frac{\partial k_3}{\partial d_5} & \frac{\partial k_3}{\partial \theta_1} & \dots & \frac{\partial k_3}{\partial \theta_5} \\ \frac{\partial k_4}{\partial a_1} & \dots & \frac{\partial k_4}{\partial a_5} & \frac{\partial k_4}{\partial \alpha_1} & \dots & \frac{\partial k_4}{\partial \alpha_5} & \frac{\partial k_4}{\partial d_1} & \dots & \frac{\partial k_4}{\partial d_5} & \frac{\partial k_4}{\partial \theta_1} & \dots & \frac{\partial k_4}{\partial \theta_5} \\ \frac{\partial k_5}{\partial a_1} & \dots & \frac{\partial k_5}{\partial a_5} & \frac{\partial k_5}{\partial \alpha_1} & \dots & \frac{\partial k_5}{\partial \alpha_5} & \frac{\partial k_5}{\partial d_1} & \dots & \frac{\partial k_5}{\partial d_5} & \frac{\partial k_5}{\partial \theta_1} & \dots & \frac{\partial k_5}{\partial \theta_5} \\ \frac{\partial k_6}{\partial a_1} & \dots & \frac{\partial k_6}{\partial a_5} & \frac{\partial k_6}{\partial \alpha_1} & \dots & \frac{\partial k_6}{\partial \alpha_5} & \frac{\partial k_6}{\partial d_1} & \dots & \frac{\partial k_6}{\partial d_5} & \frac{\partial k_6}{\partial \theta_1} & \dots & \frac{\partial k_6}{\partial \theta_5} \end{bmatrix} \quad (4.70)$$

Uma vez que a Equação (4.69) constitui um sistema de m equações e $4n$ incógnitas, e como $m < 4n$, um número suficiente de medições deve ser feito, para que se obtenha um sistema de pelo menos $4n$ equações. Ou seja, o número de medições l deve ser tal que satisfaça a igualdade $ml \geq 4n$. Desta forma, se forem feitas medições para l localizações, a Equação (4.69) será:

$$\Delta \bar{x} = \begin{bmatrix} \Delta x_i \\ \dots \\ \Delta x_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_i \\ \dots \\ J_l \end{bmatrix} \Delta\rho = \bar{J}\Delta\rho, \quad i = 1, \dots, l \quad (4.71)$$

No que diz respeito aos valores nominais dos parâmetros necessários à computação das matrizes J_i , os parâmetros geométricos são constantes, enquanto que as variáveis das juntas dependem da configuração do manipulador na localização i .

Para evitar o mau condicionamento da matriz $\bar{J}$, é aconselhável que se escolha um valor de l , para resolver a Equação (4.71), tal que:

$$lm \gg 4n \quad (4.72)$$

Para uma identificação completa da localização do órgão terminal no espaço cartesiano, o valor de m será igual a seis. Para uma identificação parcial da localização do órgão terminal

(apenas posição), o valor de m será igual a três. O valor de n é igual ao número de variáveis do espaço de juntas [115].

Uma vez que a matriz $\bar{J}$ é não-quadrada, não é invertível, e, por isso, não pode ser usada diretamente para obter o vetor dos parâmetros de DH computados. Assim, recorre-se a um método de aproximação por mínimos quadrados, neste caso, a formulação da matriz pseudo-inversa de Moore-Penrose, de tal forma que:

$$\Delta\rho = (\bar{J}^T \bar{J})^{-1} \bar{J}^T \Delta\bar{x} = \bar{J}^+ \Delta\bar{x} \quad (4.73)$$

Pode existir um problema no cálculo de $\bar{J}^+$ se $\bar{J}$ for singular, ou numericamente quase singular. Este problema é contornado recorrendo a uma decomposição em valores singulares (*Singular Value Decomposition*, SVD), apresentada como:

$$\bar{J} = USV^T \quad (4.74)$$

Em que:

U , é uma matriz de dimensão $[m \times 4n]$ com colunas ortogonais,

S , é uma matriz diagonal, de dimensão $[4n \times 4n]$, cujos elementos são os valores singulares de $\bar{J}$, e

V , é uma matriz ortonormal de dimensão $[4n \times 4n]$.

A matriz pseudo-inversa de $\bar{J}$ é então:

$$\bar{J}^+ = VS^{-1}U^T \quad (4.75)$$

Como a matriz S é diagonal, a matriz S^{-1} também é uma matriz diagonal e os seus elementos são $1/s_i$. Se algum dos elementos singulares de S for zero, os valores correspondentes de S^{-1} serão iguais a zero, em vez de ∞ . Este princípio também se aplica para os valores de S que são aproximadamente zero. A existência de valores singulares iguais a zero indica que os parâmetros de DH correspondentes não são observáveis, isto é, não têm influência no posicionamento do órgão terminal. Da mesma forma, ao considerar valores “aproximadamente zero” como nulos, estamos a retirar informação à matriz $\bar{J}$, mas simultaneamente a prevenir erros de cálculo numérico que indicariam valores para parâmetros DH, que na realidade são quase inobserváveis, numa dada configuração do manipulador[125]. É importante referir que *softwares* como o *Matlab*®, indicados para cálculos matemáticos complexos, como é o caso, incluem o processo de decomposição em valores singulares no cálculo da matriz pseudo-inversa.

O processo geral de calibração consiste em medir o erro de posicionamento do órgão terminal Δx e calcular $\Delta\rho$ através da Equação (4.73), fazendo uma correção dos parâmetros DH de forma iterativa. Calculando a matriz $\bar{J}$ com os valores nominais dos respetivos parâmetros, ρ_n , a primeira estimativa de correção dos parâmetros DH é dada por:

$$\rho' = \rho_n + \Delta\rho \quad (4.76)$$

As restantes estimativas para correção dos parâmetros DH são dadas por:

$$\rho_i = \rho_{i-1} + \Delta\rho \quad (4.77)$$

A estimativa deste parâmetro traduz um problema não-linear, e como, tal o procedimento deve ser feito de forma iterativa até que o valor de $\Delta\rho$ convirja para um determinado limite. Em cada iteração, a matriz de calibração $\bar{J}$ é atualizada com os parâmetros ρ_i , obtidos pela Equação (4.77), na iteração anterior. Da mesma forma, o desvio $\Delta\bar{x}$ deve ser computado como a diferença entre os valores medidos para as l localizações do órgão terminal e as localizações correspondentes, computadas pela equação da cinemática direta com os valores dos parâmetros obtidos na iteração anterior.

O procedimento de calibração pode ser traduzido por um algoritmo que resume todo processo:

Passo 1: Mover o robô para as diferentes l localizações do órgão terminal. Computar o vetor x_n aplicando a equação da cinemática direta, utilizando os parâmetros de DH nominais. Medir a localização do órgão terminal e alocar os respetivos valores ao vetor x_m . Computar o vetor $\Delta x = \bar{x}_m - \bar{x}_n$.

Passo 2: Calcular a matriz $\bar{J}(\rho_n)$, equivalente ao Jacobiano do manipulador.

Passo 3: Recorrendo à Equação (4.73), calcular o vetor $\Delta\rho$.

Passo 4: Verificar o critério de convergência:

$$\|\bar{J}(\rho_i)\Delta\rho - \bar{\Delta x}_i\| \leq k \quad (4.78)$$

Se a condição for cumprida, foi encontrado o desvio entre os parâmetros de DH nominais e reais, e os novos parâmetros correspondem aos valores do vetor ρ_i .

Caso a condição não seja verificada, iniciar nova iteração, seguindo para o passo seguinte.

Passo 5: Atualizar o vetor dos parâmetros DH segundo:

$$\rho_i = \rho_{i-1} + \Delta\rho \quad (4.79)$$

Passo 6: Atualizar os valores da matriz $\bar{J}$, através de $\bar{J}(\rho_i)$.

Passo 7: Atualizar os valores de $\bar{x}_i$, através da Equação (4.65):

$$\bar{x}_i = k(\rho_i) \quad (4.80)$$

Passo 8: Atualizar vetor $\bar{\Delta x}_i = \bar{x}_m - \bar{x}_i$

Passo 9: Voltar ao passo 3.

Como consequência do procedimento de calibração cinemática são obtidas estimativas mais precisas dos parâmetros geométricos do manipulador, bem como se introduzem eventuais correções às medições dos transdutores das juntas [115, 125].

4.3.2 Aquisição de dados

Como foi referido, pretende-se que o procedimento de calibração a desenvolver seja simples, mas que permita obter resultados significativos. Para o efeito recorrer-se-á a um método de calibração em cadeia aberta e, nesse sentido, é importante uma correta aquisição de dados. A aquisição de dados é parte fundamental deste processo, que determina a informação real que é possível obter do robô.

A literatura sobre calibração refere uma grande variedade de sistemas de metrologia, que podem ser divididos tendo em conta o número de variáveis de posicionamento do robô que podem ser medidas. Neste campo, é mais frequente a medição de 3 variáveis, designada medição por pontos ou a medição de 6 variáveis, designada medição total (*full pose measuring*)

Para a medição por pontos, podem ser usadas máquinas de medição de coordenadas, que indicam a posição no espaço cartesiano de um determinado ponto do robô. Esta informação contempla apenas a posição e não tem qualquer componente de orientação, e, por isso, este método é designado por medição de um ponto.

A medição de 6 variáveis representa um mapeamento completo de todas as variáveis envolvidas na localização do robô. Esta informação pode ser obtida pela medição de múltiplos pontos do último braço do robô através de uma câmara de medição. Alternativamente, esta medição pode ser feita adicionando um braço e uma junta ao robô, estabelecendo a ligação entre o órgão terminal e o solo, ou ligando rigidamente o órgão terminal de dois robôs, por forma a tornar este mecanismo num sistema de cadeia fechada, com mais um grau de liberdade. O grau de liberdade adicional permite que um número infinito de configurações possa ser atingido e, assim, a partir da leitura dos transdutores das juntas é possível identificar estrutura cinemática de cadeia fechada. Este tipo de medição permite conhecer todos os componentes que caracterizam a localização do órgão terminal (posição e orientação) [123, 126].

4.3.3 Proposta de método de calibração

O procedimento de calibração para o braço robótico é condicionado pelo método de aquisição de dados do robô real, que, por sua vez, está limitado por questões de cariz tecnológico, nomeadamente pelos aparelhos de medição disponíveis e de cariz prático, pelo grau de dificuldade de implementação do método.

Tendo em conta estas condicionantes, propõe-se um método de aquisição com medição de três variáveis, isto é, medição da posição do órgão terminal do robô. A sua realização é idealizada com recurso a uma máquina de medição de coordenadas, como a da Figura 4.9.



Figura 4.9 - Máquina da medição de coordenadas proposta para a aquisição de dados para o método de calibração proposto.

Sendo ideal a medição de todas as variáveis de localização do órgão terminal do robô, devido à inexistência de dispositivos para o efeito e à dificuldade de realização do método, escolhe-se uma técnica mais simples. Ademais, é de esperar a obtenção de resultados aceitáveis, uma vez que, calibrando o robô com referências de posição, são considerados todos os parâmetros de DH não nulos do modelo, definidos pela Equação (4.8):

$$p = \begin{bmatrix} eC1 - S1(dC234 + cC23 + bC2) \\ C1(dC234 + cC23 + bC2) + eS1 \\ dS234 + cS23 + bS2 + a \end{bmatrix} \quad (4.81)$$

De acordo com esta formulação, a Equação (4.71), que representa o Jacobiano do manipulador, será de dimensão $[3 \times 4n]$ ($n = 5, m = 3$), e é representada pelas três primeiras linhas expressas na referida equação.

Para garantir o bom condicionamento da matriz $\bar{J}$, define-se que o número de medições a realizar, l , seja 50, para verificar a condição da Equação (4.72). O variável k , uma constante de verificação do critério de convergência, deve tomar um valor adequado em função da implementação do método. Como valor de referência inicial, arbitrou-se $k = 10^{-5} \text{ mm}$ [125].

Tendo em conta os dados definidos, o processo de calibração pode ser implementado a partir do processo iterativo sugerido.

5 Solução de Automação

A solução de automação do projeto passa pela integração de um sistema capaz de executar, simultaneamente, tarefas típicas do controlo de braços articulados e de controlo de processos de impressão tridimensional. Neste sentido, o sistema global envolve uma solução conjunta de *hardware* e *software*, que se interligam entre si.

Do ponto de vista do braço robótico, a sua grande flexibilidade implica a necessidade de uma solução de alimentação para os seus MPP, bem como uma unidade de processamento que permita controlar os seus eixos de movimento e implementar o seu modelo cinemático.

O controlo do processo de impressão 3D necessita igualmente de uma solução de alimentação elétrica e ainda de uma unidade de processamento destinada à interpretação de código G, extrusão de termoplástico e controlo de sistemas auxiliares, como, por exemplo, o cartucho do extrusor e a base de aquecimento.

5.1 Estudo de soluções

Com vista à escolha de uma solução de automação para o sistema, foi feito um estudo de possíveis soluções. A linha de raciocínio seguida teve em conta os dois sistemas principais da solução, e foi baseada tanto na implementação de sistemas designados para impressão tridimensional por FDM, como em soluções para controlo de braços robóticos. As soluções analisadas, que se apresentam nas secções seguintes, tiveram como elemento central uma solução de *software* ou uma solução de *hardware*, contudo é sempre apresentada uma proposta para controlo do sistema como um todo.

5.1.1 Programmable Physical Circuit Boards

As denominadas *Programmable Physical Circuit Boards* (PPCB) são componentes eletrónicos de tamanho reduzido, relativamente baratos, disponibilizados sobre a forma de placas. Estas são utilizadas para controlo de sistemas através do uso de lógica programada e de *inputs* e *outputs* físicos e digitais. O controlo destas placas é feito com um *software* específico para cada uma, designado *firmware*.

No campo da impressão 3d, o uso de PPCB é bastante frequente e existem algumas soluções consolidadas. Neste contexto, destacam-se as placas *Duet3D*, construídas a partir de um *Arduino Due* de 32 bits e com terminais para controlo de vários componentes.

Atualmente são disponibilizadas placas de 2ª geração (*Duet 2*), com possibilidade para ligação a PC por módulo *Wifi* ou por uma porta *Ethernet*. Estas placas possuem um processador de 32 bits, cinco drivers para MPP e cinco entradas para fins de curso, um leitor de cartões SD, três canais de aquecimento, sendo dois para extrusores e um para base de aquecimento, e cinco saídas de controlo de ventoinhas [127].

Como no sistema em desenvolvimento é necessário controlar pelo menos seis eixos (cinco eixos de movimento do robô e um de cabeça de extrusão), é necessário adicionar uma placa de expansão *Duex5*, que permite o controlo de mais cinco eixos de movimento, mais cinco extrusores, cinco entradas de leitura de termístores e duas de termopares, e seis ventoinhas controladas por PWM [128].

Os *drivers* de MPP incluídos nestas placas têm a limitação de disponibilizarem uma corrente de 2,8 A (limitada por *software* a 2,4 A), a uma tensão de 12 ou 24 V. Como alguns dos motores do robô têm uma corrente nominal superior, é necessário incluir *drivers* externos nesta solução de controlo. Para este efeito, podem ser selecionados *drivers* TB6600HG do fabricante *Toshiba*®, que disponibilizam uma corrente de até 4,5 A e uma tensão de até 50 V. A sua integração é feita ligando os sinais dos *drivers* integrados a este, e com uma fonte de alimentação independente (caso se use tensão de alimentação superior a 24 V) [129].

Este sistema é controlado e sincronizado pelo *firmware RepRapFirmware*, concebido para correr nos processadores das placas *Duet 2*. Este tem a função de interpretação do código G, tanto ao nível do controlo dos eixos de movimento e de extrusão, como de sistemas periféricos, como funções de aquecimento, arrefecimento e sensorização. O *RepRapFirmware* suporta várias estruturas cinemáticas de impressoras 3D (cartesiana, delta, CoreXY, SCARA e Polar). Contudo, a cinemática do braço articulado do nosso sistema não é suportada e, por isso, tem de ser implementada separadamente, recorrendo à função de controlo independente de eixos do *firmware* [130].

5.1.2 Arduino Industrial Shield

O *Arduino* é uma plataforma *open-source* baseada numa placa eletrónica programável, constituída por um microcontrolador com um suporte de entradas e saídas, que permite desenvolver projetos de eletrónica de baixo custo, numa gama alargada de aplicações. O *Arduino* tem um *software* proprietário que corre em PC (*Arduino IDE*) e permite programar qualquer placa com uma linguagem própria, baseada na linguagem C/C++.

O controlo do braço robótico pode ser feito com recurso a esta plataforma através do *M-Duino PLC Ethernet*, um *shield* industrial para *Arduino*. Esta solução consiste num PLC com diferentes unidades de entrada/saída, que tem por base um *Arduino Mega 2560*. Esta solução combina a grande flexibilidade de programação de um *Arduino*, com uma solução industrial robusta, que possibilita operar a tensões mais elevadas e com número de entradas/saídas maior, consoante a gama selecionada [131].

A utilização de configurações baseadas em *Arduino Mega*, é apropriada tanto para aplicações de impressão 3D como para robótica, tendo já sido utilizada para a construção de uma estrutura de impressão tridimensional baseada numa plataforma *Stewart* [132].

O controlo do sistema é conseguido com a inclusão de *drivers* externos para alimentar os MPP, que podem ser os já referidos TB6600HG, ou um *driver* mais robusto como o *Geckodrive G201X*, que disponibiliza uma maior tensão de alimentação (até 80 V) e uma maior corrente nominal (até 7 A) [133, 134].

A escolha do dispositivo *M-duino* é dependente do número de entradas e saídas do sistema. De uma forma geral, são necessárias três saídas para o controlo de cada um dos MPP (que farão ligação ao respetivo *driver*), perfazendo 18 saídas ($6 \times 3 = 18$), duas saídas para comando de elementos de aquecimento (cartucho do extrusor e base de aquecimento) e pelo menos uma para ventoinha, o que resulta num total de pelo menos 21 saídas. No que diz respeito às entradas, para cada motor, é necessária uma para receber o sinal do fim de curso e pelo menos três para os sinais dos *encoders*, para além de duas entradas analógicas para os sinais dos sensores de temperatura, resultando num total de 26 entradas. Por este motivo, é necessário um *M-Duino PLC Arduino Ethernet 54 I/O*, que disponibiliza um total de 29 entradas e 25 saídas.

A integração de *software*, à semelhança do trabalho desenvolvido por Lars Skaret [132], pode ser feita por programação em linguagem *Python*, com um código capaz de resolver as equações de cinemática, interpretar o código G e comandar o movimento dos MPP.

5.1.3 LinuxCNC

Ao contrário das soluções anteriores, baseadas na escolha do *hardware*, esta solução é determinada pelo *software*. O *LinuxCNC* é um *software* de controlo *open source*, desenvolvido por uma comunidade *online*, com a capacidade de implementar funções de controlo numérico em computadores de uso geral. A sua integração permite um sistema que funciona como um controlador de uma máquina industrial, capaz de desempenhar funções de PLC's e de interpretação e execução de código G, podendo controlar fresadoras, tornos, braços robóticos, entre outros, até um máximo de nove eixos interpolados em simultâneo.

Este *software* corre em sistemas operativos que utilizam o núcleo *Linux*, nomeadamente o *Ubuntu* e *Debian*, que podem ser alterados de modo a suportar características de *soft real-time*. De referir, que a utilização de computadores portáteis não é recomendada para funções de controlo em tempo real [135].

A arquitetura do *hardware* tem de ser completada com uma interface que permita a ligação entre o PC e os MPP. Para isso podem ser usadas cartas com entradas I/O programáveis, que comunicam pelo barramento PCI (*Peripheral Component Interconnect*) e são ligadas ao PC a partir de uma porta paralela. Neste sentido, pode ser usada uma carta principal 5i25 do fabricante *Mesa Electronics®* juntamente com duas cartas secundárias 7i76 que permitem o controlo de até dez MPP e integração dos respetivos *encoders*. No que diz respeito ao controlo dos MPP, é necessária a inclusão de *drivers* externos, como os *Geckodrive* G201X, que são compatíveis com estas cartas, pois estas não têm tensão e corrente suficientes para alimentar os motores [136, 137]. O recurso a cartas com portas paralelas é aconselhado pela comunidade *LinuxCNC* para efeitos de controlo em tempo real das saídas dos MPP e PWM, no entanto, também pode ser equacionada a utilização de cartas com terminais I/O programáveis com comunicação *Ethernet*, como é o caso das placas *Beaglebone®*, com uma lógica de funcionamento semelhante [138, 139].

O funcionamento de baixo nível do *LinuxCNC* é feito com o subsistema HAL (*Hardware Abstraction Layer*), que tem a função de configurar e conectar os vários componentes do sistema (*drivers*, motores, *encoders*, etc.) no *software*. A sua importância é justificada pelo facto de ser através da definição deste sistema que é possível implementar projetos com o *LinuxCNC* [140].

Neste sentido, o controlo do braço robótico é feito com três ficheiros HAL, sendo um destinado à descrição da cinemática do robô, pela definição dos respetivos parâmetros DH, outro para a geração dos sinais para acionamento dos MPP através da porta paralela, e um último para mapeamento dos terminais físicos da porta paralela que irá transmitir os sinais. Tendo em conta as potencialidades do *LinuxCNC*, pode ser desenvolvida uma GUI (*Graphical User Interface*) para simulação do movimento do braço robótico. Esta é construída no ambiente *Vismach*, e consiste num conjunto de funções em *Python* que permite criar um modelo para simulação do robô a partir dos ficheiros STL das partes constituintes. Este ambiente também permite a integração de outros elementos do espaço de trabalho (como por exemplo, a cabeça de extrusão), o que possibilita uma simulação mais rigorosa do funcionamento de todo o sistema. No caso de se utilizar uma GUI, é necessário criar um ficheiro HAL adicional, para encaminhar os sinais gerados para movimento dos motores para a simulação e, assim, garantir sincronismo entre o modelo real e a simulação.

Para além dos arquivos HAL, é também preciso criar um ficheiro do tipo INI, o arquivo de configuração principal do *LinuxCNC*, que assegura a inicialização do sistema, recuperando os ficheiros HAL e inicializando a GUI de simulação. Este ficheiro tem função de armazenar as configurações da interface gráfica, do controlador de tarefas e do temporizador para planeamento de trajetórias, bem como as especificações do robô, nomeadamente, o tipo de coordenadas, limites das juntas, velocidades e acelerações máximas e mínimas [141].

A trajetória do robô e o movimento de extrusão são controlados pelo código G, que é interpretado pelo *LinuxCNC*, mas que primeiramente deverá ser sujeito a ações de pós-processamento, ao nível da alteração das coordenadas de impressão e imposição do movimento da base de impressão em vez da cabeça.

Partindo da arquitetura de *hardware* e *software* descrita, é igualmente possível executar uma solução de automação semelhante à proposta, utilizando o *software Machinekit* em alternativa ao *LinuxCNC*. Estes dois *softwares* têm as mesmas raízes e são semelhantes na sua estrutura de funcionamento, no tipo de aplicações e nas licenças de utilização *open-source*. O *Machinekit* é uma plataforma mais recente e mais desenvolvida que o *LinuxCNC*, o que significa que tem maior potencial de aplicações no futuro, mas, em contrapartida, a sua utilização não está tão consolidada [142].

5.1.4 ROS (Robotic Operating System)

Na análise das soluções para controlo do braço robótico também se inclui o ROS, um sistema operativo especialmente desenvolvido para a criação de *software* de controlo de robôs e, por isso, pretende-se avaliar a viabilidade da sua utilização neste projeto.

Tal como o *LinuxCNC* e *Machinekit*, o seu desenvolvimento está a cargo de uma comunidade *online* (*Open source Robotics Foundation*), cujos *softwares* desenvolvidos são abrangidos por licenças de código aberto. Este sistema executa funções típicas de um sistema operativo, incluindo abstração de *hardware*, controlo de dispositivos de baixo nível, transmissão de mensagens entre processos, e gestão de pacotes. Para além disso, também disponibiliza ferramentas e bibliotecas para obter, escrever e correr código em múltiplos computadores. O ROS corre em plataformas *Unix*, como é o caso dos sistemas operativos *Ubuntu* e *macOS*.

Um sistema implementado por ROS é constituído por vários nós (*nodes*), que desempenham tarefas diferentes. Um nó designa um processo que executa funções de computação específicas e torna possível uma construção modular do sistema. Os nós comunicam entre si através de mensagens (*messages*), uma estrutura de dados com vários campos, que as caracterizam. Por sua vez, as mensagens são encaminhadas por um sistema de publicação/subscrição, conforme o nó envie ou receba informação. O conteúdo da mensagem é designado de tópico (*topic*) e, nesta lógica de funcionamento, um tópico pode ter vários nós publicadores e subscritores e, em sentido inverso, um nó pode publicar e/ou subscrever vários tópicos. Os nós são agrupados em pacotes (*packages*), que têm a função de agrupar conjuntos de dados com as mesmas características (bibliotecas, ficheiros de configuração, etc.). Os pacotes são os elementos básicos do sistema ROS, por serem a menor unidade de informação que é possível construir e partilhar. A distribuição dos pacotes é feita através de repositórios (*repositories*) [143, 144].

Uma das grandes vantagens do sistema ROS reside na sua modularidade e disponibilização de conteúdos, na medida em que possibilita utilização e integração de pacotes em aplicações diferentes daquelas para os quais foram inicialmente desenvolvidos.

No âmbito do sistema ROS, ainda não foi desenvolvido nenhum pacote ou *software* destinado a aplicações de impressão 3D com tecnologia FDM. O projeto mais próximo é o ROS *Additive Manufacturing* (ROSAM), que está ainda em desenvolvimento, e permite a geração de trajetórias de robôs para aplicações de impressão 3d de materiais metálicos. A utilização de um *software* deste tipo seria muito vantajosa, pois seria possível efetuar várias etapas do processo de impressão 3D com uma única aplicação (*slicing*, geração de trajetórias e conversão numa linguagem interpretável pelo robô) [145].

Tendo em conta esta impossibilidade, a arquitetura do sistema deve ser semelhante à proposta por M. R. de Gier [146], onde também foi implementado um sistema de impressão 3D com um braço robótico UR5. Desta forma, o sistema ROS deve ser apenas responsável por controlo do braço robótico, e o movimento de extrusão é controlado por outro dispositivo, sendo que estes comunicam entre si.

Do ponto de vista do movimento do robô, o controlo de manipuladores robóticos em ROS é feito primordialmente com o *MoveIt!*, o *software open-source* mais utilizado para este efeito. Trata-se de um *software* fácil de usar, que incorpora avanços recentes em planeamento de trajetórias, manipulação, perceção 3D, cinemática, controlo, navegação e verificação de colisões. Este permite executar funções de programação *offline*, como simulações gráficas de movimento, ideal para testar trajetórias e estudar interferências no espaço de trabalho [147].

Para implementar o braço robótico no *MoveIt!* é necessário criar um pacote para o robô. Já foram desenvolvidos, e encontram-se disponíveis *online*, um grande número de pacotes para utilização de robôs com este *software*, no entanto, não existe nenhum para o braço robótico *Igus®*, e, por isso, é necessário criar um.

Um dado pacote é construído pelo próprio *software*, a partir de um ficheiro URDF (*Universal Robot Description File*). O URDF é o formato nativo para caracterização de robôs,

interpretável pelos vários sistemas ROS. Este formato consiste num documento XML onde são descritas as propriedades físicas do robô, desde o comprimento dos elos e dimensão das juntas, até à localização dos sensores e aparência visual de cada componente. A criação do braço robótico neste formato pode ser feita pela programação de ficheiros XML, onde terão de ser construídos cada um dos componentes para formar a estrutura robótica. Alternativamente, existe um *plugin* para o *Solidworks* que permite converter o ficheiro CAD de um robô no formato URDF [148].

Neste ponto, é importante ter em atenção que a trajetória do órgão terminal do braço robótico é proveniente do código G, e que o *Moveit!* não possui funcionalidades de interpretação deste código. Assim, será necessário utilizar ou desenvolver um interpretador de código G, capaz de extrair informação de posição e velocidade no espaço cartesiano, para que, por sua vez, esta seja convertida em movimento do robô através do *Moveit!*.

A ligação de *hardware* entre o PC e o robô pode ser feita de acordo com a implementação proposta por Jesse Weisberg [149] para controlo do braço robótico *Moveo*⁵[150]. Para tal, é utilizado o microcontrolador *Arduino Mega 2560* e o *shield* RAMPS 1.4, com *drivers* externos para controlo dos cinco MPP. Esta solução é semelhante a outras já estudadas, expostas nas Secções 5.1.1 e 5.1.2, diferenciando-se pelo *software* que as sustenta. Por este motivo, os *drivers* utilizados podem ser os já referidos TB6600HG.

Para a cabeça de extrusão, do ponto de vista do *hardware*, é necessário um *driver* para MPP, que possa ser comandado a partir de um PC através de um microcontrolador *Arduino*, tendo em conta a informação do código G da rotina de impressão.

A implantação do sistema global fica completa com a utilização de *Arduinos* que fazem a transmissão de informação entre os dois PC's e a cabeça de extrusão, por comunicação série, como ilustrado na Figura 5.1. Um dos PC's corre com o sistema operativo *Windows*, com *software* de impressão 3D instalado e o outro corre com sistema operativo *ROS* e *Linux*, exclusivamente para controlo do movimento do robô. As referências de movimento e velocidade do robô são geradas no PC *Windows* pelo código G.

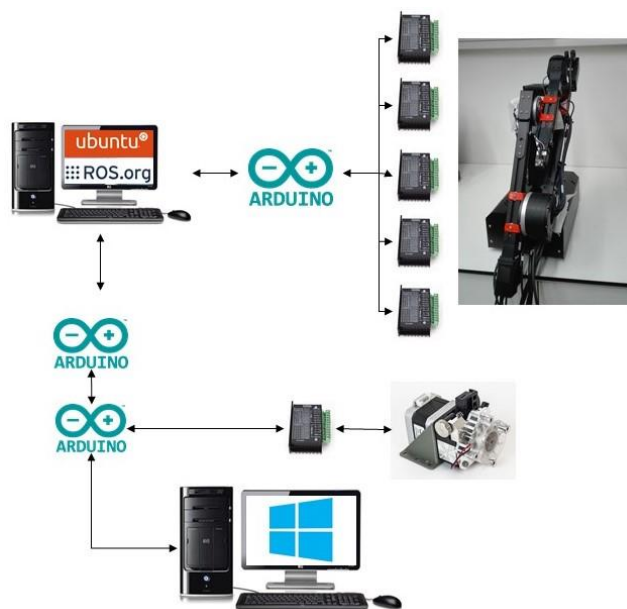


Figura 5.1 - Sugestão de solução de automação para controlo do braço robótico e cabeça de extrusão, baseado em [149] e [146]. Fontes de imagens:[151-157]

⁵ O *Moveo* é um braço robótico *open-source* desenvolvido pela empresa BCN3D em parceria com o governo autónomo da Catalunha, cuja estrutura se encontra disponível *online*, em ficheiros STL, com o objetivo de serem imprimidos tridimensionalmente por qualquer utilizador e permitindo-lhes construir o seu próprio braço robótico. A eletrónica de controlo deste robô é baseada em *Arduino*. O estudo deste robô é relevante para o projeto em desenvolvimento, uma vez que também se trata de um robô constituído apenas pelos componentes mecânicos e elétricos, com liberdade de implementação de uma solução de controlo.

5.1.5 Beckhoff

Outra solução a ter em conta para o controlo do sistema de impressão tridimensional é baseada em componentes do fabricante *Beckhoff*, uma empresa que comercializa componentes para sistemas de automação industriais. Esta disponibiliza soluções tanto ao nível do *hardware*, através de sistemas modulares (cartas) que se interligam entre si, tanto como do *software*, com o *TwinCAT* (*The Windows Control and Automation Technology*), que já vai na terceira geração (*TwinCAT 3*). A construção do *TwinCAT* é baseada em *CODESYS*, uma solução de *soft-PLC* da empresa *3S-Smart Software Solutions GmbH*, que implementa funções de controladores industriais em PC's segundo a norma de programação de PLC's IEC 61131-3. Esta hipótese foi seguida como sugestão da *Igus®* para o controlo de braços articulados da série *Robolink®*.

A estrutura dos sistemas *Beckhoff* assenta no protocolo de comunicação *EtherCAT*, originalmente desenvolvido pela própria empresa, indicado para controlo em tempo real de componentes de automação. O mestre *EtherCAT* envia um telegrama que passa ao longo de todos os nós. Cada escravo lê a informação do *frame* e insere a respetiva informação no mesmo, enquanto este está em circulação. A comunicação gerida pelo mestre é feita através do controlo de acesso ao meio (MAC) *Ethernet*, sem qualquer processador de comunicação adicional, o que permite que um mestre possa ser implementado em qualquer *hardware* com uma porta *Ethernet* disponível [158].

O recurso a este conjunto é semelhante às soluções que recorrem ao *LinuxCNC* e *ROS*, na medida em que é necessário um PC que corra o *software* de controlo, que se interliga com um conjunto de *drivers* e portas I/O, que asseguram o funcionamento no nível lógico. Na solução sugerida, é utilizado um controlador *CX5130*, um PC industrial da *Beckhoff*, com um processador Intel® Atom™ com dois núcleos. Na sua versão mais avançada, *CX5130-0155*, ele vem instalado com o sistema operativo *Windows 10 IoT Enterprise LTSC 64 bit* e com o *software TwinCAT 3*, que possibilita a implementação de um PLC em conjunto com o módulo de controlo de movimento (*Motion Control*) e funções de interpolação simultânea de eixos de movimento. Em vez de um PC industrial *Beckhoff*, também seria possível a utilização de um PC de uso geral com o sistema operativo *Windows*, instalado com o *software TwinCAT 3*. No entanto, como se trata de uma solução industrial, é de esperar um sistema mais robusto e com maior margem para adaptações e evoluções [159, 160].

O controlo dos motores do robô e do extrusor pode ser feito com dispositivos do mesmo tipo, ou seja, com cartas *EL7047*, que são *drivers* de MPP com capacidade de alimentação dos mesmos e leitura dos seus *encoders*. Estas disponibilizam tensão e corrente numa gama alargada, na qual se incluem as características dos MPP do robô, tendo também saídas do tipo PWM e entradas para leitura de fins-de-curso. Estes *drivers* são versáteis e é possível o ajuste das suas características pela alteração de parâmetros por *software*. Para o sistema de impressão 3D global, são necessárias seis cartas deste tipo, cinco para alimentar os motores do braço robótico e uma para o motor do extrusor. Esta configuração tem a vantagem de se poderem incorporar vários MPP e inclusivamente motores de outro tipo, bastando para tal adquirir as respetivas cartas [161].

Ao nível do *software*, esta solução é implementada com o *TwinCAT 3*, que permite que o sistema funcione como um controlador de tempo real, com funções de PLC, com linguagens de programação de acordo com a norma IEC 61131-3, controlo de eixos de movimento, e ainda comunicação com outras interfaces de acordo com os *standards open Microsoft* (OPC, OCX, DLL, etc.). No campo das aplicações de controlo de movimento, são disponibilizadas extensões do *software*, destacando-se o *NC-I* (*Numeric Control*), que admite a interpolação de até oito eixos em simultâneo, bem como programação e interpretação de código G, de acordo com a norma DIN 66025, e ligação com o PLC. Além deste, a extensão *Kinematic Transformation* permite implementar o modelo cinemático (cinemática direta e inversa) de manipuladores em série de até seis eixos. O funcionamento do sistema, é articulado pelas funções destas duas extensões, sendo que o *NC-I* interpreta o código G do *slicer* e transmite essa informação ao

Kinematic Transformation, que lida com os cálculos do robô e geração de trajetórias, e as envia de volta ao *NC-I* para traduzir essas referências em movimento do robô.

Em alternativa, pode também ser utilizado o módulo do *TwinCAT* de programação em C/C++, programado para resolver as equações cinemáticas, em comunicação com o *NC-I*. De forma similar, pode-se recorrer a um módulo de comunicação adicional com o *Matlab®/Simulink®* que, suportando a aquisição e visualização de variáveis em tempo real, pode efetuar os mesmos cálculos. A utilização destes módulos é interessante, pois, fazendo uso das potencialidades de cada linguagem, pode ser possível fazer simulação do movimento do robô em articulação com o seu controlo em tempo real. Poderá haver vantagem na utilização do módulo *Matlab®/Simulink®*, visto que se trata de um *software* indicado para o cálculo matemático e matricial e este possui bibliotecas (*toolboxes*) para estruturas robóticas.

5.1.6 RoboDK

No contexto da análise das soluções de automação para controlo do sistema, importa considerar também o *software RoboDK*, um *software* de programação *offline* e simulação para robôs industriais. Este pode ser usado para simulação de vários processos de fabrico envolvendo manipuladores robóticos, incluindo soldadura, fresagem, pintura, impressão 3D, entre outros. Este *software* tem a particularidade de ser dedicado à simulação de braços articulados, possuindo uma extensa biblioteca de robôs de diversos fabricantes. Destaca-se por implementar a cinemática (direta e inversa) dos robôs e, com base nisso, ser capaz de gerar e simular trajetórias para aplicações industriais, incluindo verificação de colisões no espaço de trabalho e análise de singularidades.

A interface de utilização deste programa é intuitiva e de fácil utilização, não sendo imprescindível o conhecimento prévio de uma linguagem de programação. Podem também ser importados diferentes tipos de ficheiros, como, por exemplo STEP, para criar o espaço de trabalho e fazer uma simulação mais rigorosa.

Em algumas aplicações, é possível executar rotinas de programação *online*, com sincronismo entre o modelo de simulação e o robô real. Contudo, tal é possível para robôs de um conjunto de fabricantes limitado (ABB, Fanuc, KUKA, Mecademic, Mitsubishi, Motoman e Universal Robots), e a sua utilização neste projeto, enquanto ferramenta de controlo do robô em tempo real, só é possível pela criação de um *driver* no *software*.

Ainda assim, a sua utilização tem potencial como instrumento de programação *offline*, principalmente por este ser o único *software* com capacidade de executar essas tarefas na simulação de impressão 3D (com tecnologia FDM). Aliás, é inclusivamente possível criar a configuração do espaço de trabalho com cabeça de extrusão fixa e mesa movida pelo robô, sendo as transformações matemáticas necessárias geradas automaticamente [162, 163].

No que diz respeito à impressão 3D, o *software* consegue interpretar código G e transformá-lo em movimento do robô, sendo que, para além disso, ele também tem incluído um *plugin* do Slic3r®, o que também é uma novidade, na medida em que se torna possível executar *slicing* e geração do movimento das juntas de um robô com um único *software*.

O *RoboDK* recorre a pós-processadores como elemento fundamental de programação *offline*, dado que estes têm a função de converter uma determinada simulação num programa específico, interpretável por um dado robô. Esta característica garante flexibilidade, porque permite implementar uma simulação em controladores diferentes. O *software* inclui uma extensa biblioteca de pós-processadores, dando suporte a vários modelos de controladores de vários fabricantes. Em alternativa, existe a liberdade de criar pós-processadores personalizados ou modificar já existentes. Um pós-processador é um ficheiro PY (definido por um *script* em linguagem *Python*) e a sua criação/modificação resume-se à escrita de código nesta linguagem de programação [164].

A base de dados deste programa contém um elevado número de robôs, mas, maioritariamente, modelos de grandes fabricantes como a KUKA, ABB, FANUC entre outros

e, como tal, não possui o braço robótico em estudo, nem nenhum do fabricante *Igus®*. Num caso geral, este problema pode ser contornado através da opção do *software* para adicionar um qualquer robô a partir do seu ficheiro STEP, e definindo os seus parâmetros físicos. No entanto, essa funcionalidade só é possível para robôs com seis eixos. Por este motivo, a introdução do robô *Igus®* só pode ser feita a pedido, ou seja, contactando os responsáveis do *software* e solicitando a inclusão do robô nas suas bibliotecas.

A concretização desta solução de automação para controlo do sistema cinge-se às ferramentas de programação de nível mais alto, não dando resposta às necessidades de controlo do robô a um nível mais baixo, nomeadamente no controlo dos MPP. Neste sentido, este pode ser integrado em conjunto com qualquer interface de *hardware* sugerida anteriormente, capaz de desempenhar estas funções, ou com microcontroladores de uso geral como *Arduino*, *Raspberry Pi* ou *Beaglebone*, com comunicação série ou *Ethernet*, conectados a um conjunto de *drivers* externos.

5.2 Escolha da solução

Nesta secção, pretende-se fazer a escolha da solução de automação para controlo do sistema. Em primeiro lugar, será feita uma síntese das várias soluções de automação apresentadas, apresentada na forma de tabela (Tabela 5.1), de forma a facilitar a sua compreensão e a comparação entre soluções.

Apesar de as soluções serem apresentadas de forma seccionada, é importante referir que não são soluções estanques e outras podem ser criadas com os mesmos (ou outros) *softwares* e *hardwares*, com arquiteturas de funcionamento diferentes. Em particular, o crescimento das plataformas *open-source* no campo de *software* e mecatrónica, bem como as possibilidades de programação de computadores e microcontroladores, contribuem em grande escala para o potencial aparecimento de soluções inovadoras.

Tabela 5.1 - Tabela resumo das soluções de automação estudadas.

Solução 1: Programmable Physical Circuit Boards – Duet 3D	
Hardware	<i>Duet + Duex 5; Drivers externos; Ligação a PC por Wifi ou Ethernet</i>
Software	<i>RepRap Firmware</i>
Vantagens	Desvantagens
- Solução compacta de baixo custo - Sistema desenvolvido para aplicações de impressão 3D por FDM - Solução de fácil utilização e com informação disponibilizada <i>online</i> <i>Firmware open-source</i>	- Implementação cinemática do robô - Dificuldade de incluir ferramentas de simulação e programação <i>offline</i> - Sistema pouco robusto
Solução 2: Arduino Industrial Shield	
Hardware	<i>M-Duino PLC Arduino Ethernet 54 I/O; Drivers externos</i>
Software	Programação placa <i>Arduino</i> em <i>Python</i> ou <i>Arduino IDE</i>
Vantagens	Desvantagens
- Sistema baseado em PLC - Fácil configuração das entradas e saídas do sistema - Solução baseada em <i>Arduino</i> (microcontrolador popular) mais robusta - Solução de <i>software open-source</i>	- Solução indicada para controlo simples do braço robótico - Necessidade de desenvolver código de programação para vários sistemas de alto e baixo nível (cinemática, interpretação de código G, comando dos motores)
Solução 3: LinuxCNC/Machinikit	
Hardware	<i>Mesa 5i25+7i76+7i76; Drivers externos; Ligação a PC por porta paralela</i>
Software	<i>LinuxCNC/Machinikit</i> no PC (sistema operativo <i>Linux</i>); <i>Firmware HostMot2</i> na placa
Vantagens	Desvantagens
- Solução capaz de efetuar programação <i>offline</i> e controlo em tempo real <i>Software</i> indicado para controlo numérico e capaz de interpretar código G	- Funcionalidades de impressão 3D por FDM limitadas - Implementação do sistema em linguagem de baixo nível

- Existência de módulos para implementação da cinemática do robô - Solução de <i>software open-source</i> <i>Software</i> funciona como controlador do robô		- Necessidade de porta paralela de PC (apesar de existirem algumas configurações para ligação por <i>Ethernet</i>) - Necessidade de duas placas extensíveis (7i76) para controlo de seis eixos - Solução de controlo industrial com popularidade decrescente	
Solução 4: ROS			
Hardware	Placas <i>Arduino</i> para comunicação série; <i>drivers</i> externos		
Software	ROS + <i>Moveit!</i> (sistema operativo <i>Linux</i>); <i>Arduino IDE</i> para comunicação entre os sistemas, controlo de MPP e gerir pins I/O		
Vantagens		Desvantagens	
- Solução de controlo robótico bastante popular e em forte crescimento - Pacotes de <i>software open-source</i> desenvolvidos e partilhados por vasta comunidade <i>online</i> ativa - Aquisição de <i>know-how</i> num sistema de <i>software</i> com grande potencial no futuro - Possibilidade de, no futuro, serem desenvolvidos pacotes e/ou <i>software</i> para FDM com robótica, com destaque para as potencialidades do <i>software</i> ROSAM, ainda em desenvolvimento		- Não é possível controlar sistema com um único PC - Utilização do sistema operativo é pouco intuitiva, com necessidade de adquirir conceitos informáticos mais avançados. Curva de aprendizagem íngreme (<i>steep learning curve</i>) - Movimento do robô e do extrusor feito por controladores diferentes	
Solução 5: Beckhoff			
Hardware	PC Industrial <i>Beckhoff</i> CX 5130-0155; <i>drivers</i> <i>Beckhoff</i> EL7047		
Software	<i>TwinCAT 3</i> com módulos <i>PLC</i> , <i>NC-I</i> e <i>Kinematic Transformation</i>		
Vantagens		Desvantagens	
- Solução integrada com <i>software</i> e <i>hardware</i> comercializados pelo mesmo fabricante - Capacidade de interpretação de código G e realização de cinemática do robô - Sistema industrial modular e robusto com potencial para ser expandido e/ou reformulado, consoante as necessidades - Vasta documentação e suporte dado pelo fabricante		- Não é possível fazer, de forma direta, simulação do processo <i>Software</i> não contempla funções de impressão 3D, por natureza - Solução mais dispendiosa ao nível do <i>hardware</i> e das licenças de <i>software</i>	
Solução 6: RoboDK			
Hardware	Microcontrolador de uso geral (<i>Arduino</i> , <i>Beaglebone</i> ou <i>Raspberry Pi</i>), <i>drivers</i> externos		
Software	<i>RoboDK</i> ; <i>Python IDLE</i> para programação de pós-processador e/ou <i>driver</i>		
Vantagens		Desvantagens	
- Único <i>software</i> que capaz de integrar todas as especificidades do sistema (<i>slicing</i> para impressão 3D, interpretação de código G, cinemática do robô, configuração com extrusor fixo) - Ferramenta robusta de programação <i>offline</i> e simulação de operações industriais com robótica - Possibilidade de controlo em tempo real através de <i>scripts</i> de programação em <i>Python</i>		- Solução robusta do ponto de vista de <i>software</i> apenas e não de <i>hardware</i> - Necessidade de programação de pós-processadores e <i>drivers</i> de origem - Licença de utilização do <i>software</i> mais dispendiosa	

Tendo em conta o levantamento executado, opta-se pela solução de automação baseada no sistema *Beckhoff*. Os aspetos que mais pesaram nesta seleção foram o facto de se concretizar um sistema bastante robusto, com *software* e *hardware* de natureza industrial e a sua grande versatilidade, para permitir melhorar ou reformular o sistema facilmente. Além disso, também foi tido em conta o facto de o projeto ser desenvolvido no contexto de uma instituição de investigação direcionada para soluções de aplicação industrial que, tendo a sua estratégia de mercado definida, tem interesse no aprofundamento de *know-how* em sistemas robóticos envolvendo soluções *Beckhoff* e na exploração das potencialidades de utilização de sistemas industriais em ambiente de investigação.

5.3 Detalhe da solução

A escolha da solução de automação foi feita com base em pesquisas que tinham como objetivo a idealização de uma solução geral. No entanto, com vista à implementação desta solução, esta carece de maior detalhe para garantir um sistema completo, com funcionamento correto.

No que diz respeito ao controlo dos MPP, são necessárias seis cartas do tipo EL70x7, *drivers* da *Beckhoff* para MPP's, sendo cinco para o movimento do braço robótico e um para o movimento de extrusão. Consultando as fichas técnicas dos motores do robô (Anexo A.2) e do catálogo deste tipo de cartas, e considerando as características de corrente e tensão de alimentação, podemos verificar que podem ser usadas cartas EL7037 para os MPP de menor dimensão (NEMA 11 e NEMA 17), em vez das cartas EL7047, que são apenas utilizadas para os motores maiores (NEMA 23 e NEMA 23 XL)⁶. Como, na grande maioria das aplicações de FDM, os extrusores são comandados por um MPP NEMA 17, assume-se a necessidade de mais uma carta EL7037 para o seu funcionamento. Assim, o conjunto de *drivers Beckhoff* para controlo de MPP é constituído por três cartas EL7047 e três EL7037.

No que concerne ao PC industrial para correr o *TwinCAT 3*, foi feito um estudo mais aprofundado em relação à solução inicialmente sugerida, nomeadamente através do contacto com representantes da *Beckhoff*, de onde surgiu uma alternativa ao PC CX5130, o PC C6015-0010. Trata-se de um PC com características de *performance* semelhantes ao anterior, com a particularidade de ser mais compacto. Este possui um processador *Intel® Atom™* que, dependendo da versão, pode ter até quatro núcleos. Os PC's industriais *Beckhoff* são caracterizados por uma escala de *performance* para correr o *TwinCAT 3* que, neste caso, é TC3:40 numa escala de nove níveis que varia entre TC3:20 e TC3:90 [165].

Relativamente à interligação entre os componentes físicos do sistema, e considerando o protocolo de comunicação EtherCAT, para haver comunicação entre os terminais e a rede EtherCAT, é necessária a existência de um EtherCAT *coupler*. O *coupler* cria a ligação entre a rede EtherCAT de alto nível e os terminais, ou seja, converte telegramas de alto nível em representação de sinais E-bus, usada na comunicação entre cartas. Desta forma, uma estação generalizada será constituída por um EtherCAT *coupler*, um conjunto de terminais EtherCAT e um terminal de barramento (EL9011).

A escolha do EtherCAT *coupler* depende de vários fatores, como a necessidade de controladores, a ligação física aos restantes componentes ou o protocolo de comunicação. O *coupler* a utilizar será o EK110 (Anexo C.1.6), visto que é indicado para a ligação aos drivers do tipo EL70x7. O *coupler* tem também a função de alimentar os terminais para comunicação do barramento E-bus, disponibilizando um máximo de 5V/2A [166].

O EtherCAT *coupler* será a interface de ligação entre os comandos do PC C6015 e os módulos de controlo dos motores (e outros dispositivos). Desta forma, a ligação entre o módulo EK1100 e o PC C6015 é feita através de uma porta RJ45 que suporta o protocolo EtherCAT. A ligação entre o EK1100 e os módulos EL70x7 é feita através do barramento E-bus, comandado pelo EK1100, que é assegurada por contactos elétricos nas paredes laterais dos módulos, e que, por esse motivo, devem estar montados como um bloco.

A solução completa do sistema de impressão 3D baseado num braço robótico pode incluir ainda outros sistemas e componentes auxiliares que serão devidamente analisados e concebidos nas secções seguintes.

⁶ As considerações de natureza elétrica feitas para justificar esta escolha são detalhadas na Secção 6 - Projeto de Instalação elétrica

6 Projeto de instalação elétrica

A seleção dos componentes elétricos da impressora em desenvolvimento centrou-se nos requisitos impostos ao controlo do braço robótico, elemento crítico do projeto e, por esse motivo, foi escolhida a solução de controlo baseada em componentes do fabricante *Beckhoff*. Neste sentido, é favorável que todos os componentes da impressora sejam controlados por elementos *Beckhoff*, constituindo uma solução integrada, cujos elementos são totalmente compatíveis, e em que, como consequência da escolha deste fabricante, haverá a necessidade de acrescentar módulos inerentes ao sistema de controlo em causa.

A escolha foi feita distinguindo o controlo do movimento do robô do movimento de extrusão, para possibilitar uma análise mais cuidada dos detalhes de cada um dos processos.

6.1 Movimento da base

Para o controlo do movimento do robô, a solução compreende três módulos de *drivers* para MPP do tipo EL7047, e outros dois do tipo EL7037, sendo estes controlados por um computador industrial C6015-0010, que suporta o *software TwinCAT 3*.

Da análise da ficha técnica dos motores do robô (Anexo A.2), podemos verificar que todos os motores podem ser alimentados com uma tensão entre os 24 V DC e os 48 V DC, variando a corrente nominal em função da respetiva categoria. No caso dos motores NEMA23 e NEMA23XL a corrente nominal indicada é de 4,2 A. Por isso, o *driver* indicado para estes motores é uma carta EL7047 (Anexo C.1.1), pois disponibiliza uma corrente de até 5 A (com possibilidade de se estender até 6,5 A) e que permite que os motores sejam alimentados externamente numa gama de 8 a 50 V DC. Assim, dá-se preferência à escolha de uma tensão de alimentação de 48 V, que permite que os motores sejam capazes de atingir maiores velocidades, devido a dois motivos. Por um lado, com uma tensão maior o tempo de subida da corrente nos enrolamentos será menor, o que possibilita frequências de comutação mais elevadas. Por outro lado, e em consequência disso, como a força contraelectromotriz gerada nos enrolamentos aumenta com a velocidade, serão necessárias tensões mais elevadas para um mesmo nível de corrente. No contexto do projeto, são necessárias três cartas deste tipo.

No caso do motor NEMA17, a corrente nominal é 1,8 A e o *driver* a utilizar para este motor será uma carta EL7037 (Anexo C.1.2). Apesar de esta fornecer apenas uma corrente de 1,5 A, esta escolha é feita assumindo que a diferença de intensidade de corrente não será significativa a ponto de alterar o desempenho do motor. Em particular, admite-se que a estrutura não irá suportar cargas demasiado elevadas (a sua função é suportar a base de uma máquina de impressão tridimensional) e, por isso, a subalimentação dos motores NEMA 17 não comprometerá o comportamento do sistema.

Contudo, foram analisadas formas mais rigorosas para contornar esta limitação. Numa primeira análise, pode ser escolhido um *driver* que disponibilize a corrente necessária sem qualquer limitação, que, no caso, seria uma carta EL7047. Em alternativa, e por análise dos catálogos da *Beckhoff*, pode ser adicionada uma ventoinha que permita melhorar o desempenho do *driver*, assegurando o seu arrefecimento por convecção forçada, e possibilitando que este disponibilize uma corrente de até 3 A. Esta é a solução mais viável, e é conseguida adicionando a ventoinha ZB8610, alimentada a 24 VDC.

No que diz respeito à tensão a fornecer ao motor NEMA 17, por indicação do fabricante, esta está compreendida entre 24 VDC e 48 VDC, no entanto, a carta EL7037 limita que a tensão de alimentação do motor seja 24 V. Apesar de a performance do motor ser melhorada alimentando os seus terminais com uma tensão maior, considera-se aceitável esta solução, porque é concordante com as indicações do fabricante.

O motor NEMA11 será alimentado igualmente por um módulo EL7037. As suas necessidades impõem uma corrente nominal de 1 A, valor que é disponibilizado por este *driver*.

Em relação à tensão, esta também será de 24 VDC, pelo motivo já mencionado. No caso deste motor, não é possível considerar uma outra carta, porque este é o modelo mais simples da gama de drivers da *Beckhoff*.

6.2 Processo de extrusão

Do ponto de vista de controlo, a cabeça de extrusão compreende essencialmente duas funções: aquecimento do filamento e movimento de extrusão.

6.2.1 Movimento

O movimento de extrusão é comandado por um MPP. Este deve disponibilizar binário suficiente para forçar o filamento ao longo do bico extrusor, à velocidade pretendida e com resolução suficiente para que os micropassos não afetem a qualidade da impressão. Na maior parte das impressoras 3D para FDM este movimento é assegurado por MPP NEMA 17.

A viabilidade da utilização deste tipo de motor é feita seguidamente, tendo em conta a modelação matemática do processo de extrusão apresentada em [16, 167]. Esta é feita de acordo com o binário disponibilizado e tendo em conta as principais forças envolvidas do processo.

Neste sentido, será feita uma estimativa para uma situação geral simplificada da impressão de um filamento de PLA com diâmetro, $d_f = 1,75 \text{ mm}$.

No mecanismo de extrusão, semelhante ao da Figura 2.2, a velocidade de avanço do filamento, $v \text{ [mm/s]}$, pode ser relacionada com o respetivo mecanismo de extrusão através de:

$$v = \omega_r * R_r \quad (6.1)$$

Onde:

$v, \text{ [mm/s]}$, é a velocidade de avanço do filamento,
 $\omega_r, \text{ [rad/s]}$, é a velocidade angular da polia dentada, à qual adere o filamento,
 $R_r, \text{ [mm]}$, é o raio da respetiva polia

Para uma polia dentada MK8, podemos aproximar o valor de $R_r = 3 \text{ mm}$. Se admitirmos uma velocidade de avanço, $v = 0,5 \text{ mm/s}$, a velocidade angular será $\omega_r = 0,17 \text{ rad/s}$.

A força máxima exercida pela polia para extrusão do filamento é dada por:

$$F_{extrusão} = \tau_{PLA} * A_{fs} \quad (6.2)$$

Onde:

$F_{extrusão}, \text{ [N]}$, é a força máxima admitida para o movimento de extrusão,
 $\tau_{PLA}, \text{ [Pa]}$, é a resistência do material ao corte, obtida a partir da tensão de cedência, dividida por uma razão de $\sqrt{3}$,
 $A_{fs}, \text{ [m]}$, é a área da secção transversal do filamento que fica em contacto com a polia

A partir dos dados da Tabela 2.1, pode-se definir $\tau_{PLA} = 15,0 \text{ MPa}$, e, assumindo $A_{fs} = 2,8 \text{ mm}^2$, a força máxima será $F_{extrusão} = 42,2 \text{ N}$.

O binário requerido ao motor é função do raio da polia e expresso por:

$$T = F_{extrusão} * R_r = 42,2 * (3 * 10^{-3}) = 0,13 \text{ Nm} \quad (6.3)$$

Por consulta dos dados técnicos dos MPP (Anexo A.2), o motor NEMA 17 cumpre o requisito de binário, sendo a escolha mais adequada, pois, apesar de os motores da gama NEMA 11 também disponibilizarem este binário, tal pode não se verificar em condições de funcionamento mais exigentes.

6.2.2 Aquecimento

O aquecimento do extrusor é feito pelo cartucho de aquecimento. Trata-se de um elemento simples, que é caracterizado pela respetiva tensão de alimentação e potência

disponibilizada. Para o dimensionamento do sistema serão tomados como valores de referência os do cartucho incluído na cabeça de extrusão *Tian Aero* do fabricante *E3D*. De acordo com os seus dados técnicos, verificamos que é alimentado a uma tensão de 24 V e disponibiliza uma potência de 30 W [157].

O seu controlo a partir do sistema pode ser feito através de uma saída digital, por intermédio de um relé. Por este motivo, a sua integração na solução será feita com recurso a uma carta EL2008, um módulo de 8 saídas digitais com uma tensão de saída de 24 VDC (Anexo C.1.3) e um relé de estado sólido. A necessidade de um relé é justificada pelo facto de a corrente disponibilizada por cada saída digital, 0,5 A, não ser suficiente para o aquecimento. Por este motivo, recorre-se a um relé que aceite uma tensão de acionamento de 24 VDC e disponibilize o mesmo valor na saída. Assim, escolhe-se um relé de estado sólido do fabricante *EQITEK* com a referência SSR-100 DD que tem uma tensão de acionamento compreendida entre 3 e 32 VDC e a tensão a fornecer ao cartucho está compreendida entre 5 e 60 VDC.

Apesar de apenas ser necessária uma saída digital da carta EL2008 para esta tarefa, as restantes poderão ser usadas para controlo de outros aparelhos da impressora. Um exemplo disso poderá ser a utilização de uma saída para integração de uma ventoinha para arrefecimento do filamento no extrusor.

6.2.3 Sensorização

O mecanismo de aquecimento do extrusor fica completo com a inclusão de um elemento sensor que permita um controlo de temperatura mais rigoroso. Para este efeito será usado um termopar de uso genérico (tipo K) que, apesar de não ser o tipo de sensor que apresenta maior exatidão, nem ter o melhor tempo de resposta, consegue assegurar uma linearidade razoável, pode trabalhar numa gama de temperaturas muito alargada e tem excelente durabilidade [168]. A sua integração no sistema *Beckhoff* é feita com uma carta EL3318 (Anexo C.1.4). Esta corresponde a um terminal de entradas analógicas para leitura de termopares, que permite a ligação direta de até 8 unidades e inclui um microprocessador que procede à linearização do seu sinal. O sobredimensionamento deste componente possibilita a inclusão de outros sensores deste tipo no futuro.

Com a inclusão do termopar, é possível fazer o controlo da temperatura do extrusor em malha fechada, nomeadamente implementando um controlador PID por via de *software*. O sinal de *feedback* é dado pelo termopar e o acionamento do relé é feito por um sinal modulado em PWM implementado também no *software*.

6.3 Acessórios

Não sendo um elemento indispensável das impressoras 3D, é bastante frequente a utilização de bases aquecidas, com vista ao melhoramento da qualidade das peças impressas. A temperatura ideal da base varia de material para material. Contudo, como valor de referência, é de esperar que uma base aquecida seja capaz de atingir pelo menos 100 °C. O tipo de base mais comum são as bases de silicone, que se destacam pela sua versatilidade e facilidade de montagem. Do ponto de vista elétrico, este elemento requer um consumo de energia elevado, podendo chegar aos 100 W, dependendo de fatores como a sua dimensão e temperatura máxima. Por esse motivo, pode optar-se pela utilização de uma base alimentada a corrente alternada, ou seja, diretamente da rede (230 V AC), em vez de corrente contínua. Assim, evita-se sobrecarregar as fontes de alimentação que serão imperativamente necessárias para outros elementos do sistema.

Para controlar este aquecimento, pode ser usado um relé de estado sólido, que assegura maior segurança e simplifica o aquecimento da base. A sua função é semelhante à de um relé eletromecânico comum, no entanto, o seu princípio de funcionamento é ligeiramente diferente, pois são usados TRIACS (*Triode for Alternating Current*), componentes eletrónicos, em vez de

contactos metálicos. Os relés deste tipo possuem dois terminais de entrada e dois terminais de saída, sendo que na entrada é introduzido um sinal de controlo, que afetará o estado da saída (ligado ou desligado).

Neste caso, quando, na entrada, é introduzido um sinal de 24 V DC, o estado de saída altera-se e passa a disponibilizar uma corrente AC, proveniente da rede. Por este motivo, o aquecimento da base pode ser controlado a partir de uma saída digital da carta EL2008, que, ligada à entrada do relé de estado sólido, irá controlar uma resistência térmica, por sua vez ligada à saída do relé, que aquecerá a base. A escolha do relé é feita tendo em conta a tensão de controlo (24 V DC) e também a tensão e corrente da carga (230 V AC). Assim, o relé a utilizar será o modelo D2425 do fabricante *Sensata*, que possibilita uma corrente de carga máxima de 25 A.

Tal como para o controlo da temperatura do extrusor, também é importante a integração de um termopar, que será ligado ao módulo EL3318, e que permitirá um controlo da sua temperatura em malha fechada. Regra geral, todos os elementos de aquecimento da base (base, elemento de aquecimento e sensor) são disponibilizados em conjunto.

6.4 PC Industrial

O funcionamento de cada elemento é comanda por *software* através de um PC industrial com o sistema operativo *Windows 10*. O PC a utilizar será o C6015-0010 (Anexo C.1.5), um computador com um processador *Intel Atom* com dois núcleos.

Do ponto de vista das ligações do PC C6015-0010, este possui seis portas para ligação e comunicação com outros elementos. Uma destinada à sua alimentação, duas conexões RJ45 para permitir a ligação a uma *Local Area Network* (LAN) e comunicar via EtherCAT, uma porta *DisplayPort* para transferir um sinal de imagem e duas portas USB para ligação de dispositivos periféricos, como rato e teclado.

Do ponto de vista elétrico, o PC C6015 possui dois circuitos, um de comando e um de potência, através da entrada de alimentação. Esta entrada é constituída por quatro terminais. Dois destes são afetos à alimentação do PC com uma entrada (24 V+) de 24 VDC e uma saída (GND) de 0 V. Dos restantes, o terminal P-S (*Power Status*), uma saída, indica o estado do PC e pode ser ligado a um sinal luminoso para esse efeito, e o terminal PC_ON, uma entrada, serve para ligar o PC e deve ser acionado por um contacto. Por indicação do fabricante, esta entrada e saída funcionam a 24 V DC e, por isso, pode ser escolhido um interruptor com indicador luminoso para interagir com os estes sinais. Assim, escolhe-se o interruptor luminoso com a referência YW1L-MF2E10Q4G do fabricante *Idex* de atuação momentânea e com um sinal luminoso LED de cor verde. O interruptor será ligado ao terminal PC_ON e o indicador LED será colocado à saída do terminal *Power Status*. Tendo em conta esta configuração, o PC é desligado através da função “*shut down*” do *Windows* ou quando é detetada uma transição positiva do contacto de atuação momentânea e consequentemente no terminal PC_ON.

6.5 Componentes Beckhoff

Tendo em conta que a solução de controlo da impressora e dos seus vários subsistemas é assegurada por componentes *Beckhoff*, é preciso fazer a integração de alguns elementos que, por natureza, são necessários para o seu correto funcionamento.

Como referido na Secção 5.3, um desses componentes é o EtherCAT *coupler*, EK1100, que estabelece a comunicação entre os terminais e a rede EtherCAT.

O sistema global será então constituído pelo EtherCAT *coupler* EK1100, três módulos EL7037, três módulos EL7047, um módulo EL2008, um módulo EL3318 e ainda um PC industrial C6015-0010.

Com o objetivo de tornar este sistema mais robusto, é possível separar eletricamente os vários componentes em dois grupos. Ou seja, cria-se um grupo potencial constituído pelo

EtherCAT *coupler*, o módulo de saídas digitais e o módulo de entradas analógicas para termopares e outro grupo potencial dedicado aos módulos dos drivers dos MPP. Esta divisão permite separar eletricamente componentes que controlam elementos de natureza diferente, o que tem a principal vantagem de se poder dimensionar elementos de proteção específicos para cada um dos grupos elétricos, em vez de uma solução de proteção generalizada.

Esta divisão elétrica é feita com recurso a um terminal de alimentação EL9100 (Anexo C.1.7). A sua forma de funcionamento estabelece um grupo potencial para alimentar terminais colocados à sua direita, com tensão constante (24 V DC), e que constituam cargas de corrente elevada. A inclusão deste elemento traduz-se apenas numa separação elétrica, que não compromete a comunicação no barramento E-bus. Neste sentido, por serem os elementos mais exigentes do sistema, os módulos dos drivers dos MPP serão colocados à direita da carta EL9100. Assim, a ordem de montagem dos componentes, em linha, será: EK1100, EL3318, EL2008, EL9100, EL7037(x3), EL7047 (x3), sendo o PC C6015-0010 montado em paralelo a partir do EK1100.

Ainda no contexto dos elementos específicos da *Beckhoff*, é importante considerar que a corrente do barramento E-Bus é fornecida pela carta EK1100, no entanto, existe um limite máximo de consumo de corrente pelo E-Bus (2000 mA). Da consulta das fichas técnicas de todos os módulos ligados barramento (Anexos C.1.1-4), é possível verificar que a corrente total consumida é:

$$i = 140 * 3 + 100 * 3 + 210 + 110 = 1040 \text{ mA} \quad (6.4)$$

Caso este valor excedesse os 2000 mA, ou na eventualidade de no futuro se acrescentarem módulos que atinjam este valor, é necessário incluir um módulo EL9410, uma fonte de alimentação para o barramento E-Bus, que disponibiliza 2 A adicionais para o efeito.

6.6 Fontes de alimentação

As fontes de alimentação são um elemento fundamental de cada sistema, que disponibilizam energia para toda a instalação. Os componentes do sistema são todos alimentados por corrente contínua e, por isso, serão usadas fontes que disponibilizam corrente deste tipo.

O principal fator diferenciador dos vários elementos do sistema diz respeito à tensão que necessitam. De acordo com as considerações feitas anteriormente, é possível distinguir três valores de referência para a tensão de alimentação:

- os MPP NEMA23 e 23XL são alimentados por uma tensão de 48 VDC (por via das cartas EL7047);
- os MPP NEMA17 e 11 (por via das cartas EL7037), os componentes EK1100, EL2008, EL9100, o PC C6015 e os sensores de fim-de-curso do braço robótico são alimentados por uma tensão de 24 V DC;
- os *encoders* dos MPP são alimentados a 5 VDC;

Por este motivo, são necessárias três fontes de alimentação diferentes, que disponibilizam uma tensão constante e cuja potência e corrente nominal são variáveis.

Para a alimentação dos motores NEMA23 e 23XL, será necessária uma fonte que disponibilize 48 V DC. A corrente nominal requerida para a fonte é dada pela soma das necessidades de corrente de cada um dos motores. A corrente que um determinado *driver* solicita à respetiva fonte de alimentação é cerca de 80% da corrente nominal do respetivo motor [169]. Considerando os dados do Anexo A.2, a corrente nominal de cada um dos motores é 4,2 A, e por isso, cada *driver* irá solicitar à fonte de alimentação uma corrente de 3,36 A. No total, o conjunto dos três motores requer uma corrente de 10,08 A, traduzindo-se num requisito de potência de 484 W. Por este motivo, escolhe-se uma fonte do fabricante *Mean Well* com o modelo RSP-500-48 (Anexo C.1.8), cuja tensão nominal é 48 VDC, a corrente nominal é 10,5A e, consequentemente, a potência nominal disponível é de 504 W.

Os componentes que requerem uma alimentação de 24 VDC são os motores NEMA17 e 11, todos os elementos *Beckhoff*, considerando também a alimentação do barramento E-bus, e o cartucho de aquecimento. Da consulta dos respetivos dados técnicos é possível estimar a potência necessária ao funcionamento de todos os componentes e assim escolher uma fonte de alimentação de 24 VDC adequada.

Para estimar os requisitos de corrente da fonte impostos pelos MPP, segue-se a mesma linha de raciocínio que foi seguida para o cálculo de MPP a funcionar a 48 VDC. Os motores NEMA 17 têm uma corrente nominal de 1,8 A., mas serão alimentados com 1,5 A. O respetivo requisito de corrente da fonte é feito tendo em conta este último valor, o que significa que os MPP NEMA17 solicitam uma corrente de 1,2 A ($I = 1,5 * 0,8$). Para o MPP NEMA 11, este valor é de 0,8 A ($I = 1 * 0,8$). Assim, o conjunto dos motores impõe à fonte de alimentação um requisito de 3,2 A, que corresponde a um consumo de potência elétrica de 77 W.

Por seu lado, o consumo associado à carta EL9100 reflete-se na alimentação da lógica interna das cartas EL7047 e EL7037. Consultando os anexos C.1.1,2 e 7, é possível aferir que o valor da corrente de entrada dos *drivers* é de 5 mA, o que significa um consumo de potência de 0,12 W, para cada carta. Assim, o conjunto das cartas EL7047 e EL7037 traduz-se num consumo de 0,72 W.

Também o consumo de potência associado ao módulo EK1100 deve ser feito atendendo a algumas considerações, nomeadamente o facto de esta ser responsável pela alimentação do barramento E-bus e da lógica interna das cartas subsequentes, isto é, as cartas EL2008 e EL3318. O módulo EL3318 apresenta um consumo de corrente apenas ao nível do E-bus (Anexo C.1.4). Por sua vez, o módulo EL2008 (Anexo C.1.3) disponibiliza uma corrente máxima de 0,5 A em cada uma das suas saídas, o que implica um consumo de potência máximo de 96 W ($P_{EL2008} = 24 * (0,5 * 8) = 96 W$) e a este valor acresce um consumo de 15 mA para alimentação da sua lógica interna, refletido num consumo de potência de 0,36 W ($P_{EL2008,LI} = 24 * (15/1000) = 0,36 W$). A caracterização da potência total associada ao módulo EK1100 fica completa com a referência ao consumo ao nível do E-bus, 24,96 W ($P_{E-bus} = 24 * 1,04 = 24,96 W$) expresso na Equação (6.4).

A potência necessária ao funcionamento do PC industrial, de acordo com os dados no Anexo C.1.5, é, no máximo, 14 W.

Para finalizar o cálculo da potência de todos os componentes que operam a 24 VDC, importa considerar o cartucho de aquecimento do extrusor que, de acordo com o exposto na Secção 6.2.2, toma o valor de referência de 30 W.

Desta forma, a potência necessária para a fonte de 24 V é dada por:

$$P_{total} = 77 + 0,72 + 96 + 0,36 + 24,96 + 14 + 30 \approx 243 W \quad (6.5)$$

Neste sentido, é feita uma escolha por uma fonte de alimentação de 500 W, que não só será suficiente para alimentar todos os componentes que operam a 24 V DC, como terá uma margem para, em caso de necessidade, no futuro se adicionarem outros componentes. A fonte escolhida é do fabricante *Mean Well*, com a referência RSP-500-24 (Anexo C.1.8).

No âmbito de elementos a funcionar a 24 VDC, é importante também considerar a alimentação dos fins-de-curso do braço robótico. A sua tensão de alimentação é variável e opta-se por este valor por ser um valor típico para estes componentes. A sua inclusão no projeto elétrico não constitui uma carga significativa para a fonte de alimentação, que, como foi indicado, tem uma margem de potência suficiente para incluir outros componentes.

A alimentação de todo o sistema fica completa com a energia a fornecer aos *encoders* de cada motor. As cartas EL70x7 têm saídas previstas para a alimentação de *encoders* a 24 V, por via de um circuito interno. Contudo, os *encoders* dos motores funcionam a 5 V DC e, por isso, serão alimentados externamente através de uma nova fonte de alimentação.

Sendo esta apenas necessária para alimentar os *encoders*, opta-se por uma fonte de baixa potência que disponibilize a tensão necessária. Assim, a escolha recai por uma fonte de 15 W também do fabricante *Mean Well*, com a referência HDR-15-5 (Anexo C.1.9).

A interpretação dos sinais dos *encoders* é feita pelas cartas EL70x7. Apesar de, para a alimentação dos *encoders*, as cartas disponibilizarem 24 VDC, estas têm capacidade de ler os seus valores numa margem de tensão entre os 5 e os 24 VDC.

6.7 Elementos de proteção

6.7.1 Proteção de equipamentos

Como parte imprescindível de qualquer instalação elétrica, é necessária inclusão de elementos que protejam os componentes em situações de funcionamento não ideais.

No caso das fontes de alimentação, estas são alimentadas diretamente da rede com corrente elétrica monofásica. Para a sua proteção, é fundamental a inclusão de disjuntores a montante de cada fonte, devidamente dimensionados

O primeiro fator a ter em conta na escolha de um disjuntor é a sua corrente de disparo (corrente nominal), ou seja, o valor de corrente para o qual o disjuntor interrompe o circuito. Este valor terá de ser sempre superior à corrente de entrada do componente a proteger, acrescido de um fator de cerca de 10% para compensar flutuações da corrente. Este pode ser obtido através da análise das fichas técnicas das fontes de alimentação do circuito (Anexos C.1.8-9), tendo em conta que serão alimentadas a 230 V AC e comparando com os dados de um catálogo de disjuntores, que para o efeito serão do fabricante *Eaton*⁷.

Para a fonte de alimentação RSP-500-48, a corrente de entrada é 2,65 A, o que significa que a corrente nominal do respetivo disjuntor será 3 A. A fonte RSP-500-24, como é uma fonte da mesma série, tem características iguais e, por isso, terá um disjuntor de corrente nominal igual. Já a fonte HDR-15-5 tem uma corrente de entrada de 0,25 A e requer um disjuntor de corrente nominal 500 mA. Este valor teoricamente poderia ser mais baixo, no entanto, o fabricante não disponibiliza disjuntores com correntes nominais inferiores.

Outro fator a ter em conta na escolha de um disjuntor é o seu tipo. O tipo de disjuntor determina a corrente que por ele pode passar, superior à sua corrente nominal, durante um curto período de tempo, sem que o circuito seja interrompido. A determinação do tipo de disjuntor é feita tendo em conta a corrente necessária para o arranque das fontes e quantas vezes esse valor é maior que a corrente nominal do respetivo disjuntor. A sua análise pode ser igualmente feita pela consulta das respetivas fichas técnicas. Na Tabela 6.1 encontram-se sintetizados os valores de referência necessários para a definir o tipo de disjuntor de cada fonte.

Tabela 6.1 - Tabela auxiliar para determinação do tipo de disjuntor a utilizar em cada fonte de alimentação.

Fonte	Corrente de entrada (I_I)	Corrente nominal disjuntor (I_N)	Corrente de arranque (I_A)	Fator I_A/I_N	Tipo de disjuntor
RSP-500-48	2,65 A	3 A	40 A	13,3	Tipo S
RSP-500-24	2,65 A	3 A	40 A	13,3	Tipo S
HDR-15-5	0,25 A	0,5 A	45 A	90	Tipo D

A análise dos dados da Tabela 6.1, permite então escolher um disjuntor para cada fonte, tendo em conta também que todos serão unipolares, pois a instalação é alimentada a partir da rede com corrente monofásica (fase e neutro). Assim, para as fontes RSP-500-48 e RSP-500-24 serão usados disjuntores FAZ-S3/1. Para a fonte de 5V, a relação entre a corrente nominal e de arranque é muito elevada e o fator de corrente requerido não é garantido por nenhum tipo de disjuntor. Por este motivo, opta-se pelo tipo de disjuntor que assegura o maior valor, isto é, um disjuntor do tipo D, que permite valores de corrente entre 15 a 20 vezes superiores ao respetivo valor nominal. Para esta fonte o disjuntor a usar é o FAZ-D0.5/1-SP.

⁷ A escolha do fabricante de disjuntores foi feita tendo em conta a disponibilidade de stock de um distribuidor multimarcas. Esse facto justificou a escolha por um fabricante Americano em vez de um fabricante Europeu como a *Schneider Electric* ou *Siemens*.

Tendo em conta que o relé de estado sólido a utilizar no controlo da base de aquecimento também é alimentado com corrente alternada, é importante prever a inclusão de um disjuntor para proteção deste equipamento. Admitindo, uma alimentação de 230 V AC e uma potência de referência de 300 W, a corrente necessária pode ser dada por:

$$P = PF * I * V_{RMS} \quad (6.5)$$

Onde:

P , [W], é a potência consumida,

PF , é o Fator de Potência, do inglês *Power Factor*, designa a razão entre a potência real utilizada e a potência aparente consumida,

I , [A], é a corrente e,

V_{RMS} , [V], é o valor eficaz da tensão

Assim, admitindo um fator de potência de 1, por ser um elemento resistivo, estima-se uma corrente necessária de 1,3 A. Desta forma, e em conformidade com os disjuntores escolhidos para a proteção das fontes de alimentação seleciona-se um disjuntor com corrente nominal de 2 A do tipo S, sendo a sua referência FAZ-S2/1.

A proteção dos restantes elementos pode ser feita de forma individual, como para o caso das fontes, ou numa solução conjunta.

Uma vez que existem vários elementos no circuito a funcionar a 24 V DC, é possível utilizar um módulo de seletividade (*Siemens SITOP PSE200U*), que consegue proteger várias partes do circuito em simultâneo e de forma independente. Este módulo pode ser considerado uma extensão da fonte de 24 V DC e tem a capacidade de distribuir e monitorizar a corrente de vários circuitos independentes, detetando sobrecargas e curto-circuitos em cada um, e interrompendo o circuito quando a corrente ultrapassa um determinado valor. O número de circuitos que é possível controlar é igual ao número de saídas do módulo, neste caso quatro, que devem ser devidamente ajustadas em função dos elementos a proteger [170].

A distribuição destes circuitos pode ser feita de forma a ter um circuito que proteja o PC C6015, outro para o módulo EK1100, outro para o conjunto das três cartas EL7037 e o módulo EL9100, e um outro para o cartucho de aquecimento. O ajuste da corrente de proteção é feito tendo em conta as fichas técnicas de cada elemento e do módulo de seletividade. Estes valores encontram-se sintetizados na Tabela 6.2.

Tabela 6.2 - Tabela auxiliar para ajuste dos valores de disparo do módulo de seletividade.

Componente	Corrente de entrada	Corrente de proteção	Nº saída do módulo
C6015	0,6 A*	3 A	1
EK1100	70 mA+2000Ma=2,07 A	4 A	2
EL7037+EL9100	5 mA*3+10+1,8*2+1=14,75 A	7 A**	3
Cartucho de aquecimento	2 A	3A	4

*O valor da corrente de entrada do C6015 não se encontra especificado na sua ficha técnica e, por isso, foi estimado tendo em conta a sua tensão de entrada (24 V) e a potência máxima de consumo (14 W).

**O valor de corrente de proteção escolhido é inferior ao teoricamente estimado, que deveria ser pelo menos 15 A. Esta diferença foi assumida tendo em conta que o consumo de corrente (e energia) do módulo EL9100 é no máximo 10 A, mas que numa situação real, consumirá significativamente menos.

Os valores da corrente de proteção foram atribuídos aplicando um fator de, pelo menos 50% em relação à corrente de entrada. No entanto, a gama de proteção que é possível aplicar com este módulo situa-se entre os 3 A e os 10 A e, por isso, o valor mínimo de proteção aplicado são 3 A.

Para proteção dos drivers EL7047 e dos motores por eles alimentados não é dimensionado nenhum elemento de proteção adicional, porque estes estão equipados com mecanismos de proteção próprios, que garantem a sua proteção e a dos motores a eles ligados.

A montagem do circuito elétrico é completada com a inclusão de fusíveis com intenção de proteger elementos mais sensíveis.

Neste sentido, por indicação da *Beckhoff*, é aconselhável a colocação de um fusível à saída do *output Power Status* do PC C6015 que alimentará um sinal luminoso e cuja corrente máxima de saída é 0,5 A. Por consulta dos dados técnicos do sinal luminoso (Anexo C.1.10), é

possível verificar que a corrente nominal de um sinal luminoso de cor verde é 13 mA, e por isso, escolhe-se um fusível de cartucho de corrente nominal de 40 mA.

Apesar de não existir qualquer indicação do fabricante do robô, no que diz respeito à proteção dos *encoders* e fins-de-curso, considera-se importante a inclusão de fusíveis de cartucho para sua proteção contra situações de eventuais picos de corrente. Como o consumo de corrente de cada fim-de-curso é inferior a 100 mA, e uma vez que existem cinco exemplares, escolhe-se um fusível de corrente nominal de 1 A para assegurar a proteção do conjunto. Já os *encoders* não apresentam informação neste sentido, e por isso, opta-se por um cartucho de corrente nominal de 2,5 A, valor este que é superior ao máximo disponibilizado pela fonte de alimentação de 5 V em condições nominais.

6.7.2 Proteção de pessoas

Como parte essencial do projeto da instalação elétrica, é necessário considerar a proteção de pessoas, através da inclusão de equipamentos que protejam o operador.

Do ponto de vista funcional, o elemento central de segurança passa pela inclusão de uma botoneira de emergência, que permitirá a interrupção do movimento do robô e dos equipamentos de aquecimento de forma imediata, numa situação de emergência. Uma vez que o controlo destes elementos é feito com componentes *Beckhoff*, é aconselhável considerar uma solução de segurança com base na arquitetura de controlo *Beckhoff*, de modo a garantir a função de segurança sem danificar os componentes de controlo.

Sistema de seguranças TwinSAFE

Com vista à inclusão de funções de segurança nos seus sistemas, a *Beckhoff* desenvolveu um sistema de segurança próprio. A solução de segurança é designada *TwinSAFE* e consiste numa solução integrada com a filosofia de controlo aberta e feita por um PC. Neste sentido, o conceito de segurança *TwinSAFE* permite extensão do sistema de *inputs* e *outputs* da *Beckhoff* com terminais *TwinSAFE*, e a inclusão de sinais *standard* com sinais de segurança num mesmo sistema. O protocolo de comunicação usado para este fim é designado SoE (*TwinSAFE Protocol/Safety over EtherCAT*). Este permite a transferência de informação importante através de um qualquer meio, constituindo um canal negro (*black channel*) e está em conformidade com a norma de segurança IEC 61508:2010 de sistemas de proteção automáticos para sistemas elétricos, eletrónicos e eletrónicos programáveis. O sistema *TwinSAFE* assegura as funções de segurança através da interligação entre terminais físicos e *software* próprio, no caso também designado *TwinSAFE*, que é configurável no gestor de sistemas *TwinCAT* (*TwinCAT System Manager*). A integração do sistema de segurança no *software* é feita com recurso a funções de blocos específicas para ações de segurança, como, por exemplo, paragens de emergência ou modo de operação, o que garante grande flexibilidade de implementação, possibilitando o desenvolvimento de ações de segurança por configuração de *software*, em vez de por ligação de cabos elétricos. O sistema de segurança *TwinSAFE*, tem como princípio basilar a lógica de *fail safe*, ou seja, garantir que a falha de um componente não põe o sistema uma situação de perigo. Os componentes físicos de segurança dos sistemas *Beckhoff* são sempre de cor amarela, para que se distingam dos restantes.

Para a integração de uma botoneira de emergência no sistema de segurança, deve ser utilizada uma carta EL1904. Esta carta consiste num terminal de *inputs* digitais de 24 VDC, com quatro *inputs* disponíveis, do tipo *fail safe*. O módulo EL1904 é um elemento específico de segurança e tem conexões de dois canais, conformes com a norma IEC 61508:2010 SIL 3. Assim, a botoneira de emergência será ligada por via de dois contactos normalmente fechados a dois *inputs* da carta. Isto significa que a botoneira de emergência não necessita de ser alimentada por um elemento externo como a fonte de alimentação, e a própria carta, apesar de ser um terminal de *inputs*, disponibiliza um canal de tensão de saída e um de entrada para receber o respetivo sinal.

A instalação do botão de emergência necessita também de um módulo responsável pela implementação das funções de segurança. Para este efeito, recorre-se ao módulo EL6900. Este terminal EtherCAT é a unidade de lógica do sistema, o que significa que integra as funções de segurança *TwinSAFE*. A carta EL6900 é também um componente específico para segurança, que sendo flexível e eficiente, permite a implementação de funções de segurança a um baixo custo. Neste módulo vem incluída a função “ESTOP” destinada a paragens de emergência manuais ou automáticas. Esta função tem os *inputs* lógicos “EStopIn1” e “EstopIn2”, sendo que cada um estará ligado ao sinal proveniente de cada um dos *inputs* da carta EL1904, um sinal de “Restart” e o *output* lógico “EStopOut”. No seu funcionamento, quando a botoneira for atuada os sinais “EstopIn” comutarão para o estado “0” e consequentemente a saída “EstopOut” passará ao estado “0”. O sinal de saída é integrado no PLC que ordenará a paragem dos motores desligando os respetivos terminais nas cartas EL70x7 e a interrupção do aquecimento desligando o sinal das saídas digitais EL2008.

O rearmamento do botão físico é feito de forma manual, pois a botoneira de emergência terá encravamento, como é requerido em funções de segurança. No entanto, o seu rearmamento lógico é feito através do input “Restart” da função “ESTOP”.

A botoneira a utilizar será do fabricante *Idec* com a referência YW1B-V4E02R. Esta é uma botoneira em cogumelo que possui acionamento com encravamento e volta à posição inicial quando rodada. Ela ficará montada no exterior do quadro elétrico numa posição bem visível e de fácil acesso.

A inclusão das cartas EL1904 e EL6900 acresce um consumo de corrente que será suportado pela fonte de alimentação de 24 V DC, dimensionada na Secção 6.6. Contudo, estas cartas consomem corrente apenas ao nível do E-bus, sendo este valor 200 mA, para a carta EL1904 e de 188 mA para a carta EL6900. A sua existência não afeta o dimensionamento do sistema, porque, e de acordo com a Equação (6.4), faz com que o consumo total de corrente no E-bus seja 1428 mA, inferior ao máximo suportado pelo EK1100 de 2000 mA. Da mesma forma, este consumo traduz-se numa potência de cerca de 10 W, que devido ao sobredimensionamento da fonte de 24 V DC, conseguirá suportar este acréscimo.

Do ponto de vista elétrico, a proteção de pessoas é assegurada através da inclusão de um disjuntor com proteção diferencial, um elemento de segurança que interrompe o circuito quando deteta correntes de fuga à terra. Os disjuntores diferenciais são caracterizados pela respetiva corrente de disparo e pela corrente de fuga, sendo esta última a característica que define a sensibilidade do disjuntor. Para a proteção de pessoas, o valor típico para a sensibilidade é 30 mA. O dimensionamento da corrente de disparo é feito de forma a que a corrente consumida a jusante do disjuntor seja ligeiramente inferior à corrente de disparo. O disjuntor diferencial será colocado a montante das fontes de alimentação e como tal, o valor da corrente de disparo deve ser superior a 5,55 A. Devido à gama de disjuntores diferenciais disponibilizadas pelo fornecedor, o elemento escolhido será do fabricante ABB com a referência 2CSF202001R1250, com uma sensibilidade de 30 mA e corrente de disparo de 25 A. Importa referir que o valor da corrente de disparo é superior ao previsto, no entanto, não compromete a sua função de segurança, porque cada uma das fontes já se encontra devidamente protegida por um disjuntor e a função deste elemento é a de assegurar a proteção de pessoas.

6.8 Outros elementos elétricos

O projeto que visa a implementação da instalação elétrica, cujos elementos foram cuidadosamente selecionados, é completado com considerações acerca da inclusão de um interruptor geral, botoneiras auxiliares, um filtro de linha, escolha de um armário elétrico, disposição dos diversos componentes no mesmo e ainda o levantamento do número de bornes necessários. Como complemento ao projeto desenvolvido, estas ponderações têm objetivo de permitir uma correta implementação do sistema. As reflexões destinadas a esta secção encontram-se detalhadas no Anexo C.2.

6.9 Implementação

Tendo em conta o projeto elétrico elaborado, e como objetivo último deste capítulo, foi possível proceder à montagem de todos os componentes elétricos. Esta etapa foi de cariz prático e compreendeu a aquisição de componentes. Neste aspeto, importa considerar que, por questões de agenda, não foi possível adquirir e incluir no sistema final o sistema de segurança *Beckhoff* idealizado. Uma vez que o projeto não é destinado a comercialização e o seu caráter experimental é elevado, admite-se que, nesta fase, esta limitação não é impeditiva à implementação do sistema.

A montagem dos componentes elétricos foi feita de acordo com as reflexões presentes no Anexo C.2. Em particular, o esquema da Figura C. 11 foi muito importante, no entanto, uma vez que os módulos de segurança não foram incluídos, a disposição final sofreu algumas alterações em relação ao exposto na referida figura.

A montagem do quadro elétrico foi feita de forma faseada, envolvendo operações de furação, aparafusamento e cravação de cabos elétricos, como ilustrado na Figura 6.1.

Como elemento adicional, foram incluídos dois elementos de arrefecimento, duas ventoinhas *Beckhoff* ZB8610, abaixo das cartas EL7037.

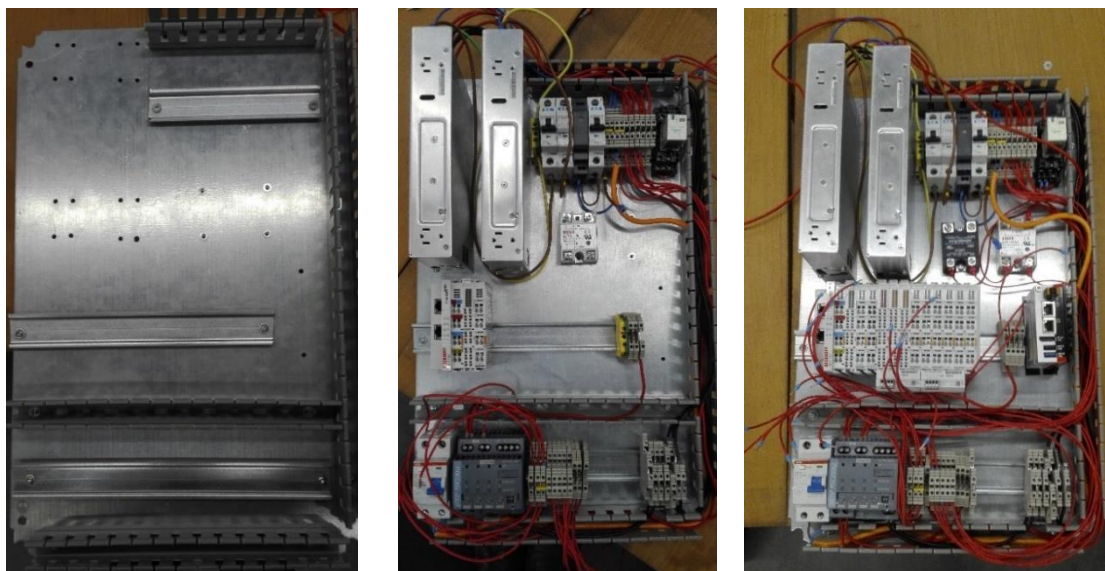


Figura 6.1 - Várias fases da montagem dos componentes elétricos.

A instalação final de todos os elementos pode ser observada na Figura 6.2, onde se concretizam as ligações elétricas entre os componentes através dos respectivos terminais. Nesta, é possível observar que, nesta fase, as ligações que dizem respeito aos equipamentos de aquecimento não foram finalizadas, tendo-se incluído os dois relés de estado sólido, faltando a ligação dos respetivos equipamentos aos terminais do circuito de potência do respetivo relé.

A validação da instalação foi feita com recurso a um multímetro, onde se pôde verificar os pontos de continuidade de corrente elétrica, bem como o potencial elétrico existente em pontos-chave da instalação. Na Figura 6.2 está ilustrada a disposição dos componentes no armário e é possível verificar a correta ligação dos componentes, pelos sinais luminosos das cartas *Beckhoff* e do módulo *Siemens SITOP PSE200U*.

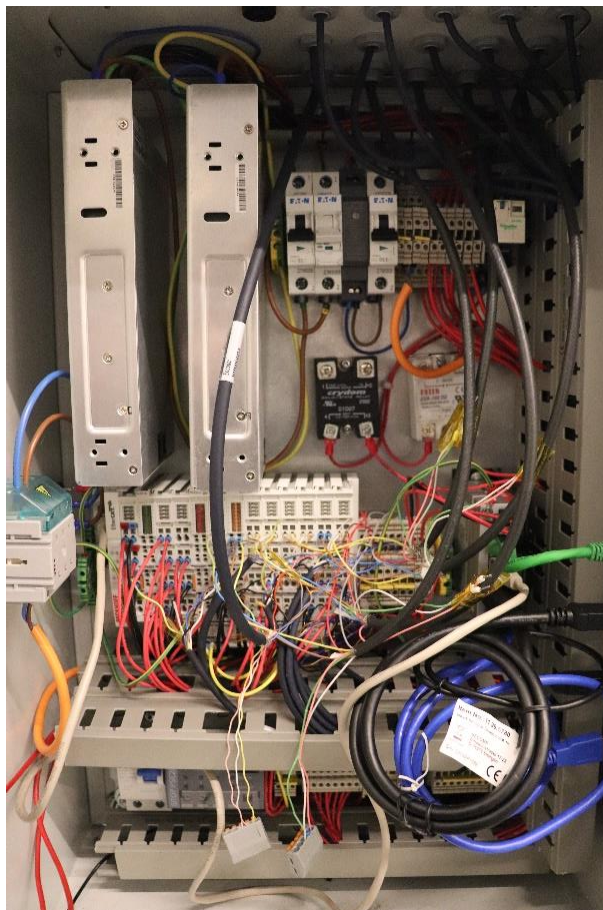


Figura 6.2 - Instalação elétrica da plataforma de impressão 3d.

7 Projeto da estrutura mecânica

A plataforma de impressão 3D em desenvolvimento, do ponto de vista mecânico e em conformidade com as impressoras 3D tradicionais, é constituída por uma base de impressão e uma cabeça extrusora. Neste capítulo, pretende-se projetar uma estrutura mecânica que integre estes dois componentes numa estrutura única, bem como o braço robótico e elementos auxiliares que serão necessários. A solução resultante será uma estrutura de impressão funcionalmente igual ao que é designado por impressora 3D.

7.1 Base de impressão

A base de impressão (ou plataforma de impressão) é um dos constituintes fundamentais de uma impressora 3D, que consiste na superfície onde o material é depositado, e suportará a peça fabricada. Para o presente trabalho, é necessário projetar devidamente esta base.

7.1.1 Requisitos

Na estrutura de funcionamento idealizada, a base de impressão será móvel e será comandada pelo movimento do braço robótico, em torno da cabeça extrusora fixa. A sua posição e orientação serão dadas em relação ao órgão terminal do robô, podendo-se definir a base como a sua ferramenta. Para implementação desta configuração, pretende-se que a plataforma deva ter determinadas características funcionais:

- A plataforma deve ser paralela à flange do robô e, por isso, ter a mesma orientação do órgão terminal do braço robótico.

Uma vez que o braço robótico possui cinco graus de liberdade, a sua posição e orientação não podem ser dadas de forma independente, o que influenciará a escolha da disposição da base de impressão.

Se for considerada uma base paralela à flange do órgão terminal (Figura 7.1 a)), a orientação é independente nos eixos A e C. Se for considerada uma base perpendicular à flange (Figura 7.1 b)), a orientação é independente nos eixos A e B. De um ponto de vista funcional, a principal diferença entre estas duas configurações é o facto de, na primeira, se conseguir movimentar a base em cada um dos eixos cartesianos (X, Y e Z), mantendo a sua orientação constante. Tal não acontece na segunda configuração, quando é feito um movimento ao longo do eixo X, em que a orientação da base vai sendo alterada. Por esse motivo, opta-se pela configuração da Figura 7.1 a), em que a plataforma de impressão será solidária com a flange do órgão terminal, em que a superfície da base será paralela à flange do órgão terminal.

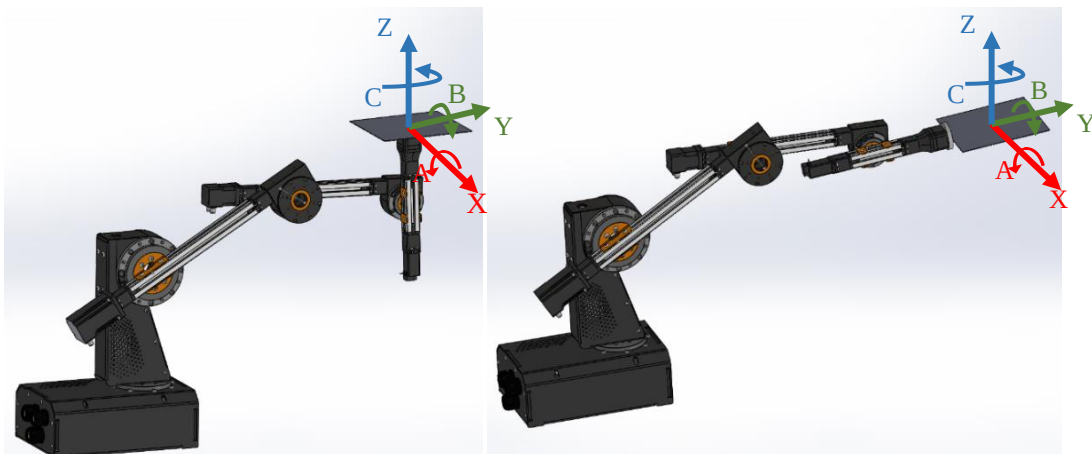


Figura 7.1 - Orientação da base de impressão em relação ao órgão terminal do robô. a) Plataforma de impressão paralela ao órgão terminal. b) Plataforma de impressão perpendicular ao órgão terminal

- A plataforma de impressão deverá ter uma forma circular, com 300 mm de diâmetro.

Em relação à forma geométrica da plataforma, normalmente são utilizadas bases quadradas, retangulares ou circulares. Por questões de simetria e por analogia com a forma da flange do robô, opta-se por uma base com forma circular. No que diz respeito às suas dimensões, e como se trata de um projeto de caráter experimental, assume-se um sobredimensionamento da base, com um diâmetro de 300 mm, que não só permite um volume de impressão considerável, mas também a sua possível alteração, no futuro, para um diâmetro menor (ou forma geométrica diferente), sem afetar a localização de outros componentes.

- A plataforma deverá ser preparada para a inclusão de placa de aquecimento.

Tendo em vista a construção de um sistema completo, é essencial a conceptualização de um sistema que permita a inclusão de uma base de aquecimento, em concordância com as considerações feitas na Secção 6, sobre o projeto elétrico da impressora.

- A plataforma deverá ser construída de forma a que permita a utilização de bases diferentes.

Devido ao caráter experimental da aplicação, é importante a conceção de um sistema que permita a impressão de peças em substratos diferentes. Por este motivo, é requisito da plataforma de impressão a possibilidade de serem adicionadas bases de diferentes materiais, para melhorar as propriedades de adesão, em função do material a imprimir.

- Pretende-se que a plataforma seja de fácil montagem e apresente uma estrutura modular.

De uma forma geral, pretende-se que a plataforma de impressão seja flexível e modular, de forma a permitir alterações e melhoramentos no futuro, e cuja montagem seja intuitiva.

- A plataforma de impressão deve ser compatível com o braço robótico.

Como condição essencial, a plataforma desenvolvida deve ser controlável pelo braço robótico, isto é, ter uma massa inferior à sua carga útil (cerca de 3 kg).

7.1.2 Componentes

Tendo em conta os requisitos impostos, projeta-se uma estrutura com três elementos funcionais, com funções distintas: um elemento que faça a ligação da plataforma à flange do robô, um elemento que contenha a superfície de impressão e um elemento intermédio que faça a ligação entre ambos. Para facilitar a compreensão ao longo deste texto, estes elementos serão designados de suporte de ligação à flange, suporte da base de impressão (ou suporte intermédio) e base de impressão.

Suporte de ligação à flange

O primeiro elemento, que proporciona o acoplamento à flange do braço robótico, deverá ter duas zonas, uma destinada à ligação à flange e outra que permita a conexão ao elemento de suporte da base. Para a ligação à flange, é preciso considerar a dimensão dos respetivos furos roscados, bem como a sua disposição. Para a ligação ao elemento de suporte, toma-se como referência o valor da dimensão da base, 300 mm. O desenho CAD deste componente pode ser visto na Figura 7.2.

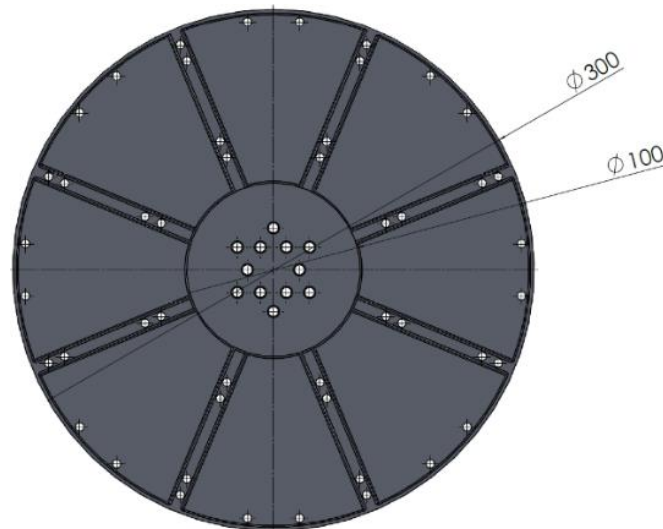


Figura 7.2 - Estrutura de alumínio para ligação à flange do órgão terminal.

Esta peça tem um diâmetro exterior de 300 mm e uma zona interior de diâmetro de 100 mm. Na zona central, encontram-se doze furos passantes, com um rebaixo, para ligação aparafusada à flange do robô, que contém furos roscados de dimensão M4. A ligação entre estes dois elementos é feita com parafusos de cabeça cilíndrica com oco hexagonal do tipo ISO 4762 M4 x 30 classe A2-70. Ao longo da sua direção radial e tangencial encontram-se dispersos furos passantes de dimensão M4 para ligação ao elemento que será o suporte da base de impressão. O facto de existirem diversos furos garante a modularidade da estrutura, ao conceder uma maior liberdade na ligação ao elemento superior, que pode ser de dimensão e forma variável.

Com exceção da zona central, que estará em contacto com a flange, e que tem uma espessura de 10 mm, este componente tem uma parede fina, de 2 mm de espessura (Figura 7.3), o que contribui para reduzir o seu peso. Neste sentido, são adicionadas nervuras na direção radial, que asseguram o reforço da estrutura e que acrescentam alguma espessura para a ligação de parafusos.

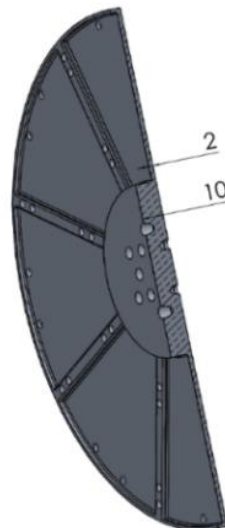


Figura 7.3 - Vista lateral em corte da estrutura de alumínio para ligação à flange do órgão terminal.

Esta peça é maquinada, usando uma liga de alumínio da série 1000 (Alumínio 3.0205 (EN-AW 1200)), devido à sua baixa massa volúmica, boa maquinabilidade e boa relação entre peso e propriedades mecânicas.

Suporte da base de impressão

O elemento de suporte intermédio (suporte base impressão) tem a função de ser a base de apoio do elemento que contém a superfície de impressão, e encontra-se acoplado à estrutura de suporte descrita anteriormente. Por este motivo, este deverá ter furos que permitam a ligação

aparafusada e uma espessura suficiente que assegure esta ligação. Esta peça deverá ter também uma superfície superior plana que suporte a base onde será extrudido o material e ainda deverá contemplar um local para montagem da base de aquecimento.

O suporte intermédio desenvolvido pode ser visto em modelo CAD na Figura 7.4.

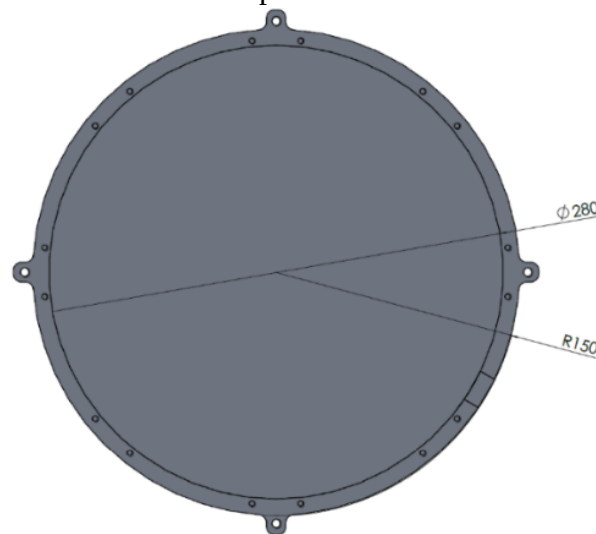


Figura 7.4 - Vista frontal da estrutura de suporte intermédia.

Esta estrutura tem a forma cilíndrica com uma parede lateral de espessura de 10 mm e interior oco. Nesta disposição existem duas superfícies, uma superior, destinada ao suporte da superfície de impressão, e uma inferior, onde pode ser montada a placa de aquecimento.

A ligação entre a estrutura de suporte inicial e o suporte intermédio é feita pelos furos da parede lateral, que têm uma profundidade de 10 mm. Tratam-se de dezasseis furos cegos roscados de dimensão M4, agrupados dois a dois. A junção é realizada com parafusos de cabeça cilíndrica de oco hexagonal ISO 4762 M4 x 10 classe A2-70.

Conforme a Figura 7.4, a estrutura de suporte da base de impressão possui quatro protuberâncias com furos roscados M6. Estas servem para fixar a base de impressão nesta mesma estrutura. Este tipo de ligação é simples e permite trocar a superfície de impressão de forma fácil e expedita.

Para o material desta estrutura, opta-se por alumínio da série 1000 (3.0205 (EN-AW 1200)), devido à sua boa relação entre massa volúmica, custo e condutividade térmica. Esta estrutura será fabricada por maquinagem e, para esse efeito, a escolha de alumínio também se revela vantajosa.

Placa de aquecimento

Para a placa de aquecimento, escolhe-se o fabricante *Keenovo®*, especializado neste tipo de dispositivos, e que permite a escolha de bases de dimensões personalizáveis. Neste sentido, escolhe-se uma base circular de silicone, com 250 mm de diâmetro, que disponibiliza uma potência de aquecimento de 300W a 230 V AC, semelhante à da Figura 7.5. Este componente também pode ser designado de tapete de aquecimento. A utilização deste tipo de bases em impressoras 3D é bastante frequente e tem a vantagem de ser versátil, flexível e fácil de montar, com recurso a uma superfície adesiva [171]. Apesar de o diâmetro da base ser de 250 mm, e ser este o diâmetro útil do volume de trabalho, é de esperar que toda a superfície superior (300 mm de diâmetro) se encontre à mesma temperatura, devido à condutividade térmica dos metais.

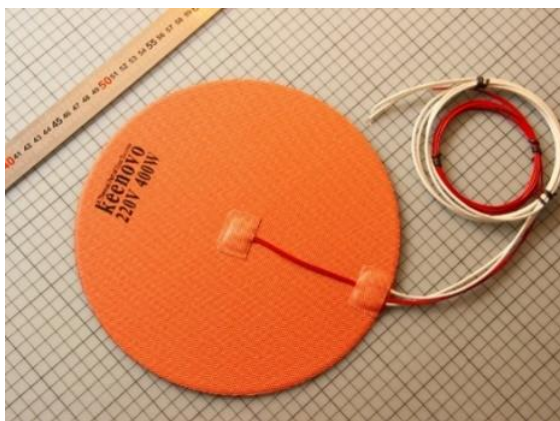


Figura 7.5 - Base de aquecimento de silicone circular do fabricante Keenovo [172].

Ainda neste âmbito, é importante analisar a inclusão de um sensor de temperatura. Na maior parte das vezes, as bases de aquecimento vêm equipadas com elementos sensores. No entanto, este encontra-se montado na parte inferior da base de aquecimento, ou seja, na superfície oposta à superfície de contacto com a base de impressão (Figura 7.5). Neste sentido, será vantajoso definir um local na superfície superior da estrutura de suporte da base de impressão, para a alojar o termopar, de forma a permitir uma determinação mais rigorosa da temperatura da base de impressão. Este alojamento é feito com uma ranhura, como ilustrado na Figura 7.6, que permite a sua colocação na estrutura e passagem de fios elétricos. Seguindo a mesma lógica, na parede lateral desta estrutura, é feita outra ranhura para passagem dos fios da placa de aquecimento.

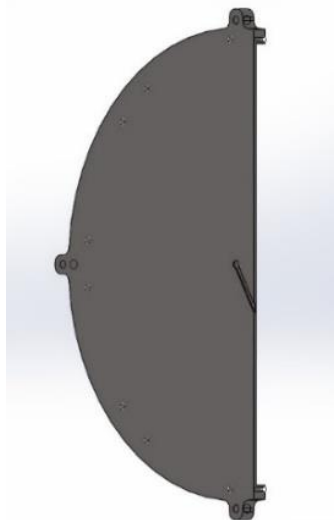


Figura 7.6 - Vista lateral em corte do suporte intermédio para suporte da base de impressão. Representação da superfície superior com ranhura para inclusão de termopar.

A colocação do tapete de aquecimento tem também de ter em conta aspetos relacionados com o seu isolamento, para proteger os componentes adjacentes. Neste caso, importa proteger o braço robótico, minimizando a transferência de calor da placa de aquecimento para a flange do robô, que é de um material polimérico e se pode deteriorar se for exposta a elevadas temperaturas. Esta condição implica igualmente que a estrutura de alumínio de ligação à flange do robô também esteja protegida termicamente, uma vez que esta está em contacto direto com a flange.

Neste sentido, a estrutura concebida converge para uma solução de isolamento térmico adequado, visto que a placa de aquecimento é montada na superfície inferior da estrutura intermédia e, como esta é oca na zona central, o ar irá isolar termicamente a placa da superfície de alumínio que se encontra abaixo. Todavia, pode ser adicionada uma base de cortiça junto da placa de aquecimento para permitir um melhor isolamento. A base de cortiça, com forma

circular e 3 mm de espessura, ficaria então colocada na superfície inferior do tapete de aquecimento (superfície visível na Figura 7.5) e a sua fixação seria feita de forma direta, se a base de cortiça tiver uma superfície adesiva, ou então recorrendo a um filme de *Kapton*®, uma solução comercial na forma de fita adesiva, constituída por um polímero que opera numa elevada gama de temperaturas (entre -269° e 400°) [173, 174].

No mesmo sentido, deve ser colocada uma base de cortiça semelhante, entre a estrutura de ligação à flange do robô e o suporte intermédio, para isolar termicamente estes dois componentes.

Base de impressão

O último elemento do conjunto que se designa por plataforma de impressão é a base de impressão propriamente dita, que contém a superfície onde serão construídas as peças fabricadas.

De acordo com a Secção 2.3.2, o material das bases de impressão é normalmente alumínio ou vidro e, por esse motivo, e tendo em conta os requisitos do projeto, foram desenvolvidas duas soluções, que possibilitam a utilização de uma base de alumínio ou vidro.

Solução base de alumínio

A utilização de uma base de alumínio é a solução mais simples e é apenas necessário construir uma base com diâmetro de 300 mm e que inclua as quatro protuberâncias com furos passantes M6. Este componente será montado em cima da estrutura intermédia e a fixação será feita com recurso a quatro parafusos de cabeça cilíndrica de oco hexagonal ISO 4762 M6 x 20 classe A2-70. A base será maquinada a partir de uma chapa de alumínio de espessura fina (Figura 7.7). No caso, optou-se por uma chapa de 1 mm, para se conseguir uma base particularmente leve.

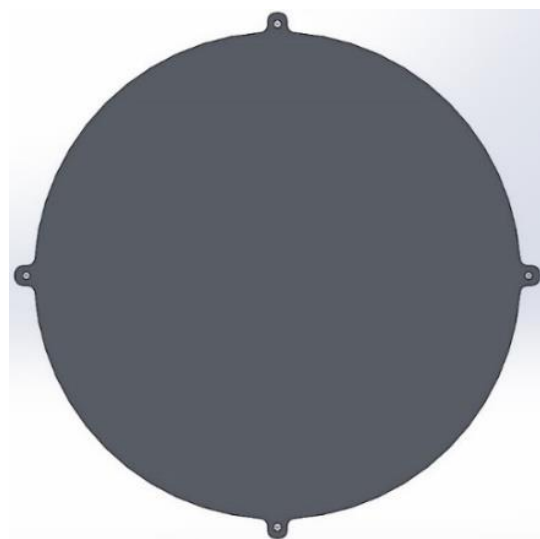


Figura 7.7 - Base de impressão em alumínio.

A montagem desta solução, com todos os componentes necessários, encontra-se representada e legendada na Figura 7.8, que apresenta o esquema de montagem, em vista explodida e em corte, segundo uma das diagonais da plataforma de impressão circular.

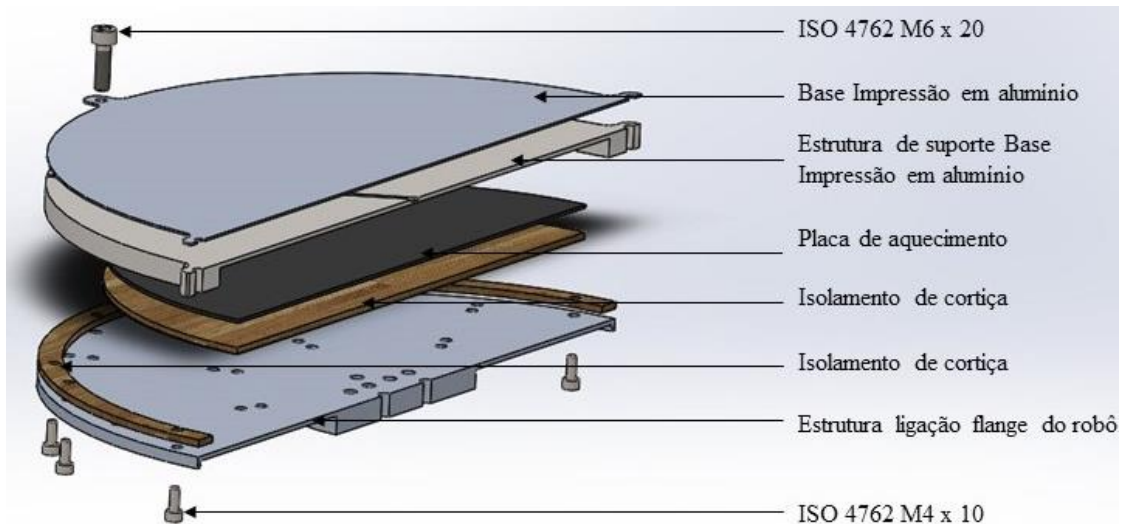


Figura 7.8 - Vista explodida em corte da plataforma de impressão com base de alumínio.

Solução base de vidro

Esta solução foi concebida para possibilitar a utilização de uma base de vidro como base de impressão. A sua existência comprova a flexibilidade da plataforma de impressão projetada, ao permitir a utilização de bases diferentes, sem ser necessário fazer alterações estruturais.

A necessidade de um sistema diferente para a fixação da base de vidro prende-se com o facto de ser muito complicado obter uma superfície em vidro com a forma igual ao suporte da base de impressão (quatro protuberâncias com furos). Esta limitação é contornada com a inclusão de apoios poliméricos (Figura 7.9). Estes elementos serão colocados nas protuberâncias da estrutura intermédia e, tendo um furo passante M6, serão fixados a esta com parafusos de cabeça cilíndrica de oco hexagonal ISO 4762 M6 x 20 classe A2-70. A sua colocação permite fixar a base de vidro na superfície superior do suporte intermédio, impossibilitando o seu movimento radial. Este tipo de apoio de fixação permite que sejam utilizadas bases de outros materiais, desde que tenham um diâmetro de 300 mm e uma espessura de 2 mm. No entanto, alterando as dimensões dos apoios de fixação, podem ser utilizadas bases de impressão com diâmetro e espessura diferentes.

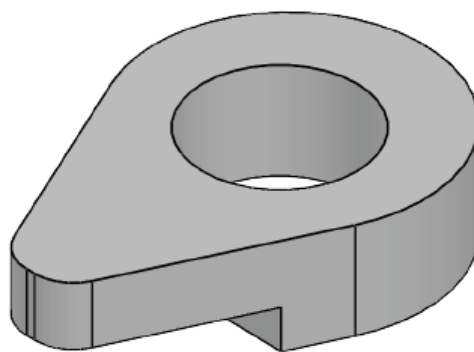


Figura 7.9 - Apoio em plástico para fixação da base de impressão.

Estes apoios podem ser obtidos por maquinagem a partir de um varão de um material polimérico. Para o efeito, selecciona-se o material *inglidur®h2* do fabricante *Igus®*, que é um polímero de uso geral, de baixo custo e que suporta temperaturas elevadas (até 200 °C).

A montagem da solução de plataforma de impressão com uma base de vidro encontra-se representada na Figura 7.10, que apresenta o esquema de montagem, em vista explodida e em corte, segundo uma das diagonais da plataforma de impressão circular.

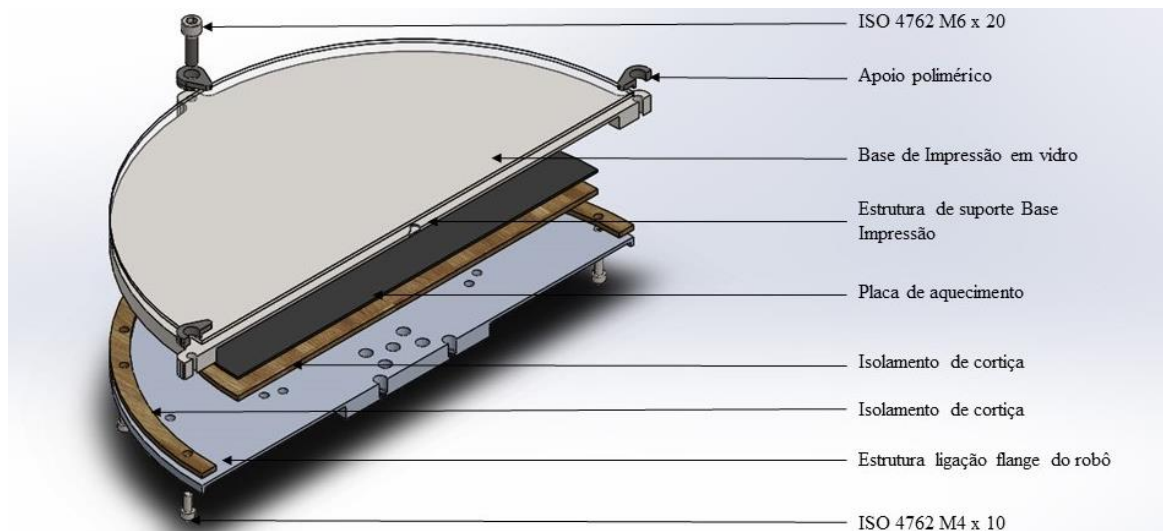


Figura 7.10 - Vista explodida em corte da plataforma de impressão com base de vidro.

Se se justificar, como elemento adicional, podem ser colocados adesivos sobre as bases de impressão (tanto na de vidro como na de alumínio), na forma sólida ou em fita para melhorar a adesão das peças a imprimir.

7.1.3 Verificações

Como etapa final do dimensionamento da plataforma de impressão, é necessário verificar se esta cumpre os requisitos impostos pelo braço robótico. Neste sentido, será feita uma verificação mássica no sentido de avaliar o peso da estrutura, e outra para avaliar as suas características de isolamento térmico.

Mássica

A verificação mássica tem como objetivo determinar a massa da plataforma de impressão e verificar se é inferior à carga útil do robô.

Esta análise é feita de forma expedita no *software Solidworks* a partir dos ficheiros CAD de cada um dos componentes. A estimativa da massa é feita a partir do volume dos componentes e da massa volúmica do respetivo material. Na Tabela 7.1 encontram-se sintetizados os valores de referência necessários a este cálculo.

Tabela 7.1 - Tabela auxiliar para estimativa da massa da plataforma de impressão.

Componente principal	Sub-componentes	Material	Massa Volúmica [Kg/m³]	Volume [mm³]	Massa [kg]
Suporte ligação à flange	-	Alumínio 3.0205 (EN-AW 1200)	2700	221111,01	0,597
Suporte base de impressão	-	Alumínio 3.0205 (EN-AW 1200)	2700	216455,3	0,584
	Placa de aquecimento	Borracha de silicone	1246	73631,08	0,092
	Isolamentos de cortiça	Cortiça	180	147262,16+26463,27	0,03
Base de Impressão					
Solução 1	Base Alumínio	Alumínio 3.0205 (EN-AW 1200)	2700	71185,65	0,192
Solução 2	Base de Vidro	Vidro	2456	141371,67	0,347
	Apoios fixação	Igildur® H2	1720	642,21 (x4)	0,04
Massa Total				Base Alumínio	1,495

	Base vidro	1,66
--	------------	------

Considera-se a massa da plataforma de impressão com o valor médio de 1,5 kg, que é inferior à carga útil do robô (3 kg) e, por isso, é adequada para ser manuseada por este.

Térmica

A verificação térmica da plataforma de impressão tem o objetivo de certificar que os mecanismos de isolamento térmico foram corretamente concebidos. Neste sentido, simula-se o aquecimento da placa de aquecimento e verifica-se a temperatura prevista para os elementos adjacentes, tendo-se em particular atenção a temperatura do suporte de ligação à flange, que estará em contacto direto com a flange do robô. Este estudo é realizado recorrendo à ferramenta de simulação de escoamentos do *Solidworks* (*Solidworks Flow Simulation*). A simulação é feita com recurso a técnicas de CFD (*Computational Fluid Dynamics*) e permite simular uma situação de transferência de calor por convecção e por condução na plataforma de impressão e na sua vizinhança.

A simulação foi feita para a plataforma de impressão com base de alumínio. Nesta, foi definida a temperatura da placa de aquecimento como sendo 100 °C e foi verificada a temperatura da sua vizinhança. O processo de cálculo é feito por discretização do modelo numa malha tridimensional. A dimensão da malha foi gerada automaticamente pelo *software*, sendo o valor de referência 3 mm. Por defeito, o *aspect ratio* é igual a 1. Na simulação, é considerada a transferência de calor por condução através dos componentes da plataforma e também por convecção através do ar circundante, a 20 °C (273,15 K). Além disso, é considerado o efeito da gravidade.

Os resultados da simulação térmica encontram-se representados nas figuras abaixo, e são apresentados em Kelvin (K).

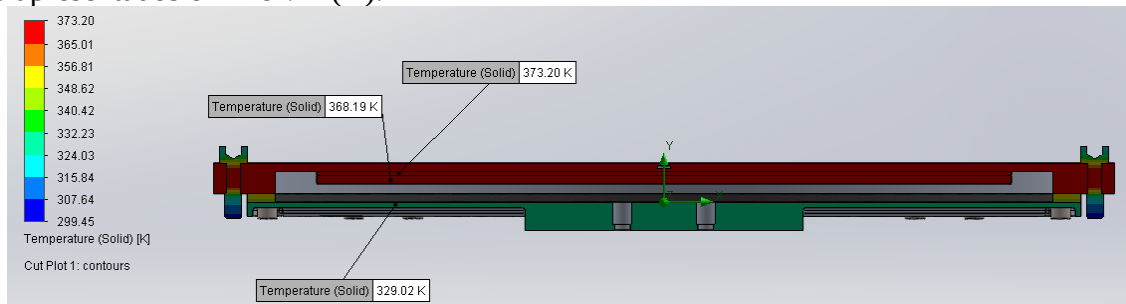


Figura 7.11 – Distribuição da temperatura dos vários componentes da plataforma de impressão em vista frontal em corte.

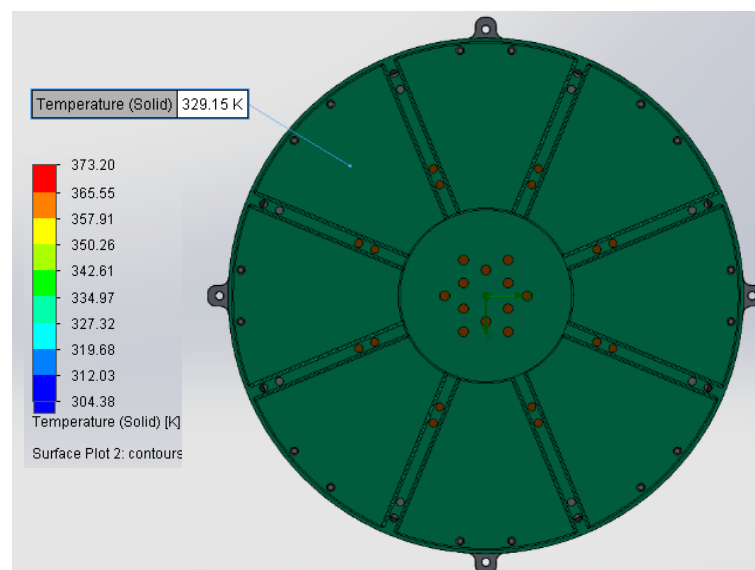


Figura 7.12 - Distribuição da temperatura da estrutura de ligação à flange do robô.

A análise dos resultados permite concluir que, aquecendo a placa de aquecimento a 100 °C (373,15 K) a temperatura do isolamento de cortiça inferior será cerca de 95 °C (368,19 K) e a temperatura do suporte de ligação à flange será cerca de 56 °C (329,15 K). Apesar de apresentar ligeiras variações, a temperatura deste último componente é considerada constante em todo o seu volume, pois trata-se de um estudo da situação de equilíbrio térmico. Esta temperatura não é suficientemente elevada para danificar o plástico da flange do robô e, por isso, considera-se a solução bem dimensionada do ponto de vista térmico.

7.2 Estrutura mecânica

No contexto do projeto, entende-se como estrutura mecânica o dispositivo que integra todos os sistemas físicos necessários à implementação do sistema de impressão tridimensional. Como projeto desta estrutura, inclui-se a definição da forma como os vários sistemas se interligam e o eventual projeto de sistemas auxiliares.

7.2.1 Requisitos

Apesar de o projeto da estrutura apresentar um certo grau de arbitrariedade, é necessário o estabelecimento de alguns requisitos:

- Construção de uma estrutura global que incorpore todos os constituintes do sistema (robô, quadro elétrico, base de impressão e extrusor)

Como principal requisito da estrutura mecânica, pretende-se que esta integre todos os sistemas necessários à tarefa de impressão por FDM. Neste campo, incluem-se a fixação do robô a uma estrutura fixa, a colocação do armário elétrico selecionado na Secção 6, bem como a escolha e integração da cabeça de extrusão. O preenchimento deste requisito pode levar à necessidade de projeto de elementos auxiliares que, como tal, deverão ser incluídas na estrutura.

Pretende-se que esta estrutura seja construída em forma de pórtico e que possibilite o movimento do robô no seu interior, de acordo com as tarefas a realizar e as suas dimensões.

- Pretende-se que a estrutura seja de fácil montagem e apresente uma estrutura modular.

À semelhança do que tem sido critério ao longo do projeto, pretende-se a construção de um dispositivo flexível e modular, que não só permita um manuseamento intuitivo, como assegurar a sua sustentabilidade, por via de um eventual reaproveitamento de materiais.

Neste sentido, usa-se perfil de alumínio *Bosch Rexroth*® para os principais componentes da estrutura, por ser uma solução amplamente utilizada, com elementos de grande durabilidade. A modularidade destas estruturas garante simplicidade de montagem, bem como grande flexibilidade, por permitirem fazer modificações facilmente. No contexto do projeto, utilizar-se-á o perfil de alumínio da série 45 mm (secção quadrada com 45 mm de lado).

7.2.2 Dimensões da estrutura

Uma vez que se está a projetar uma estrutura em forma de pórtico, um dos primeiros aspetos a considerar são as suas dimensões exteriores. Este dimensionamento é bastante importante, porque vai influenciar o movimento do robô nas tarefas que este desempenhará.

A posição relativa entre a base do braço robótico e o extrusor dá uma indicação acerca dos limites da estrutura. Sendo esta dimensão arbitrável e de grande importância para o desenvolvimento da impressora, é necessário fazer algumas considerações em relação a este tema.

Para tirar melhor partido da flexibilidade de movimento do braço articulado, é aconselhável que a sua base se encontre alinhada com o ponto de extrusão, isto é, o ponto por onde será extrudido o termoplástico. Esta condição pode ser implementada alinhando a base da

estrutura com a base do braço robótico e definindo o bico de extrusão como um ponto pertencente ao plano que passa por esta base e é perpendicular ao eixo da junta 2 (conforme a Figura 4.6, descrição cinemática do robô). Nesta configuração, admite-se o estado inicial do robô em que a junta 1 não está atuada e, por isso, a distância entre a base do robô e o ponto de extrusão pode ser expressa num plano, neste caso no plano Y-Z, de acordo com representação feita na Figura 7.13.

Com base nesta hipótese, podemos estabelecer que a distância entre a base do robô e o ponto de extrusão é variável, mas apenas influenciável pelas variáveis das juntas 2, 3 e 4. A junta 5 será solidária com o movimento da base e não altera o seu posicionamento no espaço de trabalho (apenas interfere na sua orientação). O braço que estabelece a ligação entre a junta 4 e o órgão terminal é perpendicular a este. Como, numa fase inicial, se pretende a deposição de material seja feita segundo os princípios tradicionais de impressão 3D, isto significa que a base de impressão deverá ser perpendicular ao sentido do movimento de extrusão e, consequentemente, o elo que liga as juntas 4 e 5 tem movimentos restringidos para garantir esta perpendicularidade em todos os instantes. O elo que liga as juntas 1 e 2 é constante e não interfere na formulação da distância entre a base do robô e o ponto de extrusão.

Esta ponderações encontram-se representadas na Figura 7.13, em que é feito um esquema geométrico que ajuda a definir a distância entre estes pontos.

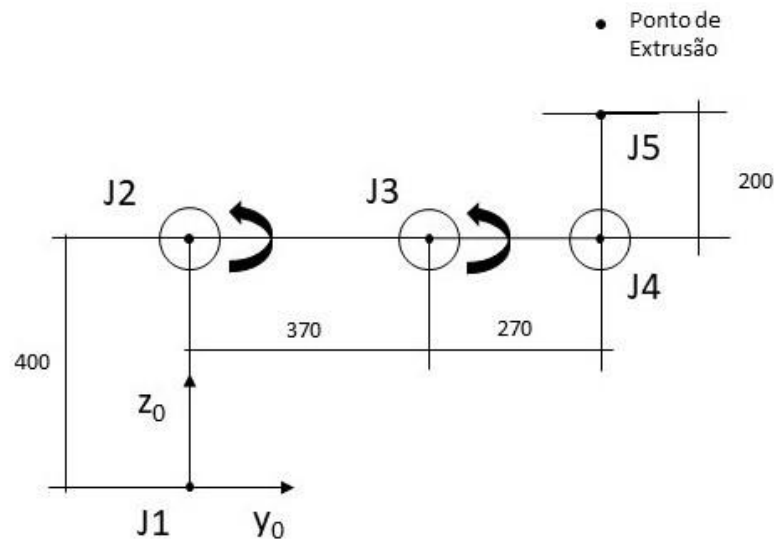


Figura 7.13 - Esquema no plano da análise entre a distância entre a base do robô e ponto de extrusão. Distâncias apresentadas em mm.

Pela observação da Figura 7.13, podemos concluir que a distância, na direção y, entre a base do robô e o ponto de extrusão será, no máximo, de 640mm (370+270mm). Para definir o comprimento da estrutura de impressão, considera-se este valor como referência, mas também se tem em conta a possibilidade de o último elo da estrutura não ser perpendicular ao plano da base. Nesta situação, a distância entre estes dois pontos de interesse será afetada pela rotação da junta 4 e pelo comprimento do elo, 200 mm. Além disso, tem-se também em conta que o sistema de eixos da base do robô se encontra na parte frontal da base do robô, pelo que é necessário acautelar algum espaço, para que as fixações da base do robô possam ser incluídas na mesa. Por estes motivos, escolhe-se um comprimento da estrutura de impressão de 1000 mm.

A análise da Figura 7.13 permite também estabelecer a altura entre o ponto de extrusão e a base do robô. Da sua observação, podemos concluir que este valor terá de ser pelo menos de 600 mm (400+200 mm). Para assegurar alguma margem para incluir a base de impressão no órgão terminal do robô e permitir o seu deslocamento vertical (direção z) numa gama de cerca de 100 mm, toma-se como valor de referência para a distância vertical entre a base do robô e o ponto de extrusão, 700 mm.

O atravancamento da estrutura global também é condicionado pela sua largura. Neste sentido, importa considerar a distância entre a base do robô e o extrusor no plano XY. Se admitirmos uma rotação da junta 1 numa gama entre $\pm 20^\circ$, teremos um deslocamento possível na direção X na ordem dos 400 mm.

Uma vez que se pretende criar uma estrutura de impressão funcional, é necessário acautelar a inclusão do quadro elétrico. Foi feita a escolha de um armário, de montagem em parede, na vertical, de dimensões nominais 600x400x250 mm. A idealização da estrutura passa pela instalação do quadro elétrico abaixo da mesa do robô, permitindo fácil acesso ao seu interior, ao botão que liga o PC e, especialmente, à botoneira de emergência. Por este motivo, considera-se que o armário elétrico montado no extremo oposto da base do robô, com a porta orientada para o exterior, consegue cumprir todos os requisitos. Neste sentido, é necessário considerar uma altura de pelo menos 600 mm para as pernas da estrutura e a sua largura deverá ser de pelo menos 400 mm. A profundidade do armário, 250 mm, não constitui uma limitação espacial neste contexto, porque ficará disposta ao longo do comprimento da estrutura (direção y). Assim, define-se que a ligação da mesa do robô ao solo será feita com umas pernas de 800 mm e a largura da respetiva estrutura terá 600 mm.

Em suma, pode-se referir que o atravancamento global da estrutura terá 1000 mm de comprimento, 600 mm de largura e 1700 mm de altura.

7.2.3 Mesa da estrutura

Na construção projetada, o braço robótico será fixado a uma mesa, que estará também ela fixa na estrutura global. Para um correto projeto mecânico, importa dimensionar devidamente a referida mesa.

A mesa de suporte será uma chapa metálica de dimensões 1000x600 mm, e a solicitação a que estará sujeita será o peso do robô e da base de impressão. Assim, para efeitos de dimensionamento, a mesa pode ser considerada uma viga simplesmente apoiada, com comprimento de 1000 mm, sujeita a uma carga de 20 kg (aproximação feita a partir do peso do braço robótico, 18 kg, e da base de impressão, 1,5 kg). A carga é aplicada ao longo do comprimento de fixação do robô (330 mm), o que se traduz numa solicitação de uma carga distribuída de 0,6 N/mm. O esquema das cargas aplicadas na mesa está representado na Figura 7.14, onde $w_1 = 0,6 \text{ N/mm}$.



Figura 7.14 - Cargas aplicadas na mesa da estrutura.

Aplicando os conceitos de equilíbrio de forças e de momentos na viga, resulta o diagrama de momentos fletores representado na Figura 7.15. A geração deste diagrama foi feita automaticamente no *software* MDSolids 4.0.

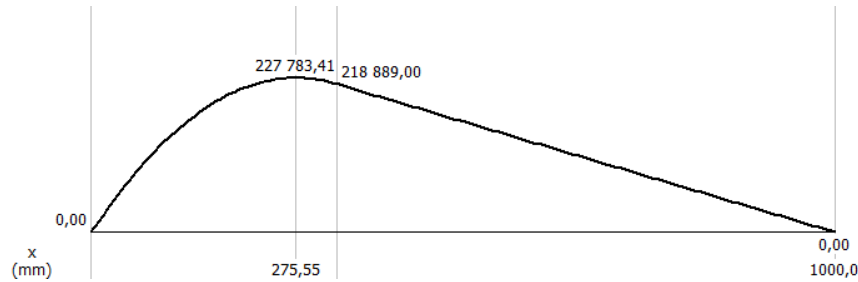


Figura 7.15 - Diagrama de momentos fletores da viga [Nmm].

Pela análise do diagrama, conclui-se que a secção crítica está localizada em $x = 275,55 \text{ mm}$, onde estará sujeita a um momento fletor máximo de $M_{f_{\text{máx}}} = 227,79 \text{ Nm}$. Como se trata de um caso de flexão pura, pois as cargas são aplicadas segundo o eixo neutro da mesa paralelepipedica, sabe-se que:

$$\frac{M_f * y_{\text{máx}}}{I_{zz}} \leq \sigma_{\text{máx}} \quad (7.1)$$

A tensão de cedência, $\sigma_{\text{máx}}$ e a distância máxima do eixo neutro da viga à superfície, $y_{\text{máx}}$ são função do material a utilizar e da espessura. Neste sentido, de acordo a disponibilidade de matéria-prima, pode ser utilizada uma chapa de STACBOND® de 4 mm ou uma chapa de alumínio de 6 mm. Serão feitos cálculos para avaliar a viabilidade de cada uma das soluções.

O STACBOND® é um material compósito de elevada qualidade que fornece uma multiplicidade de soluções construtivas graças à sua versatilidade e propriedades físicas e mecânicas. Este é comercializado na forma de chapa, composto por duas lâminas de alumínio unidas por um núcleo com resinas de termoplástico. Esta configuração garante-lhe ductilidade e resistência. De acordo com as especificações técnicas, a sua Tensão de Rotura (R_m) situa-se na gama entre os 125-240 MPa e a sua Tensão Limite de Elasticidade (R_p) é superior a 80 MPa [175, 176].

A chapa de alumínio disponível, é uma chapa de alumínio de uso geral da série 5000 com Tensão de Rotura (R_m) entre os 190 e 240 MPa e Tensão Limite Elástico (R_p) superior a 80 MPa [177].

De acordo com a Equação (7.1), I_{zz} é o momento de inércia da secção transversal da chapa, retangular, dado por:

$$I_{zz} = \frac{bh^3}{12} \quad (7.2)$$

O valor de $y_{\text{máx}}$ é metade da espessura da chapa h , pois o eixo neutro da chapa é coincidente com um dos seus eixos de simetria.

Assim, retomando a Equação (7.1), assumindo como tensão de referência a Tensão Limite de Elasticidade, e uma vez que este valor é igual para os dois tipos de chapa, é possível estimar a espessura mínima necessária. Aplicando um coeficiente de segurança de $N=1,5$, a Equação (7.1) vem:

$$h \geq 6,53 \text{ [mm]} \quad (7.3)$$

Da análise do resultado obtido, pode-se concluir que nenhuma das chapas disponíveis tem a espessura mínima necessária para um correto dimensionamento da mesa. Contudo, importa referir que o dimensionamento foi feito do lado da segurança, ou seja, tomando como referência a Tensão Limite Elástico e o valor mínimo que esta pode tomar.

Nestas condições, o critério estrutural pode ser verificado aumentando área da secção transversal da chapa, que, devido à impossibilidade de aumentar a espessura, só é possível aumentando a sua largura. Alternativamente, pode ser incluída uma secção de perfil Bosch® ao longo do comprimento da chapa, de modo a ser uma superfície de reforço adicional, que sustente a mesa e que impeça o material de ultrapassar o domínio elástico. Na Figura 7.16 encontra-se representado o esquema de montagem do robô.

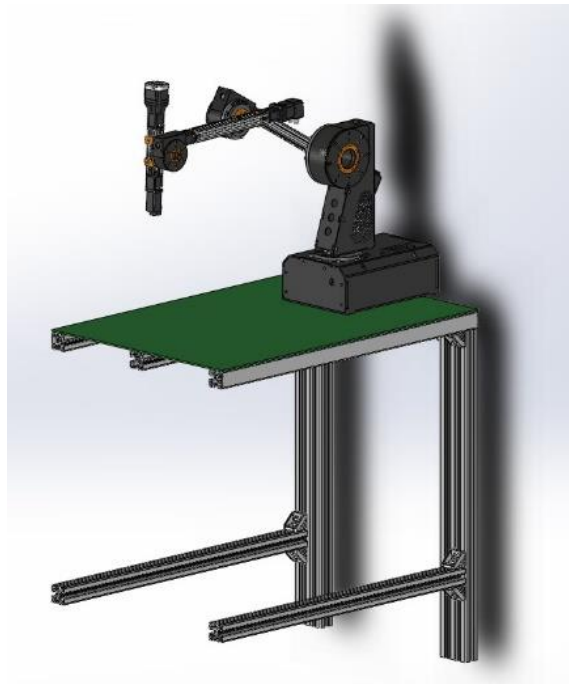


Figura 7.16 - Vista em corte da estrutura de montagem do braço robótico, incluindo pernas da estrutura, mesa e barra de reforço. Fonte modelo 3D perfil alumínio Bosch®: [178].

7.2.4 Cabeça de extrusão

O sistema global de impressão 3D fica completo com a inclusão de um extrusor. Para o efeito foi escolhida cabeça de extrusão *Titan Aero* do fabricante E3D®, um fabricante especializado no desenvolvimento e comercialização de sistemas e acessórios para FDM. A cabeça escolhida representa uma solução compacta e pronta a utilizar que inclui o mecanismo de extrusão e aquecimento. Esta permite uma extrusão precisa e é fácil de instalar e de utilizar. Ele vem incluído com um cartucho de aquecimento que funciona a 24 V e disponibiliza uma potência de 30 W [157, 179]. Este elemento tem a vantagem de vir equipado com uma chapa que permite o suporte do MPP e fixação do extrusor a uma estrutura.

De referir que a escolha do extrusor é algo flexível, uma vez que a sua influência apenas se reflete no projeto elétrico através controlo de um MPP, do cartucho de aquecimento e elemento sensor de temperatura e na geração de código G, pelo diâmetro do orifício de extrusão. Assim, esta escolha serve como referência, partindo do princípio que outros extrusores podem ser utilizados facilmente.

A montagem da cabeça de extrusão é feita com base no esquema apresentado na Figura 7.13. Pretende-se que ele seja incorporada na estrutura metálica, a uma distância de 640 mm da base do robô e a uma altura de cerca de 700 mm em relação à mesa. Tenciona-se igualmente que esta localização possa ser alterada ou ajustada sem grande dificuldade para melhorar o processo. Por esse motivo, também se projeta a estrutura de montagem do extrusor com perfil *Bosch®* e respetivos acessórios de fixação. A sua representação encontra-se na Figura 7.17.

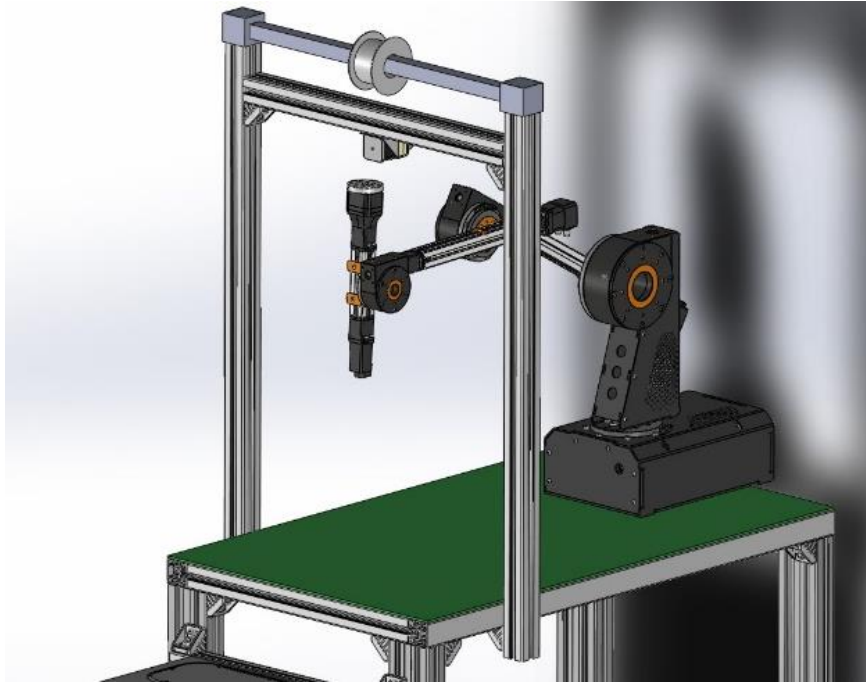


Figura 7.17 - Infraestrutura de montagem do extrusor montada na estrutura global. Fonte modelo 3D do extrusor: [180].

Como representado na Figura 7.17, a solução de montagem do extrusor inclui duas barras de perfil *Bosch*® de 1000 mm de comprimento, cada uma delas fixada a uma secção de perfil *Bosch*® através de um elemento de ligação (*gusset*). Uma barra de 600 mm de comprimento é colocada entre estas com o mesmo tipo de elementos de ligação. O extrusor é disposto na secção central desta barra através da sua chapa e de parafusos.

Na secção superior, encontra-se o dispositivo para alimentação do extrusor, composto por três elementos amovíveis em alumínio, para permitir a fácil substituição da bobina de filamento. Este é composto por duas capas que encaixam na face do perfil e um veio de secção quadrangular. A bobina contendo o filamento de termoplástico assenta no veio quadrangular.

7.2.5 Estrutura global

A solução global é constituída pela incorporação de todos os componentes previamente descritos numa estrutura única (plataforma de impressão, braço robótico e estrutura mecânica). Na Figura 7.18, encontra-se a representação da montagem da estrutura global com todos os componentes incluídos.

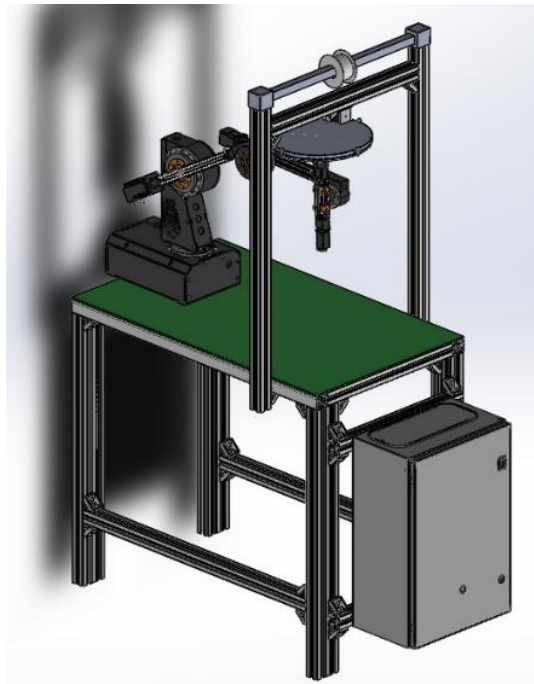


Figura 7.18 - Estrutura global do sistema de impressão 3D. Fonte modelo 3D armário elétrico: [181]

Como especificado, a estrutura será baseada em perfil de alumínio *Bosch*® e respetivos elementos de ligação. No Anexo D é feito o levantamento de todos os componentes necessários à montagem da estrutura global, tendo em vista a sua implementação (Tabela D. 1 do Anexo D).

7.3 Implementação

No projeto, foi feita uma montagem inicial da estrutura mecânica, de acordo com o projeto realizado. A implementação foi feita a partir do reaproveitamento de material previamente existente, nomeadamente, perfil *Bosch*® de 45 mm e chapa de STACBOND® de 4 mm. A Figura 7.19 mostra a montagem realizada.



Figura 7.19 - Montagem da estrutura mecânica para o sistema de impressão tridimensional.

Na estrutura mecânica, está em falta a plataforma de impressão, bem como o sistema para montagem do extrusor. A sua integração poderá ser feita posteriormente, de acordo com o projeto realizado.

8 Projeto de software

No presente capítulo, pretende-se fazer considerações acerca dos diferentes *softwares* necessários à implementação do sistema de impressão 3D baseado em braço robótico. Esta análise tem um caráter geral, ao ser baseada nas diferentes etapas do processo de FDM, e um caráter particular, no que diz respeito ao controlo do braço robótico e a adaptações para a sua introdução no processo.

8.1 Software CAD

Os sistemas computacionais de desenho assistido por computador ou CAD (*Computer-Aided Design*) são programas que possibilitam ao utilizador projetar e desenhar objetos em computador. A sua utilização insere-se na primeira fase do processo de FDM.

Para este efeito, existem diversos *softwares* disponíveis tais como *Solidworks®*, *Siemens NX®*, *Inventor®*, entre outros, sujeitos a licenças, ou *softwares open-source*, como o *ThinkerCAD®* e *FreeCAD®*, entre outros. Na escolha de um *software* CAD, é importante ter em conta a possibilidade de estes converterem modelos 3D em ficheiros STL. Dos *softwares* CAD referidos todos possuem essa funcionalidade [182].

8.2 Slicer

O *software* responsável pelo seccionamento do modelo 3D em camadas é o designado *slicer*. As suas principais funções consistem na definição dos parâmetros do processo, nomeadamente, da trajetória da cabeça de extrusão, velocidade de avanço, velocidade de extrusão e ainda geração de suportes. A informação gerada pelo *slicer* é escrita em código G.

Neste campo, os principais *softwares* de *slicing* são o *Cura®*, o *Slic3r®* e o *Simplify3D®*, sendo os dois primeiros de utilização gratuita e o último sujeito a licença.

Atualmente, os *slicers* disponíveis são designados para o funcionamento em impressoras com apenas três eixos de movimento. Isto significa que não estão preparados para tirar partido de uma implementação do processo em máquinas com mais eixos, como é o caso. Contudo, existem estudos no sentido de desenvolver algoritmos de *slicing* destinados à operação em impressoras com mais de três eixos, onde é possível a geração de trajetórias mais complexas que, entre outras vantagens, possam suprir a utilização de suportes [183, 184].

8.2.1 Código G

O código G (do inglês *G-Code*) é uma linguagem de programação tipicamente usada para o controlo numérico de máquinas industriais. Esta linguagem foi estabelecida na década de 60 pela EIA e encontra-se definida pela norma RS-274D. Apesar de este código ser de cariz universal, podem existir pequenas variantes na sua definição, consoante o tipo de aplicação, máquina a utilizar ou fabricante. Apesar disso, trata-se de um código simples, fácil de escrever e interpretar, e amplamente utilizado na indústria [185, 186].

A utilização do código G em impressão tridimensional permite controlar todas as variáveis do processo e, como tal, apresenta alguns comandos diferentes, específicos do processo, como, por exemplo, controlo da temperatura, movimento de extrusão e acionamento de mecanismos auxiliares.

O código G consiste numa lista de campos separados por espaçamentos ou por linhas. Um campo pode ser interpretado como um comando ou um parâmetro. Este consiste numa letra seguida de um número, ou simplesmente uma letra. A letra dá indicação sobre o significado do campo. Os números podem ser inteiros, ou fracionários, dependendo do contexto. Os principais comandos do código G podem ser de dois tipos: G e M, que indicam, respetivamente, instruções

gerais ou mistas. Os comandos G estão associados a tarefas de movimento, enquanto que os M a tarefas auxiliares. A interpretação dos campos do Código G está representada na Tabela 8.1⁸ [187-189].

Tabela 8.1 - Tabela com resumo dos principais comandos de Código G para o processo de FDM e seu significado[187].

Letra	Significado
Gnnn	Comando geral, como por exemplo, mover o extrusor para um determinado ponto.
Mnnn	Comando misto específico de impressão 3D, como por exemplo, ligar uma ventoinha.
Tnnn	Selecionar uma ferramenta. Neste contexto, uma ferramenta diz respeito a um bocal, que pode ser alimentado por um ou vários extrusores
Snnn	Parâmetro de comando geral, como por exemplo, tempo, em segundos, temperatura, etc.
Tnnn	Parâmetro de comando, como por exemplo, tempo, em milissegundos.
Xnnn	Coordenada para localização da cabeça no eixo 'X'. Expresso em mm.
Ynnn	Coordenada para localização da cabeça no eixo 'Y'. Expresso em mm.
Znnn	Coordenada para localização da cabeça no eixo 'Z'. Expresso em mm.
U, V, W	Eixos coordenados adicionais
Fnnn	Velocidade de avanço da cabeça (<i>feedrate</i>), expresso em mm/min.
Rnnn	Parâmetro utilizado para definir temperatura, expresso em °C.
Ennn	Parâmetro de controlo de extrusão, dado em mm. Indica o comprimento de material extrudido.
Nnnn	Número de linha, utilizado para repetir transmissão ou rotina.

A codificação dos diferentes tipos de comandos G e M que são tipicamente utilizados em FDM pode ser encontrada em [187].

O código G de uma tarefa de impressão 3D varia conforme o *slicer* que o gerou, no entanto, têm em comum um conjunto de tarefas de inicialização e de finalização do processo.

No que concerne a rotinas de inicialização, estas, normalmente, incluem definição das unidades do sistema de coordenadas (G21), definição de controlo de posição absoluto ou relativo (G90 ou G91), colocação de todos os eixos na posição inicial (G28 – *Homing*), definição da temperatura do extrusor (M109) ou eventualmente realização rotinas de nivelamento da base de impressão ou limpeza do bico de extrusão [190].

Dentro das rotinas de finalização, encontram-se tarefas como colocação dos eixos na posição inicial (G28 – *Homing*), definição da temperatura igual a zero para o cartucho e base de aquecimento (M104 S0, M140 S0), movimentação da base para posição que facilite remoção da peça, paragem dos motores (M84) e interrupção do fornecimento de energia (M80) [191].

8.2.2 Pós-processador de Código G

Para o projeto em desenvolvimento, pretende-se a utilização de um *slicer* genérico, que crie código G para rotinas de impressão 3D tradicionais, isto é, com impressoras com três eixos de movimento e em que a base é fixa, sendo móvel a cabeça de extrusão. Assim, é necessário fazer algumas alterações ao código G com vista à sua adequação ao contexto do projeto.

A base do sistema de eixos do mecanismo é coincidente com a base do robô, no entanto, os pontos gerados em código G (e que definem o movimento da base) devem ser dados como coordenadas do órgão terminal. Isto significa que é necessário aplicar uma transformação de coordenadas aos pontos do código G para que possam ser interpretados como pontos de referência para os cálculos de cinemática inversa do robô.

Além disso, como foi referido, o código G proveniente dos *slicers* disponíveis gera comandos para o movimento da cabeça de extrusão e não para o movimento da base. Ou seja, para esta aplicação, as referências do código devem ter valores simétricos aos originais. Se não fosse contemplada esta transformação, não seria possível proceder à impressão, porque, a título de exemplo, no eixo 'Z', o movimento da base seria ascendente, e esta iria colidir com a cabeça

⁸ Os campos representados na tabela são baseados no código G desenvolvido pela comunidade *Reprap*, sendo estes utilizados em muitas das impressoras 3D disponíveis no mercado.

de extrusão. Da mesma forma, sem esta transformação, o movimento nos eixos 'X' e 'Y' da cabeça de extrusão, aplicado à base do robô, iria resultar em peças com geometria simétrica à pretendida.

Da mesma forma que no processo tradicional, em que a origem do referencial é a base da impressora (normalmente no centro da base), para esta aplicação, a origem será o ponto de extrusão. A transformação de coordenadas pode ser feita com recurso a uma matriz de transformação homogênea do tipo:

$$T = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & P_x \\ 0 & -1 & 0 & P_y \\ 0 & 0 & -1 & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8.1)$$

Em que na matriz de rotação, $R_{3 \times 3}$, todos os elementos da sua diagonal tomam o valor '-1', e P_x , P_y e P_z representa as componentes do vetor P , que, por sua vez, designa o posicionamento do ponto de extrusão em relação à origem do sistema de eixos global do mecanismo. A esquematização da transformação de coordenadas encontra-se representada na Figura 8.1.

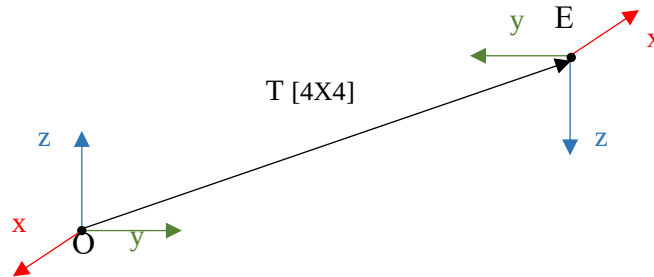


Figura 8.1 - Esquema de transformação de coordenadas a desenvolver para a aplicação.

Apesar de alguns *slicers* permitirem alterar a disposição da peça a imprimir em relação ao eixo de coordenadas da base das impressoras, esta alteração corresponde apenas a deslocamentos em relação aos eixos cartesianos e não a uma transformação para um sistema de coordenadas com posição e orientação diferentes. Por esse motivo, justifica-se a necessidade de elaborar um pós-processador capaz de implementar esta transformação. O seu desenvolvimento garante maior flexibilidade, na medida em que é mais fácil alterar a posição do ponto de extrusão e com isso modificar o código G, sem ter de se proceder ao *slicing* de novo. Ademais, a implementação deste método, por transformação de coordenadas, torna igualmente possível desenvolver código G para aplicações com bases de impressão inclinadas, como, por exemplo, é possível em impressoras 3D de cinco eixos.

Com vista ao desenvolvimento desta aplicação, foi desenvolvido um algoritmo do pós-processador de código G, com o qual é possível, a partir de um código G de uma qualquer peça, utilizá-lo para ser imprimido no sistema em desenvolvimento. No Anexo E.1 está representado este algoritmo.

Para implementação deste algoritmo foi escolhido o *software Matlab®*, por ser adequado ao cálculo matricial e incluir funções que permitem trabalhar com caracteres numéricos e de texto. O *script* elaborado para o efeito encontra-se no Anexo E.2, devidamente comentado, e no mesmo anexo encontra-se também a validação dos resultados do pós-processador.

8.3 TwinCAT 3

O *software TwinCAT 3* foi criado pela empresa *Beckhoff* com o objetivo de ser uma solução global de automação, baseada em PC. Com este *software*, qualquer sistema pode ser transformado num controlador em tempo real com múltiplos sistemas em execução. De acordo com a arquitetura do *software*, o *TwinCAT 3* possui um ambiente de funcionamento em tempo real XAR (*eXtended Automation Runtime*), que permite a execução dos vários módulos do

software, e também o ambiente XAE (*eXtended Automation Engineering*), que correndo no *Microsoft Visual Studio®*, possibilita a criação e programação de objetos de automação em várias linguagens (programação de PLC's, C e C++, .NET e Matlab®/Simulink®) [192-194].

8.3.1 Estrutura do software

O sistema base do *TwinCAT 3* (TC 3) é constituído por módulos base e por funções que comunicam entre si. Nestes módulos base incluem-se a configuração do sistema base, o módulo PLC, o módulo de configuração de terminais I/O, o módulo de segurança (*Safety*) e um módulo para programação em C++. Da parte de funções, destaca-se a função de controlo de movimento (*Motion*) [192].

A configuração do sistema é o suporte do *software* e nela é possível modificar parâmetros estruturais, como a utilização de CPU's, alterar tempo de ciclo do funcionamento em tempo real de cada um dos módulos e definição de prioridades de execução do *software*.

No módulo I/O é feita a ligação entre o sistema real, isto é, as cartas *Beckhoff* (terminais) ligadas entre si, e o *software*. Neste módulo é realizada a configuração dos *drivers* dos MPP e das restantes cartas e é através destes que são lidos os valores dos elementos sensores (neste caso, dos *encoders* e fins-de-curso)[195].

O módulo de movimento é utilizado para o controlo de eixos de movimento, nomeadamente de servomotores e MPP. O sistema de controlo de movimento é designado *TwinCAT NC I* (TC 3 NC I), em que as siglas "NC" significam controlo numérico e a indicação "I" define uma variante que permite a interpolação simultânea de eixos de movimento. O NC I executa as funções de controlador dos eixos, definindo todas as variáveis necessárias e gerando referências para o terminal I/O, através do subsistema PTP (*Point-To-Point*). O NC I executa igualmente as funcionalidades de interpretação de código G e a sua conversão em variáveis internas do sistema para serem trabalhadas com outros módulos (nomeadamente o PTP e *Kinematic Transformation*) [196].

O módulo de transformação cinemática (ou KT, *Kinematic Transformation*) é incorporado no sistema de controlo de movimento e o seu funcionamento é articulado com o TC 3 NC I. A funcionalidade de transformação cinemática possui uma biblioteca de estruturas cinemáticas, que devem ser parametrizadas conforme a aplicação. No caso deste sistema, terá de ser usada uma licença avançada deste módulo (nível de licença L4) para permitir o controlo de braços articulados [197].

O módulo PLC é o elemento central do sistema de funcionamento global. Por um lado, tem a função de interligar e comandar as variáveis da transformação cinemática, dos módulos NC I e PTP. Por outro tem funções típicas de PLC que permite ler os sinais das cartas e executar rotinas em função destes valores [198].

Na Figura 8.2 está representado um esquema com a forma como os vários módulos *TwinCAT* se articulam para implementação da solução.

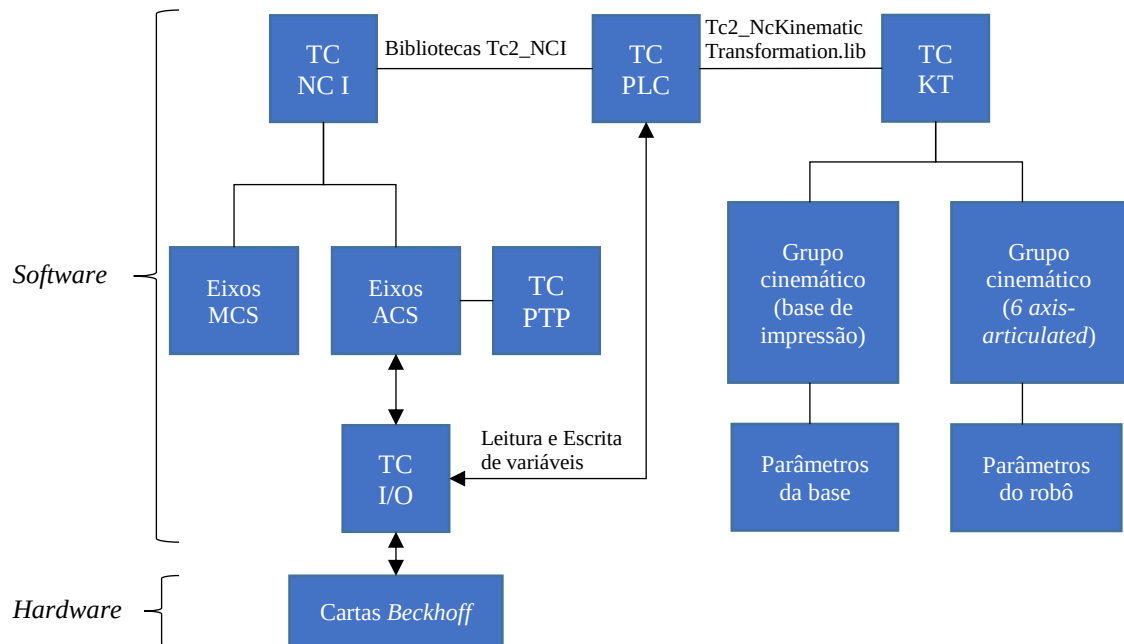


Figura 8.2 - Esquema de interligação dos vários módulos do software TwinCAT 3 para aplicação.

8.3.2 Arquitetura do sistema

Para que a solução seja corretamente definida é necessário programar o *software*, de acordo com as funções dos respetivos módulos. Seguidamente são caracterizados cada um desses módulos e as tarefas necessárias à implementação e controlo do sistema.

I/O

Como primeira etapa da integração do *software*, é necessário configurar as várias cartas físicas. Esta tarefa implica a parametrização das variáveis de interesse do *software* de acordo com as características do sistema físico (MPP, braço robótico, etc.).

A configuração dos MPP é feita na secção *CoE-Online*, onde estão disponíveis variáveis, organizadas em grupos. No grupo *8010:0 – STM Motor Settings Ch.1*, são definidas as características elétricas de operação de cada *driver* (corrente máxima, tensão nominal, resistência dos enrolamentos, indutância), parametrizadas de acordo com as fichas técnicas dos MPP (Anexo A.2). Ainda neste grupo, é definido o número de passos por revolução do motor e o número de impulsos por volta do *encoder*, que deve ser multiplicado por um fator de 4 ($500 \times 4 = 2000$), por se tratar de uma avaliação *4-fold*. No grupo *8012:0 STM Features Ch.1*, o tipo de *feedback* deve ser alterado para *encoder*, em vez de contador interno.

NC I

Do ponto de vista do TC 3 NC I, é necessário criar e configurar os eixos de movimento do sistema para proceder à sua interpolação. Cada um dos eixos é adicionado manualmente e é associado a um terminal I/O, no caso uma carta EL70x7. Esta ligação é feita automaticamente no módulo NC I, com a opção “*Link to I/O*”. Da mesma forma, um eixo de movimento pode ficar ligado a uma variável do PLC, com a opção “*Link to PLC*”.

Na utilização do módulo NC I, é necessária a configuração de cada um dos eixos de movimento, que inclui o MPP e o sistema mecânico de transmissão. Esta configuração consiste na definição dos valores de referência de operação das juntas, nomeadamente em relação à velocidade, aceleração e modos de operação.

No que diz respeito à dinâmica sistema, é importante definir os parâmetros velocidade e aceleração máxima e a velocidade e aceleração de referência. Os valores respeitantes à aceleração podem ser ajustados consoante o comportamento do robô. No que diz respeito à velocidade, os valores que devem ser definidos são calculados por:

$$v_{max} = \frac{f}{g} \quad (8.1)$$

Onde:

v_{max} , é a velocidade máxima, [rev/s],
 f , é a frequência base do motor, [fullsteps/s], e
 g , é o número de passos do motor, por rotação, [fullsteps/rev].

$$v_{ref} = v_{max} * d * r \quad (8.2)$$

Onde:

v_{ref} , é a velocidade de referência, [°/s],
 v_{max} , é a velocidade máxima, [rev/s],
 d , é a distância percorrida por rotação, [°/s], e
 r , é a razão de redução do sistema de transmissão

Também é possível definir os parâmetros de movimento manual dos eixos, nomeadamente velocidade de *jogging* rápida e lenta, sentido de rotação, e velocidade de *homing* dos eixos. Além disso, nesta secção, configura-se a posição “zero” de cada eixo (*home*), de forma a que seja dada pelo fim-de-curso existente em cada junta do robô.

O funcionamento de cada eixo é dado em função dos parâmetros do *encoder* e do sistema de transmissão, que também devem ser devidamente identificados. Neste sentido, a variável *scaling factor* (fator de escala) deve ser definida para que, a partir da leitura dos valores do MPP, seja avaliada a posição e a velocidade da respetiva junta. Este é calculado por:

$$SF = \frac{d}{4e} * r \quad (8.3)$$

Onde:

SF , é o *scaling factor*, expresso em graus por incremento, [°/incremento],
 d , é a distância percorrida por rotação, [°/s],
 e , é o número de incrementos do *encoder*, por rotação, [incrementos/rev], e
 r , é a razão de redução do sistema de transmissão

Também nesta secção pode ser alterado o sentido de rotação do motor, invertendo a polaridade das ligações do MPP no *driver*, e são impostos limites à posição de cada eixo.

Transformação Cinemática

O funcionamento do módulo de transformação cinemática é baseado em princípios de cinemática de estruturas robóticas, em particular, na definição de sistemas de eixos coordenados para descrever o comportamento do sistema. É possível definir quatro tipos de sistemas de coordenadas, um MCS (*Machine Coordinate System*), um sistema baseado no robô, normalmente colocado na sua base, um sistema de coordenadas global WCS (*World Coordinate System*), sobre o qual todos os elementos do sistema são referenciados, um sistema de coordenadas do utilizador UCS (*User Coordinate System*), dado em relação ao WCS e onde é possível definir tarefas e um sistema de coordenadas dos eixos ACS (*Axis Coordinate System*), que descreve a posição dos eixos físicos.

A utilização deste módulo permite converter as tarefas definidas num sistema de eixos cartesiano (UCS) em referências para o sistema de coordenadas dos eixos (ACS) em cada ciclo do *software*. Esta função integra-se no sistema de controlo de movimento *Beckhoff* que pode ser comandado por código G (DIN 66025) ou por funções do PLC (*PLCInterpolation library*).

Para a introdução do braço robótico no sistema *TwinCAT*, é, em primeiro lugar, necessário definir todos os eixos na configuração do NC I. Isto implica a introdução de seis eixos do tipo ACS, que corresponderão a eixos reais e ficarão ligados aos *drivers* do módulo I/O e seis eixos do tipo MCS (X, Y, Z, A, B, C), eixos virtuais que definem o espaço cartesiano, sobre o qual serão descritas tarefas.

Para a solução do sistema, o grupo cinemático a utilizar deverá ser do tipo ‘*Six Axis Articulated*’, o qual permite a implementação de estruturas articuladas com seis graus de liberdade. Este deve ser devidamente parametrizado para implementação do robô disponível.

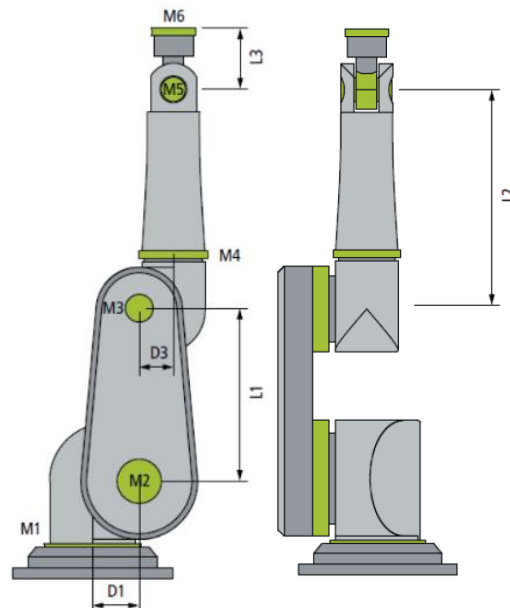


Figura 8.3 - Variáveis de parametrização de estrutura de seis eixos articulada disponível no módulo ‘Kinematic Transformation’ do software TwinCAT 3 [199]⁹.

Na configuração do braço articulado, é necessário ter em conta que o modelo disponível apresenta uma solução com seis graus de liberdade e, no projeto, utiliza-se um braço robótico com cinco graus de liberdade. Por observação da Figura 8.3, verifica-se que a junta ‘M4’ não existe no robô disponível e, como tal, o seu movimento deve ser restringindo. Esta restrição pode ser introduzida definindo os limites, máximo e mínimo, do respetivo eixo ACS como sendo iguais a zero.

No braço robótico disponível, existe um braço que não é contemplado no esquema da Figura 8.3. Trata-se do braço que faz a ligação entre a junta 1 e a junta 2 (Figura 4.6, braço de comprimento a). Este braço é introduzido através da variável *MCS offset*, que permite alterar a localização da base do robô, definindo uma compensação na direção vertical, igual ao comprimento do braço.

Além disso, é necessário definir uma ferramenta, que será, neste caso, a base de impressão. A ferramenta é introduzida enquanto grupo cinemático, e é implementada como uma extensão do eixo que contém o órgão terminal do robô.

Os valores necessários a esta parametrização são expressos na Tabela 8.2.

Tabela 8.2 - Valores de referência para parametrização do braço robótico.

Parâmetro	Valor [mm]	Comentários
Braço L1	350	
Braço L2	260	
Braço L3	140	
Braço D1	0	
Braço D2	58	Distância lateral entre junta 1 e 6
Braço D3	0	
<i>MCS offset</i>	330	
<i>Tool offset</i> OID	L=22 mm.	Definido como grupo cinemático (<i>Tool offset</i>).

PLC

O módulo PLC do TC 3 tem a função de articular o funcionamento de todo o sistema de impressão, tanto da perspetiva de controlo do movimento do robô, como do controlo dos elementos de aquecimento e sistemas auxiliares.

O PLC é programável segundo a norma de PLC’s IEC 61131-3 e, como tal, pode ser implementado em texto estruturado (ST), diagrama de blocos funcionais (FBD), diagrama em *ladder* (LD), lista de instruções (IL) e gráficos de funções contínuas (CFC).

⁹ No TwinCAT 3, é utilizada a notação M1...6 para designar as juntas 1 a 6 do robô.

O funcionamento do PLC, enquanto elemento central do sistema, compreende a interligação entre os vários módulos de uma forma sincronizada e automática. Por este motivo, a sua função abrange essencialmente a gestão do fluxo de informação no sistema, que também pode ser feita de forma manual, para testar a correta configuração dos vários módulos.

A integração dos módulos pelo PLC é feita com recurso a blocos de funções disponibilizadas por bibliotecas específicas. A representação das funções necessárias para a sua implementação é feita nas figuras seguintes.

Para a implementação de funções de controlador de eixos (*TC PTP*), utiliza-se a biblioteca *Tc2_MC2*. As funções necessárias a esta implementação e as tarefas associadas encontram-se esquematizadas na Figura 8.4.

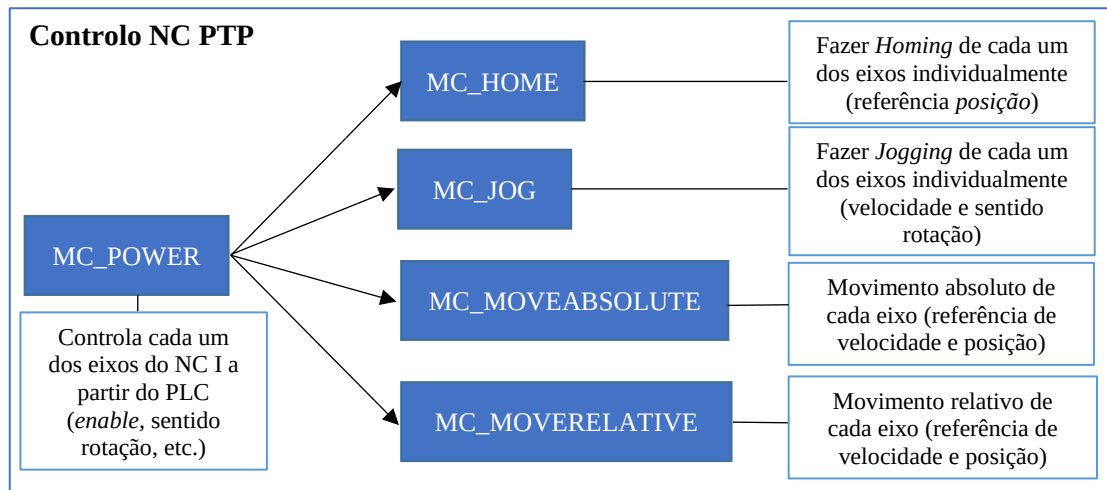


Figura 8.4 - Conjunto de funções necessárias ao controlador dos eixos de movimento do sistema a partir do PLC.

Neste sistema, a principal função do NC I é a interpretação do código G e geração de variáveis internas que são referências para funções de outros módulos. No PLC, estas funções encontram-se maioritariamente na biblioteca *Tc2_NCI*, e incluem tarefas como carregar um ficheiro de código G, definir o *override* no movimento dos eixos e associar as referências do código G aos eixos MCS. A definição destas três funções é necessária para a inicialização do canal NC I e, consequentemente, para a interpretação do código G.

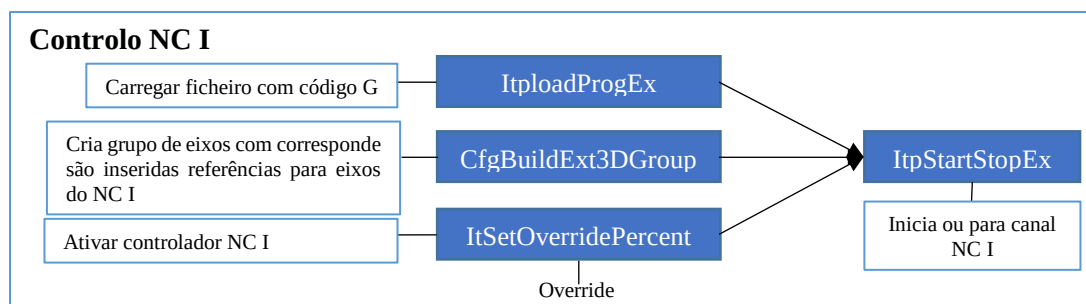


Figura 8.5 - Conjunto de funções necessárias para ativação e controlo do módulo NC I a partir do PLC.

O módulo de transformação cinemática (KT) é o último elemento necessário ao controlo dos eixos de movimento e pode ser considerado como uma interface entre o módulo NC I PTP e as funções de interpretação de código G do NC I. Segundo esta lógica de funcionamento, as variáveis de código G são dadas ao módulo *KT* sob a forma de eixos MCS, que as converte em referências para a juntas (eixos ACS), e estas, por sua vez, irão ser introduzidas no módulo PTP.

O módulo *KT* só pode ser controlado a partir do PLC, e, para tal, necessita essencialmente de duas funções: uma para definição dos eixos ACS e MCS e outra que, a partir desta definição, efetua cálculos de cinemática direta ou inversa (Figura 8.6). A biblioteca utilizada para a integração deste módulo é *Tc2_NcKinematicTransformation*.

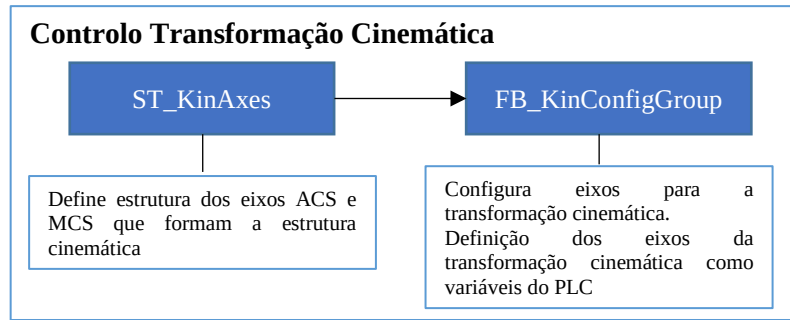


Figura 8.6 - Conjunto de funções necessárias para ativação e controlo do módulo *KT* a partir do PLC.

As tarefas de controlo de temperatura, que, no projeto, incluem controlo da temperatura do extrusor e da base, são implementadas diretamente no PLC. As variáveis das cartas físicas, nomeadamente os sinais de leitura dos termopares na carta EL3318, e as variáveis de saída para a carta EL2008, são controladas a partir de funções do PLC. A implementação do controlo de temperatura pode ser feita com recurso a um bloco de funções de um controlador PID de uso geral (*'FB_CTRL_PID'*), para gerar ações de controlo em função dos valores de temperatura lidos. Estas ações são posteriormente articuladas com uma função que permite a sua conversão em sinais digitais do tipo PWM (*'FB_BA_PWM'*). Na rotina de controlo de temperatura, os ganhos do controlador têm de ser ajustados manualmente, pois este bloco não possui a função de *auto-tuning*, e o tempo de ciclo do sinal PWM também tem de ser definido. Na escolha do tempo de ciclo, importa considerar o caso de controlo de temperatura da base, que será feito a partir de corrente elétrica AC @50 Hz. Uma vez que a corrente AC tem a forma de onda sinusoidal com um período de 20 ms, é necessário que o tempo de ciclo do PWM seja de uma ordem de grandeza superior, para que o valor da corrente que alimenta a base não seja influenciado pelo seu efeito sinusoidal. Toma-se como valor de referência para o tempo de ciclo, o valor de 2000 ms. A Figura 8.7 representa a organização das funções necessárias ao controlo de temperatura. A sua implementação requer a utilização das bibliotecas *Tc2_ControllerToolbox* e *TcBA library*.

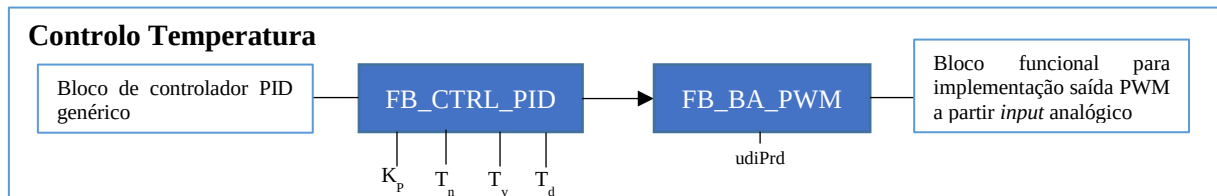


Figura 8.7 - Conjunto de funções necessárias para ativação e controlo de temperatura a partir do PLC.

Para a correta implementação do sistema, é necessário considerar que as referências de controlo são dadas pelo código G gerado para impressão por FDM e não segundo a norma DIN 66025. Isto tem implicações, por exemplo, na interpretação das funções M (comando misto) e R (referências de temperatura). Esta limitação pode ser ultrapassada fazendo a correspondência de funções M no NC I com a função prevista no código G do *licer*, através da função de *Handshake*. A utilização da função *'ItpIsHskMFunc'* permite ao PLC detetar a existência de um *Handshake* e do respetivo código (M0-257). Através deste sinal é possível associar um comando M a uma tarefa, como por exemplo, enviar um sinal para uma saída digital da carta EL2008. A função *'ItpConfirmHsk'* controla o estado da execução do comando, que, quando completo, possibilita continuar a leitura do código. A correspondência entre funções M e ordens do sistema deve ser feita de acordo com os parâmetros indicados pelo *licer*, podendo-se usar como referência as ordens de código G *RepRap* [187].

De forma semelhante, pode ser feito um mapeamento entre os valores lidos na função R e uma variável interna do *TwinCAT*, para a criação das referências de temperatura.

8.3.3 Implementação

A implementação do sistema foi feita de acordo com o projeto da arquitetura do *software*, sendo que esta etapa passou pela execução de tarefas de programação no TC 3. O projeto realizado não foi totalmente implementado, e, por isso, esta fase centrou-se na realização de experiências com o movimento do robô, enquanto elemento crítico de todo sistema e cujo controlo é mais exigente. Neste campo, importa referir que não foi possível realizar o controlo do mesmo de acordo com a arquitetura idealizada, uma vez que o módulo KT apresenta um problema técnico da responsabilidade do fabricante, relacionado com um ficheiro de instalação corrompido. Por este motivo, o trabalho de implementação do *software* foi fortemente condicionado, tendo-se, ainda assim, conseguido validar alguns conceitos e dado os primeiros passos para implementação completa da solução de controlo.

Parametrização

Como primeira fase da implementação, foi feita a parametrização dos terminais *Beckhoff* no módulo I/O. Esta parametrização foi realizada de acordo com o exposto na Secção 8.3.2, onde se inseriram as características elétricas dos MPP (Anexo A.2) para programação dos *drivers*.

No TC 3, o controlo dos MPP é feito por micropassos, com uma precisão de 1/64 de passo, o que permite aumentar a precisão de posicionamento do eixo e também assegurar um movimento contínuo, isto é, sem evidenciar o efeito de passo. As definições de controlo por micropassos estão definidas por defeito e não são ajustáveis.

Interpolação eixo a eixo

Como forma de validar as ligações elétricas dos vários componentes do sistema e a parametrização dos módulos *Beckhoff*, foram feitos testes simples ao movimento do robô. Com esse objetivo, foi, em primeiro lugar, feito o controlo manual de cada um dos eixos, de forma individual. Esta tarefa foi realizada diretamente no módulo NC-I.

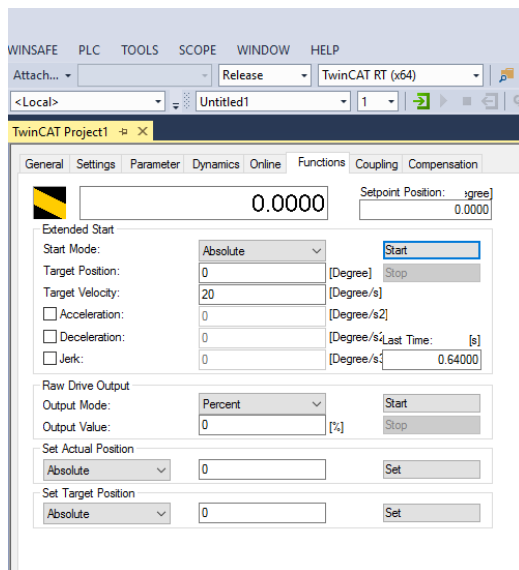
A sequência de testes consistiu na realização de sequências de *jogging* manual de cada eixo, em ambos os sentidos, a uma velocidade lenta e a uma velocidade rápida. Foi também feita uma sequência de *homing* das juntas (Figura 8.8) e, por fim, foi realizado um movimento de acordo com referências de posição (e velocidade) específicas.



Figura 8.8 - Posição de braço robótico após *homing* de todas as suas juntas.

Nas figuras seguintes, encontram-se os registos fotográficos da interpolação individual de cada eixo para ângulos específicos. Estes testes iniciais foram feitos a partir da posição de referência, em que todos os eixos se encontram na posição *Home* (Figura 8.8). Em cada um dos

eixos foi definida uma referência de posição, arbitrável, para possibilitar o movimento do robô e avaliar a concordância do sistema real. Nas imagens seguintes estão expressos os resultados, aparecendo o valor de rotação definido no *TwinCAT 3* e a posição correspondente no sistema real.

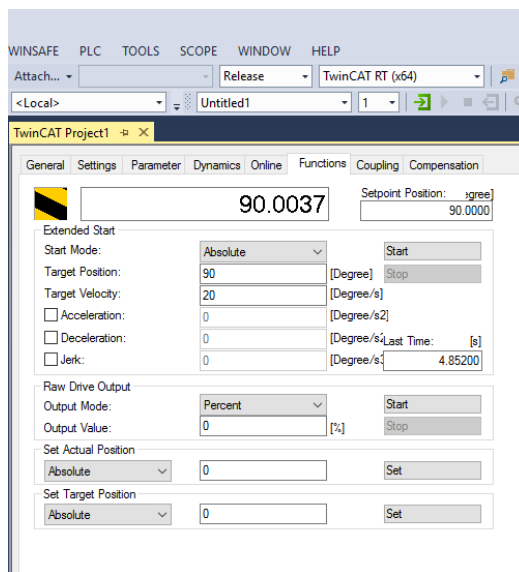


a)

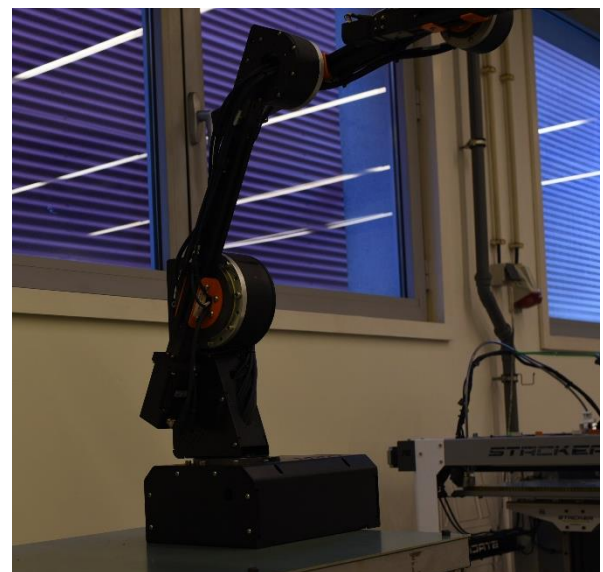


b)

Figura 8.9 - Robô na posição *Home*. a) Introdução da referência “zero” em cada junta; b) Robô real na posição *home*.

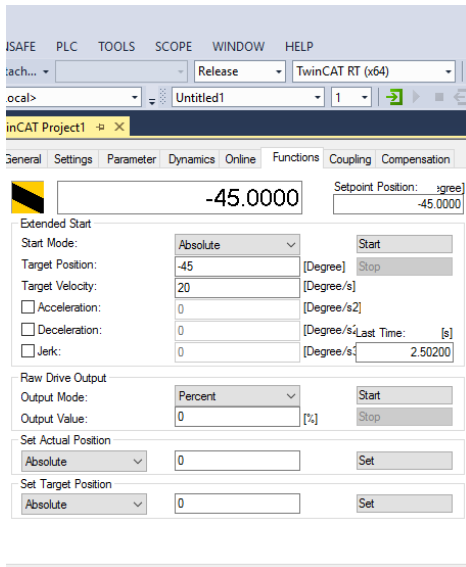


a)



b)

Figura 8.10 - - Movimento da junta 1. a) Posição de referência definida igual a 90°; b) Robô na posição definida.

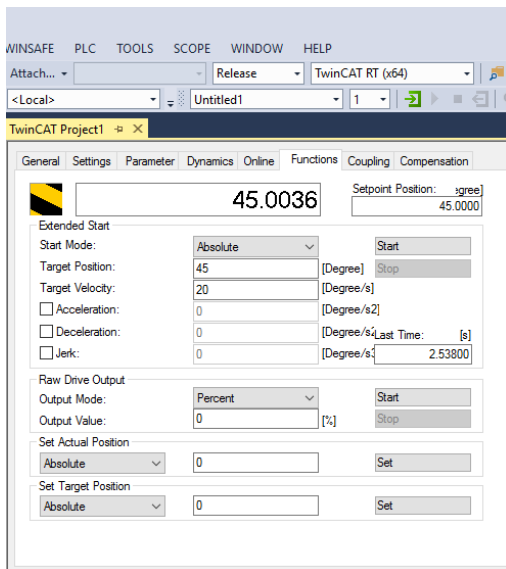


a)



b)

Figura 8.11 - Movimento da junta 2. a) Posição de referência definida igual a -45°; b) Robô na posição definida.

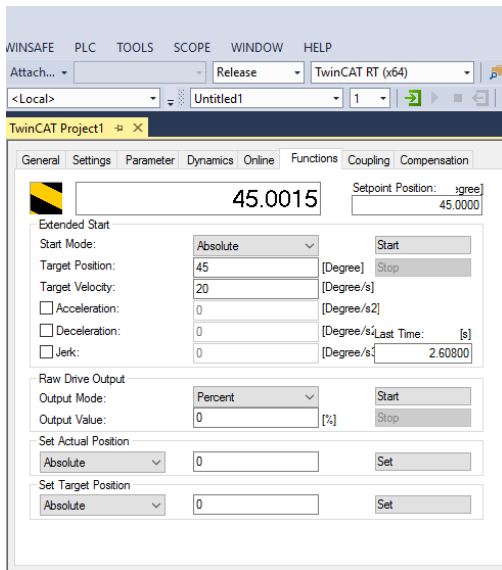


a)

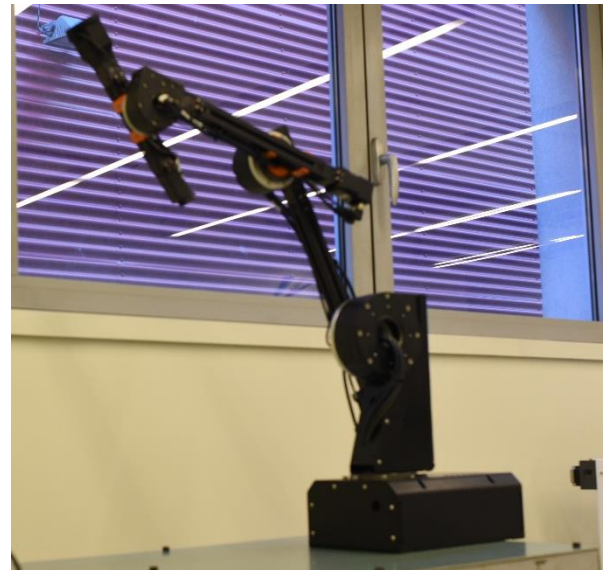


b)

Figura 8.12 - Movimento da junta 3. a) Posição de referência definida igual a 45°; b) Robô na posição definida.

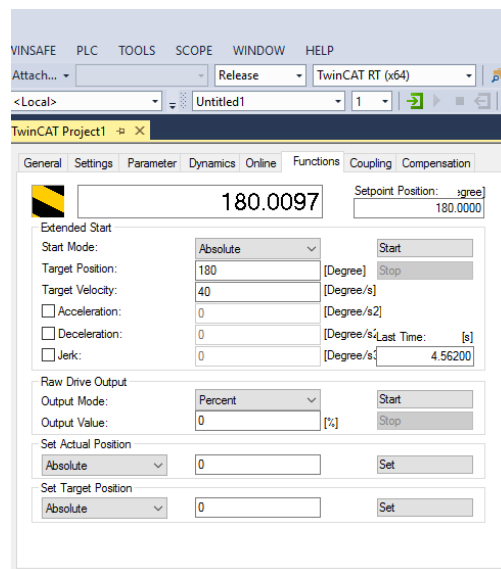


a)

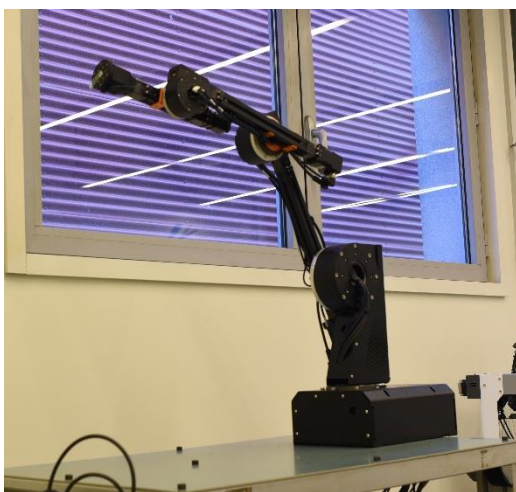


b)

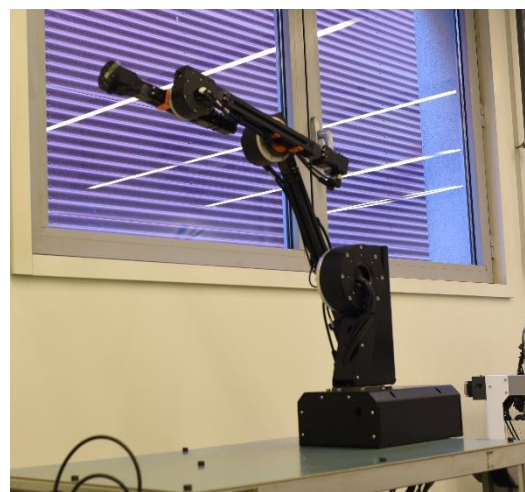
Figura 8.13 - Movimento da junta 4. a) Posição de referência definida igual a 45°; b) Robô na posição definida.



a)



b)



c)

Figura 8.14 - Movimento da junta 5. a) Posição de referência definida igual a 180°; b) Junta 5 na posição 0°; c) Robô na posição 180°.

O movimento observado permitiu confirmar a correta configuração do sistema, bem como das suas ligações elétricas, nomeadamente dos *encoders* e fins-de-curso, e levou à obtenção de resultados coerentes. Foi também possível constatar que o controlo dos MPP, com micropasso com uma razão de 1/64, se traduziu num movimento suave e continuado. No entanto, é importante considerar a possibilidade de realizar controlo vetorial dos MPP em situações futuras, que exijam um controlo mais apertado. Tendo em conta o sistema, este tipo de controlo só pode ser feito a partir de MPPs do fabricante *Beckhoff* (AS1000). A modularidade do sistema elétrico e do próprio braço robótico, fazem com que esta solução possa ser facilmente implementada.

Interpolação simultânea dos eixos

Numa segunda fase, foi feito um segundo conjunto de testes, envolvendo a interpolação simultânea de várias juntas do robô, por forma a avaliar a realização de trajetórias lineares. Dada a impossibilidade de recorrer à funcionalidade de KT do TC 3, este processo foi feito manualmente, com recurso ao modelo matemático do braço robótico definido na Secção 4.2, em particular, as equações estabelecidas para a cinemática de posição direta (Secção 4.2.2) e a cinemática de posição inversa (Secção 4.2.4).

Mais concretamente, foi realizada uma trajetória linear segundo cada um dos eixos cartesianos X, Y e Z, respetivamente, recorrendo às equações de cinemática de posição inversa. O controlo baseou-se na posição do órgão terminal, considerando a orientação constante, de tal forma a que o elo 4 do robô faça um ângulo de 90° em relação à horizontal, para efeitos de simplificação, e por se tratar de uma verificação inicial.

A sua execução foi feita no *TwinCAT* a partir da funcionalidade de controlo numérico, mais particularmente, o canal CNC, que permite inserir manualmente linhas de controlo numérico com referências para a posição de cada um dos eixos. As referências de posição foram geradas separadamente em *Matlab*®, de acordo com as equações de cinemática de posição inversa.

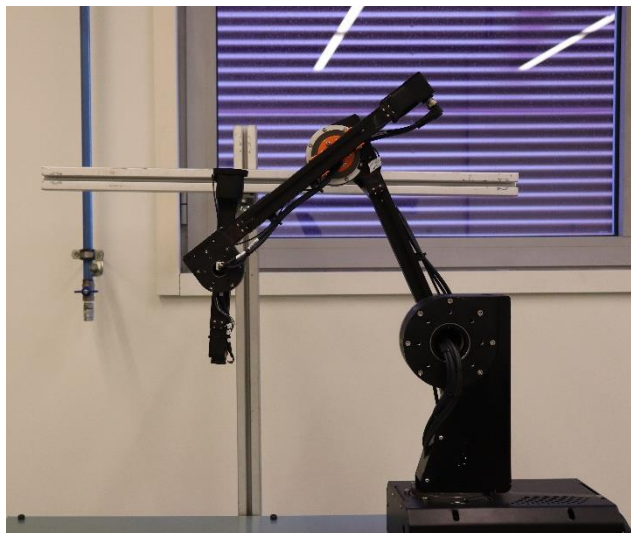
Movimento linear no eixo Y

O ponto P1 e P2, que definem o início e fim da trajetória foram arbitrados e as suas coordenadas estão expressas na Figura 8.15. A orientação do último braço do robô, definida por k (Equação (4.37)), foi determinada como sendo igual a 90° . A escolha deste valor significa que o órgão terminal será paralelo à mesa da estrutura e, por isso, ortogonal do eixo que define o sentido de extrusão. A escolha desta orientação é feita numa perspetiva de testes preliminares, em que uma será primeiramente feita uma sequência de impressão convencional. Na Tabela 8.3, encontram-se as referências de posição de cada eixo para alcançar os respetivos pontos. É necessário notar que a posição ‘zero’ do robô real, que toma como referência os fins-de-curso das juntas, difere da posição ‘zero’ do modelo matemático. Os valores calculados dizem respeito a referências calculadas para o modelo e não para o sistema real e, por isso, é acrescentado um ângulo predefinido de compensação a cada referência.

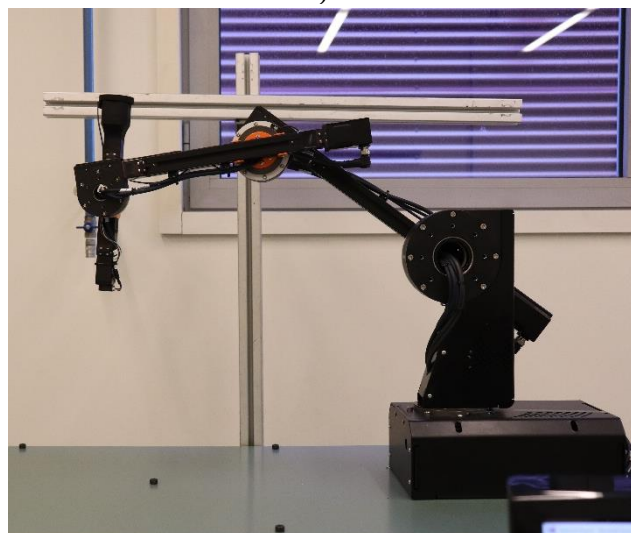
Tabela 8.3 - Referências de posição, no espaço cartesiano e no espaço de juntas, para uma trajetória linear do robô no eixo Y.

	P1	P2
x	58 [mm]	58 [mm]
y	350 [mm]	550 [mm]
z	700 [mm]	700 [mm]
$\theta 1$	0 [°]	0 [°]
$\theta 2$	1,1206 [°]	-28,6548 [°]
$\theta 3$	-55,7059 [°]	3,6965 [°]
$\theta 4$	136,985 [°]	107,358 [°]
$\theta 5$	0 [°]	0 [°]

A Figura 8.15 ilustra os pontos inicial (P1) e final (P2) da trajetória definida. Os resultados foram validados por observação do movimento e, para esse efeito, também se adicionou uma estrutura simples de perfil *Bosch®* paralela ao eixo do movimento, para servir como referência à validação dos resultados. Esta estrutura foi igualmente utilizada nos testes seguintes, alterando a sua posição em função do eixo sobre o qual se executa a trajetória.



a)



b)

Figura 8.15 - Posição do braço robótico em: a) P1; b) P2.

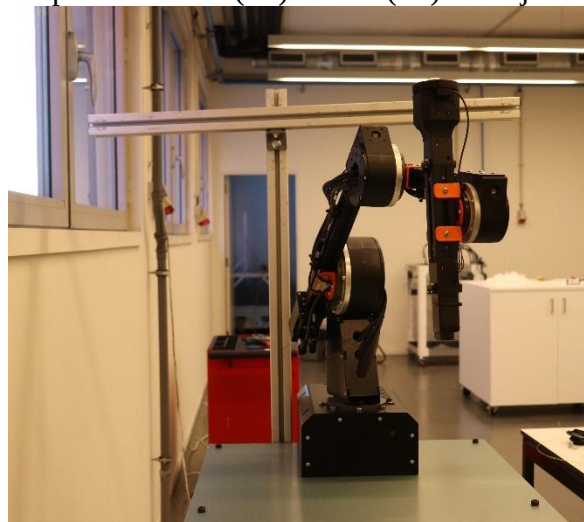
Movimento linear no eixo X

De forma semelhante, foi seguido o mesmo procedimento para testar uma trajetória linear no eixo X. Os dados relevantes para a sua definição encontram-se na Tabela 8.4.

Tabela 8.4 - Referências de posição, no espaço cartesiano e no espaço de juntas, para uma trajetória linear do robô no eixo X.

	P3	P4
x	208 [mm]	-92 [mm]
y	550 [mm]	550 [mm]
z	700 [mm]	700 [mm]
$\theta 1$	-16,0722 [°]	15,5955 [°]
$\theta 2$	-19,9397[°]	-26,6424 [°]
$\theta 3$	-14,7456 [°]	5,8319 [°]
$\theta 4$	117,085 [°]	106,211 [°]
$\theta 5$	0 [°]	0 [°]

A Figura 8.16 ilustra os pontos inicial (P3) e final (P4) da trajetória definida.



a)



b)

Figura 8.16 – Posição do braço robótico em: a) P3; b) P4.

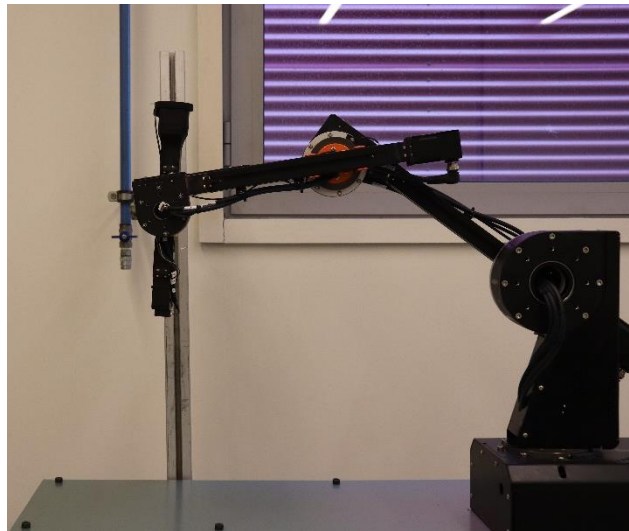
Movimento linear no eixo Z

Da mesma forma, o mesmo método foi adotado para testar uma trajetória linear no eixo Z. Os dados relevantes para a sua definição encontram-se resumidos na Tabela 8.5.

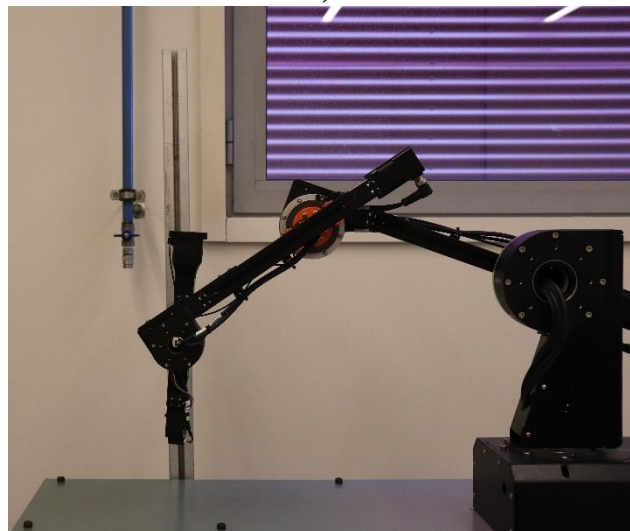
Tabela 8.5 - Referências de posição, no espaço cartesiano e no espaço de juntas, para uma trajetória linear do robô no eixo Z.

	P5	P6
x	58 [mm]	58 [mm]
y	550 [mm]	550 [mm]
z	700 [mm]	500 [mm]
$\theta 1$	0 [°]	0 [°]
$\theta 2$	-28,6548 [°]	-45,5696 [°]
$\theta 3$	3,6965 [°]	-5,0181 [°]
$\theta 4$	107,358 [°]	132,988 [°]
$\theta 5$	0 [°]	0 [°]

A Figura 8.17 ilustra os pontos inicial (P3) e final (P4) da trajetória definida.



a)



b)

Figura 8.17 - Posição do braço robótico em: a) P5; b) P6.

Tendo em conta os resultados obtidos, foi possível verificar, ainda que de forma visual e com o auxílio de um sistema de referência pouco preciso, a validade dos modelos matemáticos.

Os resultados não apresentam uma precisão elevada, querendo isto dizer que as trajetórias definidas não foram exatamente paralelas ao respetivo eixo cartesiano. Este fenómeno deve-se ao facto de o robô não estar calibrado e ao método de verificação da posição não ser muito rigoroso. Apesar disso, existe consistência dos resultados obtidos, o que permite validar o modelo matemático do robô para uma aplicação real, e, assim, concluir acerca da sua adequabilidade para o processo de impressão 3D.

9 Conclusões e Trabalhos futuros

9.1 Conclusões

O principal objetivo prosseguido com este trabalho foi a criação de um projeto de uma estrutura de impressão tridimensional, com recurso a um braço robótico. O principal objetivo foi alcançado, com a proposta de uma solução viável, que cumpre os requisitos propostos.

O campo da impressão 3d, atualmente, encontra-se em grande crescimento, potenciado pelo forte investimento de empresas e universidades de referência, no sentido de se colocarem na linha da frente para tirar melhor partido de um conjunto de processos que apresentam grandes vantagens.

Em particular, o processo de FDM, enquanto processo de FA mais comum, é especialmente indicado para o desenvolvimento de projetos de natureza exploratória, dado o seu baixo custo e a simplicidade do método. Por um lado, esta tecnologia permite a impressão de peças com qualidade considerável e a obtenção de produtos funcionais. Por outro, os resultados obtidos podem ser utilizados para a implementação de outros processos de FA, nomeadamente os equipamentos desenvolvidos para FDM podem eventualmente ser aproveitados para a impressão de metais ou de polímeros de elevado desempenho.

Da mesma forma, a utilização de estruturas robóticas tem-se vindo a consolidar nos mais diversos tipos de aplicações, fruto da sua grande flexibilidade e facilidade de programação. Contudo, o seu uso no campo do FA ainda é pouco expressivo. Para além disso, o recurso a um braço robótico sem sistema de controlo integrado constituiu um desafio adicional, pela necessidade de definir uma solução de automação que permita o controlo do robô.

No estudo da solução de automação, foram propostas várias alternativas para a implementação do sistema. Nesta análise, constatou-se a multiplicidade de métodos possíveis, sendo de realçar a possibilidade de estes, apesar de serem apresentados de forma seccionada, se poderem complementar. Esta investigação foi sustentada por duas lógicas de controlo diferentes, sendo uma baseada em controladores de sistemas de impressão 3d por FDM e a outra baseada no controlo do braço robótico. Neste campo, é de destacar o papel das comunidades *online* que desenvolvem produtos (essencialmente *software* e/ou código) de utilização gratuita (*open-source*), que podem ser utilizados como ferramentas fidedignas de controlo de processos.

O método de controlo selecionado é baseado em componentes produzidos pelo fabricante *Beckhoff*. Este disponibiliza uma solução conjunta de *hardware*, isto é, os *drivers* dos MPP, saídas digitais e sensores de temperatura, e *software*, permitindo o controlo de todos os sistemas a partir de um único dispositivo. Esta solução é ideal para o sistema em causa, uma vez que consiste numa solução de base industrial, robusta, que garante grande flexibilidade tanto a nível físico, com a possibilidade de substituir e/ou adicionar cartas para melhorar o sistema e adaptá-lo a futuras necessidades, e de programação, disponibilizando um *software* modular que permite controlo de eixos de movimento, implementação da cinemática do robô, comando de sinais digitais, leitura dos sinais dos sensores e funções de controlo de temperatura.

A solução de controlo escolhida foi o elemento central da respetiva instalação elétrica. Esta foi devidamente projetada de acordo com os requisitos de natureza elétrica do braço robótico e dos elementos de aquecimento, contemplando igualmente uma margem para a inclusão de outros subsistemas que podem ser utilizados em impressão 3d, como por exemplo, a utilização de ventoinhas de arrefecimento. O projeto foi elaborado de forma detalhada, tendo-se considerado todos os elementos de potência, comando e segurança necessários, bem como um quadro elétrico adequado. Este projeto minucioso foi fundamental para uma instalação bem-sucedida dos componentes elétricos.

Da mesma forma, o projeto da estrutura mecânica foi elaborado com vista a uma fácil construção da estrutura e que, simultaneamente, fosse flexível para ser possível fazer alterações. Este projeto centrou-se na instalação do braço robótico e da cabeça de extrusão, contemplando

liberdade de movimento do robô para as tarefas idealizadas, e com o fim último de instalar todos os equipamentos numa mesma estrutura. No âmbito deste projeto, foi também concebida uma plataforma de impressão, a qual teve em conta fatores típicos da impressão 3d, como a inclusão de um elemento de aquecimento e a possibilidade de se usarem bases de diferentes materiais, mas também o braço robótico onde será instalada, considerando-se a sua fixação numa flange em material polimérico e, por isso, incluindo-se alguns elementos que assegurem isolamento térmico entre esta e as superfícies sujeitas a temperaturas mais elevadas.

Apesar dos vários avanços que a tecnologia de FDM tem sido alvo, verificam-se ainda limitações ao nível do processo de *slicing*. Neste campo evidencia-se a ausência de um método/*software* que gere código G específico para impressão 3d com estruturas com mais de três eixos, nomeadamente com os braços articulados e máquinas de cinco eixos. Além disso, os *slicers* estudados não são compatíveis com a configuração pretendida, em que a cabeça de extrusão se encontra fixa. Por este motivo, foi desenvolvido um pós-processador de código G que transforma a trajetória normalmente gerada para a cabeça de extrusão numa trajetória para a base móvel. Este pós-processador tem a vantagem de aplicar uma transformação de coordenadas aos pontos-alvo de um código G já existente, o que faz com que se possa adaptar o código à localização (posição e orientação) efetiva do ponto de extrusão em relação ao referencial base, sem ter de se executar um novo *slicing* do objeto.

O projeto realizado representa uma solução inovadora no panorama atual da impressão 3d. O conceito desenvolvido com cabeça de extrusão fixa e base móvel, possui um grande potencial ao nível de possibilitar a criação de novos dispositivos de extrusão, sem que o seu peso e inércia constituam um obstáculo, e consequentemente da possível impressão de novos materiais. O seu caráter diferenciador manifesta-se também na utilização de um braço robótico que, sendo uma estrutura com mais de três graus de liberdade, tem a capacidade de eliminar algumas limitações típicas do processo de FDM, como a necessidade de suportes, o efeito de construção em degrau, minimizar o efeito anisotrópico das peças impressas e permitir a construção à volta de estruturas já existentes.

9.2 Trabalhos futuros

Tendo em conta o trabalho desenvolvido, os trabalhos futuros propostos centram-se na continuação das tarefas já realizadas, com vista à implementação de um sistema plenamente funcional.

Assim, um dos aspetos primordiais reside na calibração do braço robótico, de acordo com o método sugerido e com o seu modelo cinemático. Esta tarefa permitirá corrigir os parâmetros do robô indicados por defeito, e assegurar boa precisão no seu posicionamento. A capacidade de um posicionamento preciso do robô é fundamental, tendo em conta a natureza do processo, e tem um efeito direto na qualidade das peças imprimidas.

Do ponto de vista da estrutura mecânica, a realização de trabalhos futuros passa pela construção e montagem da plataforma de impressão e pela montagem do suporte para colocação do extrusor. Estas tarefas implicam a aquisição de material, nomeadamente matéria-prima (alumínio e eventualmente tubos de polímero) para ser maquinada para a realização da plataforma de alumínio, e ainda, para a fixação do extrusor, perfil *Bosch®* de 45 mm e chapa de alumínio para ser quinada, e um veio, também de alumínio, de secção quadrada, para suporte do filamento.

A instalação ficará completa com a aquisição e montagem da base de aquecimento e do cartucho do extrusor, e ainda com a execução das respetivas ligações elétricas às cartas *Beckhoff*.

No que diz respeito ao controlo do robô, o seguimento do trabalho aponta para a resolução do problema relacionado com o módulo “*Kinematic Transformation*” do *TwinCAT 3*, em cooperação com a *Beckhoff*. Tendo solucionado este problema, será possível realizar testes preliminares para movimentar o robô, quer manualmente, quer através da leitura de

código G. A implementação do sistema prosseguirá com a programação do PLC, como elemento de controlo global, através das funções referidas na Secção 8.3.2. Posteriormente, poderá ser desenvolvida uma HMI, a partir do PLC, que possibilite a realização de tarefas de impressão de forma intuitiva e automática, e ainda a monitorização do estado do processo.

Em termos mais avançados, o dispositivo desenvolvido pode ser utilizado para trabalhos de investigação futuros, como por exemplo, para testar novos *softwares* de *slicing*, novas trajetórias de impressão de peças, com orientação da mesa variável, impressão de peças sem suportes, avaliação da qualidade das peças imprimidas com estruturas robóticas com mais de três eixos, e ainda impressão de novos materiais.

Referências

- [1] Stamford, C., 2014, "Gartner Says Uses of 3D Printing Will Ignite Major Debate on Ethics and Regulation", from <https://www.gartner.com/en/newsroom/press-releases/2014-01-29-gartner-says-uses-of-3d-printing-will-ignite-major-debate-on-ethics-and-regulation>, consultado em 21/1/2019.
- [2] INEGI, 2011, "INEGI - Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial", from <http://www.inegi.up.pt/>, consultado em 21/01/2019.
- [3] Gao, W., Zhang, Y., Ramanujan, D., Ramani, K., Chen, Y., Williams, C. B., Wang, C. C. L., Shin, Y. C., Zhang, S., and Zavattieri, P. D., 2015, "The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering," *Computer-Aided Design*, **69**, pp. 65-89.
- [4] ASTM, 2010, "ASTM F2792-10: Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies".
- [5] Gibson, I., Rosen, D., and Stucker, B., 2015, *Additive Manufacturing Technologies*, Springer-Verlag New York.
- [6] Guo, N., and Leu, M. C., 2013, "Additive manufacturing: technology, applications and research needs," *Front. Mech. Eng.*, **8**(3), pp. 215-243.
- [7] Munz, O. J., 1956, "Photo-glyph recording," U. S. Patent No. 2775758.
- [8] Bourell, D. L., Jr., J. J. B., Leu, M. C., and Rosen, D. W., 2009 Published, "A brief History of Additive Manufacturing and the 2009 Roadmap for Additive Manufacturing," *Proc. RapidTech 2009: US-TURKEY Workshop on Rapid Technologies*.
- [9] Kruth, J. P., 1991, "Material Increment Manufacturing by Rapid Prototyping Techniques," *CIRP Annals*, **40**(2), pp. 603-614.
- [10] Williams, C. B., Mistree, F., and Rosen, D. W., 2011, "A Functional Classification Framework for the Conceptual Design of Additive Manufacturing Technologies," *Journal of Mechanical Design*, **133**(12), pp. 121002-121011.
- [11] Kruth, J. P., Leu, M. C., and Nakagawa, T., 1998, "Progress in Additive Manufacturing and Rapid Tooling," *CIRP Annals*, **47**(2), pp. 525-540.
- [12] Corporation, C. C., 2017, from www.contourcrafting.org consultado em 28/02/2018.
- [13] Wohlers, T. T., Associates, W., Campbell, R. I., and Caffrey, T., 2016, *Wohlers Report 2016: 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry : Annual Worldwide Progress Report*, Wohlers Associates.
- [14] Crump, S. S., 1992, "Apparatus and method for creating three-dimensional objects," U. S. Patent No. 5121329.
- [15] Schoffer, F., 2016, "How expiring patents are ushering in the next generation of 3D printing", from <https://techcrunch.com/2016/05/15/how-expiring-patents-are-usher-in-the-next-generation-of-3d-printing/?guccounter=1>, consultado em 1/3/2018.
- [16] Go, J., 2015, "High-Throughput Extrusion-Based Additive Manufacturing," Master of Science in Mechanical Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge.
- [17] RepRap, 2016, "Fused filament fabrication", from https://reprap.org/wiki/Fused_filament_fabrication, consultado em 1/3/2018.
- [18] ManufacturingGuide, 2018, "Fused Deposition Modeling, FDM", from <https://www.manufacturingguide.com/en/fused-deposition-modeling-fdm>, consultado em 2/3/2018.
- [19] Straub, J., and Kerlin, S., 2014, "Development of a Large, Low-Cost, Instant 3D Scanner," *Technologies*, **2**(2), p. 76.
- [20] Wong, K. V., and Hernandez, A., 2012, "A Review of Additive Manufacturing," *ISRN Mechanical Engineering*, **2012**, p. 10.
- [21] Yan, X., and Gu, P., 1996, "A review of rapid prototyping technologies and systems," *Computer-Aided Design*, **28**(4), pp. 307-318.
- [22] ISO/ASTM, 2016, "ISO/ASTM 52915: Specification for additive manufacturing file format (AMF) Version 1.2".

- [23] Iancu, C., Iancu, D., and Stancioiu, A., 2010, "From CAD model to 3d print via "STL" file format," *Fiabilitate se Durabilitate - Fiability & Durability*, **1**.
- [24] all3dp, 2018, "STL File Format for 3d Printing - Simply Explained", from <https://all3dp.com/what-is-stl-file-format-extension-3d-printing/>, consultado em 5/3/2018.
- [25] Winnan, C. D., 2013, *3D Printing: The Next Technology Gold Rush - Future Factories and How to Capitalize on Distributed Manufacturing*, CreateSpace Independent Publishing Platform.
- [26] Turner, B. N., and Gold, S. A., 2015, "A review of melt extrusion additive manufacturing processes: II. Materials, dimensional accuracy, and surface roughness," *Rapid Prototyping Journal*, **21**(3), pp. 250-261.
- [27] Komarnicki, P., 2017, *A Review of Fused Deposition Modeling Process Models*, Proceedings of the 13th International Scientific Conference: Computer Aided Engineering, E. R. D. Pietrusiak, ed., Springer, Cham, Chap. 25.
- [28] Reddy, B. V., Reddy, N. V., and Ghosh, A., 2007, "Fused deposition modelling using direct extrusion," *Virtual and Physical Prototyping*, **2**(1), pp. 51-60.
- [29] Turner, B. N., Strong, R., and Gold, S. A., 2014, "A review of melt extrusion additive manufacturing processes: I. Process design and modeling," *Rapid Prototyping Journal*, **20**(3), pp. 192-204.
- [30] Stratasys, 2015, "Fused Deposition Modeling (FDM) Design Guidelines," *Secondary Fused Deposition Modeling (FDM) Design Guidelines*, Secondary Stratasys, ed.
- [31] Sun, Q., Rizvi, G. M., Bellehumeur, C. T., and Gu, P., 2008, "Effect of processing conditions on the bonding quality of FDM polymer filaments," *Rapid Prototyping Journal*, **14**(2), pp. 72-80.
- [32] 3dhubs, 2018, "Selecting the optimal shell and infill parameters for FDM 3D Printing", from <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/selecting-optimal-shell-and-infill-parameters-fdm-3d-printing>, consultado em 20/3/2018.
- [33] my3DMATTER, 2015, "What is the influence of infill %, layer height and infill pattern on my 3D prints", from <http://my3dmatter.com/influence-infill-layer-height-pattern/>, consultado em 20/3/2018.
- [34] Cain, P., 2018, "Supports in 3D Printing: A technology overview", from <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/supports-3d-printing-technology-overview>, consultado em 20/3/2018.
- [35] Masood, S. H., and Song, W. Q., 2004, "Development of new metal/polymer materials for rapid tooling using Fused deposition modeling," *Materials and Design*, **25**, pp. 587-594.
- [36] Onwubolu, G. C., and Rayegani, F., 2014, "Characterization and Optimization of Mechanical Properties of ABS Parts Manufactured by the Fused Deposition Modelling Process," *International Journal of Manufacturing Engineering*, **2014**, p. 13.
- [37] Kumar, S. D., Kannan, V. N., and Sankaranarayanan, G., 2014, "Parameter Optimization of ABS-M30i Parts Produced by Fused Deposition Modeling for Minimum Surface Roughness," *International Journal of Current Engineering and Technology*, pp. 93-97.
- [38] Anna, B., and Selçuk, G., 2003, "Mechanical characterization of parts fabricated using fused deposition modeling," *Rapid Prototyping Journal*, **9**(4), pp. 252-264.
- [39] Alafaghani, A., Qattawi, A., and Ablat, M. A., 2017, "Design Consideration for Additive Manufacturing: Fused Deposition Modelling," *Open Journal of Applied Sciences*, **7**(6), pp. 291-318.
- [40] Bala, A. S., Wahab, S. b., and Ahmad, M. b., 2016, "Elements and Materials Improve the FDM Products: A Review," *Advanced Engineering Forum*, **16**, pp. 33-51.
- [41] Rohringer, S., 2018, "3D Printer Filament Guide 2018 – 25 Types for Every Need", from <https://all3dp.com/1/3d-printer-filament-types-3d-printing-3d-filament/>, consultado em 21/3/2018.

- [42] 3dMatter, 2018, "FDM 3D Printing materials compared", from <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/fdm-3d-printing-materials-compared>, consultado em 21/3/2018.
- [43] Stratasys, 2018, "Stratasys: Our Materials," Secondary Stratasys: Our Materials, Secondary Stratasys, ed.
- [44] Knoop, F., and Schoeppner, V., "Mechanical and Thermal Properties of FDM parts manufactured with Polyamide 12 ".
- [45] Ultimaker, 2018, "Ultimaker Materials," Secondary Ultimaker Materials, Secondary Ultimaker, ed.
- [46] Wu, W., Geng, P., Li, G., Zhao, D., Zhang, H., and Zhao, J., 2015, "Influence of Layer Thickness and Raster Angle on the Mechanical Properties of 3D-Printed PEEK and a Comparative Mechanical Study between PEEK and ABS," *Materials*, **8**(9), p. 5271.
- [47] Jiang, S., Liao, G., Xu, D., Liu, F., Li, W., Cheng, Y., Li, Z., and Xu, G., 2018, "Mechanical properties analysis of polyetherimide parts fabricated by fused deposition modeling," *High Performance Polymers*, pp. 1-10.
- [48] Agarwala, M. K., Jamalabad, V. R., Langrana, N. A., Safari, A., Whalen, P. J., and Danforth, S. C., 1996, "Structural quality of parts processed by fused deposition," *Rapid Prototyping Journal*, **2**(4), pp. 4-19.
- [49] Onagoruwa, S., Bose, S., and Bandyopadhyay, A., 2001 Published, "Fused deposition of ceramics (FDC) and composites " *Proc. Solid Freeform Fabrication Proceedings, Proceedings of the SFF Symposium*, pp. 224-331.
- [50] Srivastava, M., Maheshwari, S., and Kundra, T. K., 2015, "Virtual Modelling and Simulation of Functionally Graded Material Component using FDM Technique," *Materials Today: Proceedings*, **2**(4), pp. 3471-3480.
- [51] Li, L., Sun, Q., Bellehumeur, C., and Gu, P., 2002, "Composite Modeling and Analysis for Fabrication of FDM Prototypes with Locally Controlled Properties," *Journal of Manufacturing Processes*, **4**(2), pp. 129-141.
- [52] matweb, 2018, "MatWeb: Source of Materials Information", from www.matweb.com, consultado em 18/4/2018.
- [53] 3DPrinterPower, 2017, "Anatomy of a 3D Printer", from <http://3dprinterpower.com/3d-printer-anatomy/>, consultado em 24/06/2018.
- [54] 3DPrinterPrices, 2013, "Anatomy of a 3D printer", from <http://www.3dprinterprices.net/anatomy-of-a-3d-printer/>, consultado em 26/06/2018.
- [55] 3DPrinterPower, 2017, "Bowden Extruder vs Direct Extruder Showdown", from <http://3dprinterpower.com/bowden-extruder-vs-direct-extruder-showdown/>, consultado em 26/06/2018.
- [56] Griffey, J., 2014, "Library Technology Reports: Types of 3-D Printing," *3-D Printers for Libraries* **5**, pp. 8-12.
- [57] my3dconcepts, "Main Components of FDM 3D Printers", from <http://my3dconcepts.com/explore/main-components-of-desktop-3d-printers/>, consultado em 26/06/2018.
- [58] Yusuf, B., 2015, "3D Printers Explained: Delta, Cartesian, Polar, Scara", from <https://all3dp.com/known-your-fdm-3d-printers-cartesian-delta-polar-and-scara/>, consultado em 03/07/2018.
- [59] 3dnatives, 2017, "The 4 types of FFF/FDM 3D Printer Explained (Cartesian, Delta, Polar)", from <https://www.3dnatives.com/en/four-types-fdm-3d-printers140620174/>, consultado em 03/07/2018.
- [60] Evans, B., 2012, *Practical 3D Printers: The Science and Art of 3D Printing* Apress.
- [61] Tractus3D, "3D printing technology – Delta versus Cartesian", from <https://tractus3d.com/3d-printing-technology/>, consultado em 04/07/2018.
- [62] RepRap, 2017, "Prusa i3", from https://reprap.org/wiki/Prusa_i3, consultado em 05/7/2018.

- [63] Moyer, I. E., 2012, "Core XY", from <http://corexy.com/>, consultado em 09/07/2018.
- [64] RepRap, 2018, "CoreXY", from https://reprap.org/wiki/CoreXY#cite_note-3, consultado em 09/07/2018.
- [65] Curran, C., 2016, "The road ahead for 3-D printing", from <http://usblogs.pwc.com/emerging-technology/the-road-ahead-for-3d-printing/>, consultado em 03/07/2018.
- [66] Makkusu, 2015, "CORE XY PRINTER.176", from <https://maxdesign1990.wordpress.com/2015/07/19/core-xy-3d-printer/core-xy-printer-176/>, consultado em 09/07/2018.
- [67] Abdallah, F. L. L. D. M. D. C. T., 2004, *Robot Manipulator Control: Theory and Practice*, Marcel Dekker, Inc., Nova Iorque.
- [68] Bell, C., 2015, *3D Printing with Delta Printers*, Apress.
- [69] Betina Madeira Schmitta, C. F. Z., Cassiano Bonina, Daniel Lohmannb, Diovani, and Castoldi Lencinaa, A. d. C. S. N., 2017, "A Comparative Study of Cartesian and Delta 3D Printers on Producing PLA Parts," *Materials Research*, **20**(2), pp. 883-886.
- [70] ORION, from <https://www.seemecnc.com/products/orion-delta-3d-printer>, consultado em 10/10/2018.
- [71] 3dhubs, from <https://www.3dhubs.com/3d-printers/rostock-max>, consultado em 10/10/2018.
- [72] ThreeDMaterials, "Polar 3D Printer", from <https://threedmaterials.com/products/polar-3d-printer>, consultado em 25/10/2018.
- [73] Anderson, T., 2016, "Anatomy of a 3D Printer: How does a 3D Printer Work", from <https://www.matterhackers.com/articles/anatomy-of-a-3d-printer>, consultado em 29/10/2018.
- [74] Think3DPrint3D, and Escher3D, 2018, "Duet3D Documentation", from <https://duet3d.dozuki.com/>, consultado em 17/11/2018.
- [75] Smoothieboards, 2017, "Smoothieboards", from <http://smoothieware.org/smoothieboard>, consultado em 17/11/2018.
- [76] RepRap, 2018, "Arduino Mega Pololu Shield", from https://reprap.org/wiki/Arduino_Mega_Pololu_Shield, consultado em 17/11/2018.
- [77] Hermes Gibertini, Matteo Strano, and Annoni, M., 2016, "An innovative machine for Fused Deposition Modeling of metals and advanced ceramics," *MATEC Web Conferences*, **43**.
- [78] Xuan Song, Yayue Pan, and Chen, Y., 2015, "Development of a Low-Cost Parallel Kinematic Machine for Multidirectional Additive Manufacturing," *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, **137**, pp. 1-13.
- [79] Yong Chen, Chi Zhou, and Lao, F., 2011, "A layerless additive manufacturing process based on CNC accumulation," *Rapid Prototyping Journal*, **17**(3).
- [80] William S. Yerazunis, John C. Barnwell III, and Nikovski, D. N., "Strengthening ABS, Nylon, and Polyester 3D Printed Parts by Stress Tensor Aligned Deposition Paths and Five-Axis Printing
" *Proc. Solid Freeform Fabrication 2016: Proceedings of the 27th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium* pp. 1259-1271.
- [81] Kailun Hu, Shuo Jin, and Wang, C. C. L., 2015, "Support slimming for single material based additive manufacturing," *Computer-Aided Design*, **65**, pp. 1-10.
- [82] Zoran Pandilov, and Dukovski, V., 2014, "Comparison of the characteristics between Serial and Parallel Robots," *ACTA Tehnica Corviensis - Bulletin of Engineering*, **7**(1).
- [83] Siciliano, L. S. B., 2000, *Modelling and Control of Robot Manipulators*, Springer-Verlag, Berlim.
- [84] Paatz, S., 2008, "Anatomy of a Robot," *Engineering & Technology*, **3**(1), pp. 42-44.
- [85] Mark W. Spong, Seth Hutchinson, and Vidyasagar, M., 2005, *Robot Modeling and Control*, John Willey & Sons, inc., Nova Iorque.
- [86] K. S. Fu, R. C. Gonzales, and Lee, C. S. G., 1987, *Robotics: Control, Sensing, Vision, and Intelligence*, McGraw-Hill, Nova Iorque.

- [87] Control, T. Y. A. a., 1988, *Foundations of Robotics*, MIT Press, Cambridge.
- [88] KUKA, 2018, "Industrial Robots from KUKA," Secondary Industrial Robots from KUKA, Secondary KUKA, ed.
- [89] ABB, 2018, "Robot Selector," Secondary Robot Selector, Secondary ABB, ed.
- [90] Vurpillat, J., 2016, "Robotic Composite 3D Demonstrator Combines Stratasys Advanced Extrusion Technologies with Siemens' Motion Control Hardware and PLM Software", from <http://blog.stratasys.com/2016/08/24/infinite-build-robotic-composite-3d-demonstrator/>, consultado em 7/12/2018.
- [91] AdditiveManufacturing, 2017, "Siemens and Stratasys Partner on Robotic 3D Demonstrator", from <https://www.additivemanufacturing.media/news/siemens-and-stratasys-partner-on-robotic-3d-demonstrator>, consultado em 8/12/2018.
- [92] Mearian, L., 2016, "Stratasys unveils mega, robotic 3D printers to build large parts", from <https://www.computerworld.com/article/3112144/3d-printing/stratasys-unveils-mega-robotic-3d-printers-to-build-large-parts.html>, consultado em 7/12/2018.
- [93] Steve Keating, and Oxman, N., 2013, "Compound fabrication: A multi-functional robotic platform for digital design and fabrication," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, **29**, pp. 439-448.
- [94] Chenming Wu, Chengkai Dai, Guoxin Fang, Yong-Jin Liu, and Wang, C. C. L., 2017 Published, "RoboFDM: A Robotic System for Support-Free Fabrication using FDM," *Proc. 2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 1175-1180.
- [95] Chengkai Dai, Charlie C. L. Wang, Chenming Wu, Sylvain Lefebvre, Guoxin Fang, and Liu, Y.-J., 2018, "Support-Free Volume Printing by Multi-Axis Motion," *ACM Transactions on Graphics*, **37**(4), pp. 1-13.
- [96] Joseph R. Kubalak, Craig D. Mansfield, Taylor H. Pesek, Zachary K. Snow, Edward B. Cottiss, Oliver D. Ebeling-Koning, Matthew G. Price, Mark H. Traverso, L. David Tichnell, Christopher B. Williams, and Wicks, A., "Design and Realization of a 6 Degree of Freedom Robotic Extrusion Platform," *Proc. Solid Freeform Fabrication 2016: Proceedings of the 26th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium – An Additive Manufacturing Conference*, pp. 1314-1332.
- [97] Joseph R. Kubalak, Alfred L. Wicks, and Williams, C. B., 2018, "Using multi-axis material extrusion to improve mechanical properties through surface reinforcement," *Virtual and Physical Prototyping*, **13**(1), pp. 32-38.
- [98] Andi Dine, and Vosniakos, G.-C., 2018, "On the development of a robot-operated 3D-printer," *Procedia Manufacturing*, **17**, pp. 6-13.
- [99] Byron James Brooks, Khalid Mahmood Arif, Steven Dirven, and Potgieter, J., 2017, "Robot-assisted 3D printing of biopolymer thin shells," *International Journal of Manufacturing Technology*, **89**, pp. 957-968.
- [100] Grutle, Ø. K., 2015, "5-axis 3D printer," Mestrado Tese de Mestrado, Universidade de Oslo, Oslo.
- [101] Yaoyu Ding, Rajeev Dwivedi, and Kovacevic, R., 2017, "Process planning for 8-axis robotized laser-based direct metal deposition system: A case on building revolved part," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, **44**, pp. 67-76.
- [102] George Q. Zhang, Xiongzi Li, Remus Boca, Jeremy Newkirk, Biao Zhang, and Fuhlbrigge, T. A., 2014 Published, "Use of Industrial Robots in Additive Manufacturing – A Survey and Feasibility Study," *Proc. 45th International Symposium on Robotics*.
- [103] DM3D, 2018, "DMD 44R/66R - ROBOTIC DMD SOLUTIONS ", from http://www.pomgroup.com/index.php?option=com_content&view=article&id=213&Itemid=922, consultado em 11/12/2018.
- [104] Igus, 2017, "Sistema modular robótico robolink®", from <https://www.igus.pt/robolink/robot?tab=1>, consultado em 13/12/2018.
- [105] Igus, 2017, "robolink® DQ – up to 5DOF* (Axis): ... robolink® DQ ... modular kit – 5 DOF* ...", from <https://www.igus.pt/info/news-2017-rl-dq>, consultado em 13/12/2018.

- [106] Igus, 2018, "Data sheets for robolink standard arms (RL-D-RBT-xxxxx-BC-(AE)", from <https://blog.igus.eu/blog/2018/02/06/data-sheets-for-robolink-standard-arms-rl-d-rbt-xxxxx-bc-ae/>, consultado em 13/12/2018.
- [107] Machado, J. A. T., 1994, *Motores passo a passo : controlo e modos de funcionamento* Públindústria, Porto.
- [108] Solarbotics, "Industrial Circuits Application Note: Stepper Motor Basics", from <http://solarbotics.net/library/pdflib/pdf/motorbas.pdf>, consultado em 18/12/2018.
- [109] Gears, Q., "Elements of Metric Gear Technology."
- [110] Harmonicdrive, "Harmonic Gear - HarmonicDrive(r) - Strain Wave Gear Principle", from <http://www.harmonicdrive.net/technology>, consultado em 19/12/2018.
- [111] SchneiderElectric, "What is the difference between PNP and NPN when describing 3 wire connection of a sensor?", from <https://www.schneider-electric.co.uk/en/faqs/FA142566/>, consultado em 23/12/2018.
- [112] NationalInstruments, 2013, "Medições com encoders de quadratura: Guia prático", from <http://www.ni.com/tutorial/7109/pt/>, consultado em 23/12/2018.
- [113] Posital, "Incremental Encoder Interface", from <https://www.posital.com/pt/produtos/interface-de-comunicacao/incremental/incremental-encoder.php>, consultado em 23/12/2018.
- [114] Pepperl+Fuchs, "Incremental Encoder Output Signal Overview", from http://files.pepperl-fuchs.com/selector_files/navi/productInfo/doct/tdoctb0c7_eng.pdf, consultado em 23/12/2018.
- [115] Lorenzo Sciavicco, and Siciliano, B., 2000, *Modelling and Control of Robot Manipulators*, Springer-Verlag London, Londres.
- [116] Lipkin, H., "A note on Denavit-Hartenberg notation in robotics," *Proc. ASME 2005 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference*.
- [117] Lopes, A. M., 2002, *Modelação Cinemática e Dinâmica de manipuladores de estrutura em série*, Porto.
- [118] Hayawi, M. J., 2011, "Analytical Inverse kinematics Algorithm Of A 5-DOF Robot Arm," *Journal of College of Education*, **1**(4), p. 13.
- [119] Qassem;, M. A., Abuhadrous;, I., and Elaydi, H., 2010 Published, "Modeling and Simulation of 5 DOF Educational Robot Arm."
- [120] Yuefa Fang, and Tsai, L.-W., 2003, "Inverse Velocity and Singularity Analysis of Low-DOF Serial Manipulators," *Journal of Robotic Systems*, **20**(4), pp. 177-188.
- [121] Stefano Stramigioli, and Bruyninckx, H., 2001, *Geometry and Screw Theory for Robotics*.
- [122] Zvi S. Roth, Benjamin W. Mooring, and Ravani, B., 1987, "An Overview of Robot Calibration," *IEEE Jpurnal of Robotics and Automation*, **3**(5), pp. 377-385.
- [123] John Hollerbach, Wisama Khalil, and Gautier, M., 2016, *Model Identification*, Springer Handbook of Robotics, Bruno Siciliano, and O. Khatib, eds., Springer, Cham, Chap. 4.
- [124] Alberto Omodei, Giovanni Legnani, and Adamini, R., 2001, "Calibration of a Measuring Robot: Experimental Results on a 5 DOF Structure," *Journal of Robotic Systems*, **18**(5), pp. 237-250.
- [125] Kathleen English, Matthew John D. Hayes, Markus Leitner, and Sallinger, C., "Kinematic Calibration of Six-Axis Robots," *Proc. Proceedings of the CSME Forum 2002*.
- [126] Benjamin W. Mooring, Zvi S. Roth, and Driels, M. R., 1991, *Fundamentals of manipulator calibration*, John Wiley & Sons, inc., Nova Iorque.
- [127] Think3DPrint3D, 2018, "Duet 2 Hardware Overview", from https://duet3d.dozuki.com/Wiki/Hardware_Overview, consultado em 28/12/2018.
- [128] Think3DPrint3D, 2018, "Duex2 and Duex5", from https://duet3d.dozuki.com/Wiki/Duex2_and_Duex5_Features, consultado em 28/12/2018.
- [129] Toshiba, 2017, "SYSTEM CATALOG Motor Solutions Guide " Secondary SYSTEM CATALOG Motor Solutions Guide Secondary Toshiba, ed.

- [130] Think3DPrint3D, 2018, "Firmware Overview", from https://duet3d.dozuki.com/Wiki/Firmware_Overview, consultado em 28/12/2018.
- [131] IndustrialShields, 2018, "Ethernet PLC", from <https://www.industrialshields.com/shop/category/ethernet-plc-1>, consultado em 30/12/2018.
- [132] Skaret, L., 2011, "A Stewart Platform Based Replicating Rapid Prototyping System with Biologically Inspired Path-Optimization " Master Degree Master Thesis, University of Oslo, Oslo.
- [133] GianlucaRS, 2016, "What do you need to control igus Robolink D robotic arm?", from <https://www.rs-online.com/designspark/what-do-you-need-to-control-igus-robolink-d-robotic-arm>, consultado em 28/12/2018.
- [134] GeckoDrive, 2018, "G201X Digital Step Drive ", from <https://www.geckodrive.com/g201x-digital-step-drive.html>, consultado em 28/12/2018.
- [135] LinuxCNC, "LinuxCNC", from <http://linuxcnc.org/>, consultado em 29/12/2018.
- [136] MesaElectronics, "5I25 Superport FPGA based PCI Anything I/O card", from http://store.mesanet.com/index.php?route=product/product&product_id=55, consultado em 29/12/2018.
- [137] MesaElectronics, "7I76 STEP/IO Step&dir plus I/O daughtercard - Sourcing output version", from http://store.mesanet.com/index.php?route=product/product&product_id=119, consultado em 29/12/2018.
- [138] LinuxCNC, 2018, "LinuxCNC Supported Hardware", from http://wiki.linuxcnc.org/cgi-bin/wiki.pl?LinuxCNC_Supported_Hardware, consultado em 29/12/2018.
- [139] BeagleBone, 2018, "BeagleBone®", from <https://beagleboard.org/bone>, consultado em 29/12/2018.
- [140] LinuxCNC, 2018, "HAL Introduction", from http://linuxcnc.org/docs/html/hal/intro.html#_hardware_drivers, consultado em 29/12/2018.
- [141] ChewZ, 2017, "Moveo Robot 5 DOF Kinematic", from http://www.chew-z.it/wiki/doku.php?id=moveo:moveo_kinematic_en, consultado em 30/12/2018.
- [142] Machinekit, 2018, "Machinekit", from <http://www.machinekit.io/>, consultado em 30/12/2018.
- [143] ROS, 2018, "ROS/ Introduction", from <http://wiki.ros.org/ROS/Introduction>, consultado em 1/1/2019.
- [144] ROS, 2014, "ROS/ Concepts", from <http://wiki.ros.org/ROS/Concepts>, consultado em 1/1/2019.
- [145] Lamoine, V., 2017, "ROS Additive Manufacturing", from <https://discourse.ros.org/t/ros-additive-manufacturing-ram/3170>, consultado em 2/1/2019.
- [146] Gier, M. R. d., 2015, "Control of a robotic arm: Application to on-surface 3D-printing," Mater Degree Master Thesis, Delft University of Technology, Delft.
- [147] ROS, 2018, "MoveIt!", from <https://moveit.ros.org/>, consultado em 2/1/2019.
- [148] ROS, 2018, "URDF and SRDF", from http://docs.ros.org/kinetic/api/moveit_tutorials/html/doc/urdf_srdf/urdf_srdf_tutorial.html, consultado em 2/1/2019.
- [149] Weisberg, J., 2017, "Moveo with ROS", from <https://www.jesseweisberg.com/moveo-with-ros/>, consultado em 2/1/2019.
- [150] BCN3D, 2016, "BCN3D MOVEO – A fully Open Source 3D printed robot arm", from <https://www.bcn3dtechnologies.com/en/bcn3d-moveo-the-future-of-learning/>, consultado em 2/1/2019.
- [151] shopclues, "Computer PC full set", from <https://www.shopclues.com/computer-pc-full-set-1.html>, consultado em 2/1/2019.
- [152] Ubuntu, "Ubuntu Logo", from <https://design.ubuntu.com/brand/ubuntu-logo/> consultado em 2/1/2019.
- [153] ROS, "Generation ROS", from <https://www.generationrobots.com/blog/en/ros-robot-operating-system-2/> consultado em 2/1/2019.

- [154] Microsoft, "Microsoft Logo", from <https://www.cultofmac.com/391167/check-out-the-new-microsoft-windows-logo-designed-by-apple/> consultado em 2/1/2019.
- [155] Arduino, "Arduino Logo", from https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Arduino_Logo.svg consultado em 2/1/2019.
- [156] Toshiba, "TB6600 Stepper Motor driver", from <https://www.makerlab-electronics.com/product/tb6600-stepper-motor-driver/> consultado em 2/1/2019.
- [157] E3D, "E3D Titan Aero Extruder", from <https://www.filastruder.com/products/e3d-titan-extruder-aero>, consultado em 2/1/2019.
- [158] Group, E. T., 2018, "EtherCAT - the Ethernet Fieldbus", from <https://www.ethercat.org/en/technology.html>, consultado em 10/10/2018.
- [159] Igus, 2016, "Open source software for the robolink® joint construction kit", from <https://www.igus.pt/info/news-2016-robolink-software-for-programming-articulated-joints>, consultado em 2/1/2019.
- [160] Beckhoff, 2018, "CX5130 | Embedded PC with Intel® Atom™ processor", from <https://www.beckhoff.com/CX5130/>, consultado em 2/1/2019.
- [161] Beckhoff, 2017, "EL70x7: Stepper Motor Terminals, vector control," Secondary EL70x7: Stepper Motor Terminals, vector control, Secondary Beckhoff, ed.1.5.
- [162] RoboDK, 2018, "Simulate Robot Applications: Program any Industrial Robot with One Simulation Environment", from <https://robodk.com/>, consultado em 2/1/2019.
- [163] RoboDK, 2018, "Robot Drivers", from <https://robodk.com/doc/en/Robot-Drivers.html>, consultado em 2/1/2019.
- [164] RoboDK, 2018, "Post Processors", from <https://robodk.com/doc/en/Post-Processors.html>, consultado em 3/1/2019.
- [165] Beckhoff, 2018, "TwinCAT 3 – Platforms", from <https://www.beckhoff.com/english.asp?twincat/twincat-3-platform-classification.htm>, consultado em 3/1/2019.
- [166] Beckhoff, 2017, "EK110x, EK15xx - Documentation," Secondary EK110x, EK15xx - Documentation, Secondary Beckhoff, ed.3.6.
- [167] Anna Bellini, Selçuk Guçeri, and Bertoldi, M., 2004, "Liquefier Dynamics in Fused Deposition," Journal of Manufacturing Science and Engineering, **126**, pp. 237-246.
- [168] Instruments, N., 2017, "Visão geral dos sensores de temperatura", from <http://www.ni.com/white-paper/4218/pt/>, consultado em 14/10/2018.
- [169] Festo, 2016, "Power Supply Stepper - How to choose the correct current rating of the power supplies used for motor controllers," Secondary Power Supply Stepper - How to choose the correct current rating of the power supplies used for motor controllers, Secondary Festo, ed.
- [170] Siemens, 2018, "Selectivity and Fast Fault-Locating in 24V DC Load Circuits", from <https://w3.siemens.com/mcms/power-supply-sitop/en/expansion-modules/selectivity-and-diagnosis-module/pages/default.aspx>, consultado em 17/10/2018.
- [171] Keenovo, 2018, "Diâmetro 200mm, W @ 120 V, w/3 M PSA & NTC 100 K Termistor, Keenovo Redonda Silicone Heater Pad, Delta Aquecedor Impressora 3D, Heatbed", from https://pt.aliexpress.com/item/Dia-200mm-300W-120V-w-3M-PSA-NTC-100K-Thermistor-Keenovo-Round-Silicone-Heater-Pad-Delta/32576487595.html?spm=a2g03.search0104.3.144.1c3138a0mx15Q1&ws_ab_test=searchweb0_0,searchweb201602_3_10065_10068_319_317_10696_10084_453_454_10083_10618_10304_10307_10820_10821_10301_538_537_536_10059_10884_10887_100031_321_322_10103,searchweb201603_51,ppcSwitch_0&algo_expid=5b33938c-f4fd-4926-87e0-76fbb1e3d520-23&algo_pvid=5b33938c-f4fd-4926-87e0-76fbb1e3d520, consultado em 18/12/2018.
- [172] "©Dia 10 400W @ 220 V w/3 M PSA & Termistor, Keenovo Rodada Circular Tanque Aquecedor De Silicone Pad, Delta Impressora 3D Placa de Construir Heatedbed ", from <https://sites.google.com/a/q.bestledlights.cf/a143/Dia-1-4-W-22-V-w-3-M-PSA-Termistor-Keenovo-Rodada-Circular-Tanque-Aquecedor-De>, consultado em 18/12/2018.

- [173] Dupont™, "DUPONT™ KAPTON®-Polyimide Film", from <http://www.dupont.com/content/dam/dupont/products-and-services/membranes-and-films/polyimide-films/documents/DEC-Kapton-general-specs.pdf>, consultado em 19/12/2018.
- [174] Amazon, "MonkeyJack 300X300X3mm Cork Thermal Insulator for 3D Printer Heat Bed with Adhesive Round ", from <https://www.amazon.com/MonkeyJack-300X300X3mm-Thermal-Insulator-Adhesive/dp/B078CQBBLZ>, consultado em 19/12/2018.
- [175] STACBOND, "STACBOND", from <https://www.stacbond.es/paginas/descripcionstacbond>, consultado em 27/12/2018.
- [176] STACBOND, "Especificaciones Técnicas STACBOND®PE," STACBOND, ed.
- [177] G.LealS.A., "Alumínio | Chapa : 5754 H111 ", from <https://www.gleal.pt/files/products/147.pdf>, consultado em 4/1/2019.
- [178] Bosch, "Bosch Rexroth CAD Files - Aluminum Framing", from http://www13.boschrexroth-us.com/partstream/Load_Category.aspx?category=Aluminum%20Framing&menu=1,0,0, consultado em 30/12/2018.
- [179] E3D, 2017, "Titan Aero Assembly", from <https://e3d-online.dozuki.com/Guide/Titan+Aero+Assembly/23>, consultado em 4/1/2019.
- [180] Hejjas, M., 2018, "Titan Aero extruder assembly - CAD 3D File", from <https://grabcad.com/library/titan-aero-extruder-assembly-1>, consultado em 30/12/2018.
- [181] SchneiderElectric, 2018, "Steel wall-mounting enclosures Spacial CRN - plain door without mounting plate", from [http://www.tracepartsonline.net/\(S\(iusvlsshmjen5nut5ru4d4y3\)\)/PartDetails.aspx?Class=SCHNEIDER ELECTRIC DISTRI&clsid=&ManID=SCHNEIDER ELECTRIC DISTRI&PartFamilyID=10-20102016-112771&PartID=10-20102016-112771&sk_Reference=NSYCRN64250&SrchrsltType=4&SrchrsltId=2&SearchedKeywords=NSYCRN64250](http://www.tracepartsonline.net/(S(iusvlsshmjen5nut5ru4d4y3))/PartDetails.aspx?Class=SCHNEIDER ELECTRIC DISTRI&clsid=&ManID=SCHNEIDER ELECTRIC DISTRI&PartFamilyID=10-20102016-112771&PartID=10-20102016-112771&sk_Reference=NSYCRN64250&SrchrsltType=4&SrchrsltId=2&SearchedKeywords=NSYCRN64250), consultado em 23/10/2018.
- [182] All3dp, 2018, "Best 3D Design/3D Modeling Software 2018", from <https://all3dp.com/1/best-free-3d-modeling-software-3d-cad-3d-design-software/>, consultado em 5/1/2019.
- [183] Sajan Kapil, Seema Negi, Prathamesh Joshi, Jitendra Sonwane, Arun Sharma, Ranjeet Bhagchandani, and Karunakaran, K. P., "5-Axis Slicing methods for Additive Manufacturing process," *Proc. Solid Freeform Fabrication 2017: Proceedings of the 28th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium*, pp. 1886-1896.
- [184] D. Ding, Z. Pan, D. Cuiuri, H. Li, N. Larkin, and Duin, S. v., 2015, "Multi-direction Slicing of stl models for robotic wire-feed additive manufacturing," *Semantic Scholar*, pp. 1059-1069.
- [185] Deans, M., 2018, "G-Code: The CNC Programming Language ", from <https://www.autodesk.com/products/fusion-360/blog/cnc-programming-fundamentals-g-code/>, consultado em 6/1/2019.
- [186] Cetinkunt, S., 2014, "Mechatronics with Experiments," John Willey & Sons, Chicago.
- [187] RepRap, 2019, "G-code", from <https://reprap.org/wiki/G-code#G-commands>, consultado em 7/1/2019.
- [188] All3dp, 2019, "2018 3D Printer G-Code Commands – Tutorial & Manual", from <https://all3dp.com/g-code-tutorial-3d-printer-gcode-commands/>, consultado em 7/1/2019.
- [189] LinuxCNC, 2019, "G Code Overview", from <http://linuxcnc.org/docs/html/gcode/overview.html>, consultado em 7/1/2019.
- [190] RepRap, 2015, "Start Gcode routines", from https://reprap.org/wiki/Start_GCode_routines, consultado em 7/1/2019.
- [191] RepRap, 2015, "End GCode routines", from https://reprap.org/wiki/End_GCode_routines, consultado em 7/1/2019.
- [192] Beckhoff, 2018, "TwinCAT 3 - Getting started," *Secondary TwinCAT 3 - Getting started*, Secondary Beckhoff, ed.

- [193] Beckhoff, 2011, "TwinCAT 3 – eXtended Automation Runtime (XAR)", from <https://www.beckhoff.com/english.asp?twincat/twincat-3-extended-automation-runtime.htm>, consultado em 8/1/2019.
- [194] Beckhoff, 2011, "TwinCAT 3 – eXtended Automation Engineering (XAE)", from <https://www.beckhoff.com/english.asp?twincat/twincat-3-extended-automation-engineering.htm>, consultado em 8/1/2019.
- [195] Beckhoff, 2016, "TC1100 | TC3 I/O", from https://www.beckhoff.com/english.asp?twincat/twincat_io.htm, consultado em 8/1/2019.
- [196] Beckhoff, 2017, "TwinCAT 3 NC I," Secondary TwinCAT 3 NC I, Secondary Beckhoff, ed.
- [197] Beckhoff, 2016, "TwinCAT KinematicTransformation," Secondary TwinCAT KinematicTransformation, Secondary Beckhoff, ed.
- [198] Beckhoff, 2016, "TC1200 | TC3 PLC", from <https://www.beckhoff.com/english.asp?twincat/tc1200.htm>, consultado em 8/1/2019.
- [199] Beckhoff, 2018, "Kinematic Transformations_Six Axis Articulated," Secondary Kinematic Transformations_Six Axis Articulated, Secondary Beckhoff, ed.
- [200] Beckhoff, 2017, "EL20xx, EL2124: Digital Output Terminals," Secondary EL20xx, EL2124: Digital Output Terminals, Secondary Beckhoff, ed.4.7.
- [201] Beckhoff, 2018, "EL33xx-00x0: Analog thermocouple input terminal (open-circuit recognition, 1, 2, 4, ch.)," Secondary EL33xx-00x0: Analog thermocouple input terminal (open-circuit recognition, 1, 2, 4, ch.), Secondary Beckhoff, ed.4.1.
- [202] Beckhoff, 2018, "C6015-0010: Ultra compact Industrial PC," Secondary C6015-0010: Ultra compact Industrial PC, Secondary Beckhoff, ed.1.3.
- [203] Beckhoff, 2017, "EL9xxx: EtherCAT System Terminals," Secondary EL9xxx: EtherCAT System Terminals, Secondary Beckhoff, ed.3.7.
- [204] MeanWell, 2013, "RSP-500 series," Secondary RSP-500 series, Secondary MeanWell, ed.
- [205] Beckhoff, 2017, "HDR-15 Sseries," Secondary HDR-15 Sseries, Secondary Beckhoff, ed.
- [206] Idec, 2013, "ø22mm YW Series Control Units," Secondary ø22mm YW Series Control Units, Secondary Idec, ed.

ANEXO A: Fichas técnicas do braço robótico

A.1 - Desenho de conjunto do braço robótico

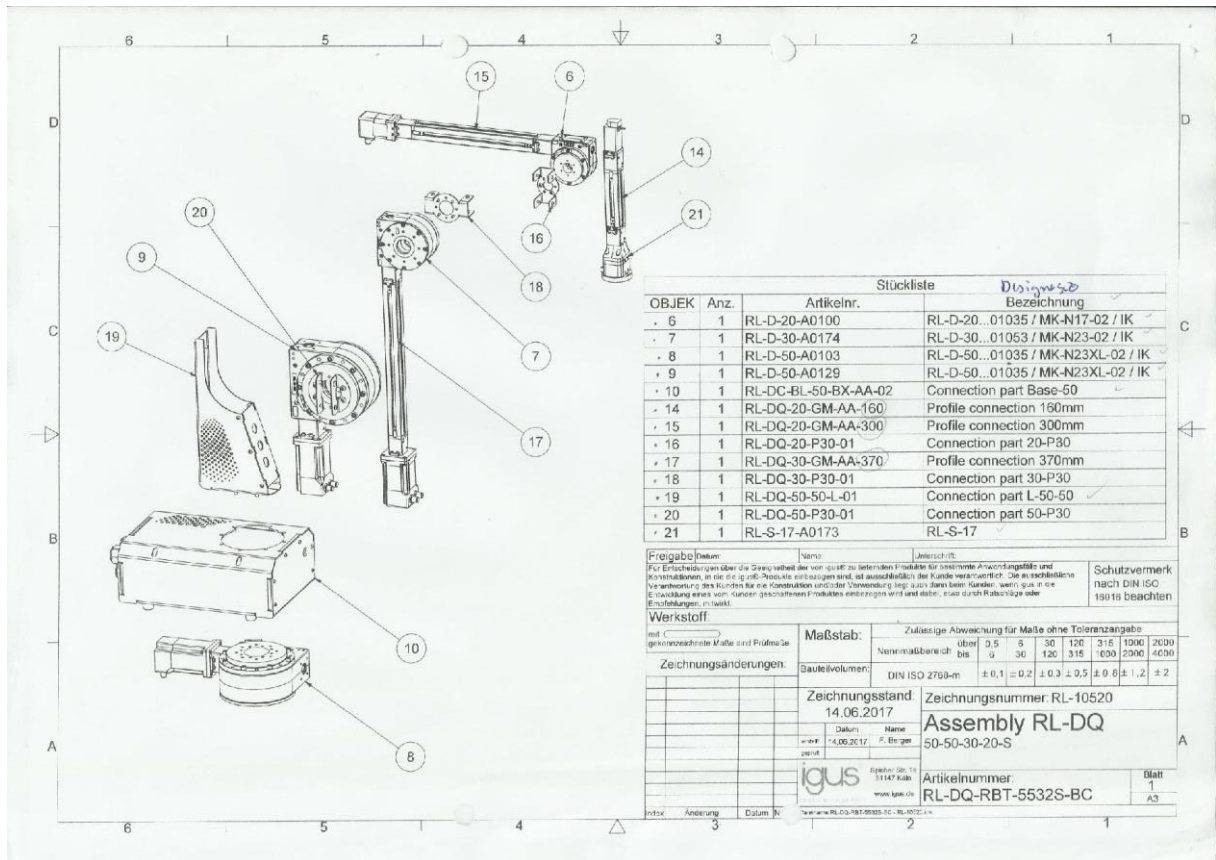


Figura A. 1 – Desenho de conjunto do braço robótico.

A.2 - Características elétricas dos motores passo a passo

stepper motor MOT-AN-S . . .



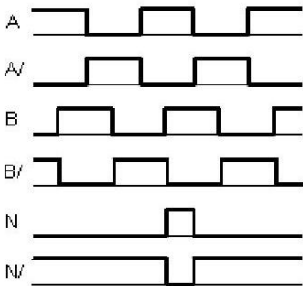
technical data						
flange dimension		28(NEMA11)	42(NEMA17)	56(NEMA23)	60(NEMA23XL)	86(NEMA34)
motor						
max voltage	[VDC]	60	60	60	60	60
nominal voltage	[VDC]	24-48	24-48	24-48	24-48	24-48
nominal current	[A]	1,0	1,8	4,2	4,2	6,4
holding torque	[Nm]	0,12	0,5	2,0	3,5	5,9
detent torque	[Nm]	0,004	0,022	0,068	0,075	0,210
step angle	[°]	1,8 ±5%	1,8 ±5%	1,8 ±5%	1,8 ±5%	1,8 ±5%
resistance / phase	[Ω]	2,30 ±10%	1,75 ±10%	0,50 ±10%	0,65 ±10%	0,33 ±10%
inductance / phase	[mH]	1,80 ±20%	3,30 ±20%	2,20 ±20%	3,20 ±20%	3,00 ±20%
moment of inertia / rotor	[kgcm²]	0,018	0,082	0,48	0,84	2,70
max. shaft load axial	[N]	7	7	15	15	65
max. shaft load radial	[N]	20	20	52	63	200
encoder						
operating voltage	[VDC]	5				
impulse / turn		500				
zero impulse / index		yes				
line-driver		RS422 protocol				
signal sequence (motor rotation clockwise)	CW					
brake						
operating voltage	[VDC]	-	24 ±10%	24 ±10%	24 ±10%	24 ±10%
wattage	[W]	-	8	10	10	11
holding torque	[Nm]	-	0,4	1,0	1,0	2,0
moment of inertia	[kgcm²]	-	0,01	0,02	0,02	0,07
operating condition		The brake may closed not till then the motor idleness.				
weight						
stranded wires	[kg]	0,20	0,38	1,04	1,45	-
plug	[kg]	0,25	0,43	1,12	1,56	3,20
encoder	[kg]	0,27	0,45	1,14	1,58	3,30
encoder and brake	[kg]	-	0,58	1,36	1,82	3,60
operating data						
ambient temperature	[°C]	-10 ...+50				
max temperature rise	[°C]	80				
insulation class		B				
humidity (not condensing)	[%]	85				
protection class engine case		IP65 (shaft seal IP52), motor with stranded wires IP40				
CE		EMV guideline				

Figura A. 2 - Características elétricas dos MPP e encoders do braço robótico.

Anexo A.3 - Estimativa da massa do braço robótico

A massa do robô é uma propriedade importante da sua caracterização e para projetar a sua inclusão no espaço de trabalho. Normalmente esta característica é indicada nas respectivas fichas técnicas, no entanto, no caso do braço robótico *Igus®*, devido à sua modularidade, a sua massa deve ser estimada a partir da massa de cada um dos seus componentes.

A massa de cada um dos MPP e dos elementos de transmissão é dada nas fichas técnicas do robô. A Tabela A. 1 apresenta estes valores de forma sintetizada.

Tabela A. 1 – Massa dos motores passo a passo e das juntas do braço robótico *Igus®*.

	Referência	Massa unitária [kg]	Quantidade	Massa Total [kg]
Motores	NEMA 11	0,27	1	0,27
	NEMA 17	0,45	1	0,45
	NEMA 23	1,04	1	1,04
	NEMA 23XL	1,58	2	3,16
Juntas	RL-S-17 (28:1)	0,4	1	0,17
	RL-D-20...01035 (1:38)	0,47	1	0,47
	RL-D-30...01053 (1:50)	0,89	1	0,89
	RL-D-50...01035 (1:48)	2,3	2	4,6

As fichas técnicas *Igus®* não fornecem informação acerca da massa dos restantes elementos do robô, como braços e elementos de ligação. Como tal, este cálculo será feito por estimativa, a partir dos seus ficheiros CAD. Com o auxílio destes ficheiros, é possível saber com precisão o volume dos componentes, sabendo que a massa volúmica é função do material a utilizar. As fichas técnicas não fornecem informação acerca dos materiais do robô, pelo que são estimados os seus materiais. Apesar de não ser possível determinar com rigor a classe do material, os valores da massa volúmica não variam muito entre classes, e consideram-se aceitáveis para estimar a massa total do robô.

Na

Tabela A. 2 estão representados estes cálculos de forma resumida, tendo em conta as simplificações indicadas.

Tabela A. 2 - Massa dos elementos de conexão, dos elementos de ligação e acessórios do braço robótico Igus®.

Elementos de ligação	Material	Massa Volúmica [kg/m ³]	Volume [mm ³]	Massa [kg]
	Aço 1.0301 (C10)	7850		
Base (RL-DC-BL-50-BX-AA-02)				4,587
RL-DC-BL-50-BX-AA-P			426446,57	3,347
RL-DC-BL-50-BX-AA-01-P			77044,35	0,604
RL-DC-BL-50-BX-AA-02-P			81059,30	0,636
Suporte Vertical (RL-DQ-50-50-L-01)				1,247
RL-DQ-50-50-L-01-P			138770,52	1,089
RL-DQ-50-50-L-01-V			20167,20	0,158
Braços do Robô*	Material	Massa/metro [kg/m]	Comprimento [mm]	Massa [kg]
	Alumínio (perfil bosch)	0,8		
Braço (RL-DQ-30-GM-AA-370)			370	0,296
Braço (RL-DQ-20-GM-AA-300)			300	0,24
Braço (RL-DQ-20-GM-AA-160)			160	0,128
Peças de conexão	Material	Massa Volúmica [kg/m ³]	Volume [mm ³]	Massa [kg]
	Alumínio 3.0205 (EN-AW-1200)	2700		
RL-DQ-P30-01				0,03744
RL-DQ-50-P30-01-P			6934,40	0,01872
RL-DQ-50-P30-01-P			6934,40	0,01872
RL-DQ-30-P30-01			10575,09	0,02855
RL-DQ-20-P30-01			9467,69	0,02556

*Os braços do robô são construídos a partir de perfil de alumínio *Bosch*® de secção 30x30. A determinação da sua massa foi feita com base nos catálogos *Bosch Rexroth*®, que indicam a massa do perfil em função do seu comprimento.

A massa total do robô é então calculada pela soma de todos os componentes (motores, juntas e elementos de ligação). Este valor é de 17,64 kg. Considerando arredondamentos e, para efeitos de dimensionamento, define-se a massa total do robô com sendo 18 kg.

ANEXO B: Modelação Cinemática do Braço Robótico

B.1 - Formulário do Algoritmo de Denavit-Hartenberg

FORMULÁRIO

Algoritmo de Denavit – Hartenberg (D-H):

- D1. *Estabelecimento do referencial da base.* Fixar um referencial ortonormado ($\mathbf{x}_0, \mathbf{y}_0, \mathbf{z}_0$) na base de suporte, com o eixo $\mathbf{z}_0$ coincidindo com o eixo da junta 1 e apontando no sentido do “ombro” do manipulador. Os eixos $\mathbf{x}_0$ e $\mathbf{y}_0$ podem ser convenientemente estabelecidos (de acordo com “regra da mão direita”) e são perpendiculares a $\mathbf{z}_0$.
- D2. *Início.* Para cada $i, i = 1, \dots, n-1$, executar os passos D3 a D6.
- D3. *Estabelecimento dos eixos das juntas.* Fazer coincidir $\mathbf{z}_i$ com o eixo da junta $i+1$.
- D4. *Estabelecimento da origem do referencial i .* Colocar a origem do referencial i na intersecção dos eixos $\mathbf{z}_i$ e $\mathbf{z}_{i-1}$ ou, caso não se intersectem, na intersecção da perpendicular comum aos eixos $\mathbf{z}_i$ e $\mathbf{z}_{i-1}$ com o eixo $\mathbf{z}_i$.
- D5. *Estabelecimento do eixo $\mathbf{x}_i$.* Estabelecer $\mathbf{x}_i = \pm \frac{(\mathbf{z}_{i-1} \times \mathbf{z}_i)}{\|(\mathbf{z}_{i-1} \times \mathbf{z}_i)\|}$ ou, nos outros casos, segundo a perpendicular comum entre $\mathbf{z}_{i-1}$ e $\mathbf{z}_i$ (de $\mathbf{z}_{i-1}$ para $\mathbf{z}_i$).
- D6. *Estabelecimento do eixo $\mathbf{y}_i$.* Fazer $\mathbf{y}_i = + \frac{(\mathbf{z}_i \times \mathbf{x}_i)}{\|(\mathbf{z}_i \times \mathbf{x}_i)\|}$ de modo a completar o referencial de acordo com a “regra da mão direita”.
- D7. *Estabelecimento do referencial do órgão terminal.* Estabelecer $\mathbf{x}_n$ de modo a que seja perpendicular a $\mathbf{z}_{n-1}$ (intersectando-o). Se a última junta for rotativa, alinhar $\mathbf{z}_n$ com $\mathbf{z}_{n-1}$. Colocar $\mathbf{y}_n$ de modo a completar o referencial de acordo com a “regra da mão direita”.
- D8. *Determinação dos parâmetros.* Para cada $i, i = 1, \dots, n$, executar os passos D9 a D12.
- D9. *Determinar d_i .* O parâmetro d_i é a distância da origem do referencial $i-1$ até à intersecção de $\mathbf{z}_{i-1}$ com $\mathbf{x}_i$ segundo $\mathbf{z}_{i-1}$. É variável se a junta i é prismática.
- D10. *Determinar a_i .* O parâmetro a_i é a distância desde a intersecção de $\mathbf{z}_{i-1}$ com $\mathbf{x}_i$, à origem do referencial i , segundo $\mathbf{x}_i$.
- D11. *Determinar θ_i .* O parâmetro θ_i é o ângulo entre $\mathbf{x}_{i-1}$ e $\mathbf{x}_i$, segundo $\mathbf{z}_{i-1}$. É variável se i é rotativa.
- D12. *Determinar α_i .* O parâmetro α_i é o ângulo entre $\mathbf{z}_{i-1}$ e $\mathbf{z}_i$, segundo $\mathbf{x}_i$.

$$\text{Matriz de D-H para os referenciais } i \text{ e } i-1: {}^{i-1}\mathbf{A}_i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\cos \alpha_i \sin \theta_i & \sin \alpha_i \sin \theta_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \alpha_i \cos \theta_i & -\sin \alpha_i \cos \theta_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

Figura B. 1 - Formulário do método de Denavit-Hartenberg.

B.2 - Cálculos auxiliares para obtenção matriz transformação homogênea

A partir da formulação da Equação (4.7):

$$T_5^0 = A_1^0 * A_2^1 * A_3^2 * A_4^3 * A_5^4 \quad (B.1)$$

É possível obter a matriz de transformação homogênea global da Equação (4.8), a partir das matrizes de transformação individuais expressas nas Equações (4.2-4.6). Tendo em conta também as simplificações das Equações (4.9-4.10), é feito o cálculo das respectivas parcelas.

$$A_1^0 * A_2^1 = \begin{bmatrix} -S1C2 & S1S2 & C1 & -bS1C2 + eC1 \\ C1C2 & -C1S2 & S1 & bC1C2 + eS1 \\ S2 & C2 & 0 & bS2 + a \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (B.2)$$

$$(A_1^0 * A_2^1) * A_3^2 = \begin{bmatrix} S1S2S3 - S1C2C3 & S1C2S3 + S1S2C3 & C1 & \dots \\ C1C2C3 - C1S2S3 & -C1C2S3 - C1S2C3 & S1 & \dots \\ S2C3 + C2S3 & -S2S3 + C2C3 & 0 & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots \\ \dots & -cS1C2C3 + cS1S2S3 - bS1C2 & & \\ \dots & cC1C2C3 - cC1S2S3 + bC1C2 & & \\ \dots & cS2C3 + cC2S3 + bS2 + a & & \\ \dots & 1 & & \end{bmatrix} \quad (B.3)$$

Simplificando, de acordo com as Equações (4.9-4.10):

$$(A_1^0 * A_2^1) * A_3^2 = \begin{bmatrix} -S1C23 & S1S23 & C1 & -cS1C23 - bS1C2 \\ C1C23 & -C1S23 & S1 & cC1C23 + bC1C2 \\ S23 & C23 & 0 & cS23 + bS2 + a \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (B.4)$$

Prosseguindo o cálculo temos:

$$(A_1^0 * A_2^1 * A_3^2) * A_4^3 = \begin{bmatrix} S1C23S4 + S1S23C4 & C1 & -S1C23C4 + S1S23S4 & \dots \\ -C1C23S4 - C1S23C4 & S1 & C1C23C4 - C1S23S4 & \dots \\ -S23S4 + C23C4 & 0 & S23C4 + C23S4 & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots \\ \dots & eC1 - cS1C23 - bS1C2 & & \\ \dots & cC1C23 + bC1C2 + eS1 & & \\ \dots & cS23 + bS2 + a & & \\ \dots & 1 & & \end{bmatrix} \quad (B.5)$$

Que pode ser simplificado por:

$$(A_1^0 * A_2^1 * A_3^2) * A_4^3 = \begin{bmatrix} S1S234 & C1 & -S1C234 & eC1 - cS1C23 - bS1C2 \\ -C1S234 & S1 & C1C234 & cC1C23 + bC1C2 + eS1 \\ C234 & 0 & S234 & cS23 + bS2 + a \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (B.6)$$

Por fim:

$$(A_1^0 * A_2^1 * A_3^2 * A_4^3) * A_5^4 = T_5^0 = \begin{bmatrix} S1S234C5 + C1S5 & -S1S234S5 + C1C5 & -S1C234 & \dots \\ -C1S234C5 + S1S5 & C1S234S5 + S1C5 & C1C234 & \dots \\ C234C5 & -C234S5 & S234 & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots \\ \dots & eC1 - S1(dC234 + cC23 + bC2) & & \\ \dots & C1(dC234 + cC23 + bC2) + eS1 & & \\ \dots & dS234 + cS23 + bS2 + a & & \\ \dots & 1 & & \end{bmatrix} \quad (B.7)$$

B.3 - Cálculos auxiliares para obtenção matriz do Jacobiano

O Jacobiano do robô é uma matriz de dimensão [6x5], representada por:

$$J(q) = [J_1(q) \ J_2(q) \ J_3(q) \ J_4(q) \ J_5(q)] \quad (B.8)$$

A determinação da matriz do Jacobiano do braço robótico é feita a partir da formulação da Equação (4.27):

$$J_i(q) = \begin{bmatrix} z_{i-1} \times (p - p_{i-1}) \\ z_{i-1} \end{bmatrix} \quad (B.9)$$

Em primeiro lugar, verifica-se o vetor p , os três primeiros elementos da matriz de transformação homogênea global, Equação (4.8), sendo:

$$p = \begin{bmatrix} -S1(dC234 + cC23 + bC2) + eC1 \\ C1(dC234 + cC23 + bC2) + eS1 \\ dS234 + cS23 + bS2 + a \end{bmatrix} \quad (B.10)$$

Todos os vetores e cálculos vetoriais necessários ao cálculo da Equação (B.9), estão representados a seguir:

$$\begin{aligned} z_0 &= [0 \ 0 \ 1]^T \\ p_0 &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\ z_0 \times (p - p_0) &= \\ \begin{bmatrix} -C1(dC234 + cC23 + bC2) - eS1 \\ -S1(dC234 + cC23 + bC2) + eC1 \\ 0 \end{bmatrix} & \end{aligned} \quad (B.11)$$

$$\begin{aligned} z_1 &= [C1 \ S1 \ 0]^T \\ p_1 &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ a \end{bmatrix} \\ p - p_1 &= \begin{bmatrix} -S1(dC234 + cC23 + bC2) + eC1 \\ C1(dC234 + cC23 + bC2) + eS1 \\ dS234 + cS23 + bS2 \end{bmatrix} \\ z_1 \times (p - p_1) &= \begin{bmatrix} S1(dS234 + cS23 + bS2) \\ -C1(dS234 + cS23 + bS2) \\ dC234 + cC23 + bC2 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (B.12)$$

$$\begin{aligned} z_2 &= [C1 \ S1 \ 0]^T \\ p_2 &= \begin{bmatrix} -bS1C2 + eC1 \\ bC1C2 + eS1 \\ bS2 + a \end{bmatrix} \\ p - p_2 &= \begin{bmatrix} -S1(dC234 + cC23) \\ C1(dC234 + cC23) \\ dS234 + cS23 \end{bmatrix} \\ z_2 \times (p - p_2) &= \begin{bmatrix} S1(dS234 + cS23) \\ -C1(dS234 + cS23) \\ dC234 + cC23 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (B.13)$$

$$\begin{aligned} z_3 &= [C1 \ S1 \ 0]^T \\ p_3 &= \begin{bmatrix} -cS1C23 - bS1C2 \\ cC1C23 + bC1C2 \\ cS23bS2 \end{bmatrix} \\ p - p_3 &= \begin{bmatrix} -dS1C234 + eS1 \\ dC1C234 + eS1 \\ dS234 \end{bmatrix} \\ z_3 \times (p - p_3) &= \begin{bmatrix} dS1S234 \\ -dC1S234 \\ dC234 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (B.14)$$

$$\begin{aligned} z_4 &= [-S1C234 \ C1C234 \ S234]^T \\ p_4 &= \begin{bmatrix} eC1 - cS1C23 - bS1C2 \\ eS1 + cC1C23 + bC1C2 \\ cS23 + bS2 + a \end{bmatrix} \\ p - p_4 &= \begin{bmatrix} -dS1C234 \\ dC1C234 \\ dS234 \end{bmatrix} \\ z_4 \times (p - p_4) &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (B.15)$$

Substituindo os valores calculados na Equação (B.8), a matriz do Jacobiano do manipulador vem dada por:

$$J = \begin{bmatrix} -C1(dC234 + cC23 + bC2) - eS1 & S1(dS234 + cS23 + bS2) & S1(dS234 + cS23) & \dots \\ -S1(dC234 + cC23 + bC2) + eC1 & -C1(dS234 + cS23 + bS2) & -C1(dS234 + cS23) & \dots \\ 0 & dC234 + cC23 + bC2 & dC234 + cC23 & \dots \\ 0 & C1 & C1 & \dots \\ 0 & S1 & S1 & \dots \\ 1 & 0 & 0 & \dots \\ \dots & dS1S234 & 0 & \dots \\ \dots & -dC1S234 & 0 & \dots \\ \dots & dC234 & 0 & \dots \\ \dots & C1 & -S1C234 & \dots \\ \dots & S1 & C1C234 & \dots \\ \dots & 0 & S234 & \dots \end{bmatrix} \quad (B.16)$$

Anexo B.4 - Cálculos auxiliares cinemática inversa

Cálculo de θ_1

Tendo em conta a parametrização de $t = \tan(\frac{\theta_1}{2})$ e a Equação (4.32):

$$C1 = \frac{1 - t^2}{1 + t^2}; S1 = \frac{2t}{1 + t^2}$$

Podemos escrever a Equação (4.31) na forma:

$$Px \left(\frac{1 - t^2}{1 + t^2} \right) + Py \left(\frac{2t}{1 + t^2} \right) = e \quad (B.17)$$

A Equação (B.17) pode ser manipulada, de forma a ser expressa como uma equação de 2º grau, na forma canónica:

$$-(Px + e)t^2 + 2Pyt + Px - e = 0 \quad (B.18)$$

De onde é possível estabelecer que:

$$t = \frac{Py \pm \sqrt{(Py^2 - Px^2 + e^2)}}{Px + e} \quad (B.19)$$

E finalmente:

$$\theta_1 = 2 \operatorname{atan2}(Py \pm \sqrt{(Py^2 - Px^2 + e^2)}, Px + e)$$

Cálculo de θ_3

O cálculo de θ_3 é feito a partir das igualdades expressas nas Equações (4.34) e (4.35):

$$PyC1 - PxS1 = dC234 + cC23 + bC2$$

$$Pz - a = dS234 + cS23 + bS2$$

Elevando cada um dos membros das equações ao quadrado e somando-os, esta igualdade toma a forma:

$$(PyC1 - PxS1 - dC234)^2 + (Pz - a - dS234)^2 = c^2 + b^2 + 2bcC3 \quad (B.20)$$

Reformulando a igualdade e rearranjando a equação, é possível escrever:

$$C3 = \frac{(PyC1 - PxS1 - dC234)^2 + (Pz - a - dS234)^2 - c^2 - b^2}{2bc} \quad (B.21)$$

O cálculo de θ_3 é finalizado, conhecendo o valor de θ_{234} , da seguinte forma:

$$S3 = \pm \sqrt{1 - C3^2} \quad (B.22)$$

$$\theta_3 = \operatorname{atan2}(S3, C3) \quad (B.23)$$

Cálculo de θ_2

O cálculo de θ_2 é feito a partir do conhecimento de θ_3 , definido anterioremtne e tendo em conta as Equações (4.34) e (4.35), expressas na forma de sistema de equações:

$$\begin{cases} PyC1 - PxS1 = dC234 + cC23 + bC2 \\ Pz - a = dS234 + cS23 + bS2 \end{cases} \quad (B.24)$$

A segunda equação pode ser escrita da seguinte forma:

$$S2 = \frac{Pz - a - dS234 - cC2S3}{cC3 + b} \quad (B.25)$$

Substituindo o resultado da Equação (B.25) na primeira equação do sistema:

$$PyC1 - PxS1 - dC234 = cC2C3 - S3 \left(\frac{Pz - a - dS234 - cC2S3}{cC3 + b} \right) + bC2 \quad (B.26)$$

Por sua vez, a Equação (B.25) pode ser manipulada matematicamente, para ser escrita em função de $C2$:

$$(cC3 + b)(PyC1 - PxS1 - dC234) = (cC3 + b)cC2C3 - cS3(Pz - a - dS234 - cC2S3) + (cC3 + b)bC2 \quad (B.27)$$

$$(cC3 + b)(PyC1 - PxS1 - dC234) + cS3(Pz - a - dS234) = C2[(cC3 + b)cC3 + c^2S3^2 + (cC3 + b)b] \quad (B.28)$$

$$(cC3 + b)(PyC1 - PxS1 - dC234) + cS3(Pz - a - dS234) = C2(c^2 + 2bcC3 + b^2) \quad (B.29)$$

$$(cC3 + b)(PyC1 - PxS1 - dC234) + cS3(Pz - a - dS234) = C2[(cC3 + b)^2 + c^2S3^2] \quad (B.30)$$

Desta forma, é possível definir:

$$C2 = \frac{(cC3 + b)(PyC1 - PxS1 - dC234) + cS3(Pz - a - dS234)}{(cC3 + b)^2 + c^2S3^2} \quad (B.31)$$

Assim, o cálculo de θ_2 vem dado por:

$$S2 = \pm\sqrt{1 - C2^2} \quad (B.32)$$

$$\theta_2 = \text{atan2}(S2, C2) \quad (B.33)$$

Anexo B.5 - Teoria dos *screws* recíprocos

A teoria dos *screws* recíprocos é utilizada para caracterizar o movimento de corpos rígidos, com base na definição de velocidades lineares e angulares e aplicação de forças num determinado corpo.

Um *screw* unitário é definido como uma matriz [6x1] na forma:

$$\hat{\$}_j = \begin{bmatrix} s_j \\ r_j \times s_j + \lambda s_j \end{bmatrix} \quad (\text{B. 34})$$

Onde:

- s_j , é um vetor unitário, que aponta na direção do eixo do *screw*,
- r_j , é o vetor posição de qualquer ponto no eixo da junta, expresso em relação ao referencial de referência,
- $r_j \times s_j$, define o movimento linear de um ponto que passa pela origem do referencial de referência, e que está rigidamente ligado ao espaço que está a rodar em torno do eixo do *screw*.
- λ , é o passo do *screw*, sendo $\lambda=0$ para juntas rotativas e $\lambda=\infty$ para juntas prismáticas
- j , é o denominador utilizado para indicar o *screw* associado à junta j .

No caso de um manipulador série, o movimento do órgão terminal é considerado como a rotação instantânea dos eixos das juntas de uma cadeia aberta. Estas rotações podem ser adicionadas linearmente para se obter a rotação do órgão terminal, isto é:

$$\$_n = \begin{bmatrix} \hat{\$}_1 & \hat{\$}_2 & \dots & \hat{\$}_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dots \\ \dot{q}_n \end{bmatrix} \quad (\text{B. 35})$$

Em que a rotação do órgão terminal é representada por:

$$\$_n = \begin{bmatrix} \omega_n \\ v_0 \end{bmatrix} \quad (\text{B. 36})$$

Sendo:

- ω_n , é a velocidade angular,
- v_0 , é a velocidade linear de um ponto do órgão terminal, que é instantaneamente coincidente com a origem do referencial de referência, e
- $\dot{q}_j$, é a velocidade da junta j .

Esta formulação permite constatar que a matriz do Jacobiano resulta da junção de todos os *screws* unitários, ou seja:

$$J = \begin{bmatrix} \hat{\$}_1 & \hat{\$}_2 & \dots & \hat{\$}_n \end{bmatrix} \quad (\text{B. 37})$$

Para o caso de $n < 6$, existem $6 - n$ *screws* linearmente independentes, designados *wrenches*, que formam um sistema de dimensão $(6 - n)$. Cada *wrench* no sistema $(6 - n)$ é recíproco ao sistema de rotações de dimensão n .

Neste contexto, um *wrench* tem um significado físico equivalente à aplicação de forças em corpos rígidos, no espaço tridimensional. Assim, um *wrench* é definido por:

$$\$_r = \begin{bmatrix} f \\ r_0 \times f + c \end{bmatrix} = \rho \hat{\$}_r \quad (\text{B. 38})$$

Onde:

- $\$_r$, é um *wrench* genérico,
- ρ , é a intensidade do *wrench*.
- r_0 , é o vetor posição de um determinado ponto,
- f , representa uma força aplicada num determinado ponto, e
- c , representa a força de reação de f

Um *wrench* unitário é definido por:

$$\hat{\$}_r = \begin{bmatrix} s_r \\ r_0 \times s_r + \lambda_r s_r \end{bmatrix} \quad (\text{B. 39})$$

Onde:

$\hat{\$}_r$, é um *wrench* unitário

s_r , é um vetor unitário que aponta na direção da força aplicada,

r_0 , é o vetor de posição de um determinado ponto, e, por isso,

$r_0 \times s_r$, representa o momento exercido por s_r em relação à origem do referencial, e

λ_r é o passo do *wrench* unitário, sendo $\lambda_r = 0$, no caso de aplicação de uma força pura e $\lambda_r = \infty$, no caso de um momento puro (*pure couple*)

Se aplicarmos a condição de reciprocidade a cada *screw* unitário obtemos:

$$\hat{\$}_j^T \$_{ri} = 0 \quad (i = 1, 2, \dots, 6 - n \text{ e } j = 1, 2, \dots, n) \quad (\text{B. 40})$$

Em que a transposta de um *screw* é definida por:

$$\hat{\$}_j^T = [S_{j4} \quad S_{j5} \quad S_{j6} \quad S_{j1} \quad S_{j2} \quad S_{j3}] \quad (\text{B. 41})$$

De tal forma que:

$$\hat{\$}_j^T \$_{ri} = S_{j4}S_{ri1} + S_{j5}S_{ri2} + S_{j6}S_{ri3} + S_{j1}S_{ri4} + S_{j2}S_{ri5} + S_{j3}S_{ri6} \quad (\text{B. 42})$$

Em que:

S_{ji} , ($i = 1, 2, \dots, 6$), é o componente número i do *screw* unitário j , $\hat{\$}_j$,

S_{rik} , ($k = 1, 2, \dots, 6$), é o componente número k do *screw* recíproco i , $\$_{ri}$.

Pré-multiplicando os dois lados da Equação (B.35) por $\hat{\$}_{ri}$, obtemos:

$$\hat{\$}_{ri}^T \$_n = S_{ri4}\omega_x + S_{ri5}\omega_y + S_{ri6}\omega_z + S_{ri1}v_x + S_{ri2}v_y + S_{ri3}v_z = 0 \quad (\text{B. 43})$$

A Equação (B.43) escrita para $i = 1, 2, \dots, 6 - n$, resulta em $6 - n$ equações que restringem o movimento do órgão terminal. Consequentemente, $6 - n$ componentes de velocidade dependentes podem ser calculados em relação aos n termos independentes de velocidade.

Abordagem por espaço nulo para identificação de *screws* recíprocos

Para se resolver a Equação (B.43), que descobre os valores das variáveis dependentes, é necessário identificar $(6 - n)$ *screws* que sejam recíprocos ao sistema de ordem n de *screws* de juntas. Para esse efeito, este método recorre ao conceito de espaço nulo.

Recorrendo à Equação (B.40) para $j = 1, 2, \dots, n$, serão obtidas n equações que podem ser compostas na forma matricial:

$$J^* \$_{ri} = [0] \quad (i = 1, 2, \dots, 6 - n) \quad (\text{B. 44})$$

Onde:

$$J^* = UJ \quad (\text{B. 45})$$

$$U = \begin{bmatrix} 0_{3 \times 3} & \cdot & I_{3 \times 3} \\ \dots & \cdot & \dots \\ I_{3 \times 3} & \cdot & 0_{3 \times 3} \end{bmatrix} \quad (\text{B. 46})$$

Sendo:

$I_{3 \times 3}$, a matriz identidade de dimensão $[3 \times 3]$, e

$0_{3 \times 3}$, uma matriz nula de dimensão $[3 \times 3]$

Admitindo que o espaço nulo de J^* é $N(J^*)$, a Equação (B.44) implica que $\$_{ri} \in N(J^*)$. Isto é, os $(6 - n)$ *screws* recíprocos formam a base de $N(J^*)$. Assim sendo, a solução dos $(6 - n)$ *screws* linearmente independentes está diretamente relacionada com a solução do espaço nulo de J^* .

Sendo u um vetor de 6 dimensões, o espaço nulo de J^* é o conjunto de todos os vetores u que satisfazem a condição:

$$J^* u = [0] \quad (\text{B. 47})$$

Como a Equação (B.47) contém n equações lineares e 6 incógnitas, trata-se de um sistema indeterminado. Se assumirmos que a característica de J^* é n , podemos dividir as matrizes J^* e u da seguinte forma:

$$J^* = [J_p \ J_s] \quad (B.48)$$

$$u = \begin{bmatrix} u_p \\ u_s \end{bmatrix} \quad (B.49)$$

Em que $J_p \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $J_s \in \mathbb{R}^{n \times (6-n)}$, $u_p = [u_1, u_2, \dots, u_n]^T$ e $u_s = [u_{n+1}, u_{n+2}, \dots, u_6]^T$. Neste sentido, a Equação (B.47) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$J_p u_p = -J_s u_s \quad (B.50)$$

Esta formulação implica que, para cada escolha do vetor u_s , existe uma única solução para u_p que pode ser calculada com recurso à regra de Cramer. Uma vez que a dimensão de u_s é $(6-n) \times 1$, existem $6-n$ soluções infinitas que formam o espaço nulo de J^* . Cada vetor u no espaço nulo pode ser expresso como uma combinação linear de $6-n$ vetores de base linearmente independentes $\hat{u}_i$ ($i = 1, 2, \dots, 6-n$), de forma a que:

$$u = k_1 \hat{u}_1 + k_2 \hat{u}_2 + \dots + k_{6-n} \hat{u}_{6-n} \quad (B.51)$$

Em que k_i são constantes. Da teoria de álgebra linear, os componentes de cada vetor da base, $\hat{u}_j = [u_{j1}, u_{j2}, u_{j3}, u_{j4}, u_{j5}, u_{j6}]^T$ ($j = 1, 2, \dots, 6-n$) são obtidos através de:

$$u_{jk} = \begin{cases} -\frac{\det(J_{kj}^*)}{\det(J_p^*)}, & \text{para } k = 1, 2, \dots, n, k \neq j \\ 1, & \text{para } k = j \\ 0, & \text{para } k > n, k \neq j \end{cases} \quad (B.52)$$

Onde J_{kj}^* é criada substituindo a coluna k da matriz J_p por a coluna j da matriz J_s . É de notar que a matriz J^* deve ser dividida de forma a que o determinante de J_p não seja igual a zero.

Os $(6-n)$ vetores da base formam a base do sistema de *screws* recíprocos. Qualquer *screw* recíproco no sistema de dimensão $(6-n)$ pode ser expresso como uma combinação linear dos vetores da base.

Uma vez que a matriz do Jacobiano é dependente da configuração, também o sistema de *screws* recíprocos é dependente da configuração.

ANEXO C: Documento de apoio ao projeto da instalação elétrica

C.1 - Fichas técnicas dos componentes elétricos

C.1.1 - Carta EL7047

BECKHOFF

Product overview

2.2.2 EL7047 - Technical data

Technical data	EL7047
Number of outputs	1 stepper motor, 2 phases
Number of digital inputs	2 limit position, 4 for an encoder system
Number of digital outputs	1 configurable for brake (0.5 A)
Supply voltage	8 ... 50 V DC
Output current without fan cartridge Z88610	5 A (overload- and short-circuit-proof)
Output current with fan cartridge Z88610	6.5 A (overload- and short-circuit-proof)
Operating modes	Standard mode (velocity direct / position controller) Field-oriented control (extended velocity mode / extended position mode) Sensorless operation Travel distance control (positioning interface)
Maximum step frequency	1000, 2000, 4000, 8000 or 16000 full steps/s (configurable)
Step pattern	up to 64-fold micro stepping (automatic switching, speed-dependent)
Current controller frequency	approx. 30 kHz
Encoder pulse frequency	maximum 400,000 increments/s (4-fold evaluation)
Input signal voltage "0"	-3 V ... 2 V
Input signal voltage "1"	3.7 V ... 28 V
Input current	typ. 5 mA
Diagnostics LED	Warning strand A and B, error strand A and B, power, enable
Resolution	approx. 5,000 positions in typical applications (per revolution)
Power supply	via the E-bus, encoder/driver stage: via the power contacts, motor: via terminal contacts
Current consumption from the E-bus	typ. 140 mA
Electrical isolation	500 V (E-bus/signal voltage)
Support NoCoEStorage (p. 33)	yes
Configuration	no address setting required Configuration via TwinCAT System Manager
Weight	approx. 105 g
Permissible ambient temperature range during operation	0°C ... +55°C
Permissible ambient temperature range during storage	-25°C ... + 85°C
Permissible relative humidity	95%, no condensation
Dimensions (W x H x D)	approx. 27 mm x 100 mm x 70 mm (connected width: 24 mm)

Figura C. 1 - Ficha técnica do módulo Beckhoff EL7047 [161].

C.1.2 - Carta EL7037

Product overview

BECKHOFF

2.1.2 EL7037 - Technical data

Technical data	EL7037
Number of outputs	1 stepper motor, 2 phases
Number of digital inputs	2 limit position, 4 for an encoder system
Number of digital outputs	1 configurable for brake (0.5 A)
Supply voltage	24 V DC (-15 %/+20 %)
Output current without fan cartridge Z88610	1.5 A (overload- and short-circuit-proof)
Output current with fan cartridge Z88610	3.0 A (overload- and short-circuit-proof)
Operating modes	Standard mode (velocity direct / position controller) Field-oriented control (extended velocity mode / extended position mode) Sensorless operation Travel distance control (positioning interface)
Maximum step frequency	1000, 2000, 4000, 8000 or 16000 full steps/s (configurable)
Step pattern	up to 64-fold micro stepping (automatic switching, speed-dependent)
Current controller frequency	approx. 30 kHz
Encoder pulse frequency	maximum 400,000 increments/s (4-fold evaluation)
Input signal voltage "0"	-3 V ... 2 V
Input signal voltage "1"	3.7 V ... 28 V
Input current	typ. 5 mA
Diagnostics LED	Warning strand A and B, error strand A and B, power, enable
Resolution	approx. 5,000 positions in typical applications (per revolution)
Power supply	via the E-bus, encoder/driver stage: via the power contacts, motor: via terminal contacts
Current consumption from the E-bus	typ. 100 mA
Electrical isolation	500 V (E-bus/signal voltage)
Support NoCoEStorage (p. 33)	yes
Configuration	no address setting required Configuration via TwinCAT System Manager
Weight	approx. 60 g
Permissible ambient temperature range during operation	0°C ... +55°C
Permissible ambient temperature range during storage	-25°C ... + 85°C
Permissible relative humidity	95%, no condensation
Dimensions (W x H x D)	approx. 15 mm x 100 mm x 70 mm (connected width: 12 mm)

Figura C. 2 - Ficha técnica do módulo Beckhoff EL7037 [161].

C.1.3 - Carta EL2008

Product overview, digital output terminals

BECKHOFF

3.1.4 EL2002, EL2004, EL2008 - Technical data

Technical data	EL2002	EL2004	EL2008
Number of outputs	2	4	8
Non-reactive outputs	-	yes (see notice [► 14])	yes (see notice [► 14])
Load type	ohmic, inductive, lamp load		
Nominal output voltage	24 V _{DC} (-15% / +20%)		
Switching times	T _{ON} : 60 µs typ.; T _{OFF} : 300 µs typ.		
Output current per channel	maximum 0.5 A (short-circuit proof)		
Switch-off energy (inductive)	max. 150 mJ/channel		
Current consumption from load voltage (power contacts)	typ. 15 mA		
Supply voltage for electronic	via the E-Bus		
Current consumption via E-bus	typ. 100 mA	typ. 100 mA	typ. 110 mA
Electrical isolation	500 V (E-bus/field voltage)		
Bit width in the process image	2 output bits	4 output bits	8 output bits
Configuration	no address setting, configuration via TwinCAT System Manager		
Weight	approx. 55 g		
Permissible ambient temperature range during operation	-25°C ... +60°C (extended temperature range)		
	Aligned in horizontal installation position: -25°C ... +60°C (extended temperature range) All other installation positions, see note [► 74] : -25°C ... +45°C		
Permissible ambient temperature range during storage	-40°C ... +85°C		
Permissible relative humidity	95%, no condensation		
Dimensions (W x H x D)	approx. 15 mm x 100 mm x 70 mm (width aligned: 12 mm)		

Figura C. 3 - Ficha técnica do módulo Beckhoff EL2008 [200].

Anexo C.1.4 - Carta EL3318

BECKHOFF

Product overview

2.5.2 Technical data

Technical data	EL3318
Number of inputs	8
Thermocouple sensor types	Types J, K, L, B, E, N, R, S, T, U, C (default setting type K), mV measurement
Input filter limit frequency	1 kHz typ.; depending on sensor length, conversion time, sensor type
Connection technology	2-wire
Maximum cable length to the thermocouple	30 m (see note [► 31])
Measuring range	in the range defined in each case for the sensor (default setting: type K; -200 ... +1370°C) Voltage: ± 30 mV (1 µV resolution) up to ± 75 mV (4 µV resolution)
Resolution	0.1/0.01 °C per digit
Supports NoCoeStorage [► 40] function	yes, from firmware 01
Wiring fail indication	yes
Conversion time	approx. 3.5 s to 30 ms, depending on configuration and filter setting, default: approx. 380 ms
Measuring error	< ±0.3 % (relative to full scale value)
Voltage supply for electronics	via the E-bus
Distributed Clocks	-
Current consumption via E-bus	typ. 210 mA
Bit width in the process data image	max. 32 byte input, max. 18 byte output
Electrical isolation	500 V (E-bus/field voltage)
Configuration	via TwinCAT System Manager
Weight	approx. 70 g
Permissible ambient temperature range during operation	-25°C ... +80°C (extended temperature range)
Permissible ambient temperature range during storage	-40°C ... +85°C
Permissible relative humidity	95%, no condensation
Dimensions (W x H x D)	approx. 15 mm x 100 mm x 70 mm (width aligned: 12 mm)

Figura C. 4 - Ficha técnica do módulo Beckhoff EL3318 [201].

C.1.5 - PC Industrial C6015-0010

BECKHOFF New Automation Technology

Technical Data

7 Technical Data

 Danger	Risk of explosion! Do not use the Industrial PC in areas of explosive hazard!
--	--

Product name	C6015-0010
Dimensions (B x H x T)	see chapter Assembly dimensions
Weight	approx. 400 g without mounting sheet approx. 450 g with mounting sheet
Supply voltage	22–30V V _{DC} (24 V _{DC} power supply unit)
Power consumption	max. 14 W (basic configuration)
Interfaces	2 x RJ-45 Ethernet 100/1000BASE-T 1 x Display-Port 1 x USB 2.0 1 x USB 3.0
Protection class	IP20
Shock resistance (Sinusoidal vibration)	EN 60068-2-6: 10 to 58 Hz: 0,035 mm 58 to 500 Hz: 0,5 G (~ 5 m/s ²)
Shock resistance (Shock)	EN 60068-2-27: 5 G (~ 50 m/s ²), duration: 30 ms
EMC compatibility	Resistance to interference conforms to EN 61000-6-2
EMC compatibility	Emission of interference conforms to EN 61000-6-4
Permissible ambient temperature	0°C to +55°C (operation) -25°C to +65°C (transport/ storage)

Figura C. 5 - Ficha técnica do PC Industrial Beckhoff C6015-0010 [202].

C.1.6 - Carta EK1100

Product overview

BECKHOFF

2.2.1.2 EK1100 - Technical data

Technical data	EK1100
Task within the EtherCAT system	Coupling of EtherCAT Terminals (ELxxxx) to 100BASE-TX EtherCAT networks
Number of EtherCAT Terminals	Up to 85535 in the overall system
Number of peripheral signals	max. 4.2 GB addressable IO points
Transmission medium	at least Ethernet CAT-5 cable
Cable length between two Bus Couplers	max. 100 m (100BASE-TX)
Protocol / Baud rate	EtherCAT Device Protocol / 100 MBaud
HotConnect	no
Delay	typical 1 µs
Bus connection	2 x RJ45
Power supply	24 V _{DC} (-15%/+20%)
Current consumption	70 mA + (E-bus current)/4
E-bus power supply (5 V)	max. 2000 mA (-25°C ... +55°C)
(at higher current consumption the EL9410 power feed terminal can be used in addition)	max. 1000 mA (> +55°C)
Power contacts	max. 24 V _{DC} , max. 10 A
Electrical isolation	500 V (power contact/supply voltage/EtherCAT)
Dimensions (W x H x D)	approx. 44 mm x 100 mm x 68 mm

Figura C. 6 - - Ficha técnica do módulo Beckhoff EK1100 [166].

C.1.7 - Carta EL9100

Technical data

Technical data	EL9100	EL9110	EL9190
Nominal voltage	24 V DC		variable, up to 230 V AC/DC
Power contact current load	max. 10 A		
Electrical isolation	500 V (E-bus/field potential)		
Current consumption from E-Bus	-	typ. 90 mA	-
Bit width in the process image	-	1 bit (diagnosis)	-
Configuration	no address or configuration settings		
Power LED	yes	yes	no
Diagnosis	no	yes, in process image	no
Electrical connection to mounting rail	no		
PE contact	yes		
Weight	approx. 50 g		
Permissible ambient temperature range (during operation)	-25°C ... +60°C (extended temperature range)		0°C ... +55°C
Permissible ambient temperature range (during storage)	-40°C ... +85°C		-25°C ... +85°C
Permissible relative humidity	95%, no condensation		
Dimensions (W x H x D)	approx. 15 mm x 100 mm x 70 mm (width aligned: 12 mm)		
Mounting [p. 63]	on 35 mm mounting rail conforms to EN 60715		
Vibration/shock resistance	conforms to EN 60068-2-6/EN 60068-2-27, see Installation instructions [p. 66] for enhanced mechanical load capacity		conforms to EN 60068-2-6/EN 60068-2-27
EMC resistance burst/ESD	conforms to EN 61000-6-2/EN 61000-6-4		
Protect. class	IP 20		
Installation pos.	variable, see chapter " Mounting of Passive Terminals [p. 72] "	variable	variable, see chapter " Mounting of Passive Terminals [p. 72] "
Approval	CE ATEX [p. 74] cULus [p. 75]		CE cULus [p. 75]

Figura C. 7 - Ficha técnica do módulo Beckhoff EL9100 [203].

C.1.8 - Fonte de alimentação RSP-500



500W Single Output with PFC Function

RSP-500 series



■ Features :

- Universal AC input / Full range
- Built-in active PFC function, PF>0.95
- Protections: Short circuit / Overload / Over voltage / Over temperature
- Forced air cooling by built-in DC Fan with fan ON-OFF control function
- 1U low profile 40.5mm
- High efficiency up to 90.5%
- Built-in remote ON-OFF control
- Built-in remote sense function
- LED indicator for power on
- 3 years warranty



SPECIFICATION

MODEL		RSP-500-3.3	RSP-500-4	RSP-500-5	RSP-500-12	RSP-500-15	RSP-500-24	RSP-500-27	RSP-500-48
OUTPUT	DC VOLTAGE	3.3V	4V	5V	12V	15V	24V	27V	48V
	RATED CURRENT	90A	90A	90A	41.7A	33.4A	21A	18.6A	10.5A
	CURRENT RANGE	0 ~ 90A	0 ~ 90A	0 ~ 90A	0 ~ 41.7A	0 ~ 33.4A	0 ~ 21A	0 ~ 18.6A	0 ~ 10.5A
	RATED POWER	297W	360W	450W	500.4W	501W	504W	502.2W	504W
	RIPPLE & NOISE (max.) Nota.2	120mVp-p	120mVp-p	150mVp-p	150mVp-p	150mVp-p	150mVp-p	150mVp-p	150mVp-p
	VOLTAGE ADJ. RANGE	2.8 ~ 3.6V	3.6 ~ 4.3V	4.5 ~ 5.5V	10 ~ 13.2V	13.5 ~ 18V	20 ~ 26.4V	26 ~ 30V	41 ~ 56V
	VOLTAGE TOLERANCE Nota.3	±2.0%	±2.0%	±2.0%	±1.0%	±1.0%	±1.0%	±1.0%	±1.0%
	LINE REGULATION	±0.5%	±0.5%	±0.5%	±0.3%	±0.3%	±0.2%	±0.2%	±0.2%
	LOAD REGULATION	±1.0%	±1.0%	±1.0%	±0.5%	±0.5%	±0.5%	±0.5%	±0.5%
	SETUP, RISE TIME	1500ms, 80ms/230VAC 3000ms, 80ms/115VAC at full load							
HOLD UP TIME (Typ.)	18ms/230VAC 14ms/115VAC at full load								
VOLTAGE RANGE Nota.4	85 ~ 264VAC 120 ~ 370VDC								
FREQUENCY RANGE	47 ~ 63Hz								
POWER FACTOR (Typ.)	PF>0.95/230VAC PF>0.98/115VAC at full load								
EFFICIENCY (Typ.)	81%	83%	83%	89%	88%	89%	89.5%	90.5%	
AC CURRENT (Typ.)	4.2A/115VAC 2.1A/230VAC 5.3A/115VAC 2.65 A/230VAC								
INRUSH CURRENT (Typ.)	20A/115VAC 40A/230VAC								
LEAKAGE CURRENT	<2mA / 240VAC								

Figura C. 8 - Ficha técnica das fontes de alimentação da série RSP-500, referente às fontes RSP-500-48 e RSP-500-24 [204].

C.1.9 Fonte de alimentação HDR-15



15W Ultra Slim Step Shape DIN Rail

HDR-15 series

SPECIFICATION

MODEL		HDR-15-5	HDR-15-12	HDR-15-15	HDR-15-24	HDR-15-48
OUTPUT	DC VOLTAGE	5V	12V	15V	24V	48V
	RATED CURRENT	2.4A	1.25A	1A	0.63A	0.32A
	CURRENT RANGE	0 ~ 2.4A	0 ~ 1.25A	0 ~ 1A	0 ~ 0.63A	0 ~ 0.32A
	RATED POWER	12W	15W	15W	15.2W	15.4W
	RIPPLE & NOISE (max.) Note.2	80mVp-p	120mVp-p	120mVp-p	150mVp-p	240mVp-p
	VOLTAGE ADJ. RANGE	4.5 ~ 5.5V	10.8 ~ 13.8V	13.5 ~ 18V	21.6 ~ 28V	43.2 ~ 56.2V
	VOLTAGE TOLERANCE Note.3	±2.0%	±1.0%	±1.0%	±1.0%	±1.0%
	LINE REGULATION	±1.0%	±1.0%	±1.0%	±1.0%	±1.0%
	LOAD REGULATION	±1.0%	±1.0%	±1.0%	±1.0%	±1.0%
SETUP, RISE TIME	2000ms, 80ms/230VAC 2000ms, 80ms/115VAC at full load					
HOLD UP TIME (Typ.)	30ms/230VAC 12ms/115VAC at full load					
INPUT	VOLTAGE RANGE	85 ~ 264VAC / (77VAC operational) 120 ~ 370VDC / (360VDC operational)				
	FREQUENCY RANGE	47 ~ 63Hz				
	EFFICIENCY (Typ.)	80%	85%	85.5%	86%	87%
	AC CURRENT (Typ.)	0.5A/115VAC 0.25A/230VAC				
	INRUSH CURRENT (Typ.)	COLD START 25A/115VAC 45A/230VAC				

Figura C. 9 - Ficha técnica da fonte de alimentação HDR-15-5 [205].

C.1.10 Sinal luminoso para ligar motor

YW Series Control Units

Space-saving, 10-mm-thick contact blocks. Removable operator.

- Compact and light-weight
- IP20 finger-safe screw terminals (IEC 60529)
- Emergency stop switches feature safety lock mechanism, direct opening action, and safe pushbutton design.
- Metal bezel, unibody pilot lights, and key selector switches available.
- Separate contact block makes installation and removal easy. Pilot lights feature a large lens for a wide viewing angle.
- Matted surfaces on the buttons, lenses, and bezels reduce reflection of ambient light.
- UL, c-UL listed, EN compliant, and CCC approved.



(Emergency Stop Switch)

- UL508, CSA C22.2 No. 14, EN 60947-1, EN 60947-5-1, EN 60947-5-5, GB 14048.5



Contact Ratings (Contact Block)

Rated Insulation Voltage	600V			
Rated Thermal Current	10A			
Operating Voltage	24V	120V	240V	380V
AC 50/60 Hz	Resistive Load (AC-12)	10A	10A	6A
	Inductive Load (AC-15)	10A	6A	3A
DC	Resistive Load (DC-12)	8A	2.2A	1.1A
	Inductive Load (DC-13)	4A	1.1A	0.55A

LED Lamp Ratings

Type No.	Rated Voltage	Rated Current	Color Code
LSED-6②	6V AC/DC	10 mA (A, R, Y) 7 mA (G, PW, S)	A: amber G: green PW: pure white R: red S: blue Y: yellow
LSED-1②	12V AC/DC	14 mA (A, R, Y) 13 mA (G, PW, S)	
LSED-2②	24V AC/DC	14 mA (A, R, Y) 13 mA (G, PW, S)	
LSED-H②	110V AC/DC	5.5 mA	
LSED-M3②	230/240V AC/DC	2.7 mA	

Note: Specify a color code in place of ② in the Type No.
Yellow LED lamps are used for white illumination of pilot lights and illuminated pushbuttons.

Incandescent Lamp Ratings

Type No.	Rated Voltage	Ratings
LS-T6	6V AC/DC	6.3V 1W
LS-T8	12V AC/DC	18V 1W
LS-T8	24V AC/DC	30V 1W

Unibody Pilot Light Ratings

Rated Voltage	Illumination Color	Rated Current
6V AC/DC	A, R, W, Y	16 mA
	G, PW, S	13 mA
12V AC/DC	A, G, PW, R, S, W, Y	20 mA
24V AC/DC		
100/110V AC		
230/240V AC		

Specifications

Operating Conditions	Operating temperature: -20 to +55°C (no freezing) Operating humidity: 45 to 85% RH (no condensation) Storage temperature: -45 to +80°C Storage humidity: 95% RH maximum
Degree of Protection	From panel front: IP65 (IEC 60529) Terminal: IP20 (IEC 60529)
Insulation Resistance	100 MΩ
Dielectric Strength	Contact block: 2,500V, 1 minute Pilot light: 2,000V, 1 minute
Vibration Resistance	<Emergency stop switch> Operating extremes / Damage limits: 10 to 500Hz, amplitude 0.35 mm, acceleration 50 m/s ² (5G) <Pushbutton, pilot light, illuminated pushbutton, selector switch, and key selector switch> Operating extremes: 5 to 55 Hz, amplitude 0.5 mm Damage limits: 30 Hz, amplitude 1.5 mm
Shock Resistance	<Emergency stop switch> Operating extremes: 150 m/s ² (15G) Damage limits: 1,000 m/s ² (100G) <Pushbutton, pilot light, illuminated pushbutton, selector switch, and key selector switch> Operating extremes: 100 m/s ² (10G) Damage limits: 1,000 m/s ² (100G)
Mechanical Life (minimum operations)	<Emergency stop switch> 250,000 (single contact block) <Pushbutton and illuminated pushbutton> Momentary: 5,000,000 (single contact block) 1,000,000 (double contact block) Maintained: 250,000 (single contact block) 100,000 (double contact block) <Selector switch and key selector switch> 250,000 (single contact block) 100,000 (double contact block)
Electrical Life (minimum operations)	<Emergency stop switch> 100,000 (single contact block) <Pushbutton, selector switch, and key selector switch> 100,000 (single contact block) 50,000 (double contact block)

Figura C. 10 - Ficha técnica de interruptor e sinal luminoso para ligar PC [206].

C.2 - Elementos elétricos auxiliares

Como exposto na Secção 6.8, o conteúdo deste anexo destina-se a completar o projeto elétrico efetuado. O foco deste é o armário elétrico, sendo que o seu objetivo último é o de incluir todos os elementos necessários ao funcionamento do sistema num único armário, por forma a definir uma solução compacta e funcional. Para esse efeito, neste anexo serão feitas considerações acerca da inclusão de elementos auxiliares, da colocação de bornes, enquanto elemento fundamental para se conseguir uma instalação elétrica organizada e perceptível. Outro aspeto muito importante que será abordado, e relacionado com o enunciado anteriormente, diz respeito à disposição dos componentes no armário. Do estudo dos dois pontos anteriores, resultará a escolha de um armário elétrico onde poderão ser colocados todos os componentes.

C.2.1 - Armário elétrico

O armário elétrico que albergará todos os componentes tem de ser alvo de ponderações, por forma a que a sua escolha seja a mais adequada. O seu estudo envolve a análise da disposição dos componentes, a levantamento do número de bornes necessários e ainda o espaço necessário para colocar todos os elementos.

Bornes

Os bornes são pontos de ligação elétrica que facilitam o manuseamento e eventuais reparações elétricas de componentes num armário elétrico. A sua inclusão permite melhorar a disposição dos componentes e facilita a sua organização.

As necessidades de bornes encontram-se resumidas na Tabela C. 1. Na linha de raciocínio são focados os componentes do circuito, as respetivas entradas e saídas, e o percurso efetuado pela corrente entre os vários componentes. Para este efeito, a corrente elétrica da rede foi considerada como sendo um componente, uma fonte de alimentação 230 V AC. Os bornes utilizados serão de três tipos distintos. Os do tipo 878-7487 são os mais simples, com apenas dois terminais (uma entrada e uma saída). Os do tipo 878-7480 são bornes de duplo andar, com quatro terminais, todos ligados entre si. Os do tipo 878-7471 são igualmente de duplo andar, mas os seus terminais encontram-se apenas ligados dois a dois. Apesar de os bornes serem elementos individuais de ligação elétrica individual, é possível associá-los em série por forma a que bornes consecutivos tenham o mesmo potencial elétrico. Na Tabela C. 1 é feito também o levantamento do número de bornes de ligação à terra necessários e de fusíveis.

Tabela C. 1 - Tabela resumo das ligações elétricas do sistema com inclusão de bornes.

Componente	Borne		Tipo de borne	Nº de bornes
	Nº entradas	Nº saídas		
L (fase) 230 V AC	1 entrada	1 Fonte 48 V DC	878-7480	2
		1 Fonte 24 V DC		
		1 Fonte 5 V DC		
		1 Relé		
N (neutro)	1 entrada	1 Fonte 48 V DC	878-7480	2
		1 Fonte 24 V DC		
		1 Fonte 5 V DC		
		1 Relé		
Fonte 48 V DC 48 V DC	3 V ⁺	6 EL7047 (x3)	878-7480	3
	3 V ⁻	1 0 V comum ¹	878-7480	1
Fonte 24 V DC 24 V DC	3 V ⁺	2 Módulo Siemens	878-7480	1
		1 Power Switch C6015	878-7480	1
		1 Lâmpada estado PC		
		1 Fins-de-curso	878-7480	1
	3 V ⁻	1 0 V comum ²	878-7480	1
Módulo Siemens	1 V ⁺ #1	1 PC C6015	878-7487	1
	1 V ⁺ #2	3 EK1100	878-7480	2 (?)

24 V DC	1 V ⁺ #3	10 EL7037/9100/2008	878-7480	3/4
	1 V ⁺ #4	Aquecimento extrusor	878-7487	1
	2 V ⁻	1 0 V comum ³	878-7480	1
Fonte 5V 5 V DC	1 V ⁺	5 encoders	878-7480	2
	1 V ⁻	1 0 V comum ⁴	878-7487	1
Alimentação fins-de-curso	1 V ⁺	5 fins de curso	878-7480	2
	1 V ⁻	5 fins de curso ⁵	878-7480	2
EL2008 (saídas digitais) 24 V DC	8 V ⁺	8 saídas digitais	878-7471	4
	8 V ⁻	1 0 V comum ⁶	878-7480	3
Ligação comum 0 V		1 V ⁻ (¹)	878-7480	8
	6 V ⁻ (de EL7047)			
		1 V ⁻ (²)		
	1 V ⁻ (de C6015)			
	1 V ⁻ (de C6015, interruptor)			
	3 V ⁻ (de EK1100)			
	6 V ⁻ (de EL7037)			
	2 V ⁻ (de EL9100)			
		1 V ⁻ (³)		
	5 V ⁻ (dos encoders)			
	1 V ⁻ (⁵)	1 V ⁻		
		1 V ⁻ (⁴)		
Ligações terra				
Terra (rede)	1		Terra	1
C6015	1			1
Fonte 48 V	1			1
Fonte 24 V	1			
EK1100	2			1
EL9100	2			1
Fusíveis				
Encoders	1 entrada	1 saída	2,5 A (Borne porta-Fusíveis)	1
Fins-de-curso	1 entrada	1 saída	1 A (Borne porta-Fusíveis)	1
C6015	1 C6015 (pin PS)	1 Indicador 24 V	0,5 A (Borne porta-Fusíveis)	1

A referência aos números ¹, ², ³, e ⁴ é feita para mencionar que correspondem ao mesmo borne. A conceção do sistema foi feita de forma a que haja um terminal comum de 0 V, ao qual se ligarão todos os componentes. Por esse motivo, o conceito de entradas e saídas para estes bornes é indiferente.

É importante ter em conta que o número de bornes a utilizar poderá ser maior, dependendo da disposição adotada para o quadro elétrico e de possíveis constrangimentos na sua montagem.

Disposição dos componentes

A estrutura idealizada para a montagem do quadro elétrico divide-se em três andares. O primeiro é reservado aos elementos de potência e segurança, o segundo aos elementos de controlo (*Beckhoff*) e o terceiro a elementos suplementares necessários.

A sua disposição é baseada no circuito elétrico disponível no Anexo C.3 e tem também em conta alguns condicionamentos de ordem funcional e espacial. Ainda assim, o seu carácter arbitrável desempenha um papel fundamental.

As fontes de alimentação são componentes de montagem em painel, que requerem uma grande área de montagem (230x135x40,5 mm). Com o objetivo de economizar espaço no

armário, será mais vantajoso se a sua montagem for feita ao longo da sua largura e altura, ocupando 40,5x135 mm em vez de 230x135.

Na montagem dos módulos *Beckhoff*, é importante ter em atenção que os cabos devem ser nele conectados no sentido de baixo para cima, porque na sua zona superior encontram-se sinalizadores luminosos que indicam o estado do sistema e alertam para eventuais problemas. Se o caminho dos cabos for no sentido de cima para baixo, estes irão obstruir a visão dos indicadores e impedir uma monitorização eficaz do sistema. Devido ao espaço limitado no andar destinado aos elementos de controlo, o PC industrial foi adicionado ao terceiro andar, onde existe espaço suficiente para a sua montagem.

Apesar de o módulo da *Siemens* poder ser considerado um elemento de potência, este foi colocado no terceiro andar do quadro, para possibilitar que a alimentação dos módulos *Beckhoff* de 24 V DC seja feita no sentido de baixo para cima.

A sugestão de disposição encontra-se esquematizada na Figura C. 11. Trata-se de uma representação esquemática, à escala, dos componentes do sistema e da sua distribuição na sua implementação real. Os bornes representados estão separados por cores para indicar que têm o mesmo potencial elétrico e que se encontram ligados eletricamente. À exceção das fontes de alimentação de 24 V e 48 V, dos relés de estado sólido e do PC 6015, todos os elementos são montados em calha DIN, também representada na Figura C. 11.

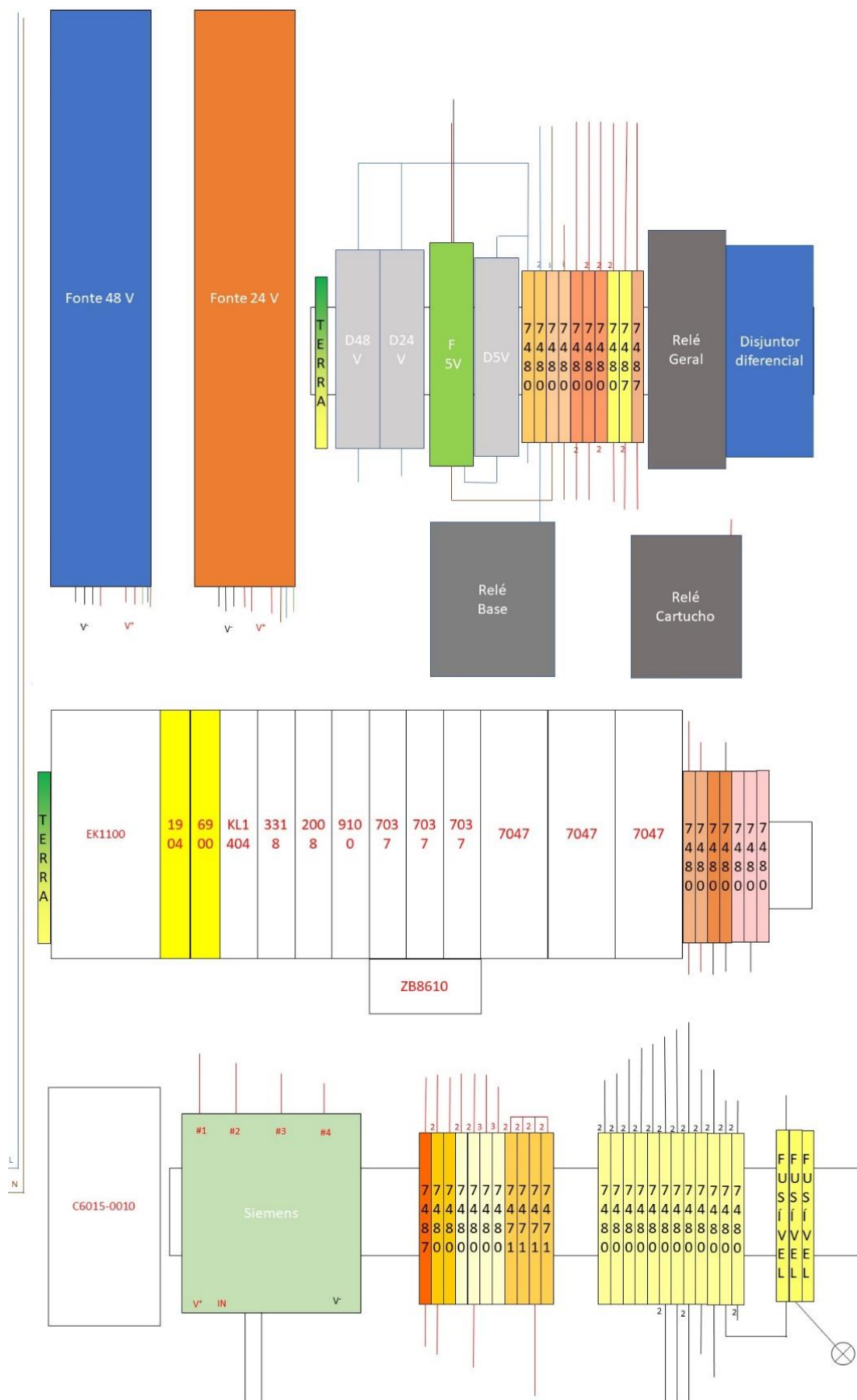


Figura C. 11 - Esquema de disposição e ligação dos componentes do quadro elétrico.

Escolha armário

Tendo em conta a disposição sugerida, é possível fazer a escolha do armário elétrico, do ponto de vista das dimensões mínimas exigidas. É importante considerar que a área útil de

montagem corresponde à área da placa de montagem e não às dimensões nominais do quadro. Assim, a altura mínima da platina de montagem será 412 mm, se tivermos em conta a altura do maior componente de cada andar, e fizermos a respetiva soma. Um valor razoável para esta dimensão serão 500 mm, para incluir um espaço entre os andares (cerca de 20 mm). A largura mínima é dependente do tamanho ocupado pela associação em série dos vários módulos *Beckhoff* e o conjunto de bornes dos *encoders* e fins-de-curso. Este valor terá de ser pelo menos 265 mm. Um valor razoável serão 300 mm para se poder incluir no mesmo andar os bornes de ligação à terra e outros bornes que possam ser necessários. Para a profundidade basta apenas comparar os valores de profundidade de todos os componentes e considerar o maior. O valor limite é imposto pelas fontes de alimentação, 81 mm.

Calculando a área ocupada por todos os componentes verificamos que estes ocupam cerca de 75 000 mm². Assumindo que o quadro elétrico terá de ter pelo menos 30 % de espaço livre para assegurar alguma manobrabilidade e a circulação de ar entre os componentes para prevenir sobreaquecimentos, a área mínima da área de montagem será cerca de 110000 mm².

Tendo em conta estas considerações, opta-se pelo armário NSYCRN64250 do fabricante *Schneider Electric*, cujas dimensões nominais são 600x400x250 mm. As dimensões da respetiva placa de montagem, que tem de ser adquirida em separado, são 550x350x1,8 mm com a referência NSYMM64, e esta consegue garantir os requisitos impostos.

C.2.2 - Outros elementos complementares

Como é normal em projetos de instalações elétricas, é fundamental a inclusão de um elemento funcional que permita ligar/desligar o sistema. Este será uma botoneira de acionamento manual e com encravamento. Este ficará eletricamente ligado antes do disjuntor diferencial e nele serão conectados os cabos de fase e de neutro provenientes da rede. O seu acionamento cortará a energia do sistema. A sua montagem será feita no exterior do quadro elétrico, num local bem visível e de fácil acesso. O interruptor escolhido foi o modelo 3LD2022-0TK13 da *Siemens*.

Para efeitos de melhorar a organização e segurança do sistema, será também incluído um conector macho (*IEC inlet*) no armário. Assim, este será o ponto de entrada da corrente da rede no sistema e, por isso, ficará eletricamente montado a montante do interruptor de emergência. Com vista a proteger a rede elétrica do efeito dos diversos componentes elétricos da instalação, será incluído também um filtro de linha, que impede que os componentes (fontes de alimentação, elementos de aquecimento, etc.) introduzam harmónicos na rede, que perturbe o funcionamento de outros equipamentos. Este filtro pode ser adquirido em conjunto com o conector macho, facilitando a sua instalação no armário e constituindo uma medida complementar de segurança. O conjunto conector macho-filtro de linha selecionado é do fabricante *Schaffner*, com a referência FN9264, constituindo um filtro de dois polos, que permite passagem de corrente até 10 A e filtrar frequências entre os 50 e 400 Hz.

Também na parede do quadro elétrico serão colocados conectores correspondentes às portas do PC C6015. Estes elementos incluem um conector RJ45, para permitir ligação do PC à rede de internet, um conector *Display port*, para ligação de um monitor e dois conectores USB, para ligação de rato e teclado. A existência destes conectores na parede exterior do armário elétrico é fundamental para uma implementação funcional.

A organização do quadro fica completa com a inclusão de buçins, que permitam a entrada dos cabos do robô no quadro, bem como dos elementos de aquecimento. Serão necessários dezasseis buçins, um para cada cabo proveniente do robô e outro para passagem dos cabos destinados às funções de aquecimento. Ainda no que diz respeito ao manuseamento de cabos, é necessário considerar também a montagem de calhas para a sua passagem no interior do quadro.

C.3 - Esquema de ligações elétricas do sistema desenvolvido



Número 20190201				A3		SCALE			
					DATE	NAME	Esquema de ligação elétrica de plataforma de impressão 3d baseada em braço robótico.		
				Edit	04/02/2019				
				Chec.					
									SHEETS
									1/1
No:	Revision	Date	By						

ANEXO D: Documento de apoio ao projeto da instalação mecânica

Neste anexo é apresentada uma tabela com o levantamento de todos os materiais necessários à construção da estrutura de impressão tridimensional projetada. Esta tarefa é indispensável para a implementação do sistema e trabalhos futuros, facilitando as operações de montagem e identificando os componentes que necessitarão de ser adquiridos.

Tabela D. 1 - Tabela- resumo dos componentes mecânicos da estrutura mecânica do sistema de impressão.

Elementos do Sistema	Componente	Modelo	Quantidade
Estrutura mecânica			
Pernas da mesa	Perfil <i>Bosch®</i>	45x90 SLx850	4
Barras suporte – comprimento	Perfil <i>Bosch®</i>	45x45 3Ax1000	2
Barras suporte - largura	Perfil <i>Bosch®</i>	45x45x510	2
Suportes laterais	Perfil <i>Bosch®</i>	45x45x910	2
Fixação Armário elétrico	Perfil <i>Bosch®</i>	45x45x510	2
Mesa da estrutura			
Braço Robótico			
Elementos de ligação - Acessórios de fixação da estrutura	Conectores <i>Bosch®</i> - Gusset	45x45 gusset	28
	Parafuso com porca <i>Bosch®</i> - Fastener	10 mm T-bolt fastening kit, L=24 mm	32
Acessórios de fixação da mesa e robô na estrutura	Parafuso com porca <i>Bosch®</i> - Fastener	10 mm T-bolt fastening kit, L=24 mm	12
Montagem extrusor			
Barras verticais	Perfil <i>Bosch®</i>	45x45x1000	2
Barra horizontal – montagem extrusor	Perfil <i>Bosch®</i>	45x45x600	1
Elementos de ligação	Conectores <i>Bosch®</i> - Gusset	45x45 gusset	4
	Parafuso com porca <i>Bosch®</i> - Fastener	10 mm T-bolt fastening kit, L=24 mm	
Fixação extrusor na estrutura	Parafuso com porca <i>Bosch®</i> - Fastener	10 mm T-bolt fastening kit, L=24 mm	2
Plataforma de impressão			
Suporte de ligação ao robô			1
Suporte de base de impressão			1
Base de impressão			1
Elementos de ligação	Parafusos ligação suporte-flange do robô	ISO 4762 M4 x 30	12
	Parafusos ligação suporte da flange-suporte base	ISO 4762 M6 x 10	16
	Parafusos ligação estrutura suporte-base impressão	ISO 4762 M6 x 20	4

ANEXO E: Pós-processador de Código G

Anexo E.1 - Algoritmo do pós-processador

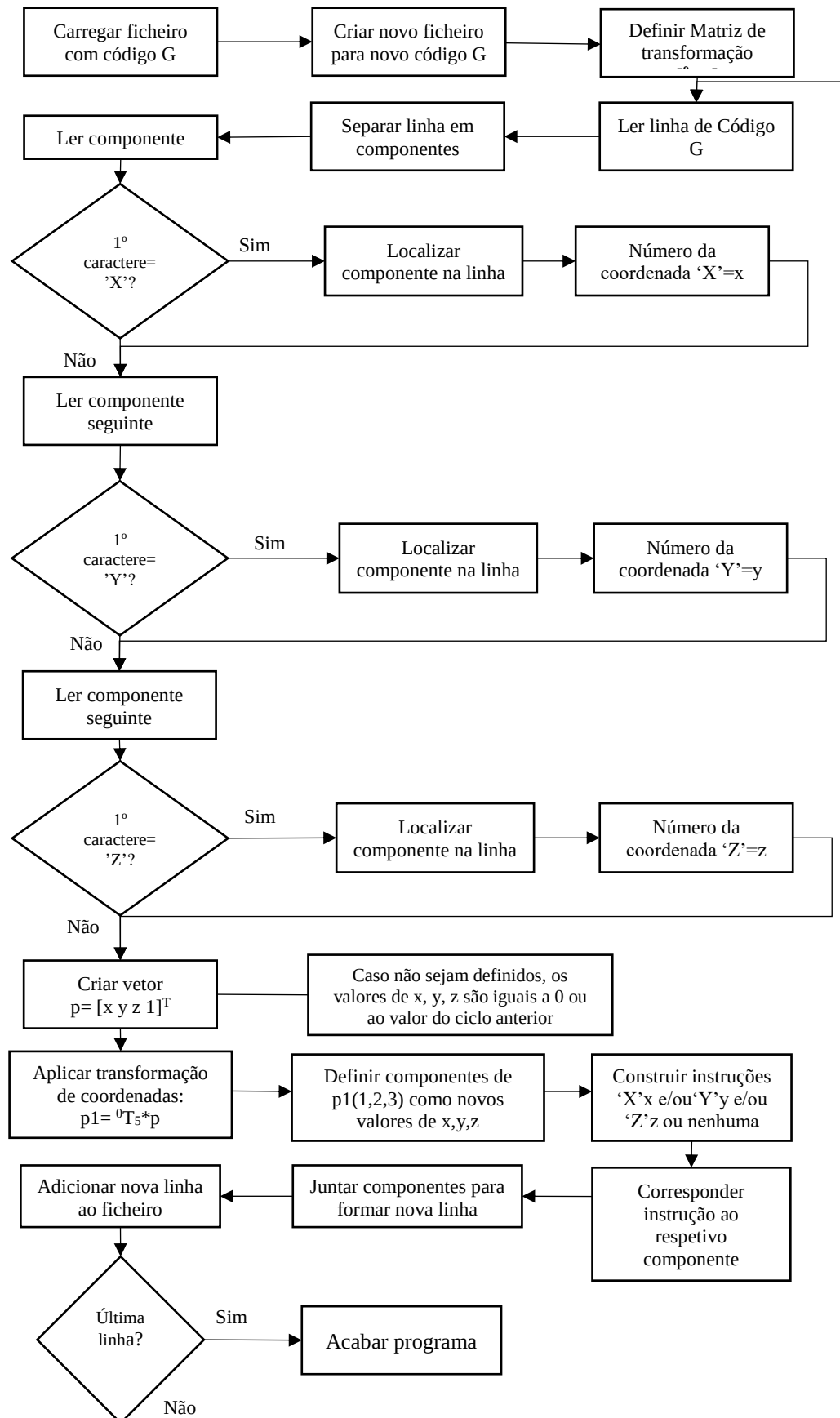


Figura E. 1 - Algoritmo de desenvolvimento de pós-processador de código G.

Anexo E.2 - Script Matlab® do pós-processador

08-01-2019 1:12 C:\Users\jpsob\Docume...\codigo_g 2.m 1 of 2

```

nome_ficheiro=input('Qual o nome do ficheiro? ', 's'); %definir o nome do
%ficheiro que contém o código g a converter->por exemplo abc.gcode

fid=fopen(nome_ficheiro); %lê o ficheiro com o nome definido anteriormente
novo_nome=sprintf('novo_%s',nome_ficheiro);%criar nome do novo documento
fid_l=fopen(novo_nome, 'w'); %cria documento de texto onde estará novo
%código g
x=0;
y=0;
z=0;
T=[-1 0 0 0;0 -1 0 0;0 0 -1 0;0 0 0 1];%matriz de transformação de
%coordenadas. Neste caso a matriz T contém apenas matriz rotação, e não os
%valores reais da matriz de transformação, pois tais valores vão depender
%da disposição final do extrusor

while ~feof(fid) %executa o ciclo while até ao fim do documento de texto
line_ex = fgetl(fid); %lê uma linha do ficheiro. Linha em análise

line_div = strsplit(line_ex); %separa a linha nos vários componentes e
%aloca-os numa matriz nxl. Separação por caracteres nulos (espaçamento)
loc_x=0; %define localização da coordenada X na linha em análise,
%inicialmente '0'
loc_y=0; %define localização da coordenada Y na linha em análise,
%inicialmente '0'
loc_z=0; %define localização da coordenada Z na linha em análise,
%inicialmente '0'
for i=1:length(line_div) %executa loop para cada um dos componentes da linha
    componente_div = line_div{i}; %cria uma nova variável componente_div,
    %para analisar os caracteres que constituem cada componente
    if componente_div(1)=='X' %se primeiro caracter do componente é 'X'
        x=componente_div(2:length(componente_div)); %x será igual ao valor
        %a seguir à letra 'X' no código, sabendo-se que será um número
        x=str2double(x); %converte o valor de x, que está definido como
        %string em double
        loc_x=i; %localiza a posição da coordenada X na linha
    end

    if componente_div(1)=='Y' %se primeiro caracter do componente é 'Y'
        y=componente_div(2:length(componente_div)); %y será igual ao valor
        %a seguir à letra 'Y' no código, sabendo-se que será um número
        y=str2double(y); %converte o valor de y, que está definido como
        %string em double
        loc_y=i; %localiza a posição da coordenada Y na linha
    end

    if componente_div(1)=='Z' %se primeiro caracter do componente é 'Z'
        z=componente_div(2:length(componente_div)); %z será igual ao valor
        %que a seguir à letra 'Z' no código, sabendo-se que será um número
        z=str2double(z); %converte o valor de z, que está definido como
        %string em double
        loc_z=i; %localiza a posição da coordenada Z na linha
    end
end
end

```

Figura E. 2 - Script desenvolvido em Matlab® para pós-processamento de código G. Parte 1/2.

08-01-2019 1:12 C:\Users\jpsob\Docume...\codigo g 2.m 2 of 2

```

p=[x, y, z, 1]'; %cria vetor da posição a atingir, em coordenadas
%homogêneas
p1=T*p; %multiplicação para proceder à transformação de coordenadas
%->p1 novo vetor

if loc_x > 0 %se valor de loc_x>0 significa que, na linha em análise,
    %foi encontrado um elemento do tipo 'X...'
    x_str=num2str(p1(1)); %converte valor de p1(1) (ou seja, valor de x)
    %em string, para que posteriormente possa ser escrito como texto
    x_inst={'X', x_str}; %cria instrução em código G relativa a x
    line_div(loc_x)=strjoin(x_inst, ''); %substitui um elemento da linha
    %com a posição loc_x pelo novo ponto, que será uma string do tipo
    %X12.3, ou seja 'X'+ '12.3' sem espaçamento entre os elementos
end

if loc_y > 0 %se valor de loc_y>0 significa que, na linha em análise,
    %foi encontrado um elemento do tipo 'Y...'
    y_str=num2str(p1(2)); %converte valor de p1(1) (ou seja, valor de y)
    %em string, para que posteriormente possa ser escrito como texto
    y_inst={'Y', y_str}; %cria instrução em código G relativa a y
    line_div(loc_y)=strjoin(y_inst, ''); %substitui um elemento da linha
    %com a posição loc_y pelo novo ponto, que será uma string do tipo
    %Y12.3, ou seja 'Y'+ '12.3' sem espaçamento entre os elementos
end

if loc_z > 0 %se valor de loc_y>0 significa que, na linha em análise,
    %foi encontrado um elemento do tipo 'Z...'
    z_str=num2str(p1(3)); %converte valor de p1(1) (ou seja, valor de z)
    %em string, para que posteriormente possa ser escrito como texto
    z_inst={'Z', z_str}; %cria instrução em código G relativa a z
    line_div(loc_z)=strjoin(z_inst, ''); %substitui um elemento da linha
    %com a posição loc_z pelo novo ponto, que será uma string do tipo
    %Z12.3, ou seja 'Z'+ '12.3' sem espaçamento entre os elementos
end

nova_linha=strjoin(line_div); %cria uma nova linha através da junção de
%todos os componentess presentes na variável line_div (nesta variável cada
%um dos elementos encontra-se numa célula de uma matriz do tipo [1xn]).
%Por defeito, os elementos juntados são separados por um espaçamento
fprintf(fid_1, '%s\r\n',nova_linha); %escreve a linha lida e/ou manipulada
%no novo ficheiro de texto

end

disp('fim')

```

Figura E. 3 - Script desenvolvido em *Matlab*® para pós-processamento de código G. Parte 2/2.

O *script* desenvolvido foi testado com sucesso para um ficheiro de código G gerado por um *slicer*. A validação foi feita a partir do *slicing* de um prisma piramidal com *software Cura*®, e o mesmo *software* foi usado para compara a trajetória resultante do código G.

Desta forma, o resultado visual do código G gerado inicialmente pode ser observado na Figura E. 4.

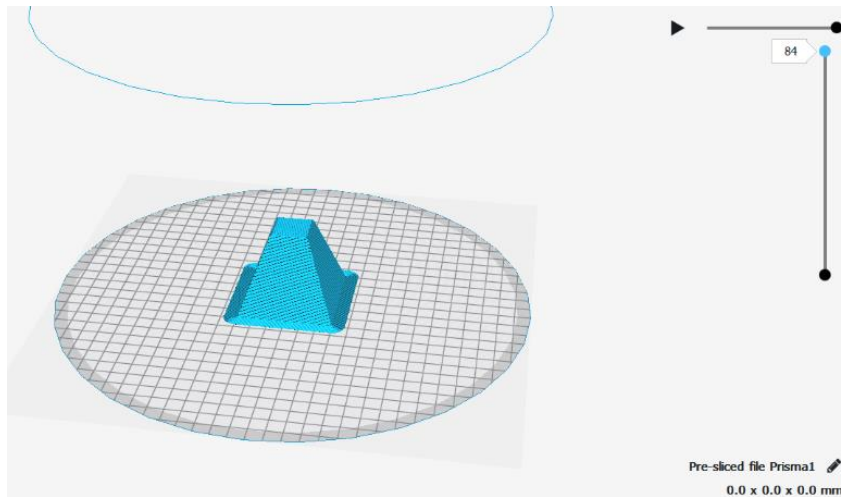


Figura E. 4 – Trajetória do extrusor resultante do *slicing* de um prisma piramidal.

O código G pós-processado pelo *script* desenvolvido pode ser observado na Figura E.

5.

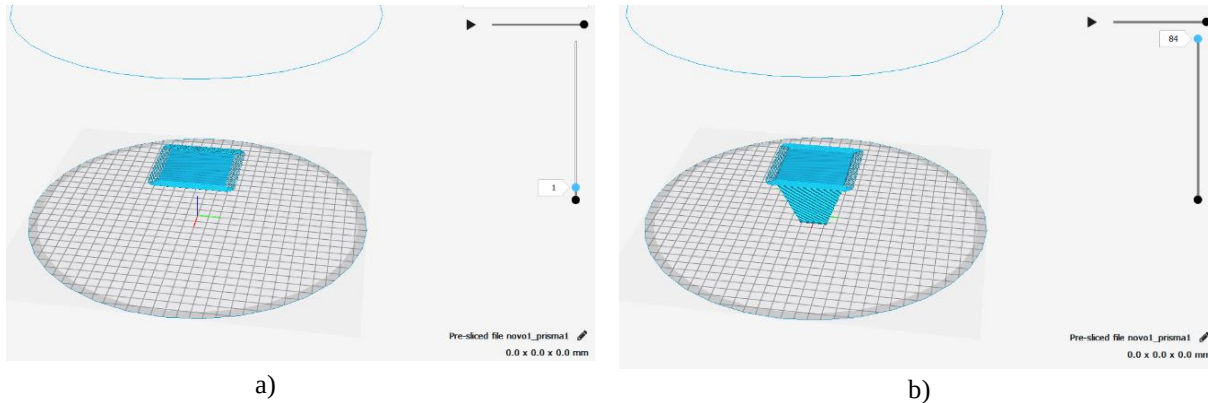


Figura E. 5 - Trajetória da base de impressão após pós-processamento do código G inicial; a) Construção da primeira camada; b) Construção da última camada.

A validação dos resultados é feita pela análise das duas figuras, através da constatação que, no caso da Figura E. 4, denota-se uma constatação típica de impressão 3d, com a peça disposta na sua posição original, em que a superfície superior da peça corresponde à última camada a ser construída (camada nº 84). A análise da Figura E. 5 deve ser feita tendo em conta que, ao contrário do caso da Figura E. 4 em que as instruções são dadas para o movimento da cabeça de extrusão, as instruções são dadas para a base de impressão. Assim, é possível verificar que a primeira camada a ser construída (Figura E. 5 a), camada nº0) se encontra a uma cota superior no espaço de trabalho, sendo que a trajetória é tal de forma a que a última camada (Figura E. 5 b), camada nº84) é obtida para uma cota igual a zero. Como o movimento correspondente é dado para a base, com a rotina de impressão resultante irá ser obtida uma peça igual à resultante da rotina expressa na Figura E. 4.