



## **Célula automatizada para montagem de quadros brancos**

**VITOR TIAGO DE SOUSA**

outubro de 2019

INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO

# Célula automatizada para montagem de quadros brancos

Vitor Tiago de Sousa



Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Área de Especialização em Automação e Sistemas

Departamento de Engenharia Eletrotécnica

2019



Este relatório satisfaz, parcialmente, os requisitos que constam da Ficha de Unidade Curricular de Tese/Dissertação, do 2.º ano do Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores.

Candidato: Vitor Tiago de Sousa, 1140348@isep.ipp.pt

Orientação científica: Manuel Fernando dos Santos Silva, mss@isep.ipp.pt

Empresa: RobotSol – Engenharia Industrial, S.A.

Supervisão: Mário Miguel Cardoso Tavares Silva Martins,  
mario.martins@robotsol.com



Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores  
Área de Especialização em Automação e Sistemas  
Departamento de Engenharia Eletrotécnica  
Instituto Superior de Engenharia do Porto

21 de outubro de 2019



*“Ninguém escapa ao sonho de voar, de ultrapassar os limites do espaço onde nasceu, de ver novos lugares e novas gentes. Mas saber ver em cada coisa, em cada pessoa, um objeto singular, um amigo – é fundamental. Navegar é preciso, reconhecer o valor das coisas e das pessoas, é mais preciso ainda!!!”*

Antonie de Saint-Exupéry



# Agradecimentos

Uma dissertação de mestrado é um longo trabalho, que inclui momentos permeados de inúmeros desafios, alegrias, incertezas, percalços e ensinamentos. O contributo de várias pessoas foi essencial para o desenrolar deste trabalho. A todos um enorme agradecimento.

Ao Professor Doutor Manuel Silva, orientador do ISEP, agradeço todo o seu tempo disponibilizado, a sua transmissão de conhecimentos, disponibilidade e orientação, que foram essenciais para o desenrolar de todo este trabalho.

Agradeço ao Eng.º Mário Martins, orientador da empresa, pela integração na sua equipa de trabalho, pela sua orientação, incentivo, disponibilidade e apoio prestado no desenvolvimento deste projeto.

Um agradecimento aos colegas e amigos de departamento Eng.º Jorge Oliveira, Eng.º Manuel Silva, Eng.º Ricardo Pimenta, Eng.º Jorge Neiva, Eng.º Bruno Oliveira, Eng.º Rui Rodrigues e Eng.º José Nunes pelos conhecimentos transmitidos, entreaajuda e companheirismo.

Um agradecimento aos restantes departamentos, com especial foco ao Eng.º Rafael Sousa do departamento de projeto mecânico, ao Eng.º Luís Ferreira do departamento de projeto elétrico, ao João Torres e ao Davide Santos do departamento de montagem, por todo o apoio na execução deste trabalho.

Aos meus amigos e colegas de estágio na empresa - Miguel Mira, Bernardo Pedrosa e Luís Almeida - pelos momentos de entreaajuda e amizade prestados ao longo de todo o trabalho.

Um agradecimento aos meus colegas e amigos que me acompanharam ao longo do meu percurso académico, e ao João Araújo por toda a entreaajuda e paciência.

Um especial agradecimento à Isa Mara, pelo apoio, pela atenção e paciência, em especial, pela sua compreensão e sorriso apresentado ao longo deste trabalho, mesmo quando sacrificava os dias, noites, feriados e os fins de semana para a elaboração desta dissertação.

Por último, um especial agradecimento aos meus pais que tanta paciência tiveram para mim e sempre me apoiaram nesta grande jornada.

Vitor Tiago de Sousa



# Resumo

A robótica tem vindo a desempenhar um papel importante nas indústrias, tornando os processos mais eficientes, realizando trabalhos monótonos e fisicamente desafiantes. No seguimento desta linha de pensamento, a RobotSol foi contactada para desenvolver uma solução automatizada de montagem e fixação de peças, com requisitos definidos desde o início do projeto, em 2015.

Este trabalho foca-se no desenvolvimento de uma célula de montagem e fixação de planos, tendo como base dois manipuladores industriais de seis eixos - para a realização de movimentação e orientação de peças -, de dois transportadores que permitem a entrada e saída de produtos da célula - de um armazém de um determinado produto - e de duas mesas - realizam a montagem, fixação e amolgamento de acordo com o estabelecido com o cliente. Foi ainda desenvolvida toda uma interface do sistema para a visualização de estados e controlo da célula.

Para o desenvolvimento deste trabalho foi necessário aferir conhecimentos teóricos relativos à robótica e automação industrial, e realizar um estudo direcionado para os intervenientes das células de montagem.

Após a realização da componente teórica deu-se o desenvolvimento e implementação do projeto. Para tal, foi necessário realizar simulações, validar as posições dos componentes, num determinado espaço, e as trajetórias realizadas. Com as simulações terminadas ocorreu o desenvolvimento dos programas e a validação dos diferentes componentes.

Com as validações terminadas procedeu-se à instalação da célula no cliente. Neste, ocorreram os testes e validações do sistema. Os resultados obtidos foram de encontro com os requisitos e, assim, de acordo com o esperado.

A realização deste trabalho permitiu obter vastos conhecimentos relativos à robótica industrial, automação e interface com o operador, bem como as vantagens da automatização dos processos para uma dada indústria.

**Palavras-Chave:** Automação, Robótica Industrial, KUKA, PLC, Montagem.



# Abstract

Robotics has been playing an important role among industries, making processes more efficient, performing monotonous and physically challenging jobs. Following this line of thought, RobotSol was contacted to develop an automated solution for assembling and fixing parts, with the requirements being defined since the beginning of the project, in 2015.

This work focuses on the development of an assembly and fixation of surfaces cell, based on two six axis industrial manipulators - to move and guide parts -, of two conveyors that allow the entry and exit of cell products - from a warehouse of a given product - and from two tables – that perform the assembly, fixing and denting according to what was established with the customer. It was also developed a system interface for states visualization and cell control.

In order to develop this project, it was necessary to do a study related to robotics and industrial automation. It was also carried out a study aimed at the components of the assembly cells.

After completing the theoretical component, the project was developed and implemented. In order to accomplish this, it was necessary to perform simulations, validate the positions of the components, in a certain space, and the trajectories performed. With the completion of the simulations, the development of the programs and the validation of the different components occurred.

After the completion of the validations, the cell was installed on the client. During the installation, the system tests and validations occurred. Analyzing the results obtained, the requirements were met and thus, according to the expected.

The implementation of this work allowed the obtention of knowledge related to industrial robotics, automation and operator interface, as well as the advantages of automating processes for a given industry.

**Keywords:** Automation, Industrial Robotics, KUKA, PLC, Assembly.



# Conteúdo

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	Contextualização e motivação . . . . .	3
1.2	Objetivos . . . . .	4
1.3	Calendarização . . . . .	4
1.4	Organização da dissertação . . . . .	6
<b>2</b>	<b>A robótica</b>	<b>9</b>
2.1	Breve história da robótica . . . . .	9
2.2	Definição de robô . . . . .	11
2.3	As leis da robótica . . . . .	11
2.4	Vantagens e desvantagens do uso de robôs . . . . .	12
2.5	Constituintes de um robô industrial . . . . .	12
2.5.1	Unidade de controlo . . . . .	13
2.5.2	Unidade de potência . . . . .	14
2.5.3	Manipulador mecânico . . . . .	14
2.5.4	Sensores . . . . .	18
2.6	Terminologia na robótica . . . . .	19
2.6.1	Volume de trabalho . . . . .	19
2.6.2	Graus de liberdade e de mobilidade . . . . .	20
2.6.3	Velocidade de trabalho e capacidade de carga . . . . .	20
2.6.4	Resolução, precisão e repetibilidade . . . . .	20
2.7	Tipologia dos robôs industriais . . . . .	21
2.8	Cinemática e dinâmica . . . . .	22
2.8.1	Cinemática direta e inversa . . . . .	23
2.8.2	Dinâmica direta e inversa . . . . .	23
2.9	Tipos de programação . . . . .	23
2.9.1	Programação <i>online</i> . . . . .	24
2.9.2	Programação <i>offline</i> . . . . .	24
2.10	Sistemas de controlo de movimento . . . . .	25
2.11	Sumário de capítulo . . . . .	26
<b>3</b>	<b>Automação industrial</b>	<b>27</b>
3.1	Controlador Lógico Programável . . . . .	27
3.1.1	Breve história . . . . .	27
3.1.2	Arquitetura do PLC . . . . .	28
3.1.3	Linguagens de programação . . . . .	31
3.1.4	Interface Humano-Máquina . . . . .	31
3.2	Sistemas de produção . . . . .	32

3.2.1	Sistemas flexíveis de fabrico . . . . .	32
3.2.2	Noções básicas de pneumática . . . . .	34
3.2.3	Redes industriais . . . . .	35
3.2.4	Segurança . . . . .	35
3.3	Sumário de capítulo . . . . .	37
<b>4</b>	<b>Indústria da montagem automatizada</b>	<b>39</b>
4.1	Montagem automatizada . . . . .	39
4.2	Caso de estudo 1 - Carga e descarga de máquina de moldagem por injeção através de robô industrial . . . . .	41
4.3	Caso de estudo 2 - Montagem de motocicletas . . . . .	43
4.4	Caso de estudo 3 - Máquina de aparafusamento automático, de baixo custo . . . . .	44
4.5	Caso de estudo 4 - A importância dos atuadores eletromecânicos na indústria automóvel . . . . .	47
4.6	Sumário de capítulo . . . . .	48
<b>5</b>	<b>Arquitetura do sistema</b>	<b>51</b>
5.1	Descrição do problema . . . . .	51
5.2	Diagrama de blocos . . . . .	52
5.3	O processo do sistema . . . . .	54
5.4	Constituição da célula . . . . .	56
5.4.1	Transportador de entrada . . . . .	57
5.4.2	Mesa de montagem . . . . .	60
5.4.3	Armazém . . . . .	62
5.4.4	Centrador . . . . .	63
5.4.5	Mesa de fixação . . . . .	64
5.4.6	Transportador de saída . . . . .	67
5.4.7	Manipulador robótico . . . . .	68
5.4.8	Atuadores finais . . . . .	69
5.4.9	Pedestais . . . . .	73
5.4.10	Segurança . . . . .	73
5.4.11	Modos de funcionamento . . . . .	76
5.5	Sumário de capítulo . . . . .	77
<b>6</b>	<b>Implementação do trabalho</b>	<b>79</b>
6.1	Trajetórias efetuadas pelos robôs . . . . .	79
6.1.1	Tipos de movimentos . . . . .	79
6.1.2	Layout 2D da célula . . . . .	80
6.1.3	Simulação do funcionamento da célula . . . . .	80
6.1.4	Estudo do tempo de ciclo . . . . .	87
6.2	Programação dos diferentes componentes . . . . .	89
6.2.1	Rede de comunicação . . . . .	89
6.2.2	Programação dos robôs . . . . .	90
6.2.3	Programação do PLC . . . . .	95
6.3	Interface com o operador . . . . .	103
6.4	Instalação da célula . . . . .	108
6.5	Sumário de capítulo . . . . .	108

<b>7</b>	<b>Testes e resultados</b>	<b>111</b>
7.1	Testes funcionais . . . . .	111
7.1.1	Testes realizados na RobotSol . . . . .	111
7.1.2	Testes realizados no cliente . . . . .	115
7.2	Tempo de ciclo real . . . . .	116
7.3	Sumário de capítulo . . . . .	118
<b>8</b>	<b>Conclusões e trabalho futuro</b>	<b>119</b>
8.1	Satisfação dos objetivos . . . . .	119
8.2	Futuras melhorias . . . . .	120
	<b>Referências</b>	<b>123</b>
<b>A</b>	<b>Sinais digitais e analógicos da célula</b>	<b>129</b>
A.1	Sinais presentes no transportador de entrada . . . . .	129
A.2	Sinais presentes na mesa de montagem . . . . .	129
A.3	Sinais presentes no armazém . . . . .	132
A.4	Sinais presentes no centrador . . . . .	132
A.5	Sinais presentes na mesa de fixação . . . . .	133
A.6	Sinais presentes no transportador de saída . . . . .	136
A.7	Sinais referentes ao robô R1 . . . . .	137
A.8	Sinais referentes ao robô R2 . . . . .	137
A.9	Sinais gerais da célula . . . . .	138
<b>B</b>	<b>Configuração da comunicação DeviceNet</b>	<b>139</b>
<b>C</b>	<b>Mapeamento dos sinais dos robôs e PLC</b>	<b>141</b>
<b>D</b>	<b>Fluxograma do robô R1 e R2</b>	<b>143</b>
<b>E</b>	<b>Programas desenvolvidos: PLC e robôs</b>	<b>145</b>
<b>F</b>	<b>Fluxogramas inerentes ao programa do PLC</b>	<b>147</b>
F.1	Fluxograma referente ao transportador de entrada . . . . .	147
F.2	Fluxograma referente à mesa de montagem . . . . .	148
F.3	Fluxograma referente ao armazém . . . . .	149
F.4	Fluxograma referente à mesa de fixação . . . . .	150
F.5	Fluxograma referente ao transportador de saída . . . . .	151
<b>G</b>	<b>Consola HMI</b>	<b>153</b>
<b>H</b>	<b>Manual do utilizador</b>	<b>155</b>



# Lista de Figuras

1.1	Estimativa anual de vendas de robôs industriais a nível mundial (2009 - 2031).	2
1.2	Calendarização planeada e real. . . . .	5
2.1	Armadura mecânica criada por Leonardo da Vinci. . . . .	10
2.2	Os criadores do primeiro robô industrial. . . . .	10
2.3	Arquitetura de um sistema robótico. . . . .	13
2.4	Elos e junta de um robô. . . . .	14
2.5	Tipos de juntas utilizadas em robôs. . . . .	15
2.6	Resolução, precisão e repetibilidade de um sistema. . . . .	21
2.7	Diferentes soluções para a mesma posição e orientação do atuador final. . .	23
3.1	Arquitetura de um PLC. . . . .	29
3.2	Ciclo <i>scan</i> de um PLC. . . . .	30
3.3	Linguagens de programação de um PLC. . . . .	31
3.4	Exemplo de um sistema flexível de fabrico. . . . .	33
3.5	Exemplo gráfico dos conceitos de pressão atmosférica, relativa positiva e negativa, e absoluta. . . . .	34
4.1	Exemplos de garras usadas em aplicações de montagem. . . . .	41
4.2	Solução apresentada pela KUKA para efetuar carga e descarga de máquina. . .	42
4.3	Robô KUKA KR 120 R3900 ultra K. . . . .	42
4.4	Robô colaborativo compacto, aplicado no teto, efetuando aparafusamento. .	43
4.5	Robô colaborativo efetuando tarefa de manuseio de peça. . . . .	44
4.6	Arquitetura do sistema de aparafusamento automático. . . . .	45
4.7	Análise do binário para um caso de sucesso. . . . .	46
4.8	Análise da força para um caso de sucesso. . . . .	46
5.1	Diagrama de blocos do sistema. . . . .	52
5.2	Comunicação existente entre os diversos equipamentos. . . . .	53
5.3	Exemplo do produto final, quadro. . . . .	54
5.4	Processo realizado pelos robôs na célula. . . . .	55
5.5	Transportador de entrada com barreiras de segurança. . . . .	57
5.6	Sensor de tabuleiro. . . . .	58
5.7	Posicionamento das peças no transportador de entrada do ponto de vista superior. . . . .	58
5.8	Posicionamento das peças no transportador de entrada do ponto de vista lateral. . . . .	59
5.9	Posicionamento dos sensores face às peças no transportador de entrada do ponto de vista lateral. . . . .	60

5.10	Componentes existentes na mesa de montagem. . . . .	61
5.11	Armazém de planos e suporte de sensor óptico de nível. . . . .	62
5.12	Centrador de planos segundo ponto de vista lateral. . . . .	63
5.13	Mesa de fixação segundo ponto de vista lateral. . . . .	64
5.14	Sistema de aparafusamento, parte superior. . . . .	65
5.15	Sistema de aparafusamento, parte inferior. . . . .	66
5.16	Sistema de punção. . . . .	67
5.17	Transportador de saída. . . . .	68
5.18	Diagrama de cargas. . . . .	69
5.19	Atuador final do robô R1. . . . .	70
5.20	Desenho técnico do atuador final do robô R1. . . . .	71
5.21	Atuador final do robô R2. . . . .	71
5.22	Desenho técnico do atuador final do robô R2. . . . .	72
5.23	Pedestal dos robôs R1 e R2. . . . .	73
5.24	Vedações de segurança e outros constituintes da célula. . . . .	74
6.1	<i>Layout</i> 2D da célula. . . . .	80
6.2	Pontos referenciados ao transportador de entrada. . . . .	81
6.3	Pontos referenciados à mesa de montagem: peças A e B. . . . .	82
6.4	Pontos referenciados à mesa de montagem: peças C e D. . . . .	83
6.5	Pontos relativos à trajetória do centrador (com plano) para a mesa de montagem. . . . .	84
6.6	Pontos relativos à trajetória da mesa de montagem para o armazém. . . . .	84
6.7	Ponto relativo à trajetória do armazém para o centrador. . . . .	85
6.8	Pontos relativos à trajetória do centrador (sem plano) para a mesa de montagem - ponto de <i>place</i> . . . . .	86
6.9	Pontos relativos à trajetória da mesa de montagem para a mesa de fixação. . . . .	86
6.10	Pontos relativos às trajetórias da mesa de fixação para o centrador. . . . .	87
6.11	Tempo de ciclo simulado. . . . .	88
6.12	Fluxograma sintetizado do robô R1. . . . .	92
6.13	Funções do programa do robô R1. . . . .	93
6.14	Fluxograma sintetizado do robô R2. . . . .	94
6.15	Funções do programa do robô R2. . . . .	95
6.16	Programas e respetivas secções referentes ao PLC. . . . .	96
6.17	Fluxograma referente à <i>main</i> : secção <i>SartControl</i> . . . . .	97
6.18	Processo predefinido do programa <i>Main</i> , da secção <i>SartControl</i> : inicialização dos componentes. . . . .	98
6.19	Fluxograma referente à <i>main</i> : secção <i>Cell</i> . . . . .	99
6.20	Sinais dos sensores e acionamento dos variadores de frequência. . . . .	102
6.21	Consola HMI: ecrã principal. . . . .	104
6.22	Consola HMI: ecrã de produção. . . . .	105
6.23	Consola HMI: ecrã da célula. . . . .	105
6.24	Consola HMI: ecrã de alarmes. . . . .	106
6.25	Páginas de manutenção. . . . .	107
7.1	Colisão de <i>gripper</i> do robô R1 com a peça B. . . . .	112
7.2	Mesa de montagem com cilindros centreadores do plano. . . . .	113
7.3	Exemplos de quadros montados sem sucesso. . . . .	114
7.4	Tempo de ciclo real. . . . .	118

F.1	Fluxograma referente à <i>main</i> : secção <i>ConveyorIn</i> . . . . .	147
F.2	Fluxograma referente à <i>main</i> : secção <i>TableIndex</i> . . . . .	148
F.3	Fluxograma referente à <i>main</i> : secção <i>Warehouse</i> . . . . .	149
F.4	Fluxograma referente à <i>main</i> : secção <i>TableFix</i> . . . . .	150
F.5	Fluxograma referente à <i>main</i> : secção <i>ConveyorOut</i> . . . . .	151



# Lista de Tabelas

2.1	Características para os diferentes tipos de atuadores. . . . .	17
2.2	Classificação dos robôs. . . . .	22
5.1	Parâmetros relativos ao <i>gripper</i> do robô R1. . . . .	70
5.2	Parâmetros relativos ao <i>gripper</i> do robô R2. . . . .	72
5.3	Tempos de paragem dos eixos 1 a 3 do robô KR 16-2. . . . .	75
5.4	Aplicação dos relés de segurança. . . . .	76
5.5	Estados luminosos para a interface HMI. . . . .	77
6.1	Estimativa de tempo associado a cada processo. . . . .	88
6.2	Configuração da comunicação DeviceNet. . . . .	90
6.3	Estados das variáveis <i>W_Cell_Power</i> e <i>W_Cell_Status</i> para a HMI. . .	100
7.1	Tempo real associado a cada processo. . . . .	117
A.1	Sinais analisados para o controlo do transportador de entrada. . . . .	129
A.2	Sinais gerais analisados para o controlo da mesa de montagem. . . . .	129
A.3	Sinais analisados para o controlo da mesa de montagem, referentes aos cilindros pneumáticos posicionadores. . . . .	130
A.4	Sinais analisados para o controlo da mesa de montagem, referentes aos cilindros pneumáticos do vácuo. . . . .	131
A.5	Sinais analisados para o controlo da mesa de montagem, referentes aos cilindros de montagem. . . . .	131
A.6	Sinais analisados para o controlo do armazém. . . . .	132
A.7	Sinais analisados para o controlo do centrador. . . . .	132
A.8	Sinais analisados para o controlo da mesa de fixação, referentes aos cilindros que efetuam amolgamento. . . . .	133
A.9	Sinais analisados para o controlo da mesa de fixação, referentes aos cilindros da aparafusadora. . . . .	134
A.10	Sinais analisados para o controlo da mesa de fixação, referentes aos cilindros que efetuam a paragem e centramento de quadro. . . . .	135
A.11	Sinais analisados para o controlo da mesa de fixação, referentes aos sensores fotoelétricos e de controlo do motor. . . . .	136
A.12	Sinais analisados para o controlo do transportador de saída. . . . .	136
A.13	Sinais analisados para o controlo do robô R1. . . . .	137
A.14	Sinais analisados para o controlo do robô R2. . . . .	137
A.15	Sinais gerais analisados para controlo da célula. . . . .	138



# Lista de Acrónimos

<b>AI</b>	Inteligência Artificial ( <i>Artificial Intelligence</i> )
<b>ATEX</b>	Atmosferas Explosivas
<b>BARA</b>	The British Automation & Robot Association
<b>CAN</b>	<i>Controller Area Network</i>
<b>CNC</b>	Controlo Numérico Computorizado ( <i>Computer Numerical Control</i> )
<b>CP</b>	Trajectoria Contínua ( <i>Continuous Path</i> )
<b>CPU</b>	Unidade Central de Processamento ( <i>Central Processing Unit</i> )
<b>DOF</b>	Graus de Liberdade ( <i>Degrees of Freedom</i> )
<b>E/S</b>	Entradas/Saídas ( <i>Inputs/Outputs</i> )
<b>EherCAT</b>	<i>Ethernet for Control Automation Technology</i>
<b>EtherNet/IP</b>	<i>Ethernet Industrial Protocol</i>
<b>FBD</b>	Diagrama de Blocos ( <i>Function Block Diagram</i> )
<b>FMS</b>	Sistema Flexível de Fabrico ( <i>Flexible Manufacturing System</i> )
<b>HMI</b>	Interface Humano-Máquina ( <i>Human-Machine Interface</i> )
<b>IEC</b>	International Electrotechnical Commission
<b>IFR</b>	International Federation of Robotics
<b>IL</b>	Lista de Instruções ( <i>Instruction List</i> )
<b>ISEP</b>	Instituto Superior de Engenharia do Porto
<b>ISO</b>	International Organization for Standardization
<b>IoT</b>	<i>Internet das Coisas (Internet of Things)</i>
<b>KRL</b>	<i>KUKA Robot Language</i>
<b>LASER</b>	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
<b>LD</b>	<i>Ladder Diagram</i>
<b>LIN</b>	Ponto Linear ( <i>Linear Point</i> )
<b>MEEC</b>	Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores
<b>PLC</b>	Controlador Lógico Programável ( <i>Programmable Logic Controller</i> )
<b>PROFIBUS</b>	<i>Process Field Bus</i>

<b>PTP</b>	Ponto a Ponto ( <i>Point to Point</i> )
<b>RIA</b>	Robotics Industry Association
<b>ROI</b>	Retorno de Investimento ( <i>Return on Investment</i> )
<b>SCARA</b>	<i>Selective Compliance Assembly Robot Arm</i>
<b>SFT</b>	Gráfico de Funções Sequenciais ( <i>Sequential Function Chart</i> )
<b>ST</b>	Texto Estruturado ( <i>Structured Text</i> )
<b>STL</b>	<i>Standard Template Library</i>
<b>TCP</b>	<i>Tool Center Point</i>
<b>TEDI</b>	Tese/Disertação

# Capítulo 1

## Introdução

Neste capítulo é realizada a introdução à dissertação. Será apresentada a contextualização do problema e a motivação para a realização deste trabalho, bem como os objetivos a atingir. Por fim, será apresentada a calendarização e a organização da dissertação.

Desde que há existência do ser humano, que o mesmo se fez destacar pela busca de ferramentas que o auxiliassem no seu cotidiano, em tarefas relacionadas com o seu dia a dia e que o levasse à sua sobrevivência. A procura incansável pelo melhoramento das suas ferramentas e realização dos seus sonhos está desde sempre presente no ser humano, o qual fez com que a tecnologia evoluísse até aos dias de hoje.

O conceito de robô terá surgido da civilização grega, tendo ocorrido grandes avanços na área através de Leonardo Da Vinci e com o tempo, em paralelo com a ficção científica, terá surgido o termo robótica como sendo uma ciência. Com o avançar dos anos, da evolução da ciência e as forças sentidas pela humanidade para se suprirem necessidades do quotidiano, tornou-se empírico a exploração da área da robótica e da automação. O interesse e foco dos cientistas tornou-as indispensáveis nos dias que correm, levando estas áreas mais além [1].

Junji Tsuda, presidente da International Federation of Robotics (IFR), afirma que os robôs são uma importante parte das indústrias, pelo que estes asseguram o progresso das mesmas. Os robôs industriais são cada vez mais dotados de tecnologias de ponta, tais como a visão artificial e previsão de falhas através de inteligência artificial (AI). Estes são cada vez mais fáceis de programar e o uso dos mesmos torna possível o melhoramento de indicadores como a produtividade [2].

A venda de robôs industriais tem batido novos *records* a cada ano que passa. Um estudo recente (outubro de 2018) mostra que em 2017 houve um crescimento de vendas, em cerca de 30%, face ao período homólogo anterior (2016), o que demonstra a atual demanda deste tipo de sistemas. De outro ponto de vista, pode concluir-se através do mesmo estudo que as vendas de robôs industriais aumentaram em 114% nos últimos cinco anos, passando de 178 000 unidades, em 2013, para 381 000 unidades, em 2017. O estudo prevê ainda

um crescimento, face a 2017, de 65% para 2021, um crescimento de 14% por ano, o que corresponderá a 630 000 unidades de robôs industriais, em 2021 [2].

Estas informações encontram-se sintetizadas na Figura 1.1. Através da mesma é possível analisar uma estimativa de vendas de robôs efetuadas de 2009 - 2017 e uma estimativa de vendas a efetuar (previsão) de 2018 - 2021.

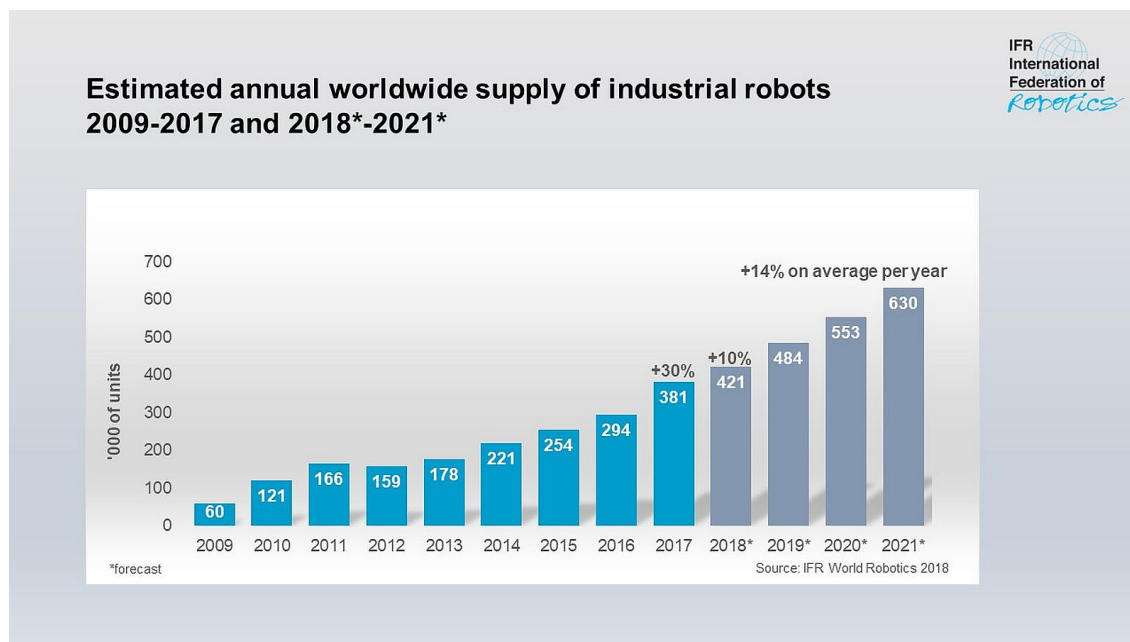


Figura 1.1: Estimativa anual de vendas de robôs industriais a nível mundial (2009 - 2031) [2].

São várias as aplicações dos robôs na indústria, tais como na indústria automóvel, elétrica/eletrotécnica e metalúrgica fazendo corresponder, respetivamente, a um nível de vendas de 33%, 32% e 10%, e os restantes 25% distribuídos por outras indústrias, em 2017 [2].

O estudo assume que a indústria automóvel é o setor que mais recorre à utilização de robôs, dada a crescente complexidade na produção de carros. Os fabricantes de carros híbridos, elétricos e tradicionais sentem a necessidade de uma maior variedade de modelos de carros e, aliado ao desafio de se atingirem determinadas metas climáticas em 2030 (existência de uma maior porção de carros novos de baixas e zero emissões), sente-se assim uma grande necessidade de automatizar processos [2].

Face ao crescimento sentido na indústria automóvel, explicado anteriormente, faz-se sentir uma maior necessidade de baterias, *chips* e *displays*. Deste modo torna-se inevitável a automação deste tipo de indústria, na qual os robôs conseguem movimentar objetos de pequenas dimensões a altas velocidades, com bastante precisão e garantir qualidade, otimizando custos de produção. Já a indústria metalúrgica sente uma crescente procura pelos seus serviços, essencialmente no que diz respeito aos metais cobalto e lítio usados no fabrico das baterias dos carros elétricos [2].

Grandes empresas já se encontram a implementar estratégias de automação da indústria 4.0<sup>1</sup>, na qual se insere a robótica, como um meio para dar resposta rápida às necessidades sentidas na área [2].

Em 2017 existia em média 85 robôs por cada 10 000 funcionários na indústria de fabrico, mais 11 unidades face a 2016. As regiões da Europa e América encontram-se acima da média global, com 106 e 91 robôs, respetivamente, e a Ásia abaixo da média com 75 unidades robóticas [2]. Contudo, nem todos os países se encontram na mesma média da sua região: Portugal em 2016 tinha uma média de 58 robôs por cada 10 000 funcionários [4].

Porém, é erróneo pensar que o aumento da automação das indústrias cause o aumento de desemprego. Na verdade, um estudo realizado pelo Centre for European Economic Research concluiu que o desemprego causado foi compensado por novos empregos de uma forma geral. Guy Michaels, chefe de pesquisa da London School of Economics, refere num outro estudo que, com o aumento da automação a mão de obra pouco qualificada diminuiu e os salários aumentaram ligeiramente, acabando por concluir que os robôs industriais não têm um impacto significativo no número total de funcionários [5].

Com a automação e modernização da produção transferem-se os trabalhos perigosos, insalubres, monótonos e repetitivos dos seres humanos para as máquinas. Na verdade, nem todos os processos são transferidos para as máquinas, mas sim uma parte dos processos de trabalho de um funcionário [5].

## 1.1 Contextualização e motivação

Este trabalho insere-se na unidade curricular Tese/Dissertação (TEDI), do 2º ano, do Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores (MEEC) na especialização de Automação e Sistemas do Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP).

Na unidade curricular de TEDI foi proposto o desenvolvimento de um estágio, para origem de tese, cujo tema incida no âmbito da área de estudos. A seleção do tema deveu-se à intenção do candidato realizar um estágio curricular e ao gosto do mesmo pela área da automação e robótica. Assim, surge este trabalho intitulado de “Célula automatizada para montagem de quadros brancos”.

O projeto em questão data de 2015 e terá surgido de um problema exposto por um cliente, que pretende melhorar o seu sistema produtivo e tornar o mesmo mais eficiente.

Perante o cenário apresentado, o estágio curricular decorreu na empresa RobotSol, uma empresa com mais de quinze anos de experiência, que se dedica ao desenvolvimento de soluções à medida, de equipamentos e linhas para a indústria em geral.

---

<sup>1</sup>Conceito usado para notar a quarta revolução industrial, também conhecido por fábrica inteligente. Fazem parte deste conceito as principais inovações tecnológicas no que diz respeito à automação, controlo e tecnologia da informação. Este conceito tem como principais pilares a *internet* das coisas (IoT), segurança, *cloud* e *big data* [3].

O facto do desenvolvimento deste trabalho ser realizado em ambiente industrial terá motivado o candidato na realização deste trabalho, uma vez que permitiu consolidar conhecimentos adquiridos ao longo do percurso académico e a aquisição de novas experiências.

## 1.2 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo principal o desenvolvimento de uma célula automatizada para montagem de quadros brancos. Dada a complexidade inerente a este objetivo, sentiu-se a necessidade de o subdividir em múltiplos objetivos de realização mais simples, tais como:

- análise e compreensão dos requisitos do sistema;
- configuração da comunicação entre o controlador lógico programável e o dispositivo mecânico e robôs;
- desenvolvimento de um algoritmo para o controlador lógico programável;
- validação das estruturas mecânicas desenvolvidas pelo projeto mecânico da empresa;
- realização de uma simulação do sistema a implementar, recorrendo ao simulador disponibilizado pelo fabricante do robô;
- desenvolvimento do algoritmo de um robô industrial para colocação de peças numa mesa de montagem de peças;
- desenvolvimento do algoritmo de um robô industrial para colocação da peça montada na mesa de aparafusamento;
- desenvolvimento de uma interface humano-máquina para a partilha, controlo e obtenção de dados de produção da célula;
- montagem do *layout* nas instalações da RobotSol;
- testes e validações do sistema nas instalações da RobotSol;
- instalação e integração do sistema nas instalações do cliente;
- ajustes e testes do sistema no cliente.

## 1.3 Calendarização

Sendo o desenvolvimento de uma célula automatizada para montagem de quadros brancos, a motivação deste trabalho, a sua prossecução conduziu à calendarização (planeada) apresentada na Figura 1.2. A calendarização inicia a 24 de setembro de 2018 e pressupõe um total de 11 tarefas/atividades, tendo como término previsto o dia 17 de maio de 2019.

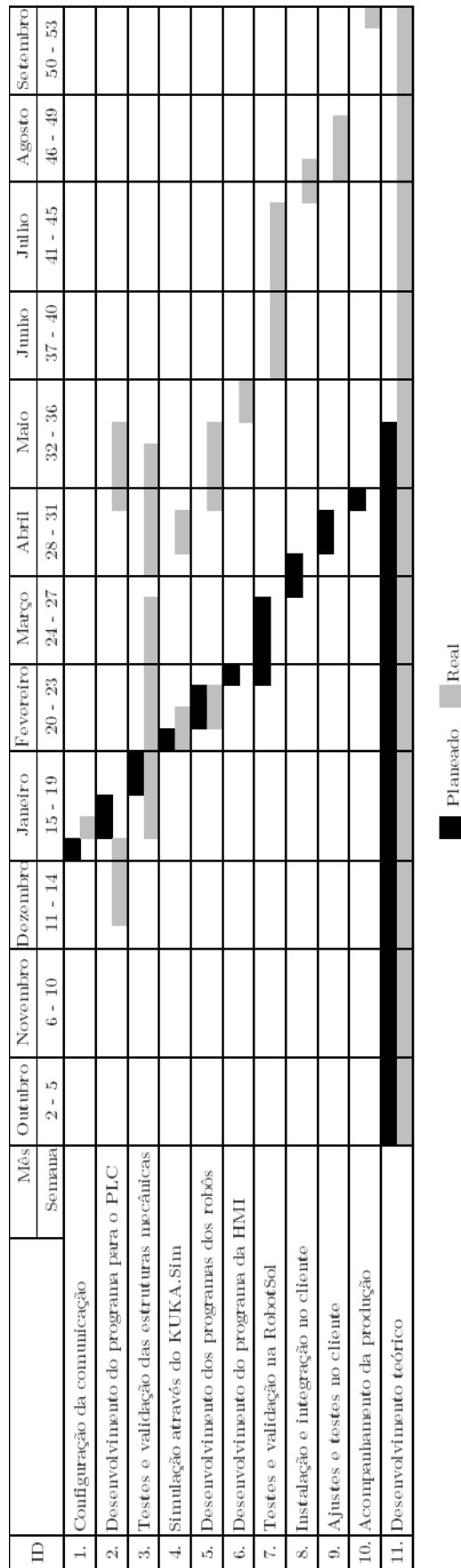


Figura 1.2: Calendarização planeada e real.

Ao longo do tempo sentiu-se a necessidade de se adaptar a calendarização planeada de modo a ir de encontro com as necessidades e imprevistos que existiram, tendo conduzido à calendarização real que se apresenta na mesma figura.

Comparando a calendarização planeada com a real, facilmente se observa que ocorreram desvios face ao que seria o idealizado. Estes desvios ocorreram devido às necessidades de se adaptar as tarefas ao longo do tempo à realidade existente, aos imprevistos encontrados (tais como problemas mecânicos no sistema), às informações obtidas que não se encontravam no planeamento e à mudança de projeto em dezembro para o que se encontra apresentado neste trabalho. Além disso, o facto de ter sido contratado pela RobotSol, a meio do estágio, levou à atribuição de outros projetos em simultâneo, causando o desvio do planeamento.

## 1.4 Organização da dissertação

Atendendo às considerações apresentadas nas secções anteriores, este trabalho apresenta um levantamento de tarefas e objetivos macro a atender ao longo desta dissertação. Assim, esta dissertação encontra-se subdividida em capítulos, e estes em secções, de modo a facultar uma melhor compreensão e facilitar a sua leitura.

Perante as ideias apresentadas, esta tese encontra-se dividida em oito capítulos. O Capítulo 1 apresenta uma introdução à dissertação, os Capítulos 2, 3 e 4 apresentam o estado da arte referente ao assunto abordado no relatório, os Capítulos 5, 6 e 7 representam a implementação do trabalho e, por fim, o Capítulo 8 representa as conclusões do trabalho.

No Capítulo 1 é efetuada uma breve contextualização do problema e os objetivos a atingir. É ainda apresentada a calendarização planeada em comparação com o real.

No Capítulo 2 apresenta-se a resenha bibliográfica referente à robótica, na qual se efetua um breve enquadramento histórico, os constituintes de um robô industrial, apresenta-se alguma terminologia usada na robótica, a tipologia dos robôs e os tipos de programação.

No Capítulo 3 é abordada a automação industrial, na qual se apresenta o controlador Lógico Programável, arquitetura do sistema, *hardware* e *software*. De seguida são abordados os sistemas de produção focando nos temas de sistemas flexíveis de fabrico, algumas noções básicas de pneumática e as redes industriais.

No Capítulo 4 apresentam-se assuntos referentes à indústria da montagem automatizada. Assim, começa-se por abordar a montagem automatizada no seu geral e efetua-se a apresentação de alguns casos de estudo referentes a este tópico.

No Capítulo 5 é abordada a arquitetura do sistema desenvolvido. Este começa pela descrição do problema, aborda o processo do sistema e a constituição da célula, relativamente a cada componente. Neste ainda se apresenta o modo de funcionamento da célula, bem como a correspondência luminosa.

No Capítulo 6 é apresentada a implementação do trabalho. Neste começa-se por apresentar a simulação realizada, no que diz respeito às trajetórias desempenhadas pelos robôs

e o tempo de ciclo simulado. Num segundo momento é abordada a programação dos diferentes componentes.

No Capítulo 7 abordam-se os testes e resultados. Neste apresentam-se os testes realizados na RobotSol e no cliente, que permitiram validar o funcionamento dos componentes e da célula. De seguida, apresenta-se a validação do tempo de ciclo real da célula, indo de encontro com o desejado pelo cliente.

No Capítulo 8 abordam-se as principais conclusões do trabalho realizado. Aqui, começa-se por apresentar a satisfação dos objetivos pretendidos e algumas possíveis futuras melhorias do sistema implementado.



## Capítulo 2

# A robótica

*Desde o início das primeiras civilizações que o ser humano tem demonstrado habilidades para o engenho, tendo começado por criar uns simples artefactos à sua imagem, suprimindo as suas próprias necessidades do quotidiano, até aos dias de hoje, onde a robótica foi evoluindo e dominada pelas necessidades humanas.*

*Neste capítulo será apresentada uma breve história da robótica, onde serão traçadas as principais linhas da evolução da robótica e os seus responsáveis. À posteriori, será apresentado o conceito de robô, as suas diferentes definições, dada a não uniformização internacional da mesma, e as leis da robótica. Será ainda apresentada a constituição e uma possível classificação dos robôs, e alguns conceitos práticos a reter sobre este tema.*

### 2.1 Breve história da robótica

O conceito de robô terá surgido na época da civilização grega, contudo fez-se destacar através de Leonardo di Ser Piero da Vinci<sup>1</sup>, ver Figura 2.1a (\*1452 - †1519). Com os seus conhecimentos na área de desenho e na anatomia humana e animal, desencadeou as maiores descobertas no que diz respeito à criação de articulações mecânicas.

Leonardo criou o primeiro robô antropomórfico<sup>2</sup> articulado da civilização ocidental, como se encontra presente na Figura 2.1b. Este robô blindado foi projetado para se sentar, agitar os seus braços e mover a sua cabeça através de um pescoço flexível enquanto abre e fecha a sua mandíbula [7]. Este e outros desenvolvimentos encontram-se registadas no livro *Codex Atlanticus*<sup>3</sup> [8, 9, 10].

---

<sup>1</sup>Mais conhecido por Leonardo da Vinci e pelas suas pinturas, em destaque Mona Lisa. Além de pintor, era desenhista, designer e engenheiro [6].

<sup>2</sup>Semelhante ao ser humano, com a mesma forma.

<sup>3</sup>Encontra-se no livro mais de 5000 páginas manuscritas das quais fazem parte estudos, desenhos, ilustrações e notas que Leonardo da Vinci terá escrito entre 1478 - 1508.



(a) Leonardo da Vinci [8].



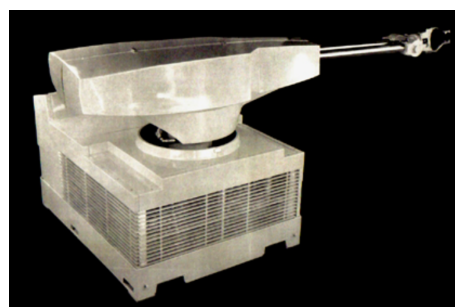
(b) Armadura mecânica [11].

Figura 2.1: Armadura mecânica criada por Leonardo da Vinci.

No século passado os robôs tiveram um longo percurso. Em 1920 foi registado o primeiro uso do termo “*robot*” (em português robô), derivado da palavra eslava<sup>4</sup> “*robot*”, que significa trabalho forçado, tendo sido introduzida pelo dramaturgo Karel Čapek, através da peça *Rossum’s Universal Robots*. A peça aborda a perda da humanização na sociedade tecnológica, dado que é retratado o uso de violência, adquirida por seres artificiais através dos seres humanos, para uma revolta contra os seres humanos [1, 8, 10].

A palavra robótica surgiu em 1940, do escritor de ficção científica Isaac Asimov, como uma ciência que lida com robôs. Em 1942, no romance *Runaround*, Isaac enunciou as leis da robótica, as quais são apresentadas mais à frente na secção 2.3, estabelecendo um padrão ético sobre qual o comportamento que os robôs teriam para com os humanos [1, 8, 10, 12].

O primeiro pedido de patente para um manipulador programável foi efetuado por George Charles Devol em 1954, tendo sido concedido em 1961. Da empresa Unimation Inc, fundada por Devol e Joseph Frederick Engelberger (ver Figura 2.2a), surgiu em 1961, o primeiro robô industrial (ver Figura 2.2b) [8, 12, 13].

(a) Protótipo da Unimation a servir um *cocktail* a Devol, à direita, e Engelberger [8].

(b) Unimate, primeiro robô industrial [14].

Figura 2.2: Os criadores do primeiro robô industrial.

<sup>4</sup>Povos europeus (eslavos) que habitam sobretudo a região dos Balcãs e Rússia.

Nos últimos 50 anos, a pesquisa relacionada com a robótica foi em busca de soluções para colmatar necessidades humanas, contribuindo para a evolução da robótica. Esta evolução levou à incorporação de robôs industriais em fábricas na área de produção, o que levou à existência de novos requisitos como flexibilidade e inteligência [12, 15].

Os robôs de hoje servem para os mais diversos propósitos. Eles são capazes de realizar desde as tarefas mais simples às mais complexas, como é o caso das limpezas, agricultura, construções, cirurgias e exploração de outros planetas.

## 2.2 Definição de robô

Nos dias de hoje, coexistem variadas definições para robô, para diferentes organizações da área da robótica, tais como:

- Robotics Industry Association (RIA): Um robô é um manipulador reprogramável, multi-funcional, projetado para mover materiais, peças, ferramentas ou dispositivos especiais em movimentos variáveis programados para a realização de uma variedade de tarefas [16];
- International Organization for Standardization (ISO) 8373:2012: Um robô é um mecanismo atuado e programável em dois ou mais eixos, com um grau de autonomia<sup>5</sup>, movendo-se dentro do seu ambiente, para executar tarefas [17];
- The British Automation & Robot Association (BARA): Um robô é um dispositivo reprogramável, projetado para manipular e transportar peças, ferramentas ou especializado em implementar a fabricação por meio de movimentos de variáveis programadas para o desempenho de tarefas específicas de fabricação [18].

## 2.3 As leis da robótica

O escritor e cientista russo Isaac Asimov, em um dos seus contos, enunciou as conhecidas leis da robótica [12]. Elas têm a intenção de proteger o ser humano das gerações inteligentes de robôs [16]:

- primeira lei: um robô não pode prejudicar um ser humano ou, por inação, permitir que algo de mal lhe aconteça;
- segunda lei: um robô deve obedecer às ordens dos seres humanos, exceto quando estas contrariam a primeira lei;
- terceira lei: um robô deve proteger a sua própria existência, desde que não contrarie as duas primeiras leis;
- lei zero<sup>6</sup>: um robô não pode fazer mal à humanidade e nem, por inação, permitir

---

<sup>5</sup>Autonomia é a capacidade de um sistema funcionar corretamente sem a intervenção do ser humano.

<sup>6</sup>Só mais tarde esta lei foi adicionada por Isaac Asimov, acima das outras três já enunciadas.

que ela sofra algum mal. Deste modo, o bem da humanidade é primordial ao dos indivíduos.

## 2.4 Vantagens e desvantagens do uso de robôs

O uso de robôs está diretamente associado aos objetivos que se pretendem obter, pelo que são várias as vantagens associadas em diferentes níveis, porém existem desvantagens e questões se colocam perante a adoção dos robôs em detrimento do ser humano.

Associado ao uso de robôs encontram-se presentes diferentes vantagens, as quais podem ser divididas em diferentes níveis - técnico, económico e social.

O uso de robôs a nível técnico permite a existência de versatilidade através da programação, para diferentes níveis de formação do operador do robô. Além disso permite a existência de flexibilidade uma vez que podem facilmente alternar entre processos. Dadas estas valências e o facto do uso dos robôs tornar as linhas de produção mais rápidas, torna-se notório um aumento da eficiência, conseguindo produzir-se mais e reduzir custos [19].

Inerente aos robôs encontra-se a precisão e repetibilidade, pelo que permite assim um aumento da qualidade comparativamente ao ser humano, uma vez que fatores como cansaço e distração são eliminados. Além disso, os robôs suportam ambientes hostis, sendo uma mais valia. Por outro lado, a nível económico, os robôs possuem um elevado retorno de investimento (ROI), um aumento da produtividade, pelo que a existência de interrupções e absentismo não existe e o mesmo equipamento consegue ter associado várias funções e equipamentos [19].

A nível social, os robôs fazem tarefas que aos olhos do ser humano são pesadas ou desagradáveis, pelo que lugares insalubres à saúde do ser humano passam a ser dotados de robôs. Estes permitem ainda a redução do número de acidentes e um aumento do poder de compra [19].

Como desvantagens associadas aos robôs existe a redução de atividades atribuídas ao ser humano, o aumento do desemprego e a subjugação do homem pela máquina [19].

## 2.5 Constituintes de um robô industrial

Um robô industrial de modo geral é concebido para posicionar e orientar no espaço a sua garra ou ferramenta. A estrutura dele é constituída por uma diversidade de componentes, no entanto, uma possível arquitetura de um sistema robótico encontra-se apresentada na Figura 2.3.

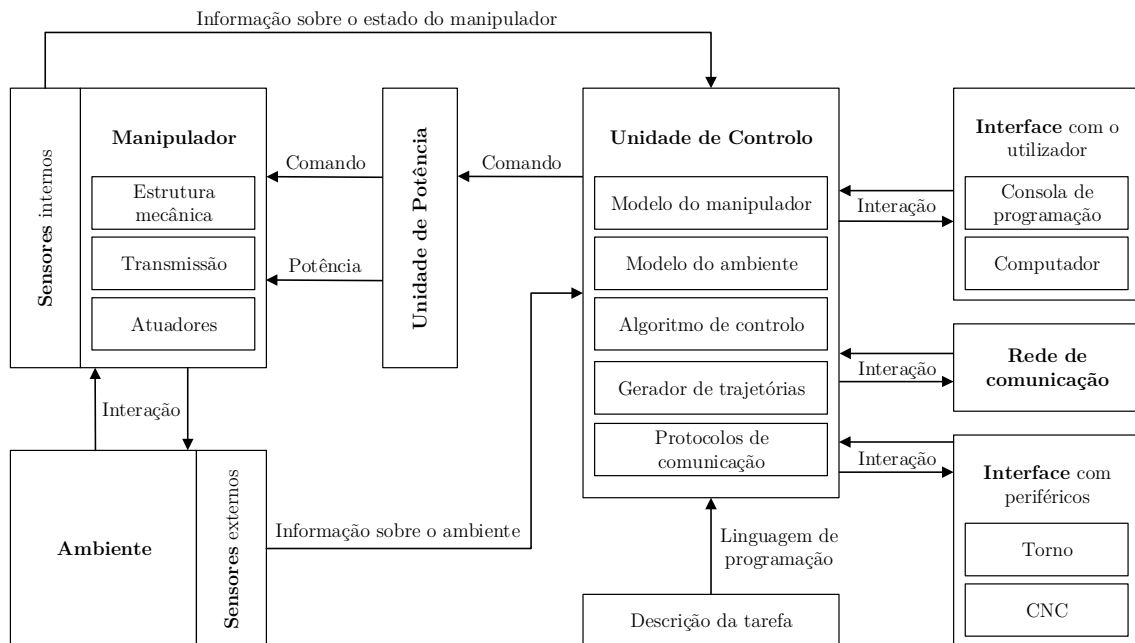


Figura 2.3: Arquitetura de um sistema robótico (adaptado de [20]).

Desta arquitetura faz parte a unidade de controlo, a qual interage com as diferentes interfaces, redes de comunicação, unidade de potência, e sensores. A unidade de potência proporciona potência aos atuadores, e a transmissão liga os atuadores à estrutura mecânica, de modo que seja possível mover a estrutura mecânica e o atuador final.

Os sensores transmitem a informação para a unidade de controlo, sobre estados internos e externos, associados ao manipulador mecânico e ao ambiente que envolve o robô.

Nas próximas subsecções será detalhado um pouco mais cada um dos constituintes da arquitetura de um sistema robótico.

### 2.5.1 Unidade de controlo

A unidade de controlo é considerada o “cérebro” do sistema, um dispositivo baseado em microcomputador (normalmente), que gere e monitoriza os parâmetros necessários para a realização de uma dada tarefa.

A unidade de controlo faz uso dos modelos do manipulador e do ambiente, e de informações recolhidas pelos sensores e utilizador, de modo a tomar decisões e a comunicar com os atuadores [20].

Pode ainda ser responsável pela comunicação com o operador, por exemplo através da consola de programação ou computador, e com outros periféricos, como por exemplo, máquinas, torno e o controlo numérico computadorizado (CNC). Ainda pode ser possível a comunicação com a *cloud* através da rede de comunicação [20].

### 2.5.2 Unidade de potência

A unidade de potência é o dispositivo responsável por proporcionar potência aos atuadores. Exemplos de unidades de potência padrão são o compressor, a bomba hidráulica e a fonte elétrica as quais fazem corresponder, respetivamente, aos atuadores pneumáticos, hidráulicos e elétricos [20].

Em alguns sistemas a unidade de potência encontra-se integrada com a unidade de controlo, dependendo de cada fabricante de robôs [20].

### 2.5.3 Manipulador mecânico

O braço robótico é denominado de manipulador mecânico, ou estrutura mecânica, típico de uso industrial e que pretende imitar o braço humano. Por analogia ao braço humano, o braço robótico é constituído pela base, braço e punho [20].

#### Juntas e elos

O braço mecânico é composto por um conjunto de elementos rígidos (elos) conectados entre si (juntas), como se pode ver na Figura 2.4, formando cadeias cinemáticas que definem uma estrutura mecânica, sendo que o primeiro elo do robô corresponde à base e o último à garra ou ferramenta [21].

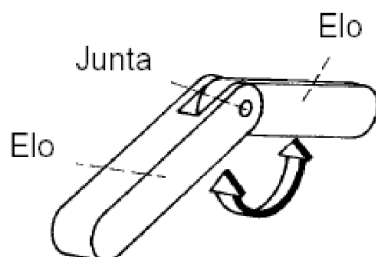


Figura 2.4: Elos e junta de um robô [21].

Existem vários tipos de juntas com as mais variadas configurações, das quais fazem parte [1]:

- prismática ou linear (P ou L) - esta junta apresenta um movimento linear entre os elos adjacentes (ver Figura 2.5a);
- rotativas:
  - rotativa de torção (T) - esta junta apresenta uma rotação com eixo paralelo aos eixos dos dois elos (ver Figura 2.5b);
  - rotativa rotacional (R) - esta junta apresenta uma rotação com eixo perpendicular aos eixos dos dois elos (ver Figura 2.5c);
  - rotativa revolvente (V) - esta junta apresenta uma rotação com o eixo paralelo ao elo de entrada e perpendicular ao elo de saída (ver Figura 2.5d);

- esférica (S) - esta junta apresenta três juntas de rotação, pelo que permite a existência de rotação em três eixos (ver Figura 2.5e);
- cilíndrica (C) - esta junta é composta por duas juntas, sendo uma linear e outra rotacional (ver Figura 2.5f);
- planar - esta junta apresenta duas juntas lineares, pelo que realiza movimentos em duas direções (ver Figura 2.5g);
- parafuso (H) - esta junta apresenta um movimento algo idêntico ao da junta linear, porém, o movimento efetua-se segundo o eixo central, ou seja, no movimento do parafuso (ver Figura 2.5h).

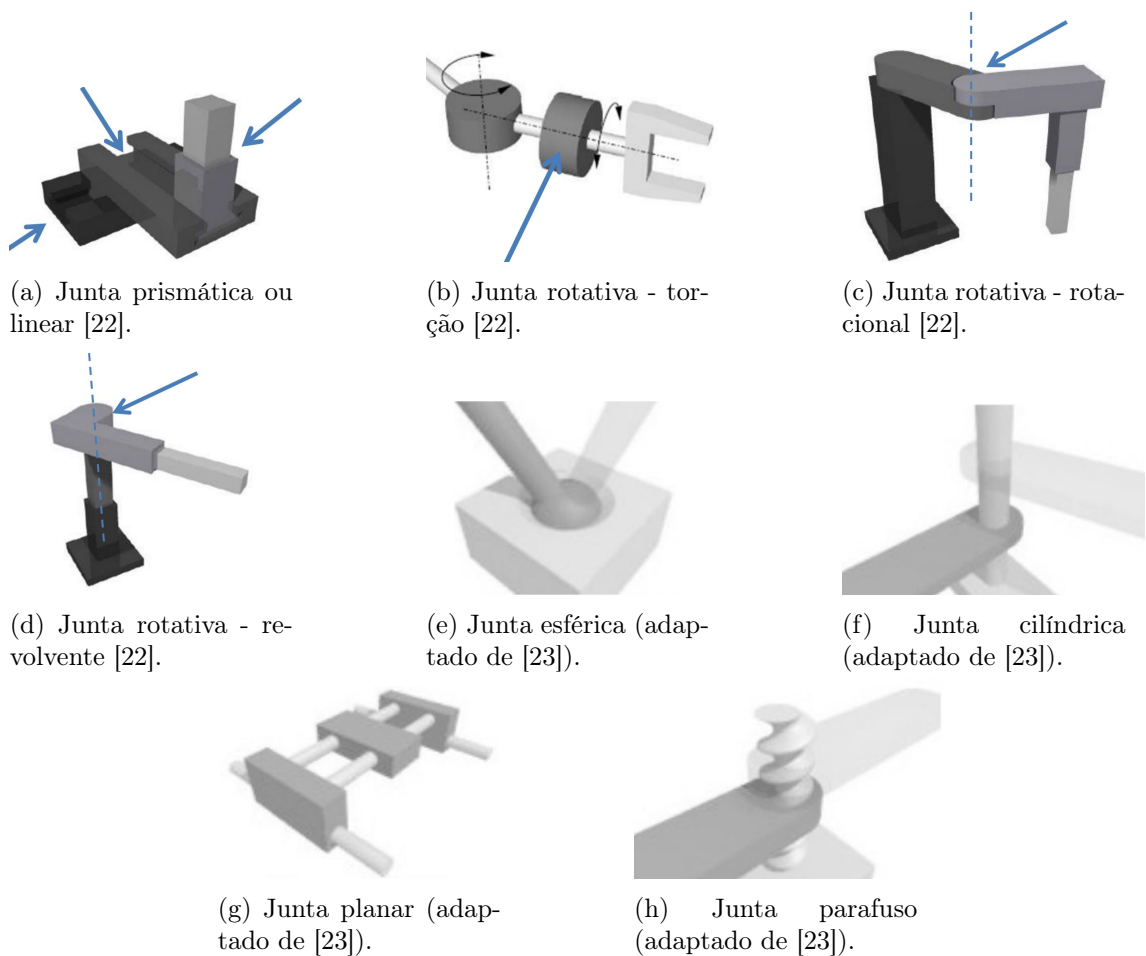


Figura 2.5: Tipos de juntas utilizadas em robôs.

## Atuadores

Entende-se por atuador o elemento que transforma um determinado tipo de energia numa ação, como resposta aos comandos de cariz manual ou automático, com a finalidade de atuar na configuração geométrica do robô (mudando a sua configuração). A transmissão liga os atuadores à estrutura mecânica [12, 16, 20, 21, 24].

Existem três tipos de acionamento nos robôs, sendo eles hidráulicos, pneumáticos e elétricos [12, 16, 20, 21, 24].

No acionamento hidráulico os principais componentes são os atuadores, válvulas de controlo e as unidades de energia. Os atuadores podem ser cilindros, motores e bombas de óleo [12, 16, 20, 21, 24].

O sistema de acionamento hidráulico é caracterizado por permitir uma grande capacidade de carga e velocidades elevadas, porém apresenta como desvantagem associada o seu elevado custo [12, 16, 20, 21, 24].

Os componentes que caracterizam o sistema de acionamento pneumático são bastante semelhantes aos hidráulicos, porém o sistema pneumático faz uso de ar, em vez de óleo, logo este irá necessitar de um sistema de energia diferente do sistema hidráulico, como por exemplo um compressor e filtros de ar [12, 16, 20, 21, 24].

O sistema pneumático tem como vantagens ser menos dispendioso e permitir atingir elevadas velocidades comparativamente a outros sistemas. Contudo possui uma má repetibilidade e um controlo difícil devido a questões relacionadas com a compressibilidade do ar [12, 16, 20, 21, 24].

No sistema de acionamento elétrico existem três tipos de atuadores: motor elétrico de corrente contínua e alternada, servomotores de corrente contínua e alternada, e motores de passo a passo. Os motores elétricos de corrente alternada são os preferidos uma vez que não possuem escovas, o que reduz o custo de manutenção e possibilita a aplicabilidade deste sistema em ambientes com Atmosferas Explosivas (ATEX)<sup>7</sup> [12, 16, 20, 21, 24].

O sistema de acionamento elétrico tem como vantagem possuir custos relativamente baixos e uma maior facilidade no controlo comparativamente com os outros atuadores. Como desvantagem associada tem a necessidade de usar travões e o arco elétrico pode ser um aspeto a ter em conta em atmosferas inflamáveis. Mais vantagens e desvantagens referentes aos atuadores elétricos, hidráulicos ou pneumáticos podem ser encontradas em [12, 16, 20, 21, 24].

Na Tabela 2.1 é possível visualizar um quadro resumo do que foi referido anteriormente com as diferentes características para cada tipo de atuador.

---

<sup>7</sup>Segundo [25], uma Atmosfera Explosiva é descrita como sendo “uma mistura com ar, em condições atmosféricas, de substâncias inflamáveis sob a forma de gases, vapores, névoas ou poeiras, na qual, após ignição, a combustão se propague a toda a mistura não queimada”.

Tabela 2.1: Características para os diferentes tipos de atuadores [21].

Características	Tipos de atuadores		
	Elétricos	Hidráulicos	Pneumáticos
Controlo	Fácil. Possibilidade de ser elaborado	Hoje em dia mais fácil com as servo-válvulas	Muito difícil devido a questões de compressibilidade do ar
Velocidades	Grande	Média/Grande	Muito grande
Binário a baixa velocidade (aceleração)	Pequeno/Médio	Grande	Pequeno
Precisão (repetibilidade)	Boa. Limitada pelo uso da transmissão.	Boa	Má. Exceto em operações a posições fixas
Funcionamento em situação estática	Mau. Requer trações	Excelente. Trata-se de funcionamento normal	Bom. Não há risco de danificação do sistema
Questões ambientais	Os arcos elétricos podem ser indesejados	Perigo de fugas de óleo	Sistemas limpos. Poluição de componentes, compressores e das fugas
Custos	Relativamente baixos	Altos	Relativamente baixos

### Atuador final

O atuador final encontra-se anexado ao pulso. Este efetua a ligação entre o manipulador mecânico e a peça de trabalho de modo a possibilitar efetuar determinadas ações num objeto. Pode categorizar-se um atuador final como sendo uma garra - para agarrar e manipular objetos - ou uma ferramenta - para efetuar uma operação num objeto [26].

O tipo de garras varia de acordo com a finalidade a que se destina. Assim, devem ser projetadas garras de uma forma personalizada para cada tipo de aplicação, tendo em conta variáveis como a forma, tamanho e massa dos objetos. As garras podem ser divididas em [26, 27]:

- dispositivos mecânicos simples: são dispositivos simples, como por exemplo um gancho;
- garras mecânicas: constituída por dois ou mais dedos que podem ser acionados pelo controlador do robô com o intuito de abrir e fechar a garra, de modo a agarrar e/ou mover uma peça de local;

- garras de sucção: constituída por ventosas com a finalidade de, por exemplo, mover um objeto de local. Este tipo de garra exige apenas uma superfície disponível do objeto para ser manipulado e aplicam uma pressão uniforme na superfície do objeto;
- garras magnéticas: possui a finalidade de segurar e mover partes ferromagnéticas;
- garras adesivas: a ação é baseada numa substância adesiva para efetuar o manuseamento, por exemplo de têxteis e outros materiais leves;
- dispositivos de agulhas: idêntico às garras mecânicas, contudo possui agulhas metálicas para efetuar o manuseamento, por exemplo, de têxteis;
- dispositivo insuflável ou de diafragma: consiste num dispositivo idêntico a um balão, pelo que quando insuflado se expande e pode, deste modo, agarrar determinados objetos, como é o caso dos copos de vidro. Utilizado essencialmente na manipulação de materiais frágeis.

Com o avançar da tecnologia outros conceitos de garra mais complexos surgiram, como é o caso de [26]:

- garras duplas: constituídas por duas garras mecânicas. Este tipo de garras é útil quando se efetua o carregamento e descarregamento de peças de uma máquina. Assim, uma das garras pode ter a peça a ser maquinada e a outra pode agarrar a peça acabada de ser maquinada. Caso existisse apenas uma garra, seria necessário efetuar o descarregamento da peça, mover a mesma para outra posição, depois agarrar a peça a ser maquinada e efetuar o carregamento da peça na máquina. Tendo duas garras mecânicas, reduz-se o tempo de ciclo;
- garras dotadas de sensores: este tipo de garras permitem detetar a presença do objeto de trabalho e aplicar forças específicas e/ou limitadas no objeto.

As ferramentas são usadas em aplicações para as quais o robô deva realizar uma operação no objeto de trabalho. Alguns exemplos de ferramentas que efetuam operações nos objetos são [26, 27]:

- ferramentas para operações mecânicas: estas ferramentas efetuam corte, rebarbagem e maquinagem;
- ferramentas para operações de soldadura: estas ferramentas efetuam soldadura por pontos e por arco elétrico;
- ferramentas para pintura: estas ferramentas efetuam a pintura através de *spray*;
- ferramentas para corte por jato de água: estas ferramentas efetuam corte de materiais através do jato de água.

#### 2.5.4 Sensores

Os sensores são usados para recolher informações sobre estados internos e externos do robô, e fornecer os mesmos à unidade de controlo de modo a serem processados [16].

Assim, segundo o ponto de vista da robótica industrial, os sensores podem ser classificados como internos e externos. Os sensores internos são usados pelo controlador de modo a controlar a posição - potenciômetros e codificadores óticos - e a velocidade - tacômetros - das articulações do robô.

Os sensores externos são usados para coordenar a operação de um robô com outros equipamentos existentes na célula. Este tipo de sensores podem ser encontrados segundo a forma de [26]:

- sensores táteis: usado para detetar o contacto entre o sensor e outro objeto. Estes podem ser subdivididos em sensores de toque - indica apenas o contacto - e de força - indica a força aplicada num objeto;
- sensores de proximidade: usado para detetar a proximidade de um objeto;
- sensores óticos: usados para detetar a presença ou ausência de objetos;
- visão artificial: usada na robótica para efetuar validações, identificações e orientações de um objeto;
- outros sensores: muitos outros sensores podem ser usados dependendo da informação que se pretende obter, como, por exemplo, sensores de temperatura, pressão e fluxo de fluidos, tensão e corrente elétrica.

## 2.6 Terminologia na robótica

Para um melhor entendimento sobre a robótica, torna-se necessário estudar alguns conceitos/termos usados na robótica. Assim, nas próximas subsecções serão abordados alguns dos termos mais usados no âmbito da mesma - o volume de trabalho, os graus de liberdade e mobilidade, a velocidade e a aceleração de trabalho, a capacidades de carga, a resolução, a precisão e a repetibilidade.

### 2.6.1 Volume de trabalho

Normalmente, o volume de trabalho representa o conjunto de pontos que podem ser alcançados pelo atuador final no espaço tridimensional, ou seja, é o espaço que o atuador final consegue alcançar. O volume do trabalho é uma das características que dita os tipos de aplicações para as quais uma configuração geométrica pode ser usada [1, 21].

A distância máxima possível de alcançar pelo manipulador mecânico é denominada pelo alcance e aos pontos que não podem ser alcançados pelo atuador final é atribuído o termo de espaço morto (*deadspace* em inglês) [21].

Mais à frente serão apresentados os diferentes tipos de configurações e o respetivo volume de trabalho.

### 2.6.2 Graus de liberdade e de mobilidade

Os graus de liberdade e de mobilidade ajudam a caracterizar os movimentos efetuados num sistema. Os graus de liberdade (DOF) de um sistema correspondem aos movimentos independentes que um dispositivo pode efetuar. Assim, um dispositivo que se desloque em três direções e rode em torno de três eixos, diz-se que possui seis DOF. Os graus de mobilidade correspondem ao número de juntas do sistema [21].

### 2.6.3 Velocidade de trabalho e capacidade de carga

Para a seleção de um robô é necessário ter em consideração a velocidade e aceleração de trabalho do mesmo. Estas medidas são quantificadas no extremo do punho do robô, pelo que as mesmas se encontram diretamente relacionadas com o tempo de ciclo de uma tarefa.

A velocidade de trabalho traduz a velocidade máxima de uma junta. É necessário ter em conta vários fatores na determinação da velocidade para uma dada tarefa, como a precisão que se pretende obter, a massa dos objetos a serem manipulados e as distâncias que se pretendem atingir [21].

A capacidade de carga encontra-se diretamente ligada à aceleração e velocidade. Esta característica é especificada para as condições em que o manipulador se encontra numa posição desfavorável. A capacidade de carga pode ser separada em capacidade de carga nominal e máxima, as quais se definem [21]:

- a capacidade de carga nominal traduz a carga máxima, para um manipulador que se mova a uma velocidade máxima sem que ocorra perda de precisão;
- a capacidade de carga máxima traduz a carga máxima, para um manipulador que se mova a velocidade reduzida sem que ocorra perda de precisão.

Para diferentes tipos de aplicações estes parâmetros podem ser mais ou menos importantes. Para robôs que efetuam montagem, normalmente, a aceleração e a rigidez do mecanismo (estrutura e rigidez do acionamento) são parâmetros de *design* mais importantes do que a velocidade ou a capacidade de carga máxima, dado que se pretende reduzir ao máximo os tempos de ciclo do movimento de *pick-and-place* mantendo a precisão de posicionamento [1].

### 2.6.4 Resolução, precisão e repetibilidade

Os robôs industriais são usados em aplicações que exigem elevados valores de precisão e repetibilidade, pelo que é usual encontrar os conceitos de resolução, precisão e repetibilidade associados aos robôs. Estes conceitos podem definir se um robô é apto para uma determinada função [28].

A resolução da junta de um manipulador representa o menor incremento que o robô pode efetuar, o que faz corresponder à distância entre dois pontos endereçáveis. A resolução é importante quando se pretende um bom posicionamento, pelo que têm influência sobre este parâmetro o sistema de controlo e mecânico [21, 29].

A precisão de um manipulador corresponde à capacidade do robô posicionar o manipulador final sobre um ponto programado/desejado, ou seja, a precisão corresponde à distância entre o ponto programado e o ponto atingido pelo manipulador do robô [21, 28, 29].

A repetibilidade representa a capacidade de um robô retornar repetidamente à mesma posição. Existem vários fatores que podem influenciar a repetibilidade de um robô, como por exemplo a variabilidade de comportamento mecânico e dos materiais [21, 29].

Através da Figura 2.6 é possível observar os três conceitos apresentados anteriormente de uma forma mais expositiva.

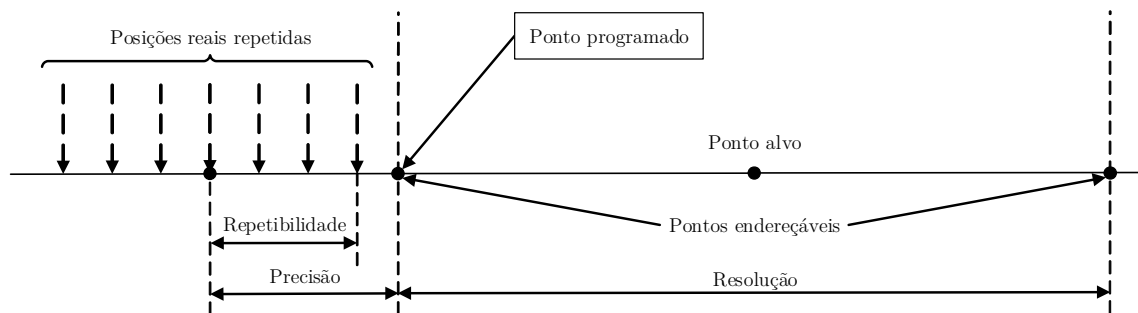


Figura 2.6: Resolução, precisão e repetibilidade de um sistema (adaptado de [30, 21]).

## 2.7 Tipologia dos robôs industriais

Os robôs podem ser classificados quanto à sua mobilidades, podendo esta ser do tipo fixa ou móvel. Os robôs do tipo móvel podem ser classificados quando ao meio ambiente em que se inserem e ao tipo de locomoção, já os robôs do tipo fixo podem ser classificados quanto à sua estrutura cinemática e espaço de trabalho.

No que diz respeito à sua mobilidade, um robô diz-se móvel quando o mesmo consegue mover-se da posição em que se encontra; por outro lado, um robô diz-se fixo quando a sua base se encontra fixa, não permitindo assim a locomoção do robô.

Um sistema robótico do tipo mobilidade fixa pode ser classificado quanto à sua estrutura cinemática do tipo: configuração série e paralela.

Um robô de configuração série consiste em vários elos conectados em série através de vários tipos de juntas. Uma extremidade (base) encontra-se conectada ao chão e a outra extremidade (atuador final) encontra-se livre para se mover no espaço.

Normalmente, as três primeiras articulações são usadas para posicionar um ponto de referência no espaço e as três últimas constituem o pulso, que orienta o atuador final em torno desse ponto de referência. Exemplo da configuração série são os robôs pórtico,

cartesiano, cilíndrico, esférico, articulado e o *Selective Compliance Assembly Robot Arm* (SCARA).

Um robô de configuração paralela consiste no uso de elos ligados paralelamente, suportando um atuador final. Geralmente, a configuração do tipo paralela pode oferecer uma maior precisão no posicionamento e orientação de objetos do que a configuração série. Uma configuração típica é o manipulador paralelo [12].

As informações apresentadas anteriormente, encontram-se sintetizadas na Tabela 2.2.

Tabela 2.2: Classificação dos robôs.

	Mobilidade	Estrutura cinemática	Configuração física
Robôs	Fixa	Paralela	Paralelo
		Série	Cartesiano
			Cilíndrico
			Esférico
			Articulado
			SCARA

A configuração física de um robô é baseada de acordo com a estrutura mecânica, pelo que existem vários tipos de configurações, sendo que cada uma tem características muito próprias e, inerente a isso, as suas vantagens e limitações [12, 21, 31].

## 2.8 Cinemática e dinâmica

O termo cinemática, com origem terminológica grega, traduz o sentido de movimento. A cinemática é tida como o ramo da ciência que estuda o movimento sem olhar à causa do mesmo. Por movimento entende-se qualquer tipo de deslocamento, podendo ser mudanças de orientação e deslocamento [16].

Entende-se por deslocamento como sendo o ato de posicionar o atuador final num ponto arbitrário dentro da área de trabalho. Por orientação entende-se como sendo o movimento efetuado pelo atuador final para uma determinada posição com a orientação desejada. Pode assumir-se que o deslocamento é o trabalho efetuado pelo braço mecânico e a orientação o trabalho efetuado pelo punho [16].

O termo dinâmica, com origem terminológica grega, traduz o sentido de força, é tido como o ramo da ciência que efetua o estudo dos sistemas que sofrem mudanças de estado à medida que o tempo evolui. Através das equações da dinâmica é possível descrever o comportamento dinâmico de um robô, pelo que se pode simular o movimento de um robô e avaliar o desempenho dinâmico do projeto [16].

### 2.8.1 Cinemática direta e inversa

A cinemática de um robô pode ser descrita como sendo uma relação geométrica entre as coordenadas operacionais e coordenadas do espaço de juntas, pelo que não se considera as massas, forças e/ou binários que provocam o movimento [21].

A cinemática do braço do robô apenas diz respeito aos elos (estrutura geométrica) e juntas (ângulos). A modelação cinemática efetua-se em relação ao sistema de coordenadas da base, ou seja, ao sistema fixo de coordenadas do robô [21].

A cinemática direta consistem em obter a posição e orientação do atuador final (em relação ao sistemas de coordenadas da base do manipulador) através das coordenadas das juntas e comprimentos dos elos [16, 21].

Por outro lado, a cinemática inversa consiste em obter as coordenadas das juntas através dos comprimentos dos elos e, da posição e orientação do atuador final. Pode acontecer que seja encontrada mais do que uma solução para a mesma posição e orientação do atuador final (ver Figura 2.7), pelo que pode ser necessário escolher as coordenadas das juntas que melhor se adequam [16, 21].

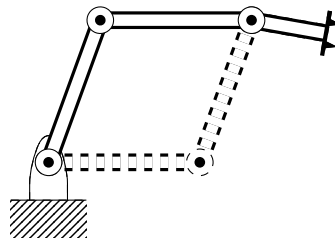


Figura 2.7: Diferentes soluções para a mesma posição e orientação do atuador final.

### 2.8.2 Dinâmica direta e inversa

A dinâmica pode ser caracterizada em dinâmica direta e inversa. Na dinâmica direta atribui-se o movimento do robô para um dado conjunto de condições iniciais e forças nas articulações. Na dinâmica inversa calcula-se as forças e binários necessários para gerar a trajetória pretendida para um determinado conjunto de posições, velocidades e acelerações [16, 21].

## 2.9 Tipos de programação

Da necessidade constante de otimização de soluções, foram surgindo ao longo dos anos ferramentas computacionais mais complexas, permitindo uma maior flexibilidade ao projetista no desenvolvimento de uma dada tarefa [24].

Os robôs industriais são mecanismos que efetuam tarefas que se encontram previamente definidas para executar, ou seja, efetuam uma sequência de pontos (*targets*) no espaço (trajetória - *path*) com uma determinada orientação, velocidade e aceleração, a isto denomina-se de programa [24, 32].

A programação de robôs permite a sincronização entre robôs e/ou outros dispositivos periféricos, integração de sensores e gerar movimentos complexos e difíceis de imaginar para o ser humano [32].

A programação pode ser caracterizada em duas formas: programação *online* e programação *offline*. A programação *online* é efetuada recorrendo a métodos de programação por ensino e condução, por outro lado a programação *offline* é efetuada essencialmente recorrendo a linguagens de programação [24].

### 2.9.1 Programação *online*

A programação *online* envolve diretamente o robô, pelo que através do robô essencialmente definem-se trajetórias. Este método de programação pode ser manual ou automático [32].

A programação efetuada de forma manual, ou seja, programação por aprendizagem carece que o utilizador conduza o manipulador às posições desejadas. Este tipo de programação é normalmente usada para a definição de trajetórias complexas ou marcar uma sequência de pontos no espaço [24, 32].

A programação efetuada de forma automática, ou seja, programação por condução carece que o utilizador conduza o atuador final às posições desejadas através da consola de programação (*tech-pendant*). Este tipo de programação é normalmente usada quando se pretende definir alguns pontos discretos e específicos [24, 32].

A programação *online* tem como principal vantagem a simplicidade de realização e de aprendizagem. Por outro lado tem como desvantagem implicar paragens da célula onde se encontra o robô a efetuar a programação (levando a baixar a produtividade) e pode causar erros de programação, como colisões com outros objetos que se encontrem no espaço de trabalho do robô [32].

### 2.9.2 Programação *offline*

A programação *offline* não envolve diretamente o robô, pelo que não é necessária a presença do robô para que se efetue a programação do mesmo. O desenvolvimento do *hardware* e *software* tornando a programação *offline* cada vez mais viável. Este tipo de programação é essencialmente usada em aplicações mais complexas e aplicações que despendam mais tempo para o desenvolvimento dos programas [24, 32].

Para este tipo de programação são usados editores e compiladores de programas para o robô. Contudo, é difícil ao operador indicar as coordenadas dos pontos (*targets*) com precisão para o qual o robô se deve deslocar [32].

Para facilitar a programação *offline* e diminuir o tempo de desenvolvimento de programas aplicam-se simuladores através do computador. Estes permitem simular efeitos, testar, verificar e detetar erros do programa desenvolvido [32].

Este tipo de programação tem como principais vantagens a redução de tempo de inatividade do robô em linhas de produção e permanência do operador em ambientes hostis, e permite a interação com outros *softwares* de interesse da área. Contudo, este sistema apresenta algumas imprecisões entre o modelo simulado em computador e o espaço de trabalho [24].

## 2.10 Sistemas de controlo de movimento

Com o intuito de realizar um movimento desejado, torna-se necessário efetuar um controlo das juntas do manipulador, como meio para realizar um determinado movimento. Na robótica é usual usarem-se controladores baseados em microprocessadores como *hardware* do sistema de controlo. São necessários diferentes tipos de controlos para diferentes aplicações. Os controlos de movimento do robô podem ser classificados em quatro categorias [26, 21]:

- sequência fixa - tipo de sistema de controlo mais simples. Este é utilizado em ciclos de movimentos simples, por exemplo, na existência de um ponto de recolha e outro de colocação, *pick-and-place*. O sistema conta com um sistema de realimentação para indicar se o movimento de junta foi realizado. Dado que não possui um servo-motor, não é possível efetuar um posicionamento preciso da junta;
- ponto a ponto - tipo de controlo mais sofisticado, designado em inglês por *Point to Point* (PTP), capaz de registar uma sequência de pontos com determinados parâmetros, tais como a velocidade associada ao movimento, num determinado ciclo de trabalho. Os pontos registados encontram-se dentro de um intervalo, de cada junta de robô, os quais fazem corresponder a um conjunto de valores. O sistema de realimentação é usado durante o ciclo para confirmar se as juntas atingem os valores especificados no programa. Neste sistema é efetuado o deslocamento para qualquer ponto do volume de trabalho;
- trajetória contínua - tipo de controlo, designado em inglês por *Continuous Path* (CP), semelhante ao anterior (PTP). Este sistema possui uma capacidade de armazenamento bastante maior que a PTP. Assim, os pontos que constituem o ciclo de movimento podem encontrar-se mais próximos uns dos outros, permitindo a existência de um movimento contínuo suave. Este tipo de controlo, em comparação com o PTP, efetua interpolações matemáticas para o cálculo de trajetórias, o que não acontece no PTP;
- controlo inteligente - tipo de sistema de controlo mais completo. Este permite ajuste de trajetórias por interação com o meio ambiente e toma decisões lógicas através das informações recolhidas pelos sensores. É através da leitura dos sensores que as decisões são tomadas. Os sistemas que fazem uso de visão artificial são um dos exemplos deste tipo de sistemas.

## 2.11 Sumário de capítulo

Em suma, neste capítulo foi apresentado um breve enquadramento da robótica industrial e os seus impulsionadores, algumas definições atribuídas por diferentes associações ao termo robô, bem como as leis da robótica enunciados por Isaac Asimov e as vantagens e desvantagens do uso de robôs.

Foi ainda apresentada a constituição de um sistema robótico. Este sistema tem como unidades principais a unidade de controlo, a unidade de potência, o manipulador mecânico - constituído por juntas e elos, os quais permitem a existência de variadas configurações, os atuadores, podendo ser hidráulicos, pneumáticos e elétricos, e o atuador final que se pode desdobrar em garras e ferramentas - e os mais variados sensores - os quais permitem a interação com o ambiente.

Apresentou-se a terminologia da robótica mais relevante tal como a definição de volume de trabalho e a diferenciação dos termos graus de liberdade e de mobilidade, velocidade e capacidade de carga, e resolução, precisão e repetibilidade.

Dada as diferentes tipologias dos robôs industriais existentes, efetuou-se um breve enquadramento dos mesmos e apresentou-se uma possível classificação dos robôs existentes - pórtico, cartesiano, cilíndrico, esférico, articulado, SCARA e paralelo.

Por fim, passou-se à apresentação da cinemática e dinâmica, dos diferentes tipos de programação existentes - *online* e *offline* - e os sistemas de controlo de movimentos existentes.

## Capítulo 3

# Automação industrial

*É adotado o termo de automação à tecnologia pela qual um processo ou procedimento é realizado sem a interação do ser humano. A automação é implementada tendo como base um conjunto de instruções, que quando combinadas com o sistema de controlo, permitem executar um processo [26]. A automação encontra-se essencialmente associada à indústria. Foi neste contexto que o termo automação terá surgido, em 1946, através de um gerente da Ford Motor Company como forma de descrever a variedade de dispositivos automáticos existentes na altura [26].*

*Neste capítulo será dado ênfase ao Controlador Lógico Programável (PLC) onde será apresentada uma breve nota histórica, a aplicabilidade, arquitetura, fundamentos lógicos e as linguagens de programação. Será ainda apresentada a Interface Humano-Máquina (HMI), algumas questões de segurança nas células automatizadas e a aplicabilidade da automação e robótica na indústria.*

### 3.1 Controlador Lógico Programável

O Controlador Lógico Programável é um equipamento eletrónico usado maioritariamente para o controlo de processos industriais ou máquinas, em tempo real, sendo programável em linguagem não informática. Os PLC surgiram da necessidade de existir um sistema flexível, robusto e facilmente programável [33, 34, 35].

O PLC monitoriza continuamente o estado das entradas e toma decisões com base num programa, para controlar o estado das saídas - a saída deve ser produzida em função das condições de entrada e dentro de um tempo limitado, caso contrário, pode ocorrer uma operação não intencional. É assim, um sistema usado em automação para efetuar controlo, classificado na indústria como sendo de alta confiabilidade [33, 34].

#### 3.1.1 Breve história

O PLC possui descendência dos sistemas de controlo baseados em relés. Antes de existir o PLC, o controlo automático, por exemplo, de linhas de fabrico era efetuado através

circuitos compostos por relés, botões, contadores, entre outros. Este tipo de controlo exigia muita fiação [26, 36].

Contudo, o sistema à base de relés possuía muitas desvantagens. Estes ocupavam muito espaço e tempo dedicado para a sua implementação e/ou alteração ao controlo do equipamento, tornando este tipo de sistema bastante dispendioso [26, 36].

Além disso, com o crescimento da indústria existia a necessidade de aumentar o número de linhas de fabrico, contribuindo para a existência de sistemas de controlo cada vez mais complexos e manutenções periódicas para garantir a fiabilidade do sistema [26, 36].

Perante inúmeras desvantagens procurou-se uma nova técnica de controlo que permitisse colmatar as falhas existentes nos sistemas baseados em relés e que acrescentasse novas funcionalidades. Assim, empresas como a General Motors tinha como requisitos para a substituição dos relés [36]:

- preços competitivos;
- um sistema flexível;
- capacidade de suportar ambientes hostis;
- modular quanto ao número de entradas e saídas;
- de fácil programação e reprogramação.

Perante esta necessidade, várias empresas se debruçaram sobre este assunto para oferecer uma solução. A Bedford Associates, Inc. baseou-se nos diagramas de relés, para efetuar os sistemas de controlo, e sugeriu o que designaram de controlador modular digital - Modicon [36].

Os primeiros PLC eram bastante simples, pelo que apenas substituíam a lógica de relé, mas com o avançar da tecnologia as suas capacidades foram aumentando e começaram a surgir funções como contadores e atrasos de tempo. Mais tarde surgiram as entradas e saídas analógicas, e funções aritméticas, tendo chegado até aos dias de hoje com inúmeras funções tornado-se amplamente usado na indústria [36].

### 3.1.2 Arquitetura do PLC

Um PLC, à semelhança de outros equipamentos eletrónicos, pode ser dividido em dois grandes blocos, *hardware* e *software*, podendo estes serem divididos em blocos mais pequenos, como se sugere nas seguintes subsecções.

#### 3.1.2.1 *Hardware*

Tipicamente, os PLC possuem partes funcionais básicas que interagem com a Unidade Central de Processamento (CPU), tais como os módulos de entrada, saída e de alimentação, a memória e a interface de comunicação, como se sugere na Figura 3.1 [37].

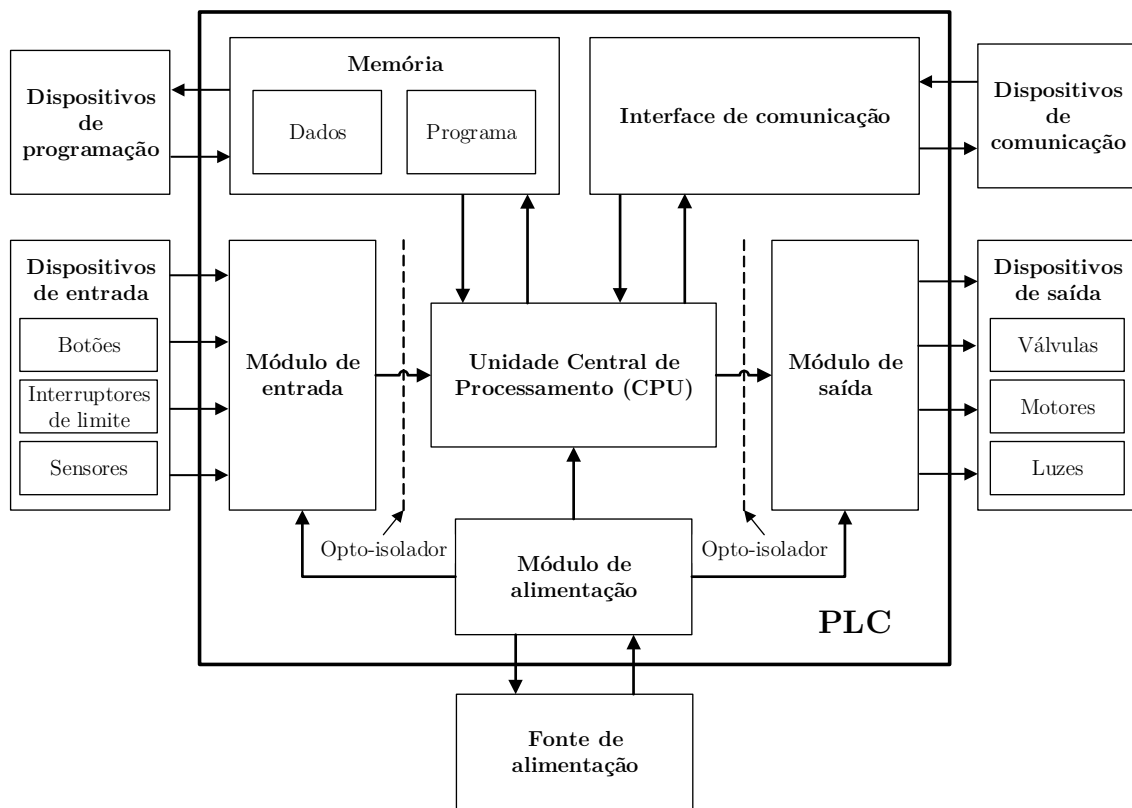


Figura 3.1: Arquitetura de um PLC (adaptado de [37, 38]).

### Unidade Central de Processamento (CPU)

A Unidade Central de Processamento é o “cérebro” do PLC. A CPU é baseada num microprocessador, o qual permite implementar lógica e controlar comunicações. Esta, perante determinados sinais de entrada, executa ações previamente programadas de acordo com o programa armazenado e comunica as decisões como forma de sinais de saída [37, 38].

### Módulos de entrada e saída

A CPU recebe informações do meio externo e comunica as decisões através dos módulos de entrada e saída. Estes módulos podem ser classificados quanto à tipologia de sinal que recebe/fornece - discreto, analógico e digital [37, 38].

Os PLC podem ser categorizados em fixos e modulares quanto à forma como os sinais de Entradas/Saídas (E/S) se encontram associados [37, 38].

Um PLC com uma configuração fixa tem um número fixo de E/S associadas e não removíveis, podendo ser expansível conectando-se a outros PLC com características parecidas. Este tipo de PLC tem como vantagem o seu menor custo face ao modular. Como desvantagens tem a falta de flexibilidade e, em alguns sistemas, no caso de um módulo do PLC falhar, todo o PLC terá de ser substituído. Por outro lado, um PLC com uma configuração modular é constituído por módulos separados que podem ser conectados entre

si, obtendo o número de E/S desejadas [35, 37, 38].

### Fonte de alimentação

A fonte de alimentação é necessária para converter a tensão recebida, em uma baixa tensão, necessária para o processador e os diferentes módulos existentes no PLC [37, 38].

### Unidade de memória

A unidade de memória é onde o programa e os dados se encontram armazenados. Esta unidade é acessível através de um dispositivo de programação, podendo aceder à memória do PLC [37, 38].

#### 3.1.2.2 Software

A CPU é quem controla toda a atividade do PLC, ou seja, efetua todo o processamento de dados e, através do programa desenvolvido, executa determinadas ações. É através do *software* que é possível efetuar toda a lógica para que um determinado processo seja executado [37, 38].

O programa do PLC encontra-se a ser executado repetitivamente, podendo dizer-se que se encontra em ciclo. De uma forma geral, o PLC efetua a leitura dos estados das entradas, executa o programa, atualiza os estados das saídas e efetua diagnósticos e a comunicação. A este processo designa-se de ciclo *scan* (ver Figura 3.2) [37, 38].

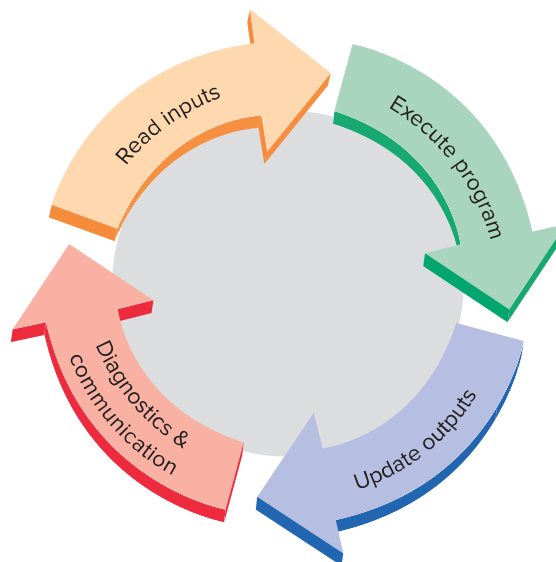


Figura 3.2: Ciclo *scan* de um PLC [37].

Com o aparecimento do PLC e a grande procura pelos mesmos, cada fabricante tendeu a desenvolver as suas próprias versões. Perante as várias versões, surgiu a necessidade de padronizar, tendo culminado na norma International Electrotechnical Commission (IEC)

61131. Esta norma contém as definições e identifica as características mais relevantes para o funcionamento de um PLC, podendo esta ser dividida em oito partes [38, 39]:

- parte 1: definição geral da terminologia e conceitos;
- parte 2: requisitos dos equipamentos eletrônicos e mecânicos, e testes de verificação para os PLC e equipamentos associados;
- parte 3: definição de cinco linguagens de programação;
- parte 4: orientação na seleção, instalação e manutenção dos PLC;
- parte 5: definição de *software* necessário para a comunicação com outros dispositivos;
- parte 6: definição de requisitos de segurança funcional para os PLC e seus periféricos associados;
- parte 7: definição de funcionalidade de lógica de controlo difusa, utilizado a programação dos PLC;
- parte 8: guias para a implementação das linguagens de programação definidas.

### 3.1.3 Linguagens de programação

As linguagens de programação são necessárias para que o PLC consiga entender instruções e executar ações.

A norma IEC 61131 aborda dois tipos de linguagens, ver Figura 3.3, sendo estas as linguagens textuais - Texto Estruturado (ST) e Lista de Instruções (IL) - e as linguagens gráficas - Diagrama de Blocos (FBD), Diagrama *Ladder* (LD) e Gráfico de Funções Sequenciais (SFC) - sendo estas as linguagens padrão [37, 38].

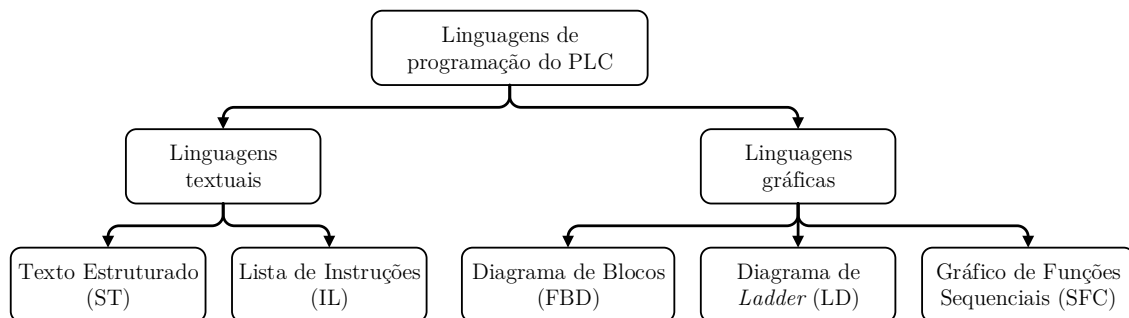


Figura 3.3: Linguagens de programação de um PLC (adaptado de [37]).

### 3.1.4 Interface Humano-Máquina

A Interface Humano-Máquina (HMI), como o próprio nome sugere, efetua a ponte entre o ser humano e a máquina. As consolas HMI podem ser programadas de modo a efetuar uma interface entre a máquina e o utilizador, deste modo, é possível ao utilizador interagir de forma controlada com processos através de uma ferramenta visual e de fácil utilização. Estas podem permitir tirar conclusões relativas a melhorias contínuas de qualidade na estratégia de controlo e produtos associados [37, 40].

A HMI pode permitir aos operadores controlar, monitorizar, diagnosticar e gerir as máquinas. No âmbito da automação industrial, as consolas HMI surgem associadas ao PLC, pelo que acabam por se tornar bastante flexíveis e expansíveis, principalmente em sistemas complexos [37, 40].

As consolas HMI táteis vêm substituir os botões e ajudar na atuação de, por exemplo, relés e motores. Através destas torna-se possível, desde que programada para tal, visualizar [40]:

- resumos de operações, permitindo monitorizar processos;
- configurações, permitindo obter detalhes sobre parâmetros do processo;
- alarmes, permitindo saber o dia e hora de alarmes ativos e/ou histórico;
- eventos, apresentado lista dos eventos mais importantes que aconteceram nos processos;
- tendências, exibindo informações relativas de, por exemplo, temperatura e taxas de produção durante um período de tempo;
- controlo manual, permitindo obter controlo no sistema em situação de manutenção;
- diagnósticos, permitindo efetuar testes em manual e em manutenções.

De modo geral, uma aplicação de uma consola HMI assenta essencialmente em quatro tarefas, sendo elas [40]:

- estabelecer a comunicação com os PLC;
- criar a relação de endereços de dados entre a consola HMI e o PLC;
- editar e criar tabelas e/ou gráficos;
- animar objetos.

## 3.2 Sistemas de produção

Um sistema de produção corresponde ao conjunto de pessoas, equipamentos e processos resultando em operações de fabricação para uma dada empresa. Assim, um sistema de produção é composto pelas instalações - da qual faz parte a fábrica, o equipamento e a disposição do mesmo no espaço - e o sistema de apoio ao fabrico - o trabalho desenvolvido pela empresa para gerir a produção e resolver os problemas encontrados [26].

### 3.2.1 Sistemas flexíveis de fabrico

Nos últimos anos os sistemas produtivos têm-se caracterizado essencialmente pelo aumento da flexibilização e diversificação de produtos e processos. Em paralelo a estas tendências, tem-se denotado uma grande competitividade entre empresas. A competitividade têm assentado em alguns pilares como [26, 41]:

- inovação;

- redução de prazos de entrega e custos;
- aumento da produtividade e qualidade;
- aumento da capacidade de resposta face a novos produtos.

A concorrência têm vindo a aumentar, pelo que cada empresa procura melhorar a sua produtividade, através de fatores como a eficiência, flexibilidade e redução de custos de mão de obra, aplicando a automação [26, 41].

Deste modo, a automação consegue reduzir o custo de mão de obra, minimizando os esforços e redução dos ciclos de fabrico, melhorando a produtividade - através do controlo da produção -, a qualidade - fazendo uso de processos repetitivos - e reduzindo a influência do ser humano - evitando a possibilidade de erro humano e a subjugação do ser humano a condições de trabalho perigosas [26, 42].

Ao longo do tempo, sentiu-se a necessidade de integrar diversos sistemas, pelo que com a introdução de novas tecnologias tornou-se possível o desenvolvimento de ilhas de automação e informatização, e a integração das várias ilhas de fabrico com funções bastante próprias, chegando assim ao que se denomina de Sistema Flexível de Fabrico [26, 42].

Segundo [42] um “Sistema Flexível de Fabrico (FMS) é uma estrutura de produção que consiste num conjunto de estações de trabalho interligadas por um sistema de transporte e manipulação de materiais e controlado por um sistema computacional integrado”.

Na Figura 3.4 é possível observar um exemplo de um FMS. Este FMS é composto pelas estações de trabalho - células de fabrico, inspeção e montagem -, sistema de transporte, manipulação e armazenamento - robôs e armazéns automáticos - e o sistema de controlo - efetua o controlo da entrada/saída de materiais e das estações de trabalho [42].

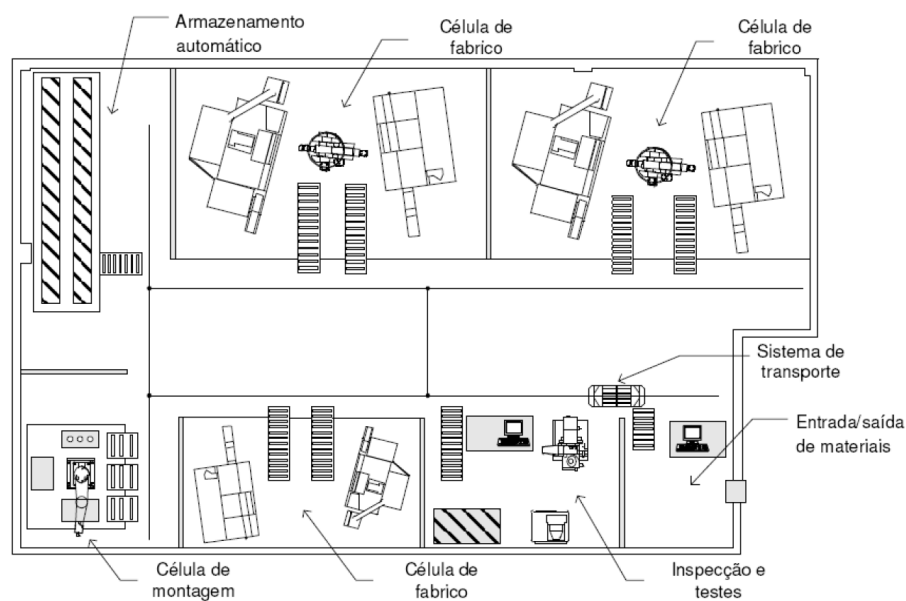


Figura 3.4: Exemplo de um sistema flexível de fabrico [42].

Deste modo, é possível produzir vários produtos da mesma família com um tempo reduzido e uma boa taxa de produção. Os FMS combinam eficiência e versatilidade [42].

### 3.2.2 Noções básicas de pneumática

Na indústria é comum recorrer à utilização do ar, para efeitos de compressibilidade, com a finalidade de obter uma determinada força/movimento. Assim, é normal encontrar este tipo de tecnologia aplicada, por exemplo, a lixadeiras, aparafusadoras, sistemas de pintura, atuadores pneumáticos, entre outros [43, 44, 45].

É normal encontrar várias terminologias associadas à “pressão do ar”, tais como, pressão atmosférica, absoluta e relativa. A pressão atmosférica corresponde à pressão na qual se está sujeito num determinado local. Assim, uma pressão acima da pressão atmosférica é designada de pressão relativa positiva ou, quando abaixo da pressão atmosférica de pressão relativa negativa, sendo estas pressões observáveis num manómetro. Já a pressão absoluta corresponde à soma da pressão atmosférica e da pressão relativa. A Figura 3.5 apresenta de uma forma gráfica os conceitos referidos anteriormente [43, 44, 45].

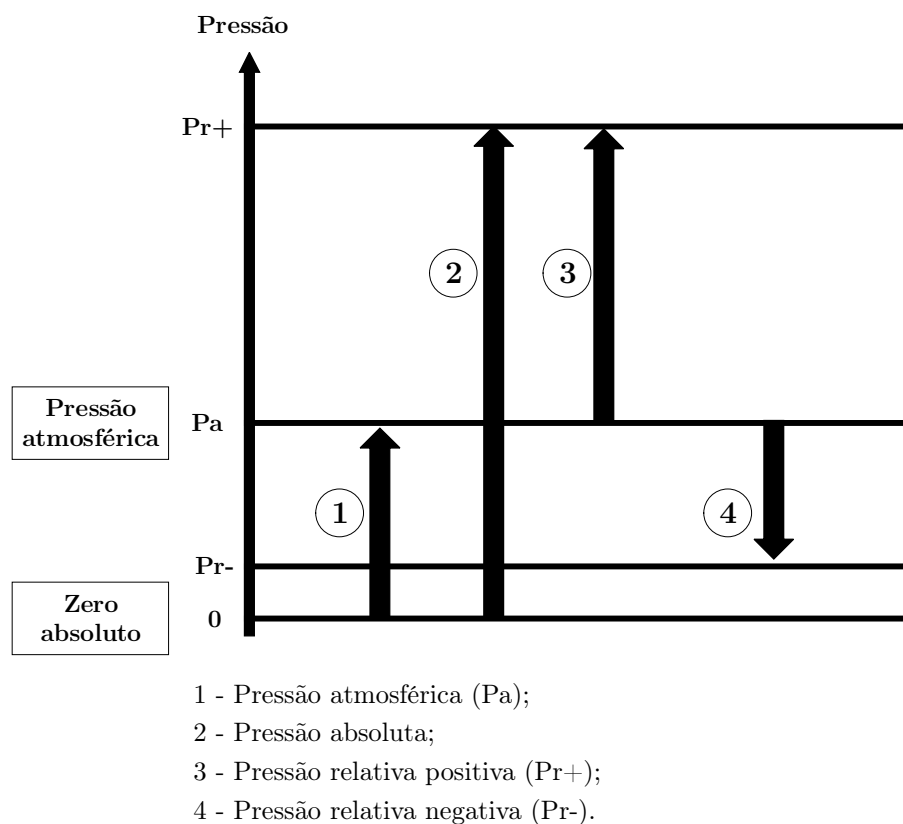


Figura 3.5: Exemplo gráfico dos conceitos de pressão atmosférica, relativa positiva e negativa, e absoluta (adaptado de [43, 44, 45]).

### 3.2.3 Redes industriais

Na indústria, na unidade de produção, o número de equipamentos tem vindo a aumentar, originando sistemas industriais cada vez mais complexos. Como tal, torna-se necessário efetuar a integração de todos os sistemas em um único sistema, efetuando trocas de informações entre sistemas da fábrica, tendo surgido assim a necessidade de comunicações industriais [46].

Uma rede de comunicação de uma indústria pode ser dividida em diferentes categorias, fazendo corresponder a diferentes hierarquias, tais como [46]:

- nível de administração/gestão: este nível envolve grandes volumes de tráfego na rede e com tempos de resposta curtos, encontra-se associado, por exemplo, a bases de dados, gestão de *stocks* e impressoras;
- nível de célula: este nível tem como finalidade interligar os dispositivos fabris, por exemplo, armazéns automáticos, controladores de células;
- nível das máquinas: este nível tem como finalidade interligar diferentes equipamentos de modo a tornar possível a execução de uma operação. Aqui, interliga-se, por exemplo, os PLC, sistemas de visão e robôs. Os tempos de resposta devem ser rápidos;
- nível dos sensores/atuadores: este nível tem como finalidade interligar os dispositivos com pouca ou nenhuma “inteligência”, tais como, sensores e atuadores.

Para a comunicação industrial é necessário redes que permitam uma comunicação rápida entre os diversos equipamentos. As redes industriais podem-se categorizar em dois tipos: redes *fieldbus* e Ethernet Industrial. Fazem parte da rede *fieldbus* o Process Field Bus (PROFIBUS), o Controller Area Network (CAN) e o DeviceNet, e da rede Ethernet Industrial o Ethernet Industrial Protocol (EtherNet/IP) e o Ethernet for Control Automation Technology (EherCAT) [37, 38, 46, 47].

### 3.2.4 Segurança

Os sistemas industriais, como células de fabrico robotizadas, devem possuir segurança de modo a representar um ambiente seguro para os operadores. Os robôs são considerados máquinas potencialmente perigosas, sendo que estes quando operam em conjunto com outras máquinas tornam o risco<sup>1</sup> de ocorrência de acidentes superior [49].

O impacto causado pelo movimento do robô ou ferramenta a velocidades elevadas, choques elétricos, queimaduras, radiações, entre outros, pode resultar num perigo para a vida humana, para o próprio robô e/ou outros equipamentos. As causas dos riscos podem ser derivadas [49]:

- da entrada não autorizada dos operadores no espaço de trabalho;

---

<sup>1</sup>Segundo [48] um risco corresponde a uma “combinação da probabilidade e da gravidade de uma lesão ou de um dano à saúde, que possa ocorrer numa situação perigosa”.

- de erros programação e manutenção;
- de falhas elétricas, hidráulicas ou pneumáticas;
- de erros de controlo;
- de falhas mecânicas e ambientais.

De modo a mitigar estes riscos, existem três regras de ouro a ter em conta [49]:

- se o robô não se encontrar em movimento, não se deve assumir que o mesmo não se irá mover;
- se o robô se encontra a repetir um padrão de movimentos, não se deve de assumir que o irá continuar a efetuar da mesma forma;
- deve-se manter respeito pelo robô e pelo que pode fazer.

Para melhor compreensão da segurança, torna-se necessário conhecer a legislação em vigor, sendo de destacar a diretiva 2006/42/CE relativa às máquinas [48].

De modo a melhorar a segurança das células de fabrico robotizadas em prol dos operadores, baixando a probabilidade de os riscos acontecerem, existem as medidas de proteção passivas e ativas [49].

As medidas de proteção passivas são regras de conduta a serem observadas e implementadas de forma a evitar situações que causem acidentes. São exemplos destas medidas [49]:

- a formação dos operadores que trabalharão com o robô;
- a atribuição de responsabilidades claras na operação e manipulação dos robôs;
- só manter os robôs nas zonas permitidas;
- limitar o espaço de trabalho do robô ao espaço necessário;
- sinalização das zonas de perigo;
- efetuar as manutenções necessárias.

As medidas de proteção ativas são destinadas a limitar as consequências dos acidentes quando as medidas de proteção passivas não conseguem. São exemplos destas medidas [49]:

- a implementação de circuitos de paragem de emergência/segurança;
- sistemas para impedir o acesso a áreas de trabalho dos robôs;
- proteção contra colisões.

As células robotizadas devem estar vedadas e serem dotadas de sistemas de segurança interligados que impeçam o acesso dos operadores à área do robô. As células podem estar vedadas através de vedações que podem ser do tipo cancelas e vedações de segurança, e barreiras, sendo estas as mais usuais [50].

Para ajudar na definição das seguranças, existe a norma ISO 13855 que estabelece o posicionamento de equipamentos de proteção em relação às velocidades de aproximação das partes do corpo [50].

### 3.3 Sumário de capítulo

Em suma, neste capítulo foi apresentado um breve enquadramento histórico do Controlador Lógico Programável, da necessidade do aparecimento do PLC e os seus impulsores.

Foi ainda apresentada a arquitetura do PLC ao nível do *hardware* e *software*. Ao nível do *hardware* foi apresentada a CPU, os módulos de entrada e saída, a fonte de alimentação e a unidade de memória. Ao nível do *software* foi apresentado o conceito de ciclo de *scan* e algumas linguagens de programação dos PLC, existindo as textuais - ST, IL - e as gráficas - FBD, LD e SFC. Apresentou-se ainda o conceito de Interface Humano-Máquina e as capacidades que possuem.

Por fim, foram abordados os sistemas de produção, focando os tópicos dos sistemas flexíveis de fabrico, algumas noções de pneumática, as redes de comunicação industriais - *fieldbus* e Ethernet Industrial -, terminado com o tópico de segurança associado às células de fabrico robotizadas.



## Capítulo 4

# Indústria da montagem automatizada

*Neste capítulo são apresentados alguns conceitos referentes aos sistemas de montagem automatizados. Desde logo é apresentada a definição de montagem automatizada, passado por apresentar algumas vantagens e a classificação dos sistemas de montagem quanto à configuração física: montagem em linha, montagem através de mesa rotativa, montagem em carrossel e montagem em estação única.*

*No seguimento do âmbito deste trabalho, serão apresentados alguns casos de estudo referentes a esta indústria, no que diz respeito a aplicações robóticas em tarefas de movimentação (*pick and palce*) e orientação, tarefas associadas a montagens (*aparafusamento*), um sistema de *aparafusamento* automático e os atuadores eletromecânicos.*

*Ao longo dos casos de estudo serão apresentadas as diferentes necessidades/problemas, a sua resolução e solução, bem como as vantagens associadas a cada caso.*

### 4.1 Montagem automatizada

O termo de montagem automatizada é aplicado ao uso de dispositivos automatizados para a elaboração de um ou vários processos de montagem, numa linha de montagem e/ou célula de fabrico [26].

Os sistemas automatizados produzem vantagens significativas no que diz respeito, por exemplo, à produtividade. Este tipo de sistemas são considerados quando existe uma grande procura dos produtos, quando se possui um produto estável - uma alteração, por exemplo, no *design* do produto pode significar uma alteração das ferramentas de trabalho e do processo, implicando custos - e quando se consegue obter retorno do investimento do sistema [26].

Um sistema de montagem automatizado, através de uma sequência de operações, combina vários componentes com a finalidade de obter um subproduto ou um produto final.

De modo geral, uma montagem consiste num produto base na qual outros produtos se conectam [26].

Normalmente, um sistema de montagem consiste numa estação de trabalho, onde as tarefas de montagem são realizadas, nos dispositivos de alimentação e de saída da estação de trabalho e do sistema de manipulação/movimentação dos objetos [26].

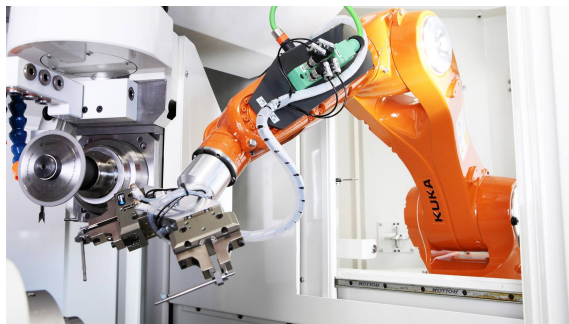
De acordo com a configuração física, os sistemas de montagem podem ser classificados em quatro tipos: montagem em linha, montagem através de mesa rotativa, montagem em carrossel e montagem em estação única [26].

A montagem em linha consiste numa série de estações de trabalho, organizadas num sistema de trabalho em linha. Na montagem através de mesa rotativa, os componentes vão sendo adicionados à base nas várias estações de trabalho localizadas ao redor da mesa de trabalho. O sistema de montagem em carrossel é uma mistura entre as montagens em linha e mesa rotativa. Na montagem em estação única o ato da montagem é efetuado na parte do produto base, num único local. Assim, neste último tipo de montagem, o ciclo envolve a colocação da base num determinado espaço de trabalho, seguido da adição dos componentes e remoção do produto final. Tipicamente, a montagem por estação única é a mais lenta [26].

Associado a sistemas de montagem automatizada - estação única - é usual encontrar robôs industriais. Estes podem efetuar tarefas como a movimentação e/ou montagem de objetos a uma base. É usual encontrar-se neste tipo de aplicações garras mecânicas de acionamento pneumático, com dois ou mais dedos, e garras de sucção, através de ventosas [26].

As garras mecânicas constituídas por dedos (ver Figura 4.1a) são projetadas em específico para o objeto que se destina a ser manipulado. Estas garras, de acionamento pneumático, consistem num cilindro que opera através de ar comprimido. Assim, tendo as garras numa determinada posição, em função do objeto a manipular/orientar, quando se efetua a passagem de ar comprimido, a garra irá fechar, ficando com o objeto preso. Para abrir, basta inverter o sentido do ar comprimido e a garra irá abrir [26].

As garras de sucção (ver Figura 4.1b) também possibilitam efetuar a movimentação/orientação de objetos, contudo é efetuado através de um sistema vácuo. O vácuo é criado através de um gerador de vácuo por efeito de *venturi* no momento em que as ventosas entram em contacto com o objeto. Este tipo de sistema deve ser aplicado numa posição favorável da peça, por exemplo, este é um mau sistema para peças com orifícios. Para pegar na peça basta fazer vácuo, e para a largar basta deixar de o fazer [26].



(a) Garra dupla, de acionamento pneumático, aplicado em robô KUKA [51].



(b) Garra de sucção aplicado em robô FA-NUC [52].

Figura 4.1: Exemplos de garras usadas em aplicações de montagem.

Ao conjunto de tarefas, que um robô executa, de “pegar” um objeto, de um determinado local, e de o “largar” num outro local, designa-se o termo de *pick and place*, sendo uma das funcionalidades mais usadas pelos robôs industriais. Os robôs industriais acabam por efetuar uma ponte entre os vários dispositivos na célula de fabrico.

## 4.2 Caso de estudo 1 - Carga e descarga de máquina de moldagem por injeção através de robô industrial

Este caso de estudo refere-se à empresa Karl Krumpholz GmbH e Co. KG. Esta foi fundada em 1955, como sendo uma empresa de construção de moldes e em 1992 adquiriu e integrou a sua própria unidade de plásticos [53].

Com o passar do tempo, através do fornecimento das indústrias elétricas e de brinquedos, entre outras, tornou-se especialista na produção de peças de plástico. A partir de 2013, a empresa começou a produzir vários componentes para o sistema de para-choques para um fabricante alemão [53].

A empresa sentiu a necessidade de encontrar uma solução que permitisse que as várias peças produzidas fossem manuseadas, processadas com rapidez, flexibilidade e precisão após a moldagem por injeção, com bons tempos de ciclo [53].

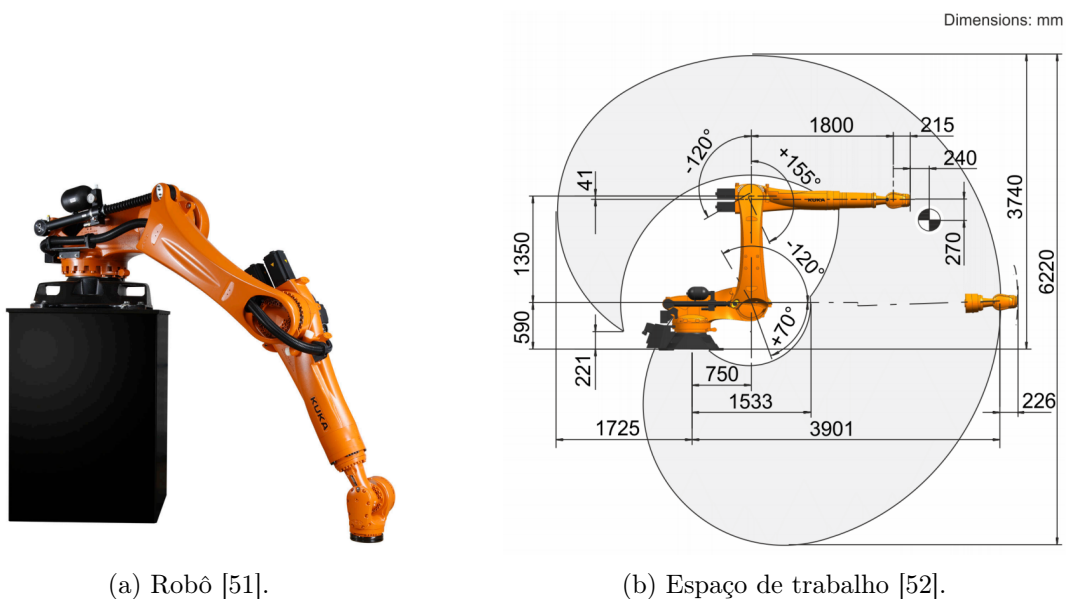
A solução encontrada pela KUKA (ver Figura 4.2) começa por pegar nas buchas de fixação da máquina, enquanto a peça se encontra a ser produzida na máquina de injeção por moldagem. Quando a máquina acaba de produzir a peça, o robô insere as buchas nos bicos da máquina e, em seguida, o robô pega a peça plástica injetada [53].



Figura 4.2: Solução apresentada pela KUKA para efetuar carga e descarga de máquina [53].

Após o robô sair da máquina, o excesso de plástico produzido pela máquina pode ser cortado e o componente moldado em diferentes modelos. O robô acaba por deixar a peça num dispositivo de arrefecimento, numa determinada posição, onde será efetuada a saída da célula [53].

Para este tipo de aplicações, a KUKA possui a série de robôs KR QUANTEC K. Esta gama de robôs são mais leves e mais baixos. O robô escolhido para esta aplicação foi o modelo KR 120 R3900 ultra K (ver Figura 4.3a) com um alcance de 3901 mm e uma carga útil de 120 kg (ver Figura 4.3b) [53, 54].



(a) Robô [51].

(b) Espaço de trabalho [52].

Figura 4.3: Robô KUKA KR 120 R3900 ultra K [54].

Dada a baixa massa do robô, este pode ser montado numa prateleira (neste caso em cima da máquina) atingindo um bom dinamismo e tempos de ciclo baixos, diminuindo até 30%. O robô tem como características a flexibilidade, velocidade, alcance e precisão indo de encontro com o desejado pelo cliente [53].

### 4.3 Caso de estudo 2 - Montagem de motocicletas

Este caso de estudo faz referência à Bajaj Auto, da Índia, uma empresa automobilística que produz motocicletas. Em 2010, a empresa procurava soluções para automatizar as suas linhas de montagem. Segundo Vikas Sawhney, diretor geral de engenharia, as tarefas de montagem nas linhas envolvem bastante trabalho, muito espaço e movimentos fisicamente desafiantes para o ser humano (requerem precisão) [55].

A empresa efetuou a padronização dos seus modelos, enquanto esta se encontrava numa rápida expansão da sua capacidade de produção devido ao número de veículos fornecidos ao mercado. Assim, esta procurou encontrar uma solução de automação padronizada que pudesse oferecer produtividade, flexibilidade e confiabilidade [55].

Perante as necessidades da empresa, esta estudou o mercado e selecionou a Universal Robots, uma empresa com foco nos robôs colaborativos (robôs projetados para trabalhar em colaboração com os seres humanos). A Bajaj viu como benefícios nos robôs, a compactidade (ver Figura 4.4), flexibilidade, rigor, segurança, entre outros [55].



Figura 4.4: Robô colaborativo compacto, aplicado no teto, efetuando aparafusamento [55].

Assim, a Universal projetou e instalou uma solução que fosse de encontro com os requisitos funcionais da Bajaj. Vários processos, que eram efetuados pelos operadores, passaram

a ser efetuados pelos robôs, como por exemplo: manuseio de material (ver Figura 4.5), alimentação de máquinas, rebarbagem, aperto de parafusos, decalque, soldagem e aplicação de visão [55].

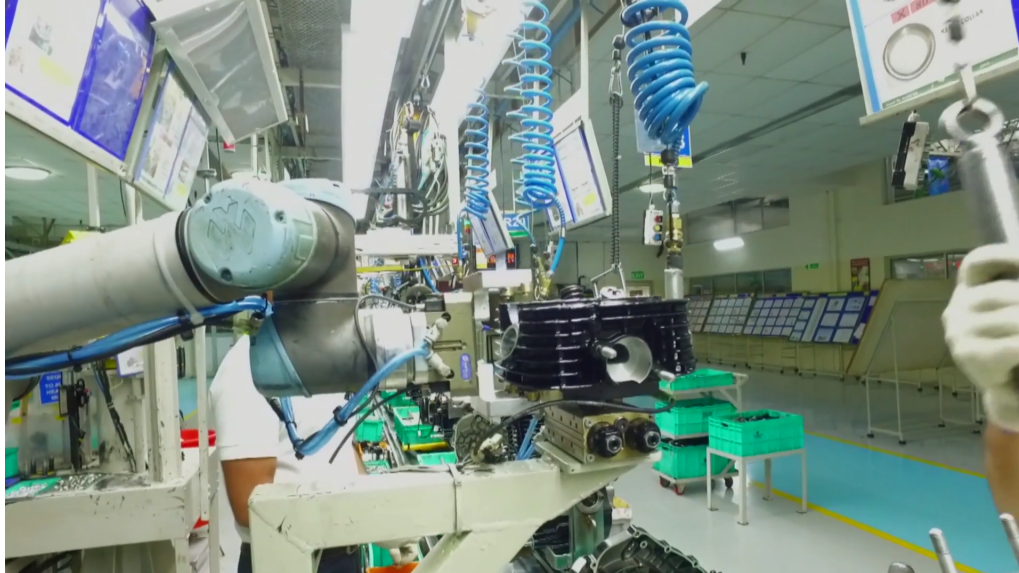


Figura 4.5: Robô colaborativo efetuando tarefa de manuseio de peça [55].

As necessidades da Bajaj foram alcançadas com o uso de robôs colaborativos, sendo de destacar que as partes fisicamente mais desafiantes para os operadores foram colmatadas com o uso destes robôs [55].

Os operadores passaram a possuir ferramentas para efetuar tarefas repetitivas com uma boa precisão. No final, constatou-se que os funcionários da Bajaj aceitaram e entendem o uso destes robôs, pelo que veem de bom agrado esta solução [55].

#### 4.4 Caso de estudo 3 - Máquina de aparafusamento automático, de baixo custo

Dentro de cada indústria existe uma grande competição entre as diversas empresas. Estas procuram aumentar a sua presença no mercado reduzindo custos e aumentando a qualidade e confiança dos seus produtos [56].

O aparafusamento é um processo que se encontra associado a linhas de montagem de produtos eletrônicos e mecânicos. Nas linhas mais convencionais, os produtos a serem aparafusados são transferidos das linhas de transporte e os operados efetuam o aparafusamento de forma manual, por exemplo, através de chaves de fenda elétricas. Assim, a produtividade do processo depende dos operadores [56].

De modo a aumentar este fator, várias empresas adotaram a automação nas linhas de montagem. Por norma, as aparafusadoras automáticas são quatro vezes mais caras que as aparafusadoras usadas pelos operadores. Além disso, as aparafusadoras automáticas

necessitam de sistemas que controlem as chaves em uso, de sistemas para obter dados do processo [56].

Existem várias aparafusadoras no mercado, sendo que cada um possui características bastante próprias, como por exemplo, uma aparafusadora que efetua o controlo através da força e do binário da máquina de aparafusamento, no parafuso; contudo estes sistemas são bastante dispendiosos [56].

Este caso de estudo apresenta uma solução de baixo custo, usando aparafusadoras manuais comerciais para, através de um mecanismo, efetuar a medição da força e do binário durante o processo de aparafusamento [56].

Ao usar aparafusadoras manuais, não é possível obter informações como o binário e força aplicada no parafuso. Para isso, foi projetado um sistema com sensores externos que efetua o controlo do sistema de aparafusamento e envia os dados para o computador [56].

Para efetuar o controlo do aparafusamento, foi projetada uma placa de controlo para efetuar o controlo do binário e força. Assim, a placa efetua o controlo do aparafusamento, mediante o *feedback* dos sensores presentes neste sistema [56].

Este sistema possui sensores de deslocamento magnéticos (HMC 1512) para efetuar a medição do binário, um potenciómetro para efetuar o controlo de força, um servo motor para efetuar a deslocação da aparafusadora (controlado através do PCL6025B), uma aparafusadora (AHA-T318) e um microcontrolador ATmega128 onde se encontra todo o controlo (ver Figura 4.6) [56].

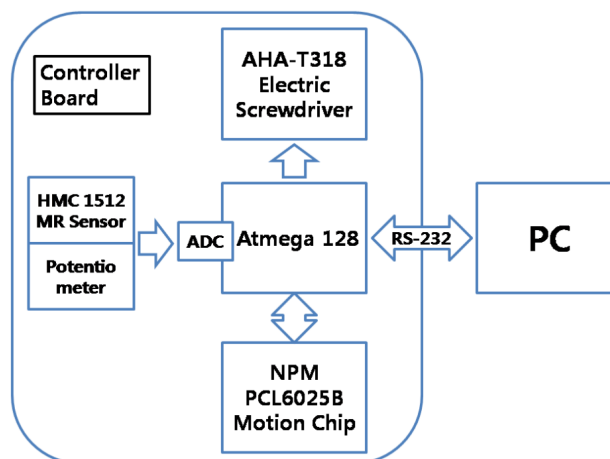


Figura 4.6: Arquitetura do sistema de aparafusamento automático [56].

Após o sistema se encontrar estável, foi possível retirar conclusões quanto ao binário e força. As Figuras 4.7 e 4.8 demonstram um caso de sucesso de aparafusamento [56].

Na Figura 4.7 é possível visualizar o ligar da aparafusadora, entre os 20 ms e 55 ms, fazendo corresponder a um pico no binário. De seguida, verifica-se o aumento do binário até aos 205 ms - ponto em que a cabeça do parafuso toca na peça, e depois diminui de forma abrupta [56].

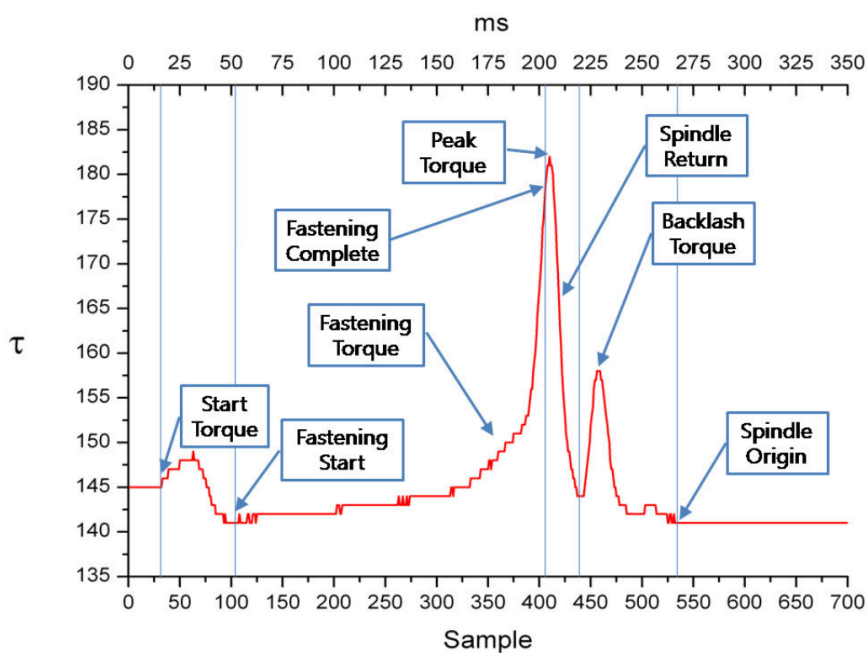


Figura 4.7: Análise do binário para um caso de sucesso [56].

Na Figura 4.8 é possível visualizar que apenas há alteração da componente da força aos 55 ms, instante em que o parafuso efetua contacto com a peça. Após esse instante, verifica-se o aumento da força até aos 155 ms. Nesse instante, verifica-se que ocorre a operação de fixação (parafuso) [56].

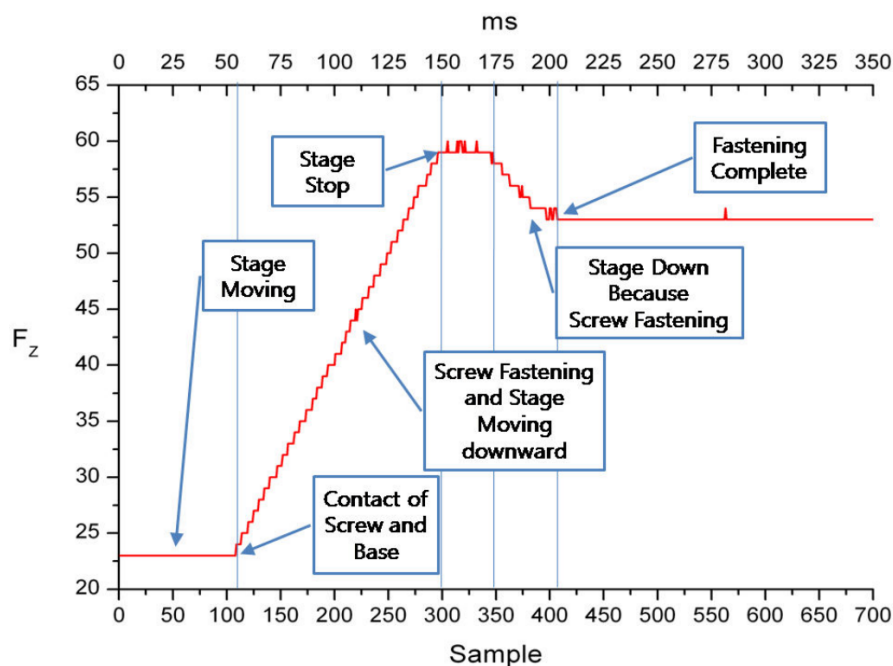


Figura 4.8: Análise da força para um caso de sucesso [56].

Além do caso de sucesso anteriormente apresentado, os autores efetuaram o estudo de casos de erro, tendo-os classificado em seis categorias [56].

Ficou concluído, após extensos testes efetuados que existe, viabilidade para o sistema desenvolvido, de baixo custo, tendo terminado com algumas possíveis melhorias a efetuar de modo a tornar este sistema mais robusto [56].

## 4.5 Caso de estudo 4 - A importância dos atuadores eletromecânicos na indústria automível

Os fabricantes da indústria automível encontram-se em constante competição no seu mercado, pelo que estes procuram encontrar novos processos e tecnologias que lhes permitam aumentar a quantidade, a qualidade e a flexibilidade de produção [57].

Com o objetivo de aumentar os indicadores atrás mencionados, os engenheiros desta indústria efetuam a análise da automação do processo em toda a produção, tentando encontrar possíveis locais a melhorar. Uma das áreas em análise é a conversão de atuadores hidráulicos e pneumáticos em atuadores eletromecânicos, sendo estes mais limpos, flexíveis e eficientes [57].

A tecnologia à base da energia dos fluídos encontra-se nestas indústrias há muitas décadas. Contudo, possui as suas desvantagens: fugas, ajustes derivados das mudanças de temperatura e humidade do ambiente, limitações na flexibilidade e precisão. Estas desvantagens culminam em limitações relativamente ao desempenho, ineficiências e manutenções constantes, impossibilitando que os fabricantes atinjam determinados objetivos de produção [57].

Por outro lado, os atuadores eletromecânicos são precisos e programáveis, com mecanismos mecânicos resistentes e confiáveis. Estes, em comparação com os sistemas hidráulicos e pneumáticos, são de fácil instalação e programáveis, possuem repetibilidade, consomem menos energia, vida útil maior e não necessitam de manutenção [57].

Na indústria é possível encontrar os atuadores à base de energia fluída em diversas aplicações, sendo de destacar a alteração para os atuadores eletromecânicos nas aplicações de soldadura por pontos robotizada, montagem pressionada, dispensação robótica, e fixação e aperto [57].

No seguimento do âmbito deste trabalho selecionou-se para estudo as aplicações de soldadura por pontos robotizada e fixação e aperto [57].

### **Soldadura por pontos robotizada**

A estrutura de um carro consiste na junção de chapas metálicas, sendo este processo efetuado por centenas de pontos de solda. Neste processo é de elevada importância a precisão e consistência da solda, de modo a garantir qualidade (traduzindo-se em segurança para os passageiros) [57].

Nos dias de hoje, este processo encontra-se associado a robôs, eliminando os riscos humanos do processo. Estes possuem pistolas de solda por pontos para efetuar o processo. Tradicionalmente, a atuação das pistolas era efetuada com recurso a cilindros pneumáticos, realizando uma determinada força durante o processo de soldagem, porém este tipo de sistema possui como desvantagens as flutuações de ar comprimido, de humidade e de temperatura, interferindo diretamente na qualidade final da soldadura [57].

O atuador eletromecânico veio colmatar a falha do sistema tradicional oferecendo um controlo melhor quanto à força exercida pela pistola, melhorando a qualidade e repetibilidade [57].

### **Fixação e aperto**

É usual encontrar-se nesta indústria grampos automatizados. Tradicionalmente, os grampos são de atuação pneumática e permitem efetuar a fixação e um aperto rápido, contudo não permitem efetuar o controlo e flexibilidade no nível de exigência da indústria automóvel. Assim, com a evolução do mercado e variedade de veículos por linha, esta indústria tem sentido a necessidade de alterar os atuadores tradicionais para os eletromecânicos [57].

Estes atuadores eletromecânicos vêm colmatar as desvantagens dos atuadores pneumáticos, permitindo ainda programar a velocidade e a força do mecanismo de fixação. Além disso, ainda são programáveis e permitem o controlo das acelerações e desacelerações, ou seja, permitem movimentos rápidos e lentos para evitar que as ferramentas danifiquem as peças [57].

Os autores deste caso de estudo, enunciam que é essencial permanecer-se atualizado tecnologicamente e efetuarem-se mudanças para se conseguir obter uma vantagem competitiva na indústria. O uso de soluções baseadas em atuadores eletromecânicos reduz os custos de manutenção e, subsequentemente, os tempos e inatividade das linhas de produção, um controlo do processo superior e menor consumo de energia [57].

## **4.6 Sumário de capítulo**

Em suma, neste capítulo foi efetuado um breve enquadramento das montagens automatizadas passando pela apresentação de algumas vantagens associadas e tipos de sistemas de montagem, e no que caracteriza uma montagem automatizada.

De seguida foi apresentado um caso de estudo referente a tarefas de movimentação e orientação de peças (*pick and place*). No caso de estudo foram apresentadas as vantagens de usar sistemas automatizados, tendo culminado em flexibilidade, velocidade, alcance e precisão.

Noutro caso de estudo foi apresentado o uso de robôs aplicados a tarefas de montagem. Os robôs funcionam em parceria com o operador, facilitando as tarefas do mesmo, e possuem como vantagens a compactidade, flexibilidade, segurança e precisão.

No caso de estudo de uma máquina de aparafusamento automático, de baixo custo, foi apresentado um sistema baseado numa aparafusadora comercial, na qual se aplicou todo um controlo capaz de analisar o binário e força para a perceção do sucesso do aparafusamento. Além disto, ainda é capaz de perceber quando efetua um mau aparafusamento.

Por fim, apresentou-se um caso de estudo referente à importância dos atuadores eletromecânicos na indústria automóvel. Estes atuadores surgiram na indústria automóvel face às vantagens que oferecem em detrimento dos atuadores tradicionais (atuadores à base de energia de fluídos).



## Capítulo 5

# Arquitetura do sistema

*Neste capítulo será efetuada a apresentação do problema, bem como a solução apresentada pela RobotSol. De seguida será apresentado o diagrama de blocos e o processo do sistema desenvolvido.*

*Serão apresentados com algum detalhe os constituintes mecânicos da célula, o seu funcionamento, e a atuação e sensorização presente nos mesmos.*

*Por fim, será abordada a segurança e os modos de funcionamento da célula de fabrico.*

### 5.1 Descrição do problema

A empresa RobotSol dedicava-se ao desenvolvimento de soluções à medida do cliente, de equipamentos e linhas para a indústria em geral. Esta foi contactada por uma empresa dedicada à exportação e especialista em produtos de comunicação visual, como por exemplo quadros, que ajudam na interação entre os utilizadores.

O cliente olhou para o processo de montagem de quadros como sendo algo monótono, fisicamente desafiante e pouco produtivo, quando efetuado por um operador. Assim, em 2015, este cliente procurou a RobotSol para desenvolver uma solução automatizada de montagem de quadros, para o seu novo produto. A solução apresentada possuía como objetivo, para o sistema, o tempo de ciclo de 2,0 quadros/min a 2,5 quadros/min.

O processo a automatizar deveria contemplar a montagem e fixação das peças ao plano (o plano podia variar em espessura), sendo a fixação realizada através de colagem, aparafusamento e amolgamento das peças ao plano. A RobotSol apresentou uma solução perante o desafio lançado pelo cliente. A solução resumia-se a uma célula de fabrico automatizada, contemplando as operações que o operador deveria efetuar: montagem, colagem, aparafusamento e amolgamento.

À data de início do estágio curricular, os requisitos por parte do cliente já tinham mudado - não era necessário efetuar a colagem -, só existia um tipo de quadro (única espessura) e já existia definido o *layout* do sistema e os equipamentos para a automatização do processo.

Da parte da RobotSol era sabido que existia pouca folga para despesas adicionais no projeto e já haviam algumas impressões gerais relativamente ao projeto desenvolvido: existiam problemas mecânicos no sistema.

Este sistema já esteve totalmente montado no cliente, no entanto nunca se encontrou a funcionar. Contudo, estava definido que não se podia efetuar alterações de *layout* relativamente aos equipamentos transportador de entrada e de saída.

Nas próximas secções serão tecidas algumas considerações referentes ao sistema implementado no cliente. Este sistema não corresponde ao sistema inicial, pelo que as alterações que surgiram do sistema inicial serão abordadas essencialmente no Capítulo 7.

## 5.2 Diagrama de blocos

Para o funcionamento geral da célula existe a interligação de diversos equipamentos e interfaces. A Figura 5.1 apresenta um conjunto de três blocos - entradas, unidades de controlo e saídas. As comunicações e interfaces encontram-se inerentes a todo o sistema.

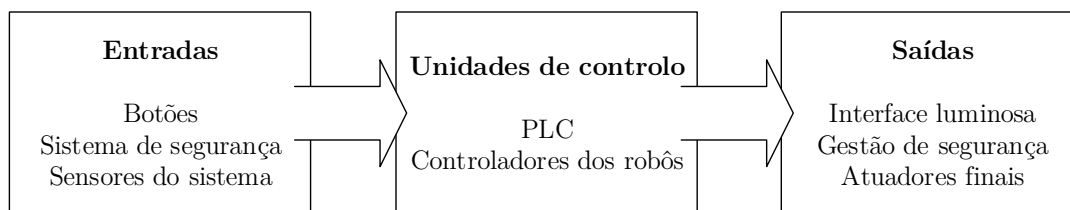


Figura 5.1: Diagrama de blocos do sistema.

As unidades de controlo são o “cérebro” de todo o sistema. Neste categoria enquadra-se o PLC, CJ2M-CPU32, e dois controladores KUKA, KR C4. As unidades de controlo são responsáveis por receber informações, efetuar o processamento, tomar decisões e comunicar.

O PLC é responsável pela gestão da célula, pelo sistema de arranque dos robôs, pelos transportadores de peças e pela montagem e fixação das peças. Por outro lado, os controladores verificam se possuem as condições para executar uma dada tarefa e executam-nas. Estes também são responsáveis pela atuação dos seus respetivos atuadores finais e a comunicação de estados para o PLC.

O bloco das entradas representa a entrada de informações nas unidades de controlo. Estas entradas podem surgir de diversos equipamentos, podendo representar o estado: de posicionamento dos cilindros pneumáticos e das garras; da pressão de ar comprimido; do vácuo; do estado das botoneiras de emergência, portas e barreiras de segurança; da deteção de peças; dos sinais de alarmes dos variadores de frequência; dos botões.

O bloco das saídas representa as ações perante as decisões tomadas. Estas podem resultar: na atuação dos cilindros pneumáticos e motores (variador de frequência); no acionamento de luzes dos botões e torre luminosa; na permissão de entrada na célula.

As comunicações realizam-se através de EtherNet entre o PLC e HMI, de DeviceNet entre o PLC e os controladores KUKA e as caixas de campo - existentes na mesa de montagem e de fixação (abordadas mais à frente) - e através de cartas de entradas e saídas digitais existentes no PLC.

As interfaces surgem através das consolas de programação dos robôs e da HMI. Através da consola de programação do robô é possível visualizar estados referente ao mesmo, trocas de sinais e valores (possibilita também alterar o estado das entradas e saídas) e movimentar o manipulador mecânico. A HMI permite visualizar os estados dos sensores, estatísticas referentes ao sistema, erros e realizar o controlo manual de diversos componentes.

Na Figura 5.2 é possível visualizar a arquitetura da comunicação existente no sistema. Toda a comunicação encontra-se em torno do PLC. Este efetua a comunicação através de uma carta de comunicação DeviceNet, com duas caixas de campo - uma caixa possui todas as ligações dos equipamentos mesa de montagem, centrador e armazém, e a outra do transportador de saída e da mesa de fixação (equipamentos apresentados mais à frente) - e dois controladores dos robôs. Através das cartas de entradas e saídas do PLC é efetuada a comunicação com o transportador de entrada, torre luminosa e segurança. Por fim, a comunicação HMI é efetuada por EtherNet.

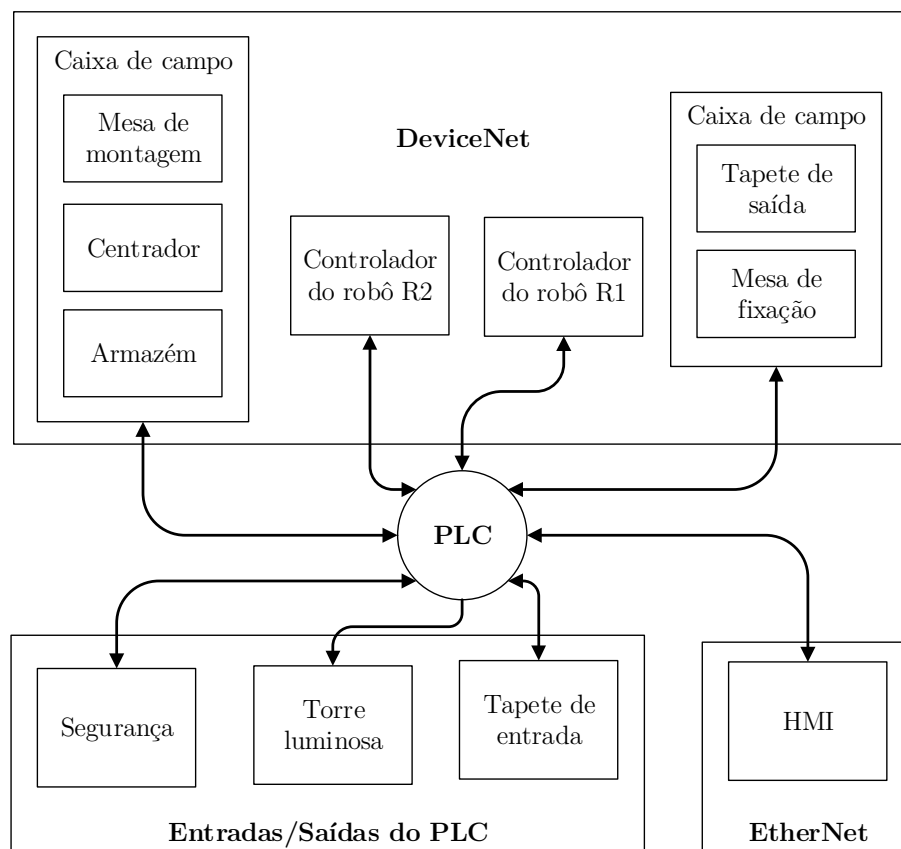


Figura 5.2: Comunicação existente entre os diversos equipamentos.

### 5.3 O processo do sistema

O processo do sistema desenrola-se em torno dos produtos a serem manipulados e orientados com a finalidade de se obter o produto final, o quadro (ver Figura 5.3).



Figura 5.3: Exemplo do produto final, quadro.

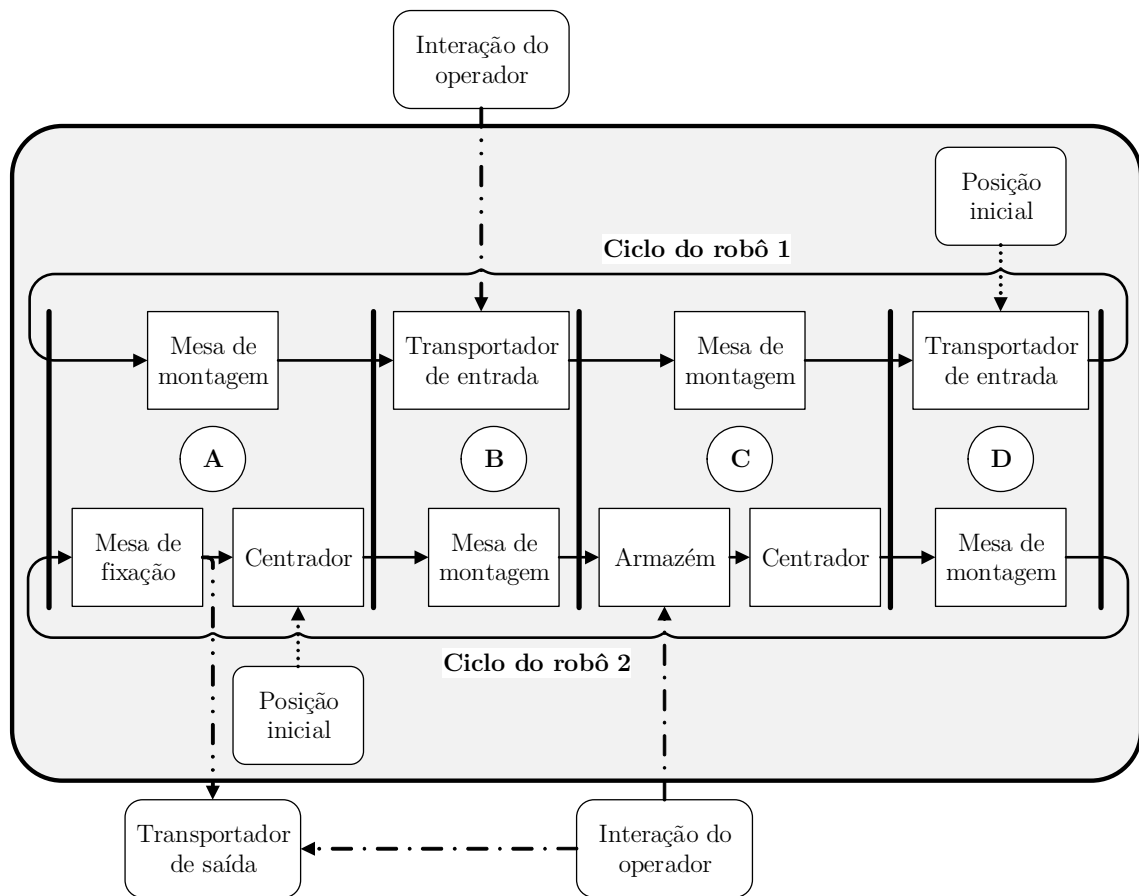
Um quadro é formado por um conjunto de material, obedecendo às seguintes relações de quantidades e produtos: um plano contraplacado, com perfil metálico de um dos lados e papel do outro; duas peças de alumínio; duas peças de plástico - uma com detalhe curvo e uma com detalhe reto; quatro parafusos. O quadro possui uma massa de 7 kg, sendo que esta se encontra distribuída em cerca de 6 kg para o plano e 0,250 kg para as restantes peças.

Para a realização do processo de montagem o plano é considerado como referência de base, na qual todas as peças são montadas. As peças e os planos dão entrada em dois equipamentos distintos na célula.

A entrada das peças é realizada através de um transportador de entrada, com tabuleiros, com posições definidas para cada peça. Os planos encontram-se num armazém, dentro da zona da célula. Todas as peças são colocados previamente por um operador.

O sistema é composto por dois robôs KUKA, de seis eixos, sendo que estes efetuam a movimentação e orientação das peças e planos, de uns equipamentos para os outros. O robô R1 interage com o transportador de entrada e mesa de montagem. Por outro lado, o robô R2 interage com o armazém, o centrador, a mesa de montagem e a mesa de fixação.

A Figura 5.4 apresenta os diversos equipamentos existentes na célula. Nesta encontra-se representado, de modo macro, o ciclo de trabalho dos robôs R1 e R2 ao longo do processo de produção do quadro. O início de ciclo dos robôs é dado pela “posição inicial”, posição do manipulador em *Home*.



A, B, C e D - Tarefas executadas em paralelo pelos robôs.

Figura 5.4: Processo realizado pelos robôs na célula.

O processo de produção do quadro desenrola-se com sincronismo de tarefas entre os dois robôs. Assim, quando um robô se encontra a efetuar uma tarefa num dado equipamento, o outro robô encontra-se a realizar outra tarefa, em outro equipamento.

Numa primeira fase de montagem, o R1 efetua a colocação das peças de alumínio na mesa de montagem (A), tendo efetuado o *pick* desta do transportador de entrada em D. De seguida o R2 efetua a colocação do plano (previamente centrado, A) na mesa de montagem

(B), enquanto o R1 se encontra a pegar em mais peças. Neste momento, a mesa efetua a primeira de fase de montagem: montagem das peças de alumínio ao plano.

Numa segunda fase de montagem, o R1 efetua a colocação das peças de plástico na mesa de montagem (C) e, em paralelo, o R2 coloca um quadro do armazém no centrador (para garantir o centramento do plano para o próximo ciclo de trabalho, C).

Tendo o R1 colocado as peças e a mesa de montagem efetuado a montagem das peças de plástico às anteriores já montadas (as peças de plástico entram numa abertura das peças de alumínio), o R2 efetua a movimentação do conjunto para a mesa de fixação e desloca-se para o centrador (A).

Estando as peças devidamente montadas na mesa de fixação efetua-se o processo de fixação das peças ao plano, perfazendo assim o quadro. Os parafusos devem ser aparafusados na peça de plástico, num orifício para eles destinados.

Após estar efetuado o aparafusamento é necessário efetuar a punção nas peças de alumínio de modo a amolgar estas contra o plano. Por fim, com o quadro já montado e fixo, este deverá sair da mesa de fixação, para um transportador de saída, dando entrada numa outra célula.

Na figura anterior também se apresentam os equipamentos nas quais o operador terá influência direta: transportador de entrada, transportador de saída e armazém. Além disso, também se sugere um determinado “controlo” de tarefas e espaço entre robôs, pelo que estes não podem estar em simultâneo dentro da mesma área de trabalho, na mesa de montagem. Assim, os robôs executam tarefas em paralelo, mas nunca dentro da mesma área de trabalho ao mesmo tempo.

## 5.4 Constituição da célula

Uma vez que no passado o *layout* se encontrou implementado no cliente, e este se interliga com outra célula, era premissa da RobotSol que não se podiam efetuar alterações relativamente à posição das vedações e do transportador de entrada e de saída. Assim, com o suporte do *software* KUKA Sim Layout 2.2 foram efetuadas as simulações deste projeto, presentes no Capítulo 6, tendo levado à validação dos diversos componentes.

Começou por se definir a posição das vedações e dos equipamentos que não se podiam alterar: transportador de entrada e de saída. Dado que a mesa de montagem é um equipamento inerente aos dois robôs, esta deve encontrar-se no espaço entre eles. A mesa de fixação, além de efetuar a fixação das peças ao plano, também efetua a movimentação dos quadros para o transportador de saída.

Uma vez que o robô R2 possui o sistema para efetuar a movimentação de planos, então o armazém e o centrador deverão ficar num espaço disponível do *layout* e ao alcance do robô R2.

Todos os componentes da célula foram fornecidos pelo departamento de projeto mecânico da RobotSol, no formato Standard Template Library (STL). Este formato é o apropriado para a execução das simulações.

#### 5.4.1 Transportador de entrada

Este componente efetua o transporte das peças, para dentro da célula, com intuito de posteriormente serem montadas ao plano. Estas peças são colocadas por um operador, fora da célula, numa posição definida.

Uma vez que o operador trabalha diretamente com o transportador, existe um certo risco associado à sua segurança. Deste modo, o transportador possui barreiras de segurança (ver Figura 5.5) para salvaguardar o operador, que no caso de estarem obstruídas impede o seu normal funcionamento, ficando assim imobilizado.

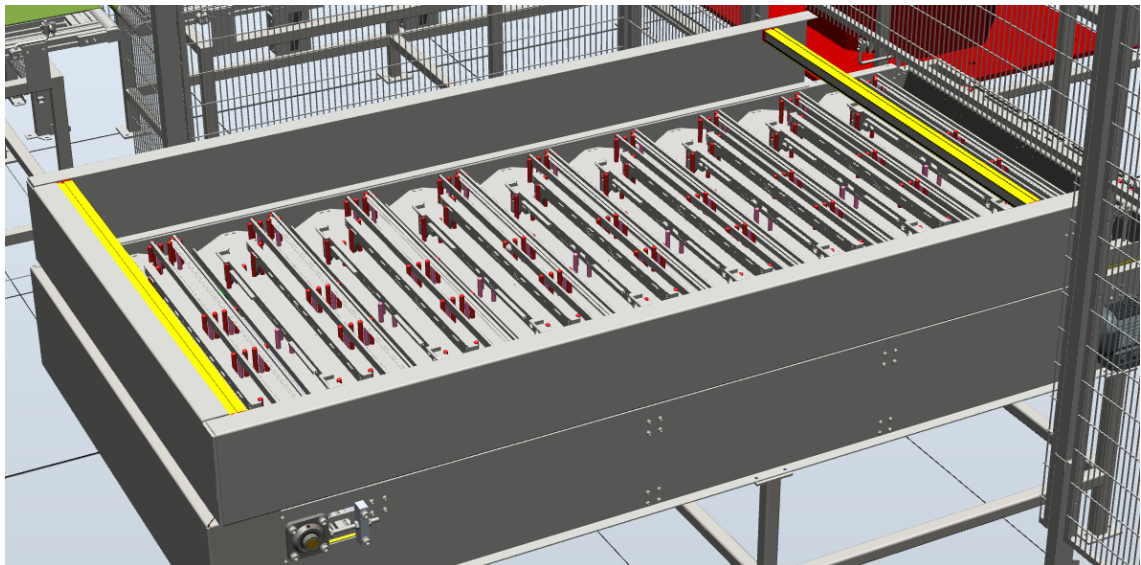


Figura 5.5: Transportador de entrada com barreiras de segurança.

O transportador possui um total de dezanove tabuleiros, sendo que apenas nove tabuleiros são considerados úteis, isto é, apenas nove tabuleiros se encontram orientados para cima, podendo o operador colocar peças.

Dado que o robô irá efetuar a movimentação e/ou orientação das peças para a mesa de montagem, é necessário garantir a mesma posição das peças, ou seja, dos tabuleiros. Este posicionamento é dado pela obstrução de um sensor que se encontra fixo na parte inferior no transportador, por baixo do tabuleiro com peças (ver Figura 5.6).

Como é possível visualizar na Figura 5.7, cada tabuleiro possui um espaço destinado a cada peça. As peças A e B, e C e D correspondem respetivamente às peças de alumínio e de plástico.

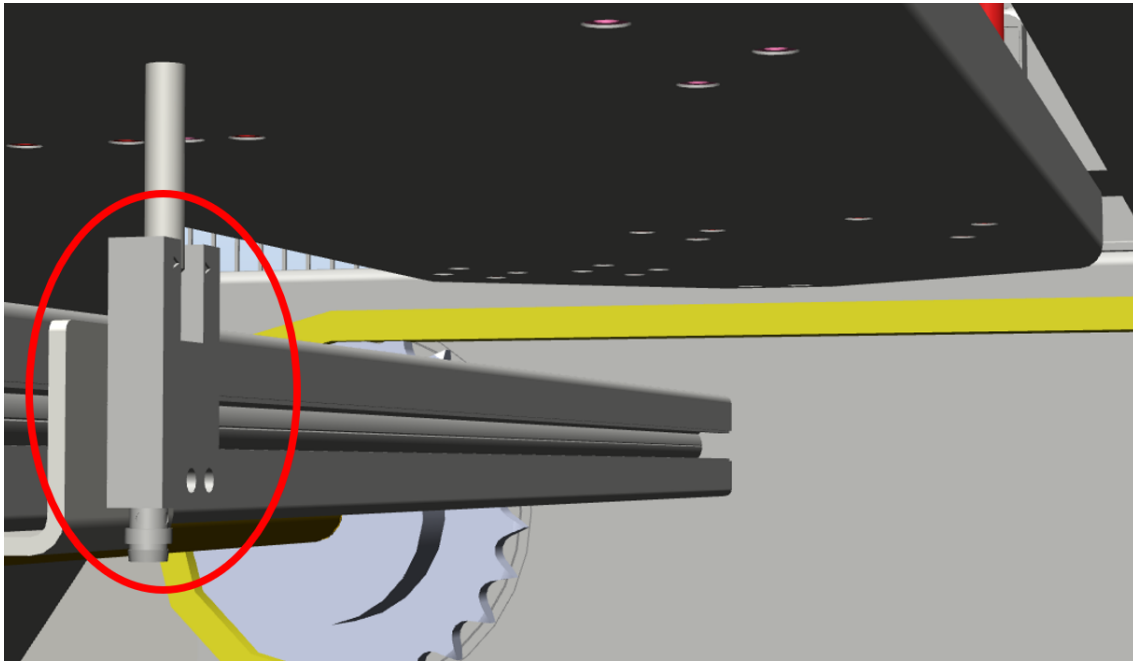
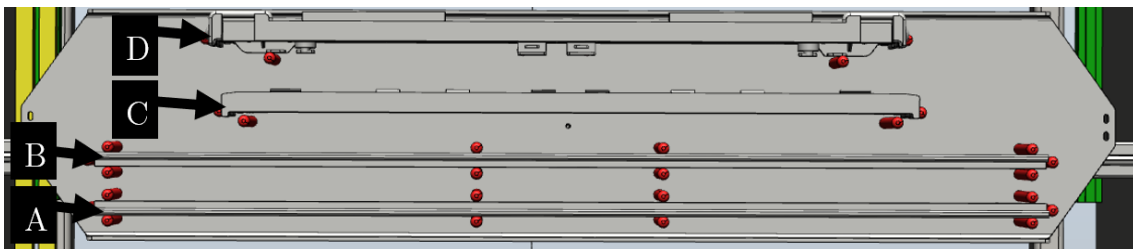


Figura 5.6: Sensor de tabuleiro.

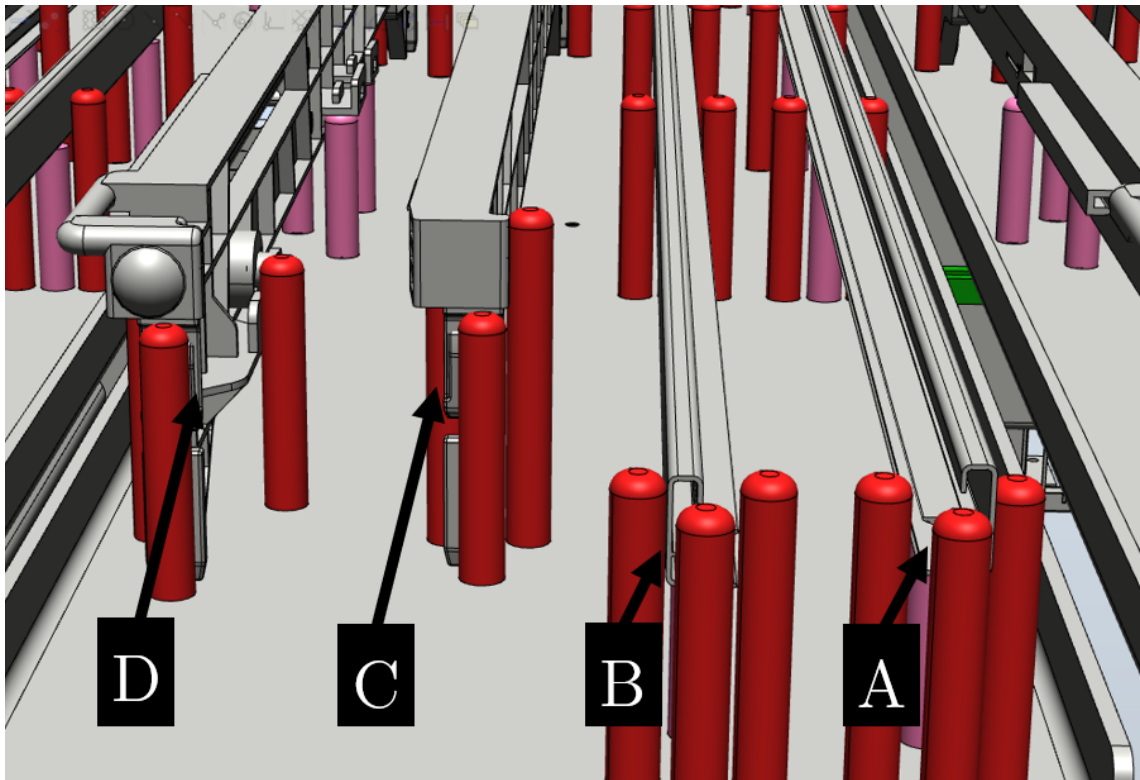


- A - peça de alumínio;
- B - peça de alumínio, rodada de 180° face à peça A;
- C - peça de plástico, com perfil reto;
- D - peça de plástico, com perfil curvo.

Figura 5.7: Posicionamento das peças no transportador de entrada do ponto de vista superior.

Como referido anteriormente, as peças de alumínio são iguais, contudo são colocadas no transportador de forma oposta. Através da Figura 5.8 é possível visualizar as peças de alumínio e as peças de plástico com perfil reto (peça C) e perfil curvo (peça D). A orientação das peças encontra-se de acordo com o necessário para a montagem das peças ao plano na mesa de montagem.

Dada a possibilidade de falha, por parte do operador e, no caso de falha, paragem do sistema para a sua correção, os tabuleiros possuem pinos anti erro, que ajudam o operador na colocação das peças, e assim, a minimizar os erros e paragens. No entanto, estes pinos apenas existem para as peças C e D, ficando estas com uma cota superior acima do pressuposto. Uma vez que as peças A e B são iguais não é possível utilizar esse tipo de



- A - peça A;
- B - peça B;
- C - peça C;
- D - peça D.

Figura 5.8: Posicionamento das peças no transportador de entrada do ponto de vista lateral.

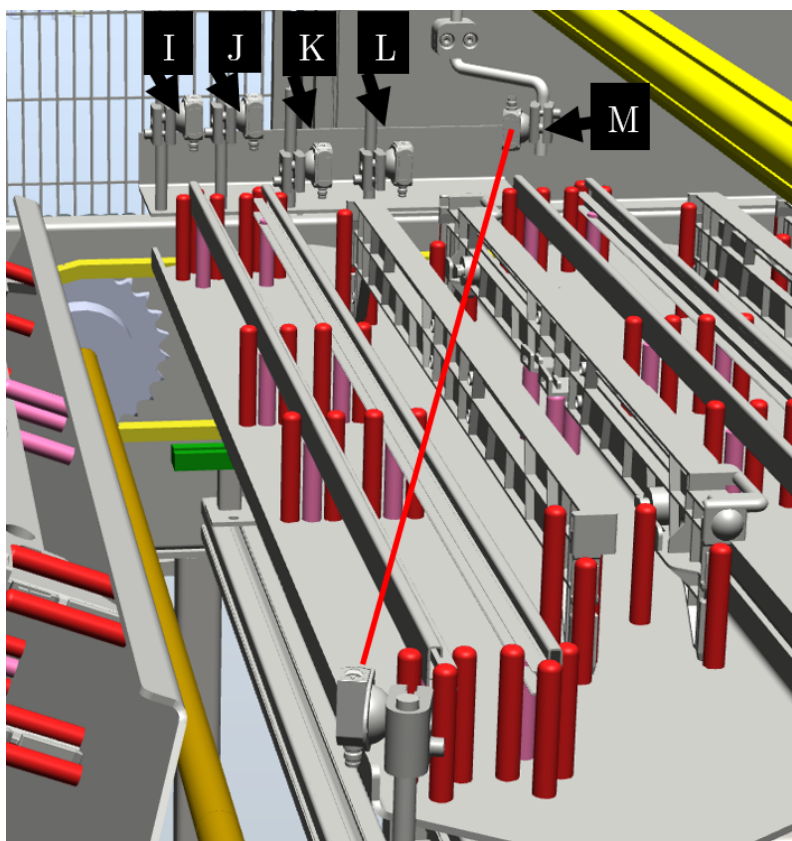
sistema de pinos anti erro.

Apesar do sistema possuir pinos anti erro, o operador pode colocar de forma errônea as peças ou nem colocar todas. Perante esta situação, existem sensores que verificam se o tabuleiro possui todas as peças e se não se encontra nenhuma acima da cota normal.

Na Figura 5.9 os sensores I, J, K e L detetam a presença de peça, através de quatro sensores de reflexão difusa (um para cada peça), e o sensor M deteta a existência de alguma peça acima da cota normal, através de um sensor fotoelétrico por barreira. Os sensores I, J, K e L apontam para a parte mais elevada da peça, verificando assim a existência das peças.

Deste modo é possível garantir que os tabuleiros vão entrar com todas as peças, e caso não estejam todas as peças, o operador pode intervir e corrigir. Além disso, os pinos ajudam a realizar controlo de qualidade; por exemplo, se as peças forem maiores, estas não cabem no espaço a elas destinadas.

Aqui, o robô R1 efetua o *pick* de duas peças (uma de cada vez), e após ter as duas peças é realizada a movimentação/orientação para a mesa de montagem. O processo é idêntico para as peças C e D.



I, J, K, L - sensores de reflexão difusa para as peças A, B, C e D, respetivamente;  
M - sensor fotoelétrico de barreira para deteção de erro.

Figura 5.9: Posicionamento dos sensores face às peças no transportador de entrada do ponto de vista lateral.

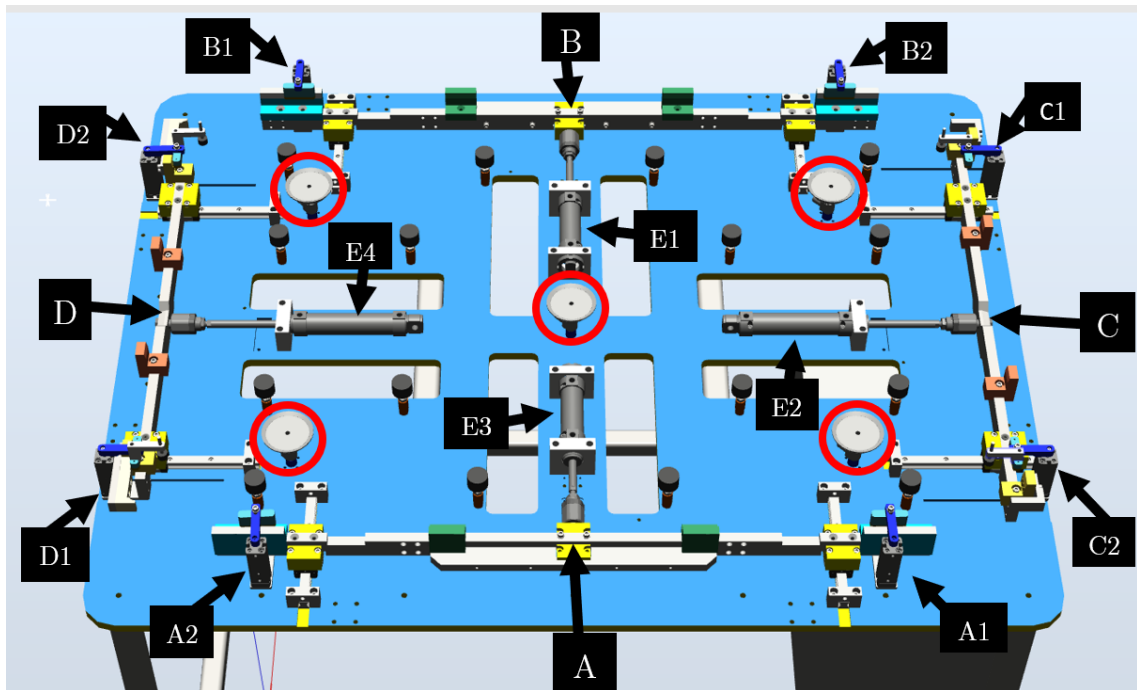
Os sinais analisados para o controlo do transportador de entrada encontram-se listados no Anexo A.1. Através destes é possível efetuar o controlo e análise de erros do transportador de entrada.

#### 5.4.2 Mesa de montagem

Neste componente efetua-se a montagem das peças - provenientes do transportador de entrada - ao plano - proveniente do armazém. A mesa é composta por cilindros pneumáticos e geradores de vácuo que realizam e auxiliam o processo.

Na Figura 5.10 é possível observar as estruturas mecânicas onde as peças serão colocadas - indicações A, B, C e D - e o plano - em cima dos suportes de tonalidade preto, espalhados pela superfície da mesa.

Relativamente às peças, estas serão colocadas pelo robô R1. O processo realiza-se de forma idêntica para as quatro peças. Assim, o robô R1 coloca a peça no espaço a ela destinada e nesse momento os cilindros pneumáticos, referentes a essa peça, recuam e garantem assim o seu posicionamento na mesa.



A, B, C e D - estrutura mecânica de suporte da peça A, B, C e D, respetivamente;  
 A1 e A2, B1 e B2, C1 e C2, e D1 e D2 - cilindros pneumáticos que garantem o posicionamento da peça A, B, C e D, respetivamente, de acionamento simultâneo;  
 E1 e E2, e E3 e E4 - cilindros pneumáticos que efetuam a montagem das peças A e B, e C e D, respetivamente, de acionamento simultâneo;  
 indicação a vermelho: cilindros pneumáticos que elevam e efetuam vácuo ao plano, de acionamento simultâneo.

Figura 5.10: Componentes existentes na mesa de montagem.

O plano que se encontrava no centrador é colocado pelo robô R2, em cima dos suportes a ele destinado e ocorre a fixação do seu posicionamento na mesa. Para isso, os cilindros pneumáticos relativos ao plano sobem, efetuam vácuo e voltam a recuar. Deste modo garante-se a posição do plano na mesa.

Como referido anteriormente, o robô R1 transporta duas peças de cada vez, sendo que o plano é inserido na mesa quando as peças A e B já se encontram nesta. Só após a colocação do plano é que são colocadas as peças C e D. Quando o plano é inserido efetua-se a montagem das peças A e B ao plano, e depois com as peças C e D a restante montagem.

A montagem das peças ao plano é realizada pelos cilindros pneumáticos que efetuam a montagem. Estes atuam em simultâneo, ou seja, os cilindros pneumáticos referentes às peças A e B (E1 e E3) recuam, e depois os referentes às peças C e D (E2 e E4) recuam. Deste modo exercem-se forças opostas no plano, no momento de efetuar a montagem, e não interferem com o posicionamento do plano na mesa.

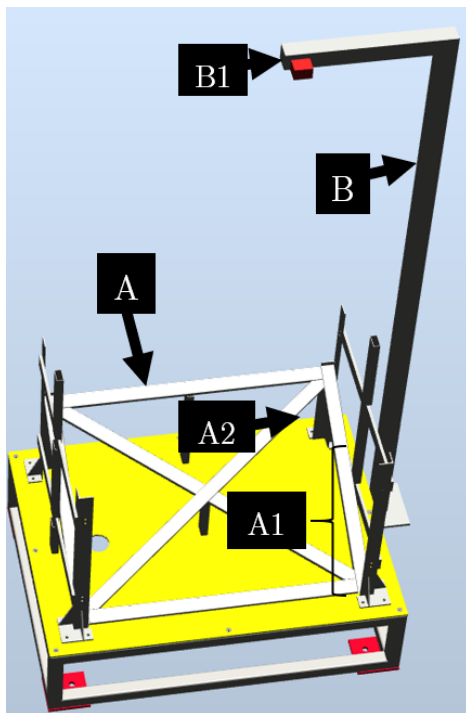
Na mesa todos os cilindros pneumáticos possuem sensores nas posições de avanço e recuo. Através deles é possível concluir se a montagem foi bem realizada. A atuação dos cilindros pneumáticos é realizada através de eletroválvulas biestáveis e do gerador

de vácuo com recurso a uma eletroválvula monoestável. Dada a existência de vácuo no sistema, torna-se necessária a existência de um sensor de vácuo. Esta mesa também possui um pressóstato o qual permite saber a pressão do ar comprimido. Os sinais referentes a esta mesa podem ser encontrados no Anexo A.2.

Esta mesa possui uma caixa de campo com comunicação DeviceNet. Todos os sensores e atuadores da mesa de montagem, centrador e armazém encontram-se ligados a esta caixa. Assim, esta caixa possui módulos da Beckhoff, dos quais fazem parte uma cabeceira de DeviceNet, dois módulos de entradas e saídas digitais, e um módulo de entradas analógicas.

### 5.4.3 Armazém

Neste componente encontram-se armazenados os planos. Na Figura 5.11 é possível visualizar o armazém (A) onde se encontram os planos, e o suporte (B) de um sensor ótico de nível de nível (B1), permitindo saber a altura de planos.



- A e B - armazém e suporte de planos, respetivamente;
- A1 - altura máxima de planos no armazém;
- A2 - orifício de passagem do feixe laser do sensor ótico de nível;
- B1 - sensor ótico de nível.

Figura 5.11: Armazém de planos e suporte de sensor ótico de nível.

Os planos são colocados neste componente pelo operador, dentro de quatro guias (cantos que garantem o posicionamento do plano). Este possui 700 mm de altura de guias (A1). Porém, não se considera toda a altura do armazém como útil.

Os planos fazem vácuo entre eles, pelo que este armazém possui escovas nas laterais das guias. Assim, é necessária alguma margem de folga para que no caso de o robô R2 levar

algum plano, com o atrito das escovas, este caia e fique dentro das guias. Considerou-se uma altura útil de 600 mm, dando para sensivelmente 60 planos, indo de acordo com a solução apresentada pela RobotSol.

O orifício que se encontra no fundo do armazém (A2) irá permitir gerar um valor padrão para o sistema e, assim, saber se o armazém se encontra sem planos.

Os sinais referentes ao armazém e que permitem efetuar o controlo do mesmo podem ser encontrados no Anexo A.3.

#### 5.4.4 Centrador

Este componente corresponde a um processo auxiliar de preparação do plano para a mesa de montagem. Este consiste numa estrutura metálica com uma base inclinada em  $60^\circ$ . Quando um plano é deixado no centrador, o plano através da gravidade irá encostar em duas faces laterais, garantindo assim sempre a mesma posição. Deste modo o plano encontra-se centrado para a mesa de montagem.

O centrador (ver Figura 5.12) possui dois sensores indutivos, permitindo detetar a existência do plano e a qualidade do mesmo. Por exemplo, no caso do plano se encontrar curvo, um dos sensores não irá detetar o plano (B), gerando um erro. Assim, os sensores encontram-se no canto inferior e no meio do centrador.

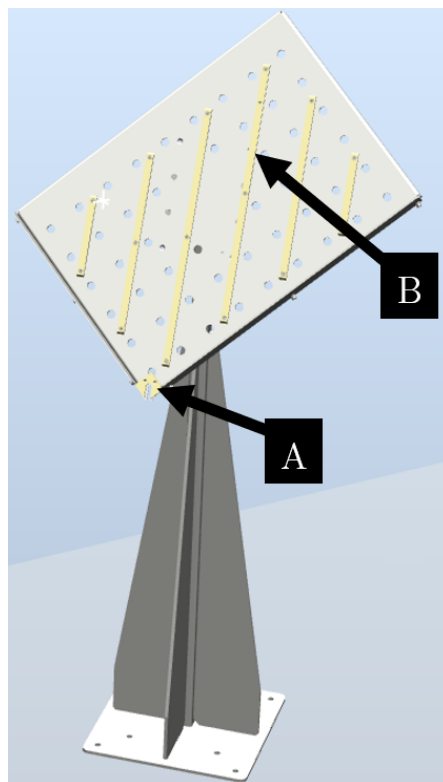


Figura 5.12: Centrador de planos segundo ponto de vista lateral.

Os sinais referentes ao centrador podem ser encontrados no Anexo A.4.

### 5.4.5 Mesa de fixação

Neste componente (ver Figura 5.13) efetua-se a fixação do quadro já montado previamente na mesa de montagem, isto é, ocorre a fixação das peças ao plano. A mesa é composta por um sistema de aparafusamento, amolgamento e de transporte. Os processos desta mesa são realizados com recurso a cilindros pneumáticos e aparafusadoras.

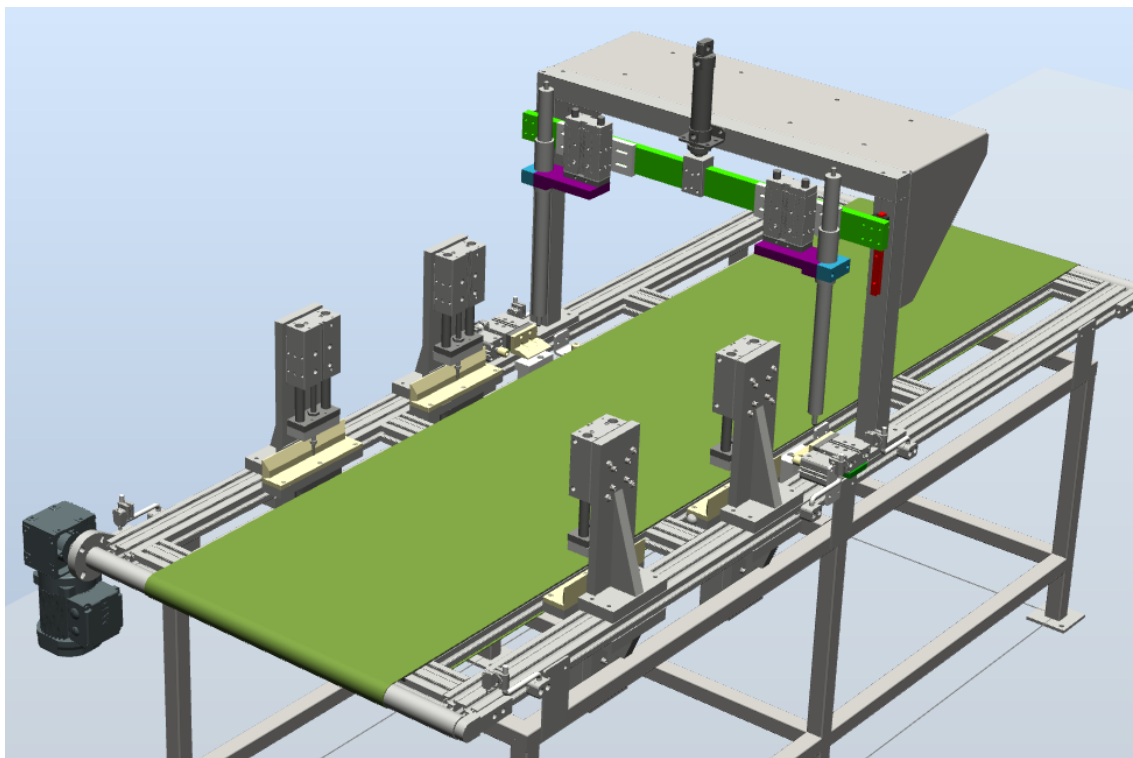


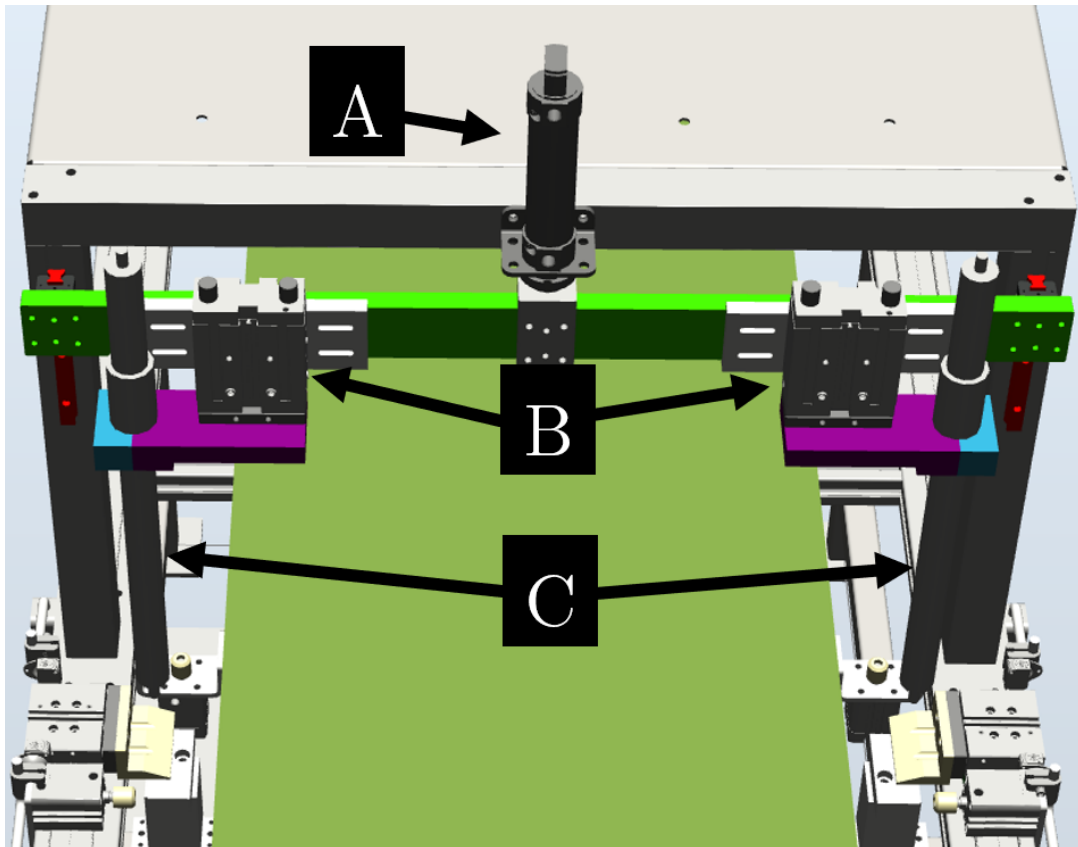
Figura 5.13: Mesa de fixação segundo ponto de vista lateral.

O início do aparafusamento é dado pelo sistema *push-to-start* desenvolvido pela marca SUMAKE [58].

Esta aparafusadora permite a definição de binário para o controlo do fim do aparafusamento. Contudo, o sistema de controlo de binário não será usado. Ficou definido no início do projeto que o controlo do aparafusamento seria baseado em tempo, sendo este parametrizado em função dos testes que serão realizados ao longo de projeto.

Nas Figuras 5.14 e 5.15 é possível observar o sistema de aparafusamento. Este sistema é composto por cilindros pneumáticos e pelas aparafusadoras.

Na Figura 5.14 mostram-se os cilindros pneumáticos A e B que interferem diretamente com as aparafusadoras C. As aparafusadoras possuem uma parte móvel que acompanha o aparafusamento e ajudam a garantir a estabilidade do aparafusamento. O aparafusamento ocorre seguindo a seguinte lógica de funcionamento: num primeiro momento as aparafusadoras avançam, através de A, até ao quadro (local a aparafusar) e a chave sextavado até ao parafuso; num segundo momento as aparafusadoras avançam, através de B, realizando o aparafusamento durante um determinado tempo.



- A: cilindros pneumáticos que realizam o primeiro momento de avanço da aparafusadora;
- B: cilindros pneumáticos que realizam o segundo momento de avanço da aparafusadora;
- C: aparafusadoras.

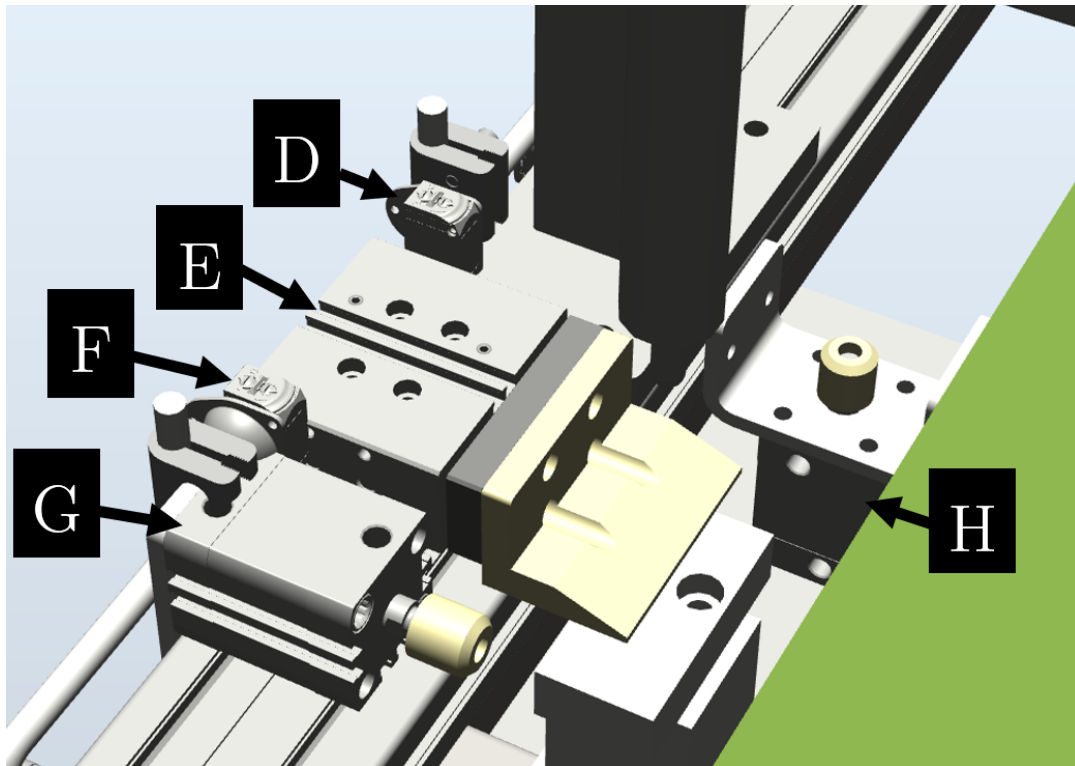
Figura 5.14: Sistema de aparafusamento, parte superior.

Na Figura 5.15 é possível observar o sistema de cilindros pneumáticos que permitem localizar com precisão os quadros para o processo de aparafusamento. Este sistema existe para cada canto de cada quadro.

O quadro proveniente da mesa de montagem, entra neste sistema com a mesma orientação que se encontra na mesa de montagem (perfil plástico curvo em direção à saída), sendo colocado pelo robô R2 em cima dos suportes dos cilindros pneumáticos E.

Num primeiro momento, os cilindros pneumáticos G realizam o alinhamento do quadro numa das faces (peça com perfil curvo), através do movimento do transportador. De modo a alinhar as faces laterais do quadro, E avançam até ao fim de curso e, com o movimento do transportador, o quadro fica alinhado para o aparafusamento da peça com perfil curvo.

Num segundo momento, os cilindros pneumáticos H realizam o alinhamento do quadro numa das faces (peça com perfil reto), com recurso ao movimento do transportador, em sentido inverso ao anterior. Após este processo, realiza-se o alinhamento lateral com recurso a E e, por fim, o aparafusamento desta peça.



- D: sensor fotoelétrico por barreira (sensor 1);
- E: cilindro pneumático que realiza o suporte do aparafusamento;
- F: sensor fotoelétrico por barreira (sensor 2);
- G: cilindro pneumático 1 que realiza paragem do quadro;
- H: cilindro pneumático 2 que realiza paragem do quadro.

Figura 5.15: Sistema de aparafusamento, parte inferior.

Os cilindros pneumáticos E, além de realizarem o alinhamento lateral do quadro, também realizam a sua estabilização, onde se efetua o aparafusamento. Esta estabilidade é reforçada com um perfil metálico que se encontra imediatamente abaixo do suporte.

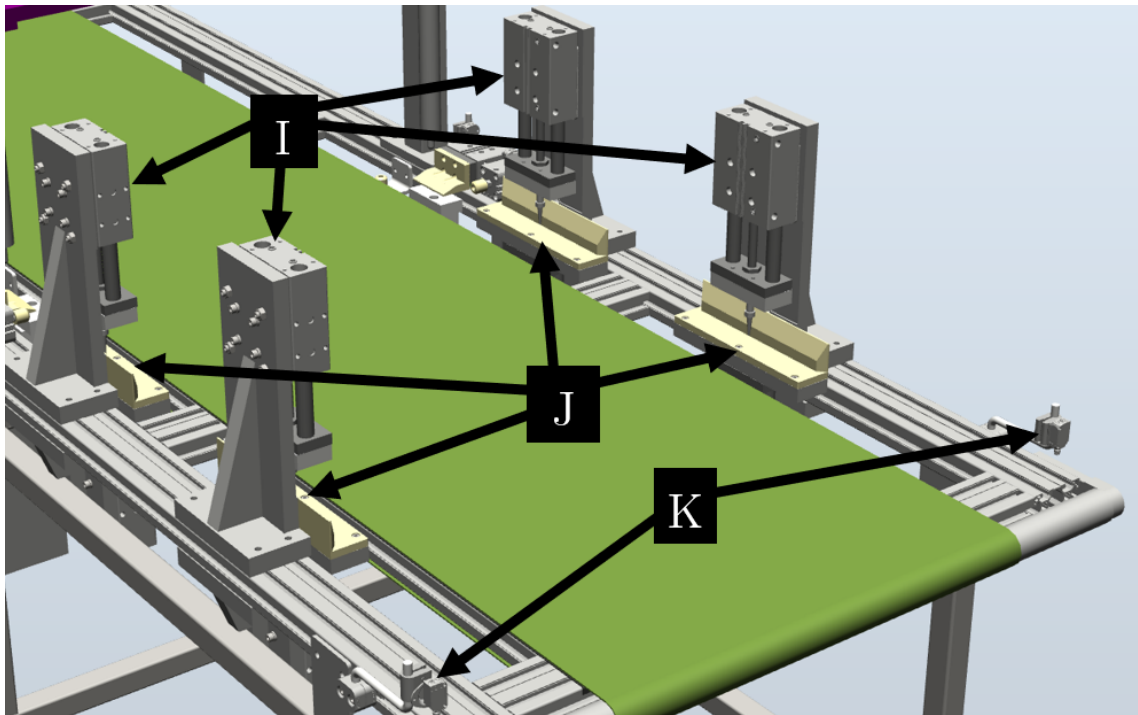
Os sensores D e F são sensores fotoelétricos por barreira. Estes permitem efetuar o controlo da posição do quadro e desencadear determinadas ações nos cilindros pneumáticos.

Na Figura 5.16 é possível observar o sistema de amolgamento do quadro. Este sistema é composto por cilindros pneumáticos. Numa primeira fase realiza-se o suporte do quadro através de J e numa segunda fase realiza-se o amolgamento através de I. O amolgamento é realizado através da força de avanço dos cilindros pneumáticos, sendo o amolgamento efetuado no perfil de alumínio, com recurso a um pino ligeiramente afiado.

A saída do quadro é realizada através do movimento do transportador, sendo a saída do quadro detetada através do sensor fotoelétrico por barreira K.

Esta mesa encontra-se dentro da célula, mas até às redes de segurança. A passagem do quadro para fora da célula é realizada pelo transportador de saída.

Os sinais referentes a esta mesa podem ser encontrados no Anexo A.5. Esta mesa possui uma caixa de campo com comunicação DeviceNet. Todos os sensores e atuadores



- I: cilindros pneumáticos que realizam a punção;
- J: cilindros pneumáticos que realizam o suporte da punção;
- K: sensor fotoelétrico por barreira (sensor 3).

Figura 5.16: Sistema de punção.

da mesa de fixação e transportador de saída encontram-se ligados a esta caixa. Assim, esta caixa possui módulos da Beckhoff, dos quais fazem parte uma cabeceira de DeviceNet, três módulos de entradas digitais e dois módulos de saídas digitais.

#### 5.4.6 Transportador de saída

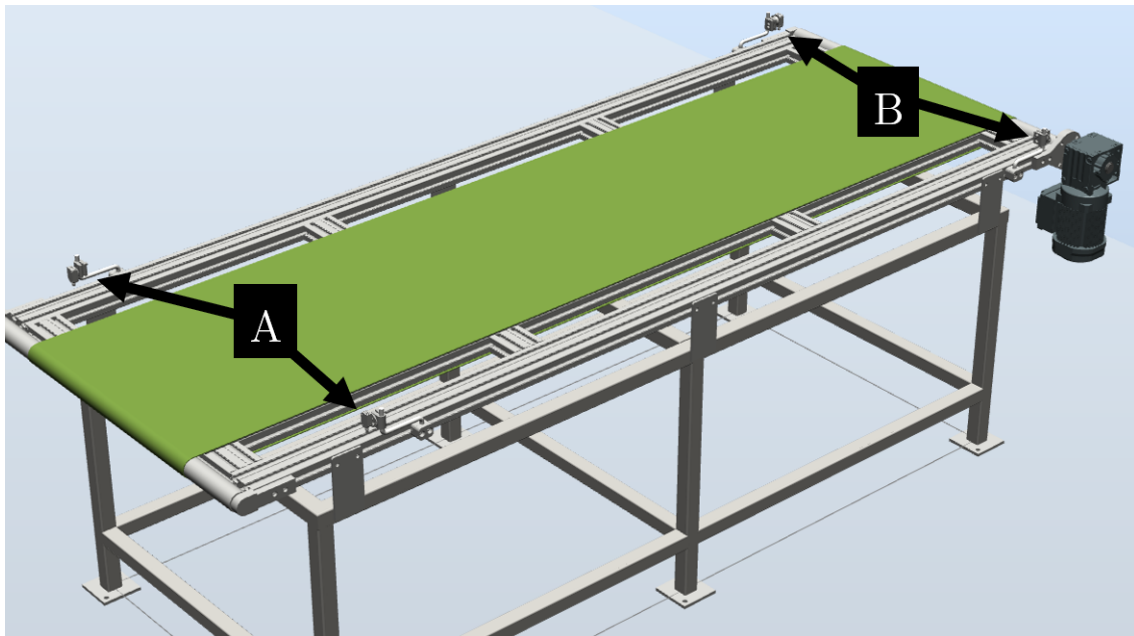
Este componente realiza a interface entre a célula de montagem e fixação de quadros e uma célula de embalagem dos mesmos. Entre as duas células existe um espaço para que exista um operador e possibilite a realização de inspeção visual e colocação de outro tipos de quadros na célula seguinte.

A pedido do cliente existem três modos de funcionamento do transportador de saída:

- modo automático: quando a célula se encontra em automático, o transportador de saída realiza a interface do quadro, da mesa de fixação para fora da célula, e de fora da célula para o interior da célula seguinte, sem qualquer tipo de paragem no espaço do operador;
- modo semi-automático: este modo é idêntico ao modo automático, contudo o quadro para no espaço do operador, sendo que existe a necessidade do operador pressionar um botão (existente neste espaço) para que o quadro possa prosseguir para a célula de embalagem;

- modo manual: quando a célula se encontra parada, o transportador de saída realiza a interface de quadros, colocados externamente pelo operador, para o interior da célula de embalagem. A prossecução dos quadros é realizada quando o operador pressiona um botão (existente neste espaço) para que o quadro possa prosseguir para a célula de embalagem.

O transportador de saída (ver Figura 5.17) é composto por dois sensores fotoelétricos por barreira. Cada sensor irá permitir detetar a entrada (A) e saída (B) de quadros no transportador.



- A: sensor fotoelétrico por barreira de entrada (sensor 7);
- B: sensor fotoelétrico por barreira de saída (sensor 4).

Figura 5.17: Transportador de saída.

Os sinais referentes ao transportador de saída e que permitem efetuar o controlo do mesmo pode ser encontrados no Anexo A.6.

#### 5.4.7 Manipulador robótico

A nível de robótica, a empresa fornecedora escolhida pela RobotSol foi a KUKA. Perante os diversos robôs industriais da KUKA, os robôs escolhidos, em 2015, foram dois KR 16-2. A seleção destes robôs industriais de seis eixos foi efetuada tendo em conta a massa dos atuadores finais e do produto a transportar, bem como as características inerentes ao robô. Os controladores associados a estes robôs são os KR C4.

Os robôs escolhidos encontram-se na gama dos robôs de 5 kg a 16 kg da KUKA, sendo os escolhidos de 16 kg de capacidade de carga [59]. Relativamente ao espaço de trabalho, o manipulador mecânico possui um alcance de 1611 mm.

Este robô possui o alcance e capacidade de carga suficiente para o objetivo pretendido.

#### 5.4.8 Atuadores finais

Cada robô possui um atuador final dedicado para a função que irá desempenhar. Assim, os robôs R1 e R2 possuem um *gripper* com características bastante próprias que lhes permitem pegar, manipular e transportar objetos para diversos pontos.

Através da Figura 5.18 é possível visualizar o diagrama de cargas do robô KR 16-2. Nos eixos do gráfico ilustra-se a distância à flange segundo Z ( $Lz$ ) e XY ( $Lxy$ ). Consoante o afastamento à flange do centro de massa, menor é a capacidade de carga.

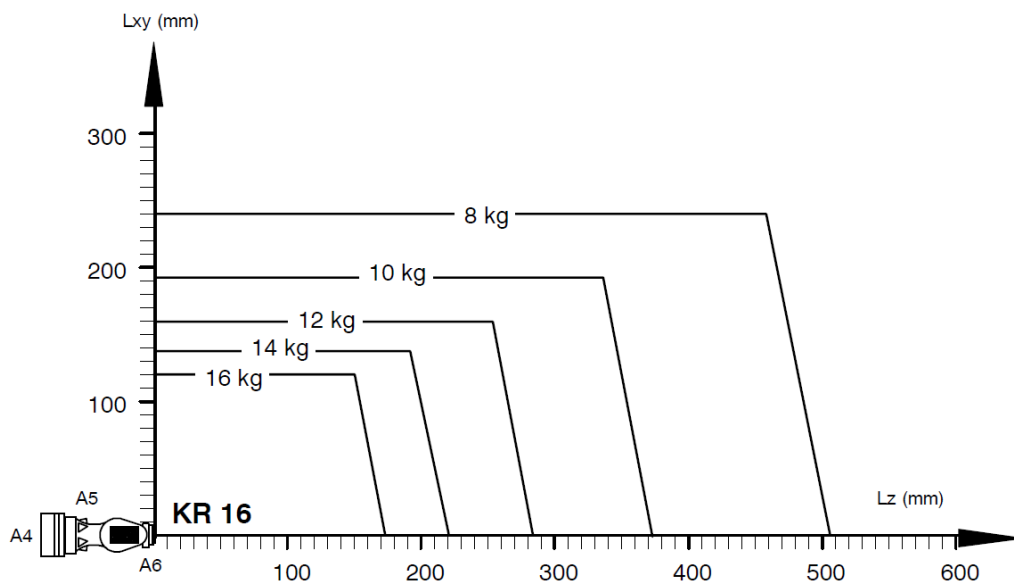


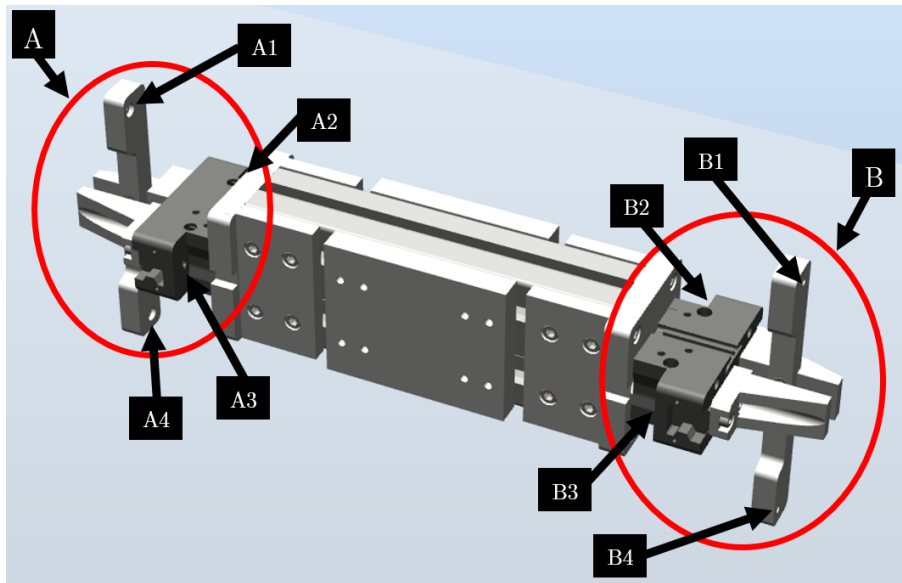
Figura 5.18: Diagrama de cargas [59].

Este diagrama é de especial importância para o desenvolvimento dos *grippers*. Assim, torna-se necessário efetuar o estudo relativo da carga. Para isso, a KUKA possui o *software* KUKA Load dedicado para esta função.

##### 5.4.8.1 Atuador final do robô R1

Na Figura 5.19 é possível observar o *gripper* do robô R1. Este será capaz de transportar duas peças de cada vez, pelo que possui duas garras de atuação pneumática. Cada uma possui sensores que permitem determinar o estado da garra - aberta ou fechada.

O *gripper* possui um perfil metálico com dois sensores indutivos que permitem determinar a correta orientação das peças metálicas A e B. Os sinais referentes ao *gripper* e que permitem efetuar o controlo do mesmo podem ser encontrados no Anexo A.7. Estes sinais encontram-se ligados a módulos da Beckhoff, dos quais fazem parte uma cabeceira de DeviceNet, um módulo de entradas digitais e um módulo de saídas digitais.



- A e B: garras para manipulação das peças A e C, e B e D, respetivamente;
- A1 e B1, e A4 e B4: sensores indutivos de deteção das peças B e A, respetivamente;
- A2 e B2, e A3 e B3: sensores indutivos de deteção de pinça aberta e fechada, respetivamente.

Figura 5.19: Atuador final do robô R1.

O *gripper* desenvolvido pela RobotSol possui as características que se apresentam na Tabela 5.1. Da tabela é possível concluir que, no pior caso, o *gripper* com duas peças totalizará cerca de 4,830 kg.

Tabela 5.1: Parâmetros relativos ao *gripper* do robô R1.

Especificação	Características
Massa do <i>Gripper</i>	4,330 kg
Massa de duas peças	0,500 kg
Centro de massa (com carga)	$X = 0,014 \text{ mm}$ , $Y = 0,000 \text{ mm}$ , $Z = 41,703 \text{ mm}$
TCP <i>gripper A</i>	$X = 200,000 \text{ mm}$ , $Y = 0,000 \text{ mm}$ e $Z = 42,500 \text{ mm}$ $A = 180,000^\circ$ , $B = -90,000^\circ$ e $C = 0,000^\circ$
TCP <i>gripper B</i>	$X = -200,000 \text{ mm}$ , $Y = 0,000 \text{ mm}$ e $Z = 42,500 \text{ mm}$ $A = 0,000^\circ$ , $B = -90,000^\circ$ e $C = 0,000^\circ$

- A, B e C: rotação em torno do eixo Z, Y e X, respetivamente.

Analisando a relação do centro de massa e da massa do gripper com carga, validou-se através da Figura 5.18 e do *software* Kuka Load 5.0 o *gripper* para o robô R1. O *gripper* encontra-se dentro dos limites de massa para o centro de massa.

Dado que o *gripper* possui duas garras, então podem ser definidas duas ferramentas de trabalho, ou seja, dois Tool Center Point (TCP) de acordo com a Figura 5.20. Os TCP são referenciados à flange do robô; assim, as cotas necessárias para a definição do TCP encontram-se referenciadas de igual modo.

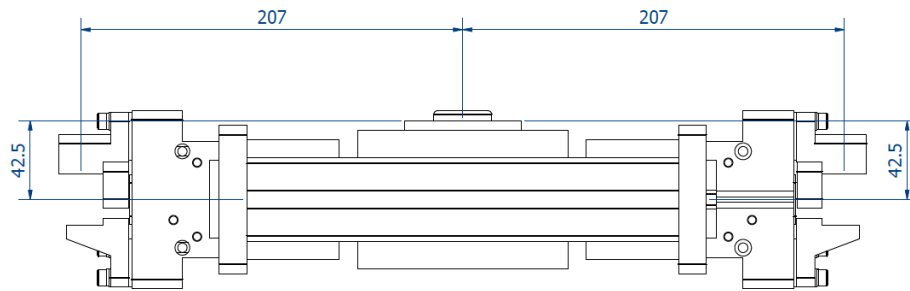
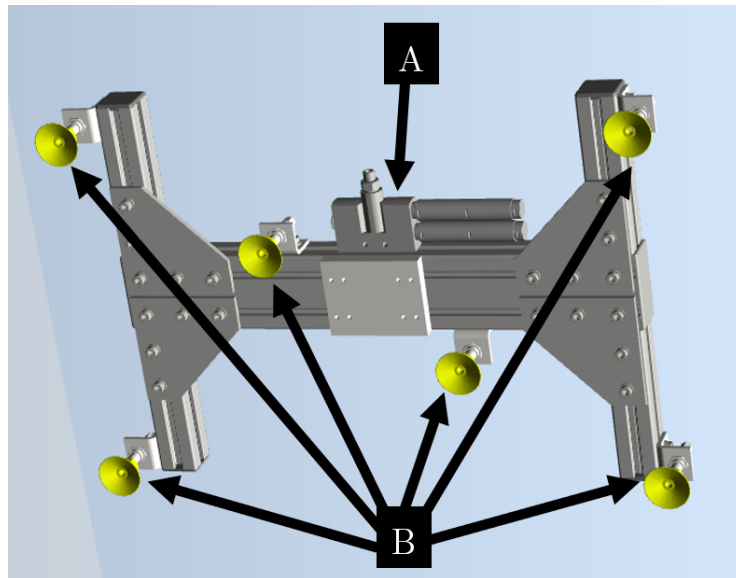


Figura 5.20: Desenho técnico do atuador final do robô R1.

#### 5.4.8.2 Atuador final do robô R2

Na Figura 5.21 é possível observar o *gripper* do robô R2. Este será capaz de transportar um plano ou um quadro (montado) de cada vez. O processo ocorrerá através de vácuo, criado pelo gerador de vácuo (A), que será aplicado na superfície do plano através das ventosas (B). O *gripper* possui um sensor de vácuo que permitirá saber a presença de vácuo aplicada no plano.



- A: gerador de vácuo;
- B: ventosas.

Figura 5.21: Atuador final do robô R2.

O *gripper* desenvolvido pela RobotSol possui as características que se apresentam na Tabela 5.2. Da tabela é possível concluir que, no pior caso, o *gripper* com quadro montado totalizará cerca de 12,200 kg.

Analisando a relação do centro de massa e da massa do gripper com carga, validou-se através da Figura 5.18 e do *software* Kuka Load 5.0 o *gripper* para o robô R2. O *gripper*

Tabela 5.2: Parâmetros relativos ao *gripper* do robô R2.

Especificação	Características
Massa do <i>Gripper</i>	5,200 kg
Massa de quatro peças	1,000 kg
Massa do plano	6,000 kg
Centro de massa (com carga)	$X = 1,476$ mm, $Y = 0,438$ mm, $Z = 90,889$ mm
TCP <i>gripper A</i>	$X = 0,000$ mm, $Y = 0,000$ mm e $Z = 124,000$ mm $A = 0,000^\circ$ , $B = 0,000^\circ$ e $C = 0,000^\circ$

-  $A$ ,  $B$  e  $C$ : rotação em torno do eixo  $Z$ ,  $Y$  e  $X$ , respectivamente.

encontra-se dentro dos limites da massa para o centro de massa.

Os sinais referentes ao *gripper* e que permitem efetuar o controlo do mesmo podem ser encontrados no Anexo A.8. Estes sinais encontram-se ligados a módulos da Beckhoff, dos quais fazem parte uma cabeceira de DeviceNet, um módulo de entradas digitais e um módulo de saídas digitais.

Dado que o *gripper* possui uma única ferramenta de trabalho, então pode ser definido um Tool Center Point (TCP) de acordo com a Figura 5.22. O TCP é referenciado à flange do robô, assim, as cotas necessárias para a definição do TCP encontram-se referenciadas de igual modo.

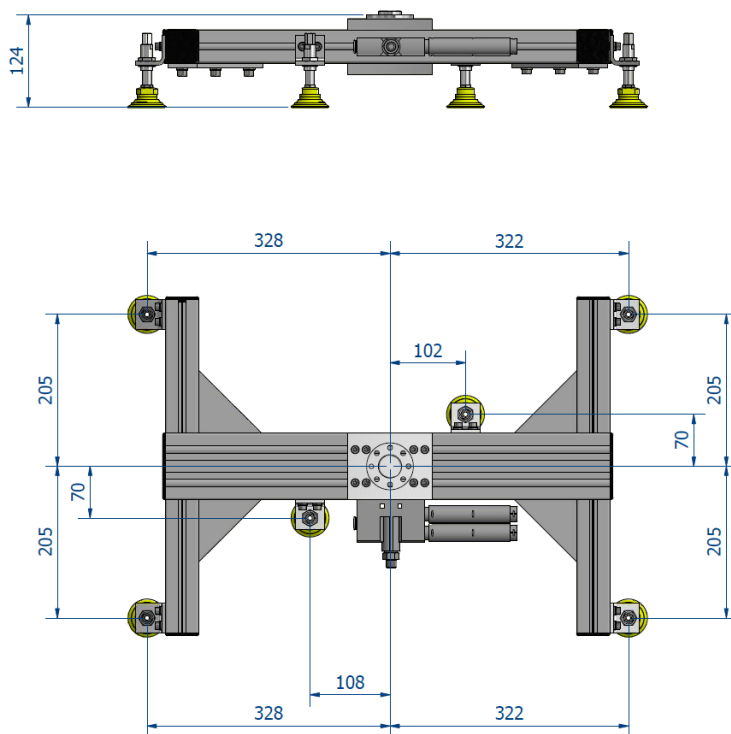


Figura 5.22: Desenho técnico do atuador final do robô R2.

### 5.4.9 Pedestais

Este componente já se encontrava definido, pela RobotSol, desde 2015. O pedestal que se encontra representado na Figura 5.23 encontra-se presente nos robôs R1 e R2 e possui uma altura de 500 mm.

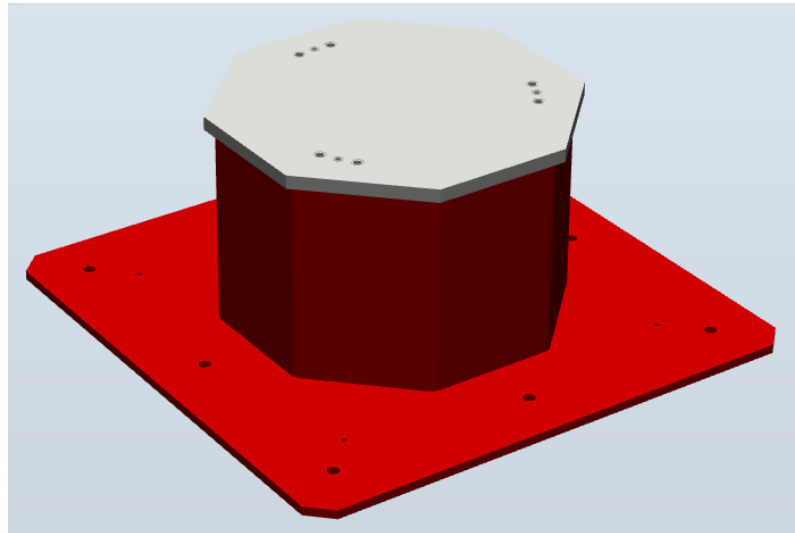


Figura 5.23: Pedestal dos robôs R1 e R2.

Este possui como função elevar os robôs, dado que estes não conseguiriam realizar as trajetórias necessárias à altura do solo. Assim, o pedestal possui uma altura que permite aos manipuladores com os atuadores finais alcançar todos os pontos necessários.

### 5.4.10 Segurança

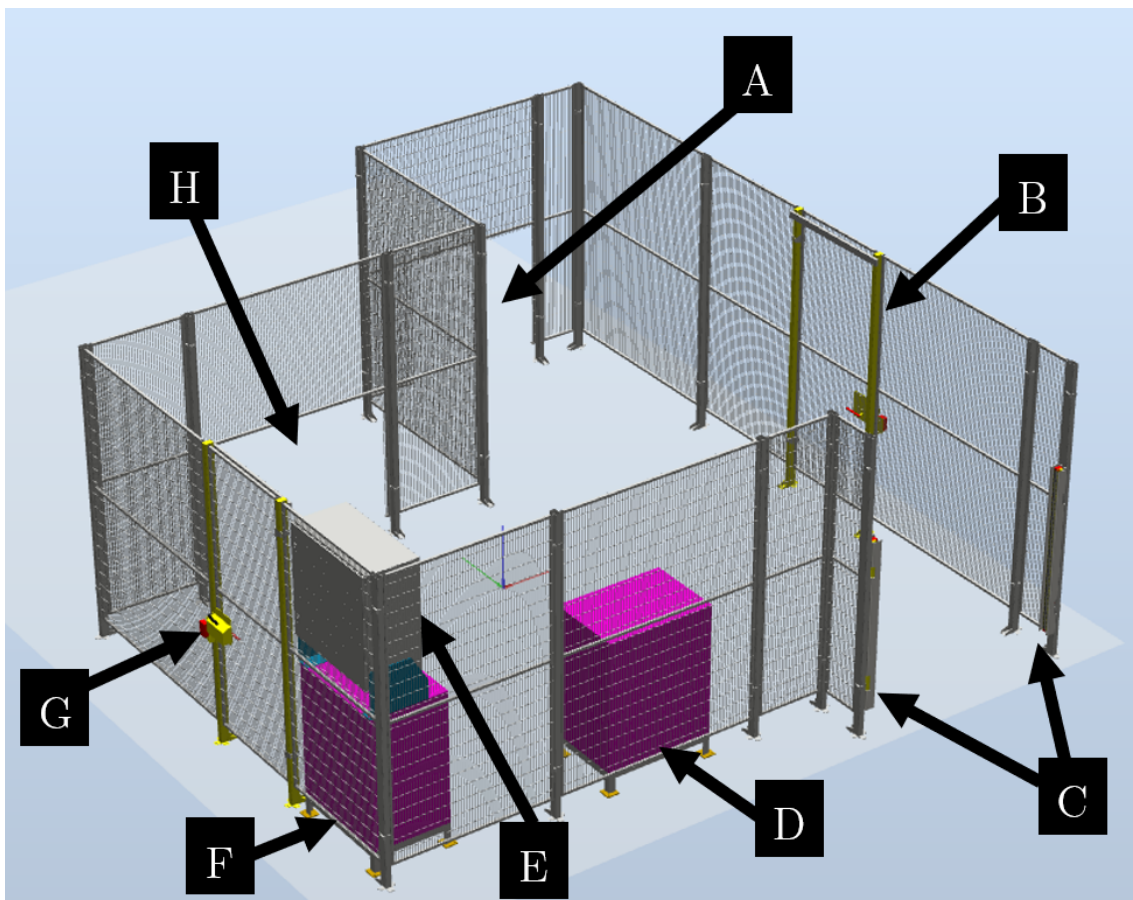
As vedações de segurança limitam a zona de perigo. Na Figura 5.24 é possível visualizar as vedações de segurança e outros constituintes deste projeto.

As vedações podem surgir sobre a forma de redes de segurança, as quais limitam fisicamente a entrada num determinado espaço. Por outro lado, existem as portas com sistema de proteção segura (B e G) que permitem a entrada na célula de forma controlada. Outra medida de segurança aplicada são as barreiras de segurança (C), contudo esta abertura destina-se a entrar na célula de forma controlada, mas com a finalidade de abastecer o armazém de planos.

Intrínseco à vedação de segurança encontram-se aberturas para acesso aos controladores dos robôs (D e G), quadro elétrico (E) e entradas e saídas de componentes pelos transportadores (A e H).

#### Portas de segurança

As portas são bloqueadas através de PSENsgates da PILZ - PSEN sg2c-3LPE. Este sistema permite saber se as portas se encontram bloqueadas, efetuar pedidos de acesso e



- A e H: abertura para o transportador de saída e de entrada, respetivamente;
- B e G: portas com sistema de proteção segura (PSENsgate);
- C: entrada para a zona do armazém, com barreiras de segurança;
- D e F: controladores dos robôs R2 e R1, respetivamente;
- E: quadro elétrico.

Figura 5.24: Vedações de segurança e outros constituintes da célula.

destrancar a porta (botão azul), trancar a porta (botão branco) e ainda espoletar uma emergência, através das botoneiras de emergência.

### Barreiras de segurança

No início deste projeto, todas as vedações de segurança encontravam-se definidas, contudo faltava definir a distância de segurança das barreiras de segurança do armazém (S). As barreiras de segurança definidas para este projeto são as F3S-TGR-CL4B-035-1200, possuindo as seguintes características: capacidade de deteção (d) 35 mm; tempo de atuação da proteção segura ( $t_1$ ) de 0,029 s.

Para o cálculo da distância de segurança e definição da distância para a colocação das barreiras importa saber o tempo de paragem do robô, dado que este representará o perigo nesta zona. Os tempos de paragem do robô ( $t_2$ ) KR 16-2 podem ser observados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3: Tempos de paragem dos eixos 1 a 3 do robô KR 16-2.

Eixos	Tempos de paragem
1	0,353 s
2	0,330 s
3	0,214 s

Assim, pode assumir-se como pior caso de tempo de paragem do robô o valor correspondente ao eixo 1, ou seja, 0,353 s.

De acordo com [50] e as características apresentadas anteriormente, obteve-se o resultado de 932 mm (ver Equação 5.1) para a colocação das barreiras de segurança da zona de perigo, sendo esta a zona do *gripper* mais perto da entrada do armazém.

$$\begin{aligned}
 S &= 2000 * (t_1 + t_2) + 8 * (d - 14) \\
 S &= 2000 * (0,029 + 0,353) + 8 * (35 - 14) \\
 S &= 2000 * 0,382 + 8 * 21 \\
 S &= 764 + 168 \\
 S &= 932
 \end{aligned} \tag{5.1}$$

A norma [50] define que se  $S > 500$  mm, então, o cálculo deve ser feito segundo a Equação 5.2, obtendo-se uma distância para a barreira de segurança de 779,2 mm.

$$\begin{aligned}
 S &= (1600 * (0,029 + 0,353)) + 8 * (35 - 14) \\
 S &= 1600 * 0,382 + 8 * 21 \\
 S &= 611,2 + 168 \\
 S &= 779,2
 \end{aligned} \tag{5.2}$$

Após a obtenção deste resultado, a informação foi passada ao departamento de projeto mecânico da RobotSol, para atualização das redes de segurança neste local.

### Botoneiras de emergência

De modo a permitir ao operador parar o sistema em caso de emergência, a célula dispõe de um conjunto de botoneiras de emergência localizadas no seu exterior: no transportador de entrada e de saída, nas portas, na entrada para o armazém e no quadro elétrico. Este sistema carece de rearme da célula.

### Definição do sistema de segurança

O sistema de segurança desta célula pode ser dividido nas emergências, segurança de portas e barreira do armazém, e segurança da barreira do transportador de entrada.

Quando uma emergência é espoletada, os robôs e variadores de frequência efetuam paragens de emergência e o sistema de ar comprimido das mesas é despressurizado. Para o sistema sair do modo de emergência nenhuma botoneira de emergência pode estar premida e é necessário realizar o rearme do relé de segurança no quadro elétrico.

A segurança de portas e barreira do armazém espoleta a paragem dos robôs. No caso de segurança de portas deve trancar-se a porta. Por outro lado, na barreira de segurança é necessário realizar o rearme da barreira de forma manual, sendo este realizado por um botão presente junto à barreira (também existe um botão de pedido de acesso). O rearme do relé de segurança é realizado de forma automática.

As barreiras de segurança do transportador de entrada permitem parar o transportador, quando o operador se encontra a abastecer o transportador com as peças, ou seja, quando o operador se encontra a obstruir as barreiras de segurança. As barreiras e relé de segurança possuem rearme automático.

Em resumo, a gestão das seguranças é realizada através de quatro relés de segurança (ver Tabela 5.4) da OMRON (três relés G9SE-401 e um G9SE-201) sendo que estes possuem uma saída auxiliar que permite saber quando o relé se encontra em segurança.

Tabela 5.4: Aplicação dos relés de segurança.

Tipo de segurança	Relés	Paragens
Emergência	1	Paragem dos robôs
	2	Paragem dos transportadores
Segurança de portas	3	Paragem dos robôs
Segurança no transportador de entrada	4	Paragem do transportador

No quadro elétrico encontra-se a distribuição elétrica da célula e o controlo (PLC) de acordo com o esquema elétrico. O PLC selecionado para este projeto é o CJ2M-CPU32 com duas cartas de entradas, duas cartas de saídas e uma carta de comunicação DevicNet, DRM21. Existe ainda no quadro elétrico a HMI.

O PLC possui todo o controlo da célula, pelo que os robôs só executam as tarefas se existirem condições para tal. Assim, os robôs funcionam como escravos do PLC.

Os sinais referentes a esta secção podem ser encontrados no Anexo A.9.

#### 5.4.11 Modos de funcionamento

O controlo da célula deverá estar de acordo com o *standard* existente na RobotSol. Assim, perante determinadas condições de trabalho deverão ser executados processos de acordo com o pretendido pelo operador e exibidos determinados estados luminosos. Estes estados encontram-se na Tabela 5.5.

Tabela 5.5: Estados luminosos para a interface HMI.

Estado	Tipo	Verde	Vermelho	Azul	Amarelo
Emergência		–	1 Hz	–	<i>On</i>
Segurança do operador		–	1 Hz	<i>On</i>	–
Acesso	1	–	–	<i>On</i>	<i>On</i>
	2	–	–	1 Hz	–
Funcionamento		<i>On</i>	–	–	–
Parado		–	<i>On</i>	–	–
Paragem		1 Hz	–	–	–
Erro		–	5 Hz	–	–

Da tabela anterior é possível depreender que existem sete estados possíveis na qual se pode encontrar a célula, sendo eles:

- emergência: o sistema encontra-se parado devido a uma emergência provocada pelas botoneiras de emergência;
- segurança do operador: o sistema encontra-se em segurança do operador devido à passagem de, por exemplo, uma barreira de segurança;
- acesso:
  - 1: o sistema encontra-se parado devido a um pedido de acesso;
  - 2: o sistema encontra-se em movimentação para “repouso”, para permitir a entrada do operador;
- funcionamento: o sistema encontra-se a executar o ciclo de trabalho;
- parado: o sistema encontra-se parado e à espera de ordem de novo ciclo;
- arranque/paragem: o sistema encontra-se a executar uma ordem de arranque ou de paragem de ciclo de trabalho;
- erro: o sistema encontra-se parado e em erro de ciclo de trabalho.

Esta interface permite a visualização rápida, ao operador, do estado em que se encontra a célula de fabrico.

## 5.5 Sumário de capítulo

Em suma, neste capítulo foi apresentada uma descrição do problema e os requisitos apresentados pelo cliente à RobotSol. Dado que o projeto advém de 2015, ao longo do tempo foram tecidas conclusões relativamente ao projeto, as quais culminaram em requisitos impostos pela RobotSol para o desenvolvimento deste trabalho, tais como, equipamentos mecânicos já definidos.

De seguida apresentou-se de forma simplificada o diagrama de blocos correspondente a este projeto, onde se abordou os equipamentos principais da célula e as comunicações entre os equipamentos.

Foi ainda apresentado o processo do sistema. Aqui foi abordado em que consiste o produto do cliente e de que modo o mesmo é montado e fixo. Assim, a célula executa o mesmo processo, contudo de forma automática e com recurso a dois robôs KUKA de seis eixos, cilindros pneumáticos e de aparafusadoras que se encontram distribuídas em vários equipamentos mecânicos.

Foi apresentada a constituição da célula, na qual se abordou com algum detalhe cada constituinte mecânico desta célula e a função que o mesmo irá desempenhar no decorrer do processo. Foram também abordados os atuadores finais dos manipuladores robóticos, bem como a sua validação através do diagrama de cargas.

Por fim, foram abordadas algumas questões de segurança relativamente à célula de fabrico e os modos de funcionamento na qual o operador poderá encontrar a célula.

## Capítulo 6

# Implementação do trabalho

*Neste capítulo são apresentadas as trajetórias efetuadas pelos robôs entre os diversos componentes e com recurso à simulação será abordado o estudo do tempo de ciclo previsto.*

*De seguida será abordada a programação offline dos diferentes componentes: robôs e PLC. Para a abordagem da programação serão apresentados fluxogramas e realizada uma breve explicação sobre os mesmos.*

*Por fim, será apresentada a interface HMI desenvolvida para o controlo e visualização dos estados da célula e o modo como se desenrolou a implementação da célula.*

### 6.1 Trajetórias efetuadas pelos robôs

Tendo os componentes definidos para a célula, torna-se possível desenvolver as trajetórias dos robôs. Para isso, com recurso ao KUKA Sim Layout 2.2 idealizaram-se os movimentos a efetuar pelo robô, bem como um estudo de tempos de ciclo.

#### 6.1.1 Tipos de movimentos

A linguagem de programação nos robôs KUKA é a KUKA Robot Language (KRL). O KRL possui dois tipos de instruções de relevo, nas quais podem ser definidas todas as trajetórias: Point to Point (PTP) e Linear Point (LIN).

Com a instrução PTP o robô guia o TCP ao longo do caminho mais rápido até ao ponto final. Contudo, o caminho mais rápido pode não ser o caminho mais curto e, portanto, pode não ser uma linha reta. Como os eixos dos robôs são rotativos, os caminhos curvos podem ser executados mais rapidamente que os caminhos lineares. Neste tipo de movimento, o caminho não é previsível.

Com a instrução LIN o robô guia o TCP a uma velocidade definida ao longo de um caminho reto até ao ponto final.

Os tipos de movimentos apresentados possuem parâmetros específicos para o desenvolver do movimento, tais como: velocidade, aceleração, aproximação, ferramenta e base de trabalho.

### 6.1.2 Layout 2D da célula

Tendo todos os componentes definidos, torna-se possível constituir o *layout* da célula (ver Figura 6.1) e realizar a análise dos movimentos a desempenhar pelos robôs.

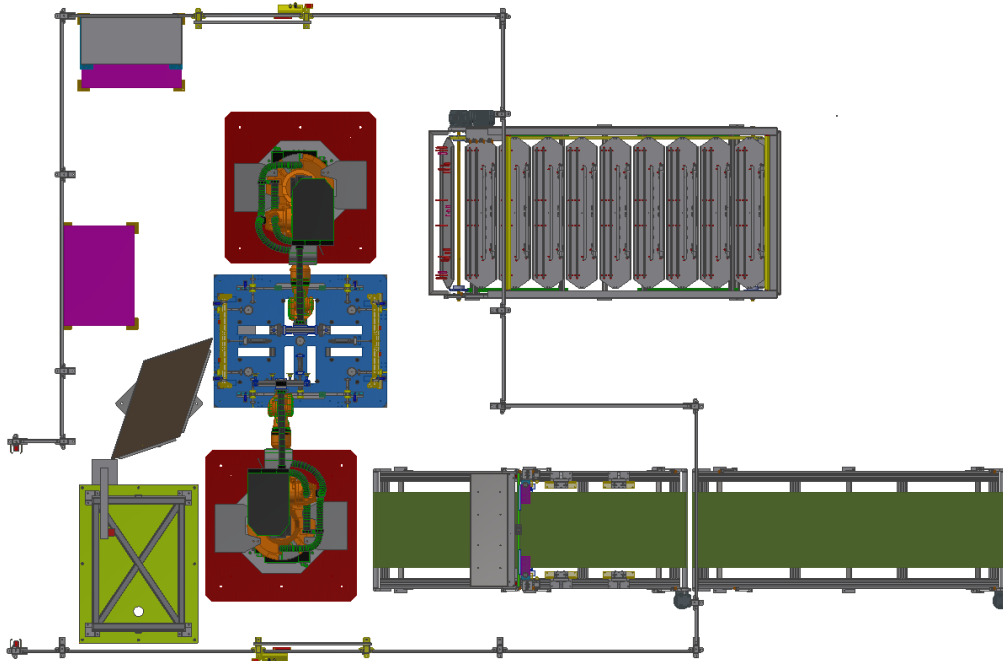


Figura 6.1: *Layout* 2D da célula.

### 6.1.3 Simulação do funcionamento da célula

Dado que esta célula possui dois robôs, será necessário desenvolver *software* para o controlador de cada robô. Estes nunca devem conseguir estar na mesma área de trabalho (mesa de montagem), caso contrário poderá ocorrer o risco de existir uma colisão entre ambos. Assim, o processo a desempenhar por estes robôs estará de acordo com a Figura 5.4 apresentada anteriormente.

Na definição das trajetórias existem pontos importantes a ter em consideração e que influenciam diretamente o tempo de ciclo do processo. Assim, é necessário ter-se em atenção as singularidades e suavidades de movimentos.

#### 6.1.3.1 Robô R1

Como visto anteriormente, este robô deverá efetuar a movimentação e/ou orientação de peças do transportador de entrada para a mesa de montagem. Este processo será efetuado duas vezes (correspondendo a um ciclo de trabalho do robô): uma vez para as peças A e B e uma vez para as peças C e D.

Para este robô foram definidas duas bases de trabalho: uma para o transportador de entrada e outra para a mesa de montagem. É boa prática o uso de bases para a definição

dos pontos. Assim, os pontos encontram-se associados à base em questão e uma alteração no posicionamento de um componente irá corresponder a uma alteração da base de igual forma. Deste modo apenas se modifica a base e não todos os pontos referentes à base.

### Transportador de entrada para a mesa de montagem

No transportador de entrada, o robô R1 possui um ponto de entrada único (ver Figura 6.2a), e espera, por ordem do PLC para poder entrar. Neste ponto ele encontra-se por cima do tabuleiro e irá realizar o *pick* das peças.

Tendo as condições para realizar *pick*, o robô efetua o *pick* da peça A (ver Figura 6.2b), efetua um movimento ascendente em *Z* (ver Figura 6.2c), roda o eixo seis em  $180^\circ$  e efetua o *pick* da peça B.

Após a realização do *pick* das peças, o robô movimenta-se em direção à mesa de montagem (ver Figura 6.2d), e espera, ainda fora da mesa, por ordem do PLC para poder entrar neste espaço. Deste modo, previne-se o caso de ocorrência de colisão com o outro robô, caso ele esteja nesse espaço.

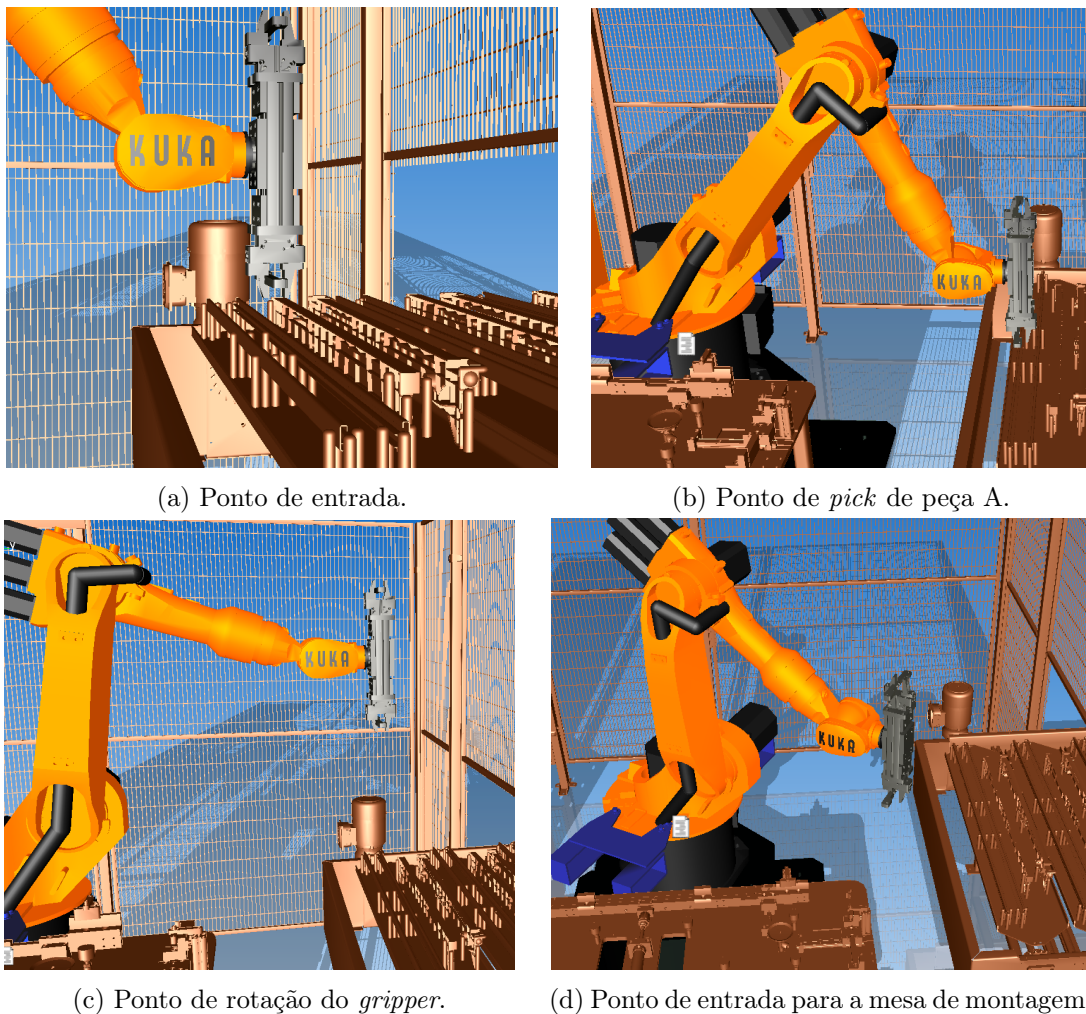


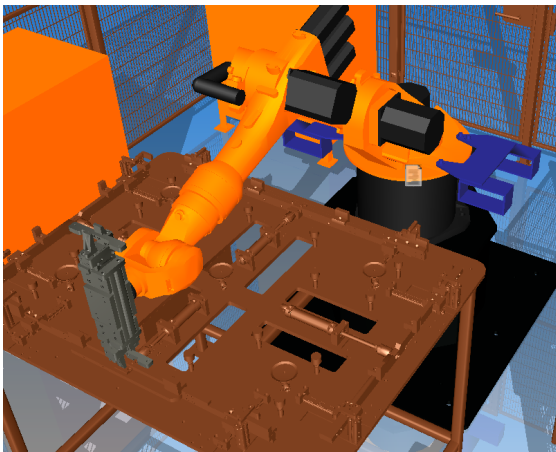
Figura 6.2: Pontos referenciados ao transportador de entrada.

As trajetórias para as peças C e D são idênticas às anteriormente apresentadas. Apenas se mudam os pontos de *pick*.

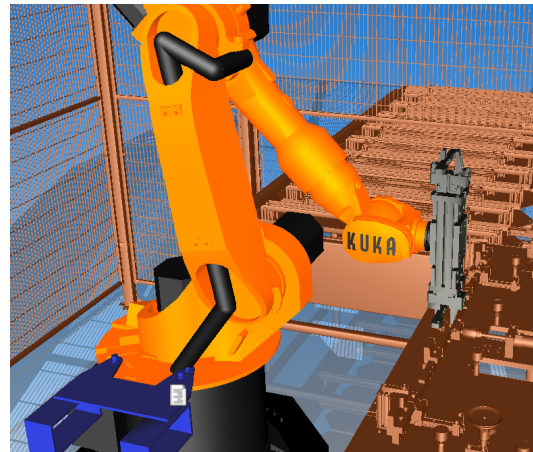
Todas as trajetórias de entrada e saída da posição de *pick* são realizadas com recurso a movimentos do tipo LIN. Os restantes movimentos são do tipo PTP.

### Mesa de montagem para o transportador de entrada

Relativamente às peças A e B, quando o PLC permite a entrada do robô nesta mesa, o robô coloca a peça B na mesa (ver Figura 6.3a), mantendo assim o *gripper* na mesma orientação que se encontrava. De seguida efetua um movimento de saída da peça, e desloca-se para cima, em Z, e para o centro da mesa. Nesse ponto, roda o eixo seis em  $-180^\circ$  (ver Figura 6.3c). A partir deste momento torna-se possível colocar a peça A (ver Figura 6.3b).



(a) Ponto de *place* da peça B.



(b) Ponto de *place* da peça A.



(c) Ponto de rotação do *gripper*.

Figura 6.3: Pontos referenciados à mesa de montagem: peças A e B.

Estando a peça A colocada, o robô desloca-se para a zona de espera de entrada do transportador de entrada, para realizar o *pick* das peças C e D. De seguida, dirige-se para a mesa de montagem e quando o PLC permite a entrada na mesa, o robô começa por colocar a peça D (ver Figura 6.4a) e de seguida a peça C (ver Figura 6.4b). Neste caso não é necessário realizar uma rotação de  $-180^\circ$  dado que as peças são colocadas com o *gripper* “de lado” enquanto as peças A e B são colocadas com o *gripper* ao alto.

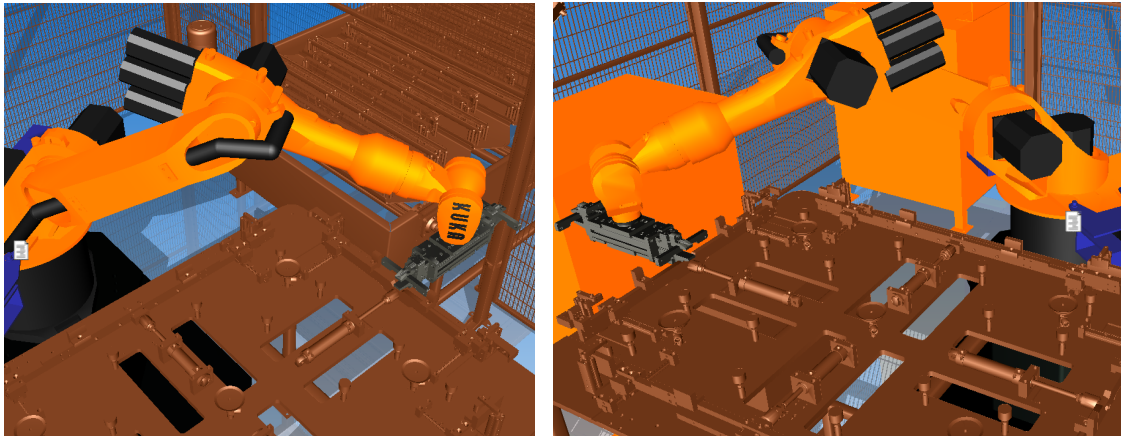
(a) Ponto de *place* da peça D.(b) Ponto de *place* da peça C.

Figura 6.4: Pontos referenciados à mesa de montagem: peças C e D.

Todos as trajetórias de entrada e saída da posição de *place* são realizadas com recurso a movimentos do tipo LIN. Os restantes movimentos são to tipo PTP.

### 6.1.3.2 Robô R2

Como visto anteriormente, este robô deverá efetuar a movimentação e/ou orientação dos planos do armazém para o centrador, deste para a mesa de montagem, e do quadro montado na mesa de montagem para a mesa de fixação.

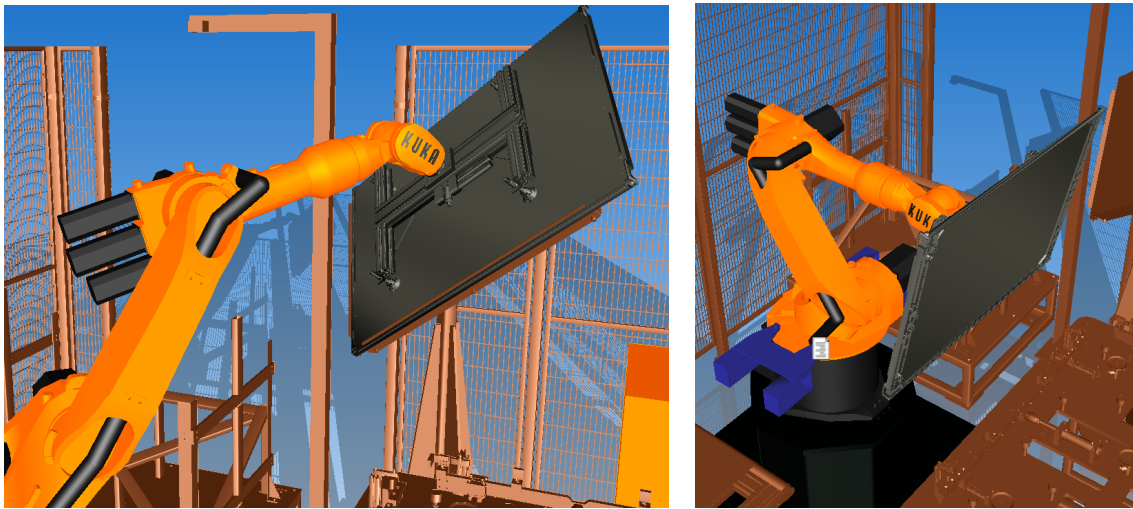
Para o robô foram definidas quatro bases de trabalho: uma para o armazém, uma para o centrador, uma para a mesa de montagem e outra para a mesa de fixação.

#### Centrador (com plano) para a mesa de montagem

Tendo o centrador um plano previamente colocado pelo robô ou operador, o robô desloca-se para este componente, para um ponto de aproximação e aguarda o *feedback* dos sensores, garantindo a presença e qualidade do plano.

Após o *feedback* positivo o robô realiza o *pick* do quadro (ver Figura 6.5a), efetua um movimento de saída e desloca-se para uma posição de entrada para a mesa de montagem (ver Figura 6.5b).

Todas as trajetórias de aproximação para efetuar o *pick* são realizadas com recurso a movimentos do tipo LIN. Os restantes movimentos são do tipo PTP.

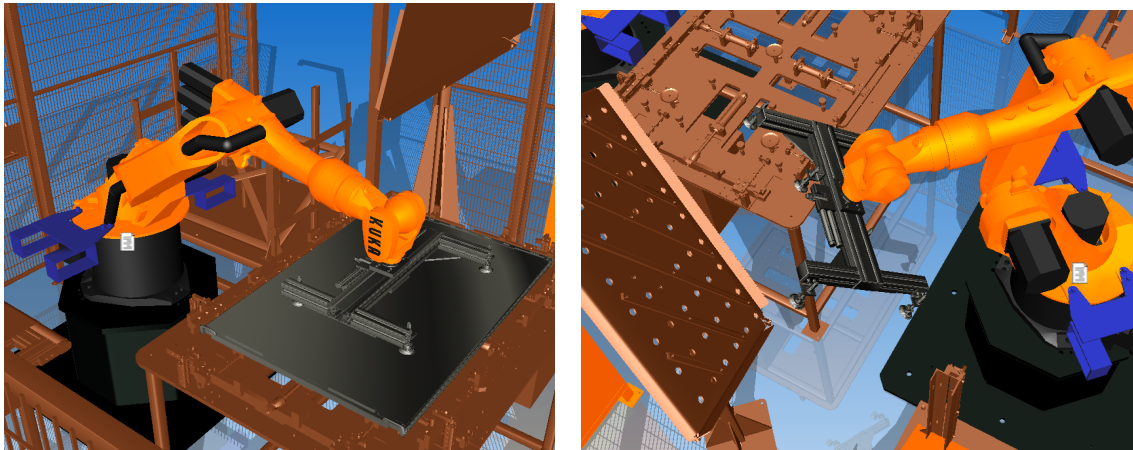
(a) Ponto de *pick* do plano.

(b) Ponto de espera.

Figura 6.5: Pontos relativos à trajetória do centrador (com plano) para a mesa de montagem.

#### Mesa de montagem para o armazém

Quando a mesa de montagem já possui as peças A e B e o PLC permite a entrada do robô R2, este efetua um movimento de aproximação para a mesa e coloca o plano (ver Figura 6.6a). Após a colocação, o robô efetua um movimento de saída da mesa, e desloca-se em direção ao armazém, realizando um movimento de desvio do centrador (ver Figura 6.6b).

(a) Ponto de *place* do plano.

(b) Ponto de desvio.

Figura 6.6: Pontos relativos à trajetória da mesa de montagem para o armazém.

Todos as trajetórias de aproximação para a realização de *place* do plano são realizadas com recurso a movimentos do tipo LIN. Os restantes movimentos são do tipo PTP.

### Armazém para o centrador

Com o robô R2 no ponto de entrada para o armazém (ver Figura 6.7a), e este com planos, o robô desloca-se para dentro do armazém para realizar o *pick* de um plano. Estando o robô com o plano, no ponto de *pick* (ver Figura 6.7b), o robô realiza um movimento de torção do plano. Este movimento garante que apenas se efetue *pick* de um plano (em testes realizados verificou-se a existência de vácuo entre planos, pelo que a solução passou por realizar este movimento). Por fim, o robô sai do armazém e desloca-se para o centrador.



(a) Ponto de entrada.

(b) Ponto de *pick* do plano.

Figura 6.7: Ponto relativo à trajetória do armazém para o centrador.

Todos as trajetórias de entrada e saída do interior do armazém são realizadas com recurso a movimentos do tipo LIN. Os restantes movimentos são do tipo PTP.

### Centrador (sem plano) para a mesa de montagem

Estando o robô R2 com o plano no *gripper*, proveniente do armazém, necessita de realizar o seu centramento. Assim, o robô efetua um movimento de aproximação do centrador e coloca o plano no mesmo (ver Figura 6.8). Este ponto é ligeiramente afastado do centrador. Quando se deixa de fazer vácuo ao plano, o mesmo irá “cair” no centrador por gravidade ficando centrado para a mesa de montagem (achando-se uma referência do plano para o *place* na mesa de montagem).

De seguida, desloca-se em direção à mesa de montagem, sem plano, para um ponto idêntico ao apresentado anteriormente, na Figura 6.5b.

Todos as trajetórias de aproximação para a realização do *place* são realizadas com recurso a movimentos do tipo LIN. Os restantes movimentos são do tipo PTP.

### Mesa de montagem para a mesa de fixação

Com o quadro já montado e com as condições necessárias para o robô R2 entrar na mesa de montagem, este efetua um movimento de entrada e realiza o *pick* do quadro (ponto

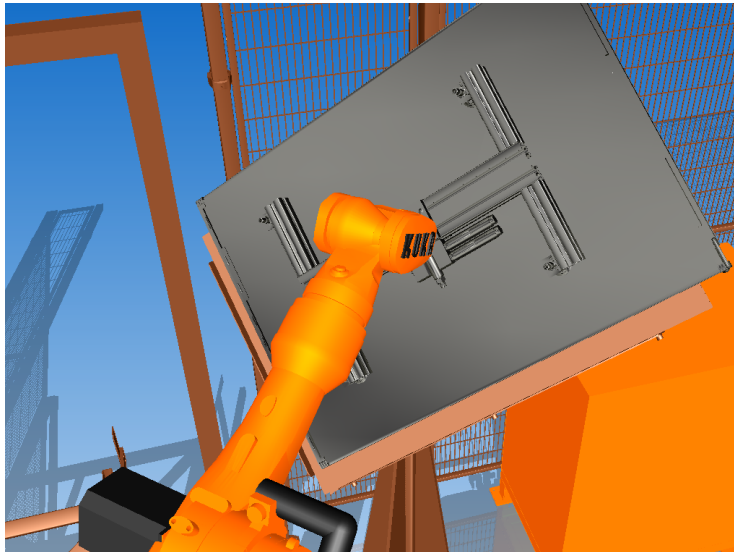


Figura 6.8: Pontos relativos à trajetória do centrador (sem plano) para a mesa de montagem - ponto de *place*.

idêntico ao apresentado anteriormente, na Figura 6.6a). De seguida, o robô realiza a saída da mesa de montagem e prossegue em direção à mesa de fixação (ver Figura 6.9).

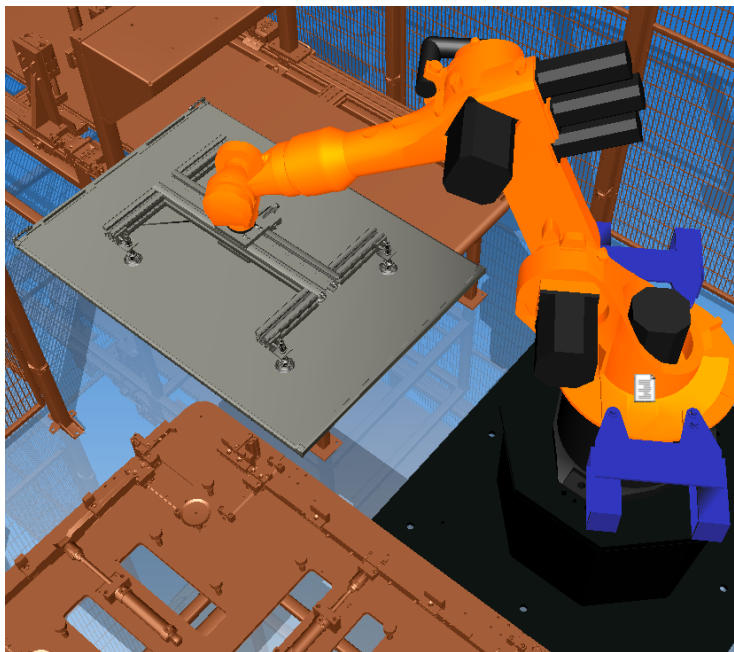


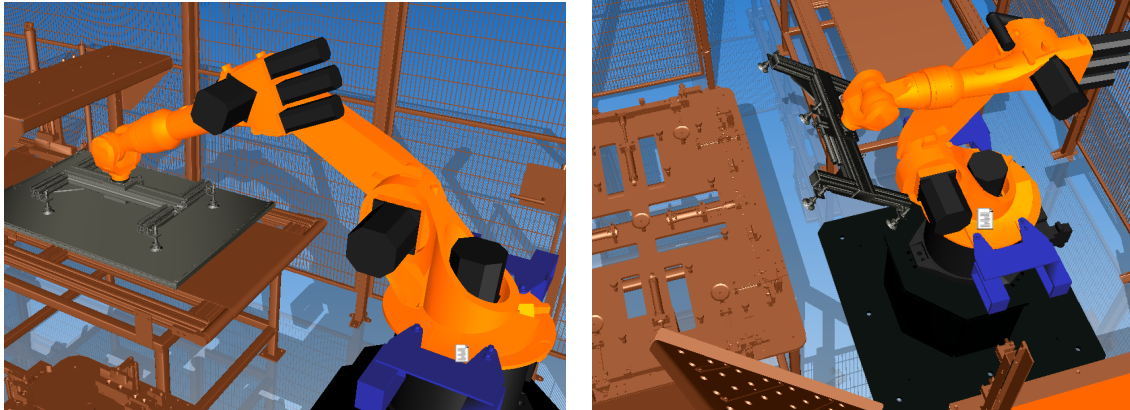
Figura 6.9: Pontos relativos à trajetória da mesa de montagem para a mesa de fixação.

Todos as trajetórias de aproximação para a realização de *pick* do planos são realizadas com recurso a movimentos do tipo LIN. Os restantes movimentos são do tipo PTP.

### Mesa de fixação para o centrador

Estando a mesa de fixação livre, o robô R2 efetua um movimento de entrada e coloca o quadro (ver Figura 6.10a).

Após a colocação do quadro, o robô desloca-se em direção ao centrador. Nesta deslocação o robô evita a passagem pelo espaço da mesa de montagem, dado que o robô R1 se encontra a colocar as peças *A* e *B*, evitando assim possíveis colisões (ver Figura 6.10b).



(a) Ponto de *place* do quadro.

(b) Ponto de desvio da mesa de montagem.

Figura 6.10: Pontos relativos às trajetórias da mesa de fixação para o centrador.

Todos as trajetórias de aproximação para a realização de *place* do quadro são realizadas com recurso a movimentos do tipo LIN. Os restantes movimentos são do tipo PTP.

#### 6.1.4 Estudo do tempo de ciclo

Através da simulação das trajetórias, apresentadas na Subsecção 6.1.3 e realizadas através do *software* KUKA Sim Layout 2.2, torna-se possível efetuar um estudo do tempo de ciclo da célula.

Na Tabela 6.1 apresentam-se os diferentes processos que interferem no tempo de ciclo. Cada processo possui uma identificação e, para cada um deles, foi estimado um tempo e efetuada uma correção ao tempo estimado (adicionado um erro de 30 % ao tempo estimado, baseado na experiência da empresa para este tipo de análises) para o tempo de ciclo, dando uma margem de erro.

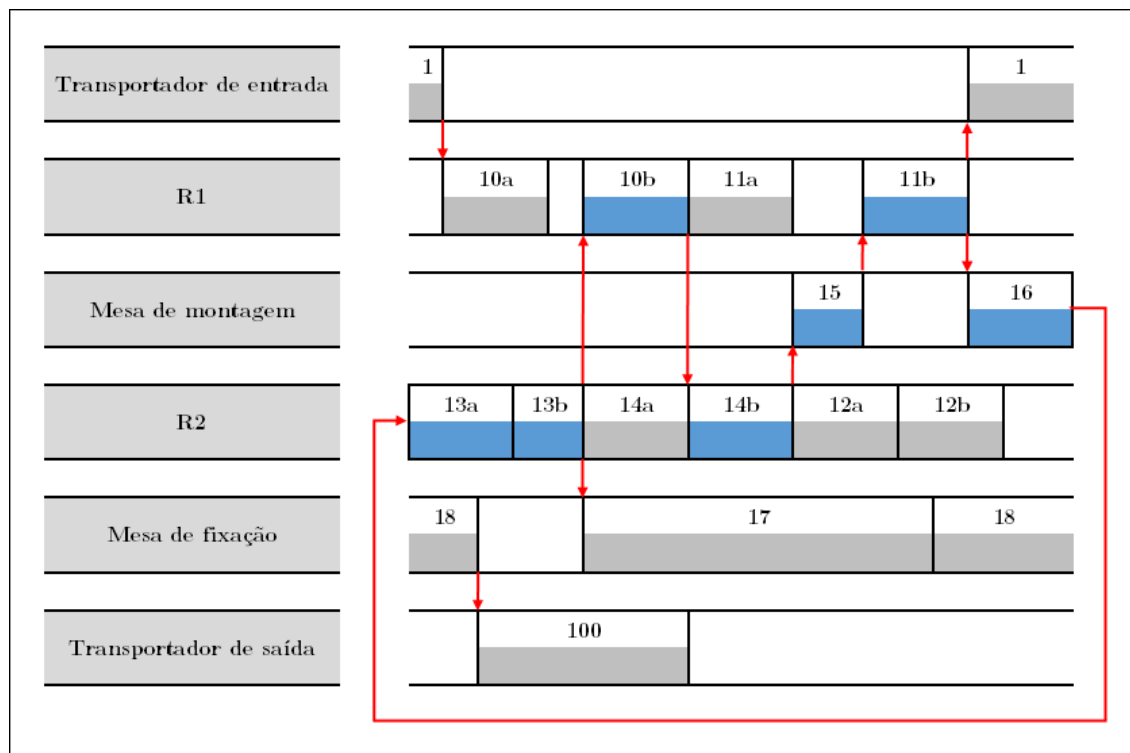
Tendo sido definida uma identificação relativamente aos tempos estimados e ao processo da célula (abordado na Secção 5.3) torna-se possível determinar o caminho crítico do processo da célula, as dependências da célula e o tempo de ciclo estimado.

Na Figura 6.11 é possível visualizar o processo da célula (quando em ciclo normal de funcionamento), bem como as tarefas realizadas em simultâneo, e deprender o caminho crítico e dependências de tarefas.

Tabela 6.1: Estimativa de tempo associado a cada processo.

Identificação		Processo	Tempo estimado (s)	Tempo estimado 30% (s)
TE	1	Entrada de peças	4	5,2
R1	10a	<i>Pick</i> de peças A e B (TE)	3	3,9
	10b	<i>Place</i> de peças A e B (MM)	3	3,9
	11a	<i>Pick</i> de peças C e D (TE)	3	3,9
	11b	<i>Place</i> de peças C e D (MM)	3	3,9
R2	12a	<i>Pick</i> do plano (armazém)	3	3,9
	12b	<i>Place</i> do plano (centrador)	3	3,9
	13a	<i>Pick</i> do quadro (MM)	3	3,9
	13b	<i>Place</i> do quadro (MF)	2	2,6
	14a	<i>Pick</i> do plano (centrador)	3	3,9
	14b	<i>Place</i> do plano (MM)	3	3,9
MM	15	Montagem das peças A e B ao plano	2	2,6
	16	Montagem das peças C e D ao plano	3	3,9
MF	17	Aparafusamento	10	13
	18	Amolgamento	6	7,8
TS	100	Saída do quadro	6	7,8

- TE, MM, MF e TS: transportador de entrada, mesa de montagem, mesa de fixação, e transportador de saída, respetivamente.



- cinzento: indicação de tempo de processamento;
- azul: indicação de tempo de processamento e de caminho crítico;
- vermelho: dependências de tarefas.

Figura 6.11: Tempo de ciclo simulado.

Através deste estudo consegue-se depreender onde atuar para reduzir o tempo de ciclo. O tempo de ciclo será ditado pelo conjunto de tempo estimado das tarefas que se encontram no caminho crítico, sendo estas: 13a, 13b, 10b, 14b, 15, 11b e 16. O resultado do tempo estimado do caminho crítico é de 19 s e com fator de erro de 30 % de 24,7 s, resultando em 3,2 quadros/min e 2,4 quadros/min, respetivamente.

Comparando o resultado do tempo estimado (2,4 quadros/min a 3,2 quadros/min) com o pretendido pelo cliente (2,0 quadros/min a 2,5 quadros/min), depreende-se que se estará de encontro com o requisito, sendo possível produzir mais quadros que o pressuposto.

## 6.2 Programação dos diferentes componentes

Tendo sido realizada a validação das trajetórias dos robôs, e assim a validação do *layout* e do tempo de ciclo pretendido, procede-se a programação *offline* da rede de comunicação, dos robôs R1 e R2, e do PLC. Para a realização da programação dos robôs foi utilizado o *software* WorkVisual 5.0, do PLC o CX-Programmer e da rede comunicação o CX-Integrator.

### 6.2.1 Rede de comunicação

A definição da rede de comunicação começa com a realização de *backups* de cada controlador para se efetuar a configuração e programação nos ficheiros específicos de cada um (controlador dos robôs R1 e R2).

Com os ficheiros de cada controlador efetuou-se a configuração dos diferentes módulos de DeviceNet e cartas físicas de entradas e saídas. Estando esta configuração realizada, criou-se a rede de DeviceNet, através do CX-Integrator, permitindo realizar a comunicação entre os diferentes módulos de comunicação.

Primeiramente foi endereçado o mapeamento das entradas e saídas dos robôs que realizam a comunicação com o PLC e das cartas digitais presentes no controlador do robô. Assim, foram definidas 1024 variáveis (512 de entradas e 512 de saída) relativamente à comunicação com o PLC e 32 variáveis (16 de entradas e 16 de saída) para as cartas físicas do controlador. A definição destas variáveis vai de encontro ao *standard* da empresa, pelo que nem todas se usam, contudo, encontram-se reservadas para possíveis trabalhos futuros.

Assim, as configurações da rede DeviceNet encontram-se de acordo com o apresentado na Tabela 6.2, sendo que os endereços dos nós fazem corresponder, respetivamente, ao módulo de comunicação: 09 - PLC; 11 - caixa de campo da mesa de montagem; 13 - controlador do robô R1; 15 - controlador do robô R2; 63 - caixa de campo da mesa de fixação.

Dado que não existia nenhum documento na empresa para realizar este tipo de configuração, e a pedido da mesma, foi realizado um documento (guia/notas) de configuração, para uso interno, da comunicação DeviceNet para robôs KUKA e para o PLC em uso. Este documento pode ser encontrado no Anexo B.

Tabela 6.2: Configuração da comunicação DeviceNet.

Módulo	Endereço do nó	Saídas		Entradas	
		Endereço inicial	Tamanho	Endereço inicial	Tamanho
DRM21	09	—	—	—	—
BK5250	11	3211	2 B	3311	11 B
EL6752	13	3212	64 B	3317	64 B
EL6752	15	3244	64 B	3349	64 B
BK5250	63	3276	2 B	3381	7 B

Todas as variáveis e respetivo mapeamento pode ser encontrado no Anexo C.

Dada a extensão dos programas desenvolvidos, do elevado número de variáveis associadas e da complexa lógica existente em cada programa, os fluxogramas apresentados nas próximas subsecções apresentam, de uma forma bastante sintetizada, a lógica de funcionamento dos programas desenvolvidos. Contudo, será possível visualizar no Anexo D os fluxogramas correspondentes aos robôs R1 e R2, de acordo com o *standard* da empresa, sendo estes mais detalhados, e no Anexo E os programas referentes ao PLC e robôs, possuindo estes toda a lógica desenvolvida.

## 6.2.2 Programação dos robôs

Com a definição das variáveis a usar no programa dos robôs e a criação da rede de comunicação, realizou-se a definição das bases e ferramentas de trabalho, sendo que algumas destas não são de introdução numérica, pelo que necessitam de ser corrigidos, na programação *online*, de forma a obter-se maior precisão.

A estruturação da lógica de programação dos robôs assenta num *standard* da empresa. A lógica do programa rege-se na troca de sinais com o PLC, pelo que o robô funciona como um escravo. Esta troca de sinais garante o sincronismo de informação e de estados do PLC e do robô. Assim, os programas foram desenvolvidos tendo em conta as seguintes ideias chave:

- os programas começam com um pedido de programa por parte do robô e terminam com a retirada do pedido de programa (*Program*, perante o *standard* da empresa);
- os robôs só entram e saem dos espaços de trabalho, dos diversos componentes, com a autorização por parte do PLC (*Area*, perante o *standard* da empresa);
- em espaços de trabalho na qual dois ou mais robôs possam possuir acesso, deve ser usado um sinal específico do *standard* (*Collision*, perante o *standard* da empresa), para evitar que os robôs entrem no mesmo espaço, ao mesmo tempo, deste modo cria-se a redundância de sinais;
- para a realização de determinadas tarefas, de determinados componentes, na qual o robô depende de um componente para a execução da sua tarefa, o robô realiza “pedidos” ao PLC para a sua execução (*Process*, perante o *standard* da empresa).

De modo geral, os dois programas dos robôs R1 e R2 possuem a mesma estrutura lógica de funcionamento. Assim, o programa é composto pelas funções principais nas quais se encontram as trajetórias e as funções auxiliares, tais como, o abrir e fechar de garras, o ligar e desligar dos geradores de vácuo e as funções de verificação de erros.

As funções de verificações de erros encontram-se associadas às atuações presentes no *gripper*, sendo que indicam se, por exemplo, o robô efetuou o *pick* de peças/plano e se perdeu alguma peça/plano durante a trajetória até efetuar o *place*.

Os programas dos controladores serão desencadeados tendo a consola do controlador no modo de automático externo e o robô na posição de *Home* pré configurada, pelo que este arrancará procedendo a uma troca de sinais com o PLC.

Foram implementadas algumas verificação de erros, sendo estes apresentados na consola HMI. Alguns erros possuem recuperações - verificação de garra aberta e fechada, de orientação da peça e de vácuo nos planos/quadros - , pelo que o operador apenas necessita de efetuar *reset* ao erro e o programa irá continuar.

Contudo, nem todos os erros possuem recuperações, como é o caso da perda de peças ou planos/quadros durante a manipulação dos objetos. Neste último caso, o operador deverá reiniciar toda a célula, inclusive os robôs, colocando-os na posição de *Home* de forma manual e voltar a colocar os robôs em modo automático externo.

O programa desenvolvido encontra-se de acordo com o apresentado anteriormente no Capítulo 5 e na secção 6.1.

### **Robô R1**

O programa do robô (ver Figura 6.12) começa por efetuar a inicialização dos valores, para uso durante o programa, e de seguida verifica se o robô se encontra na posição de *Home*; no caso de não se encontrar, o operador deverá de o colocar. Estando em *Home*, o robô possui todas as condições necessárias para realizar o seu ciclo de funcionamento.

De seguida, o programa verifica se o operador pretende entrar na célula, e no caso de pretender, este dará acesso. Posteriormente, o robô irá efetuar o pedido de programa ao PLC; que no caso de ser igual ao pretendido pelo robô, o programa irá prosseguir.

Seguidamente realiza-se um pedido de acesso à área do transportador de entrada, e quando este for permitido, será realizado o *pick* das peças A e B, respetivamente, e dará saída da área.

De seguida, o robô deverá colocar as peças A e B nas respetivas posições, pelo que começa por efetuar pedido de acesso à área de trabalho e por ativar o *bit* de colisão para o robô R2. Possuindo as condições de entrada na área de trabalho, o robô R1 desloca-se para a posição de *place* da peça B e efetua um pedido de processo ao PLC, pelo que a mesa de montagem deverá garantir a posição da peça na mesa. Após o *place* da peça B o robô efetua o mesmo processo para a peça A, efetua a saída da área da mesa, retira o pedido de acesso e desativa o *bit* de colisão.

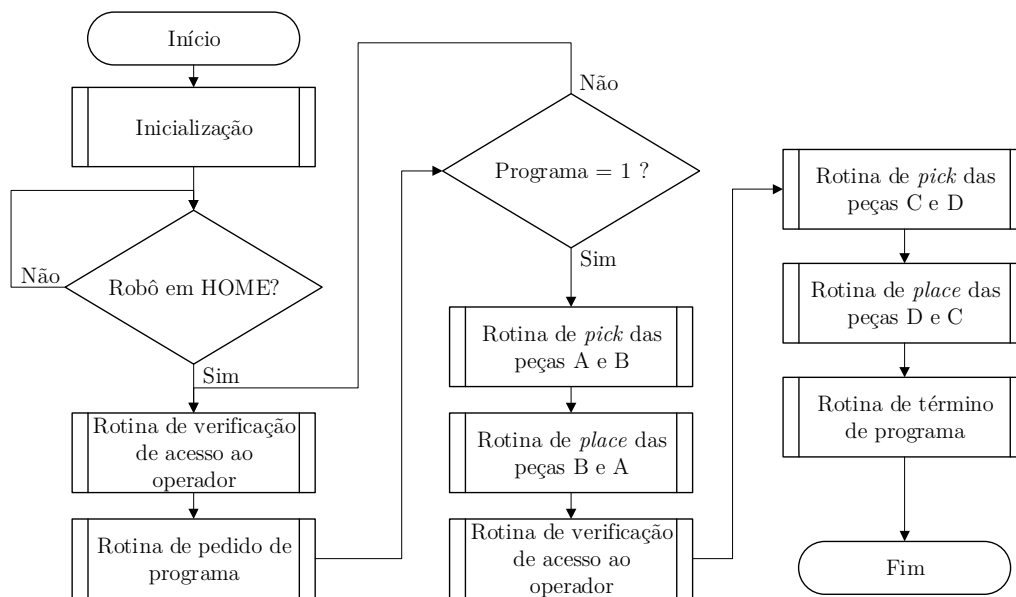


Figura 6.12: Fluxograma sintetizado do robô R1.

Após a saída da mesa de montagem, o robô efetua a verificação de pedido de acesso do operador e desloca-se em direção ao transportador de entrada. O processo para as peças C e D é idêntico ao referido anteriormente para as peças A e B, pelo que apenas mudam as trajetórias de execução.

Assim, o programa consiste num conjunto de funções que se apresentam na Figura 6.13, sendo que representam o seguinte:

- *main*: função principal, na qual as funções secundárias são chamadas em sequência de execução;
- *conveyor\_pick*: função secundária, com trajetórias, para a realização de *pick* de peças do transportador de entrada e verificação de erros (orientação de peças A e B, e de garra fechada com peça) através da rotina *verifications*;
- *table\_place*: função secundária, com trajetórias, para a realização de *place* de peças na mesa de montagem e verificação de erro (peça perdida) através da rotina *verifications*;
- *cell\_access*: função secundária, com lógica, para a realização de acessos à célula por parte do operador, através de pedido de acesso e, assim, paragem controlado do robô;
- *close\_gripper\_1*, *close\_gripper\_2*, *open\_gripper\_1* e *open\_gripper\_2*: funções secundárias para a realização do fechar e abrir das garras do robô. Nestas funções efetua-se a chamada da função *verifications*;
- *errors*: função secundária para troca de informação de erros com o PLC;
- *init\_cond*: função secundária usada para efetuar a inicialização de diferentes valores no início do programa (*main*);

- *io\_kuka*: ficheiro auxiliar onde se encontram definidas todas as variáveis a usar nas funções principais e auxiliares;
- *param\_mov*: função auxiliar usada para efetuar a troca de ferramentas, bases, acelerações, velocidades e aproximações ao longo do programa;
- *verifications*: função auxiliar usada para realizar a verificação das garras abertas, fechadas e orientação das peças A e B.

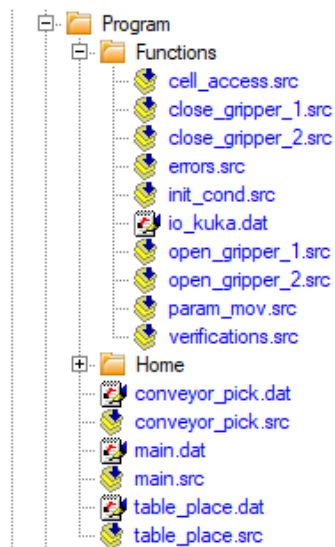


Figura 6.13: Funções do programa do robô R1.

### Robô R2

O início do programa do robô R2 (ver Figura 6.14) é idêntico ao do robô R1. Assim, o programa começa por efetuar a inicialização de valores, efetua a verificação da posição do robô (posição *Home*), e no caso de este não estar, o operador deverá de o colocar. Após isto, o programa possui todas as condições de início do seu ciclo de funcionamento.

Seguidamente, o programa verifica se o operador pretende entrar na célula, e no caso de pretender, este dará acesso. De seguida, o robô irá efetuar o pedido de programa ao PLC, que no caso de ser igual ao pretendido pelo robô, irá prosseguir.

De seguida, o robô realiza o acesso ao centrador, efetua o *pick* do plano e desloca-se em direção à mesa de montagem. Na mesa, o robô pede acesso para entrar na área de trabalho e, quando permitido, é ativado o *bit* de colisão para o robô R1, pelo que o robô irá realizar o *place* do plano. O robô termina esta rotina com a saída da área de trabalho da mesa e a desativação do *bit* de colisão.

Logo depois realiza-se um pedido de acesso à área do armazém, e quando este permitido, será realizado o *pick* do plano em função da altura de planos no armazém, e o robô dará saída do plano em direção ao centrador, onde o colocará.

Por fim, é verificada a existência de pedido de acesso do operador à célula. De seguida, o robô realiza o *pick* do quadro montado na mesa de montagem, começando por pedir

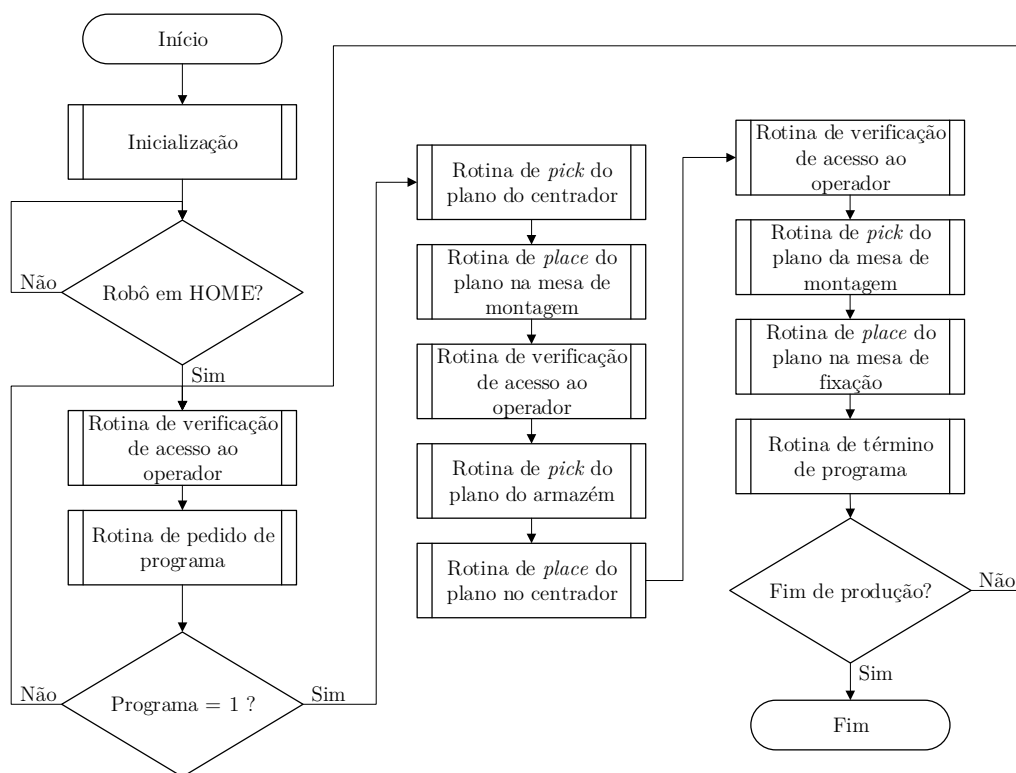


Figura 6.14: Fluxograma sintetizado do robô R2.

acesso ao PLC e ativando o *bit* de colisão, para o robô R2, e sai da área retirando o pedido de acesso e desativando o *bit* de colisão. A última rotina corresponde à execução do *place* do quadro na mesa de fixação, realizando os mesmos procedimentos de acesso e de saída que os executados no armazém.

Assim, o programa consiste no conjunto de funções que se apresentam na Figura 6.15, sendo que representam o seguinte:

- *main*: função principal, na qual as funções secundárias são chamadas em sequência de execução;
- *center\_pick*: função secundária, com trajetórias, para a realização de *pick* do plano no centrador e verificação de erro (vácuo no plano) através da rotina *verifications*;
- *center\_place*: função secundária, com trajetórias, para a realização de *place* do plano no centrador e verificação de erro (plano perdido) através da rotina *verifications*;
- *index\_pick*: função secundária, com trajetórias, para a realização de *pick* do quadro na mesa de montagem e verificação de erro (vácuo no quadro) através da rotina *verifications*;
- *index\_place*: função secundária, com trajetórias, para a realização de *place* do plano na mesa de montagem e verificação de erro (plano perdido) através da rotina *verifications*;
- *warehouse\_pick*: função secundária, com trajetórias, para a realização de *pick*

do plano do armazém e verificação de erro (perda de vácuo) através da rotina *verifications*;

- *fixation\_place*: função secundária, com trajetórias, para a realização de *place* do quadro na mesa de fixação e verificação de erro (quadro perdido) através da rotina *verifications*;
- *close\_gripper\_1* e *open\_gripper\_1*: funções secundárias para a realização de vácuo no *gripper* do robô. Nestas funções efetua-se a chamada da função *verifications*;
- *verifications*: função auxiliar usada para realizar a verificação do vácuo e de plano / quadro perdido;
- *cell\_access*, *errors*, *init\_cond*, *io\_kuka*, *param\_mov*: funções idênticas às já apresentadas anteriormente.

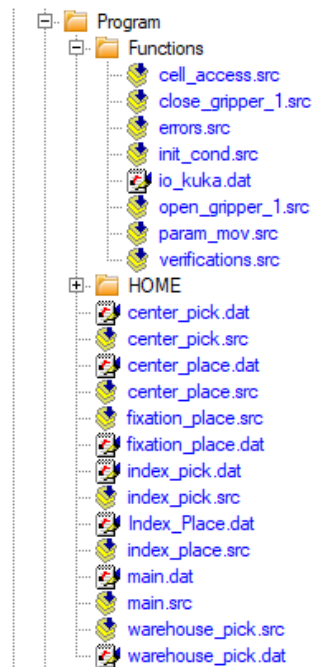


Figura 6.15: Funções do programa do robô R2.

### 6.2.3 Programação do PLC

Com a definição das variáveis dos controladores e a criação da rede de comunicação torna-se possível definir as variáveis do PLC que realizam a comunicação com os controladores, com as caixas de campo e variáveis internas do sistema. Assim, foram definidas no total cerca de 6036 variáveis; contudo, nem todas as variáveis se encontram em uso. Do mesmo modo que nos controladores dos robôs, encontram-se reservadas variáveis para trabalhos futuros.

O programa do PLC encontra-se dividido em quatro programas (ver Figura 6.16a): entradas, programas principais (*main*), robôs, saídas. Cada programa foi dividido de acordo com a programação referente a cada componente.

Os programas das entradas (Figura 6.16b) e saídas (Figura 6.16c) correspondem ao mapeamento dos sinais de entradas e saídas, da memória CIO - realiza a interface das E/S com o meio externo -, para a memória W - área de trabalho, sendo esta usada para a programação.

O programa principal (Figura 6.16d) efetua o controlo e gestão da célula - secções designadas por *StartControl* e *Cell* - e dos componentes/equipamentos, com a exceção dos robôs. O controlo dos robôs é realizado no programa pertencente aos mesmos (Figura 6.16e), sendo que para cada robô existem três secções: automático externo - troca de sinais com controlador de robôs para o arranque do robô em automático externo e resolução de seguranças -, o controlo e o *gripper*.

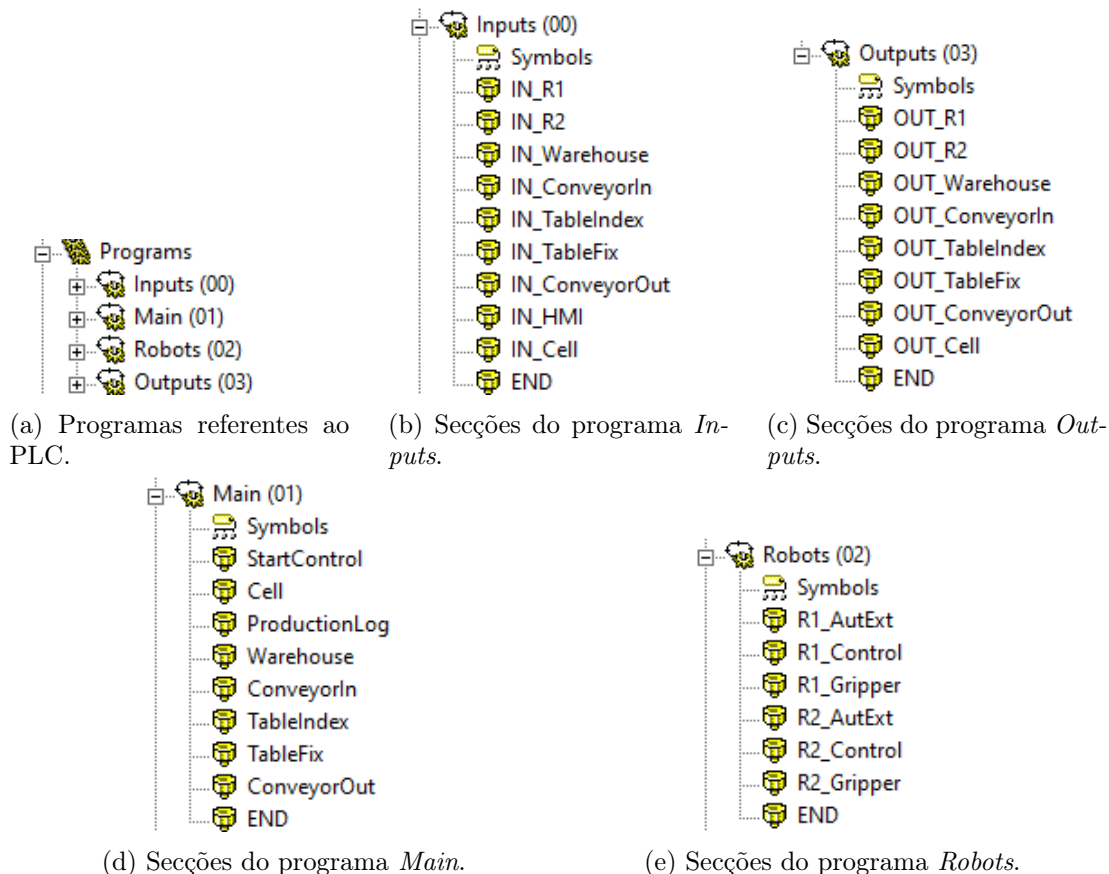


Figura 6.16: Programas e respetivas secções referentes ao PLC.

### Programa referente ao arranque de ciclo de trabalho

Quando o PLC é ligado, o programa *StartControl* (ver Figura 6.17) efetua a inicialização dos valores a usar durante o sistema. A gestão do funcionamento da célula é realizada

através da variável  $W\_Cell\_Power$ , pelo que quando a célula arranca encontra-se no modo “parado” e portanto é realizada a atribuição de 0 à variável.

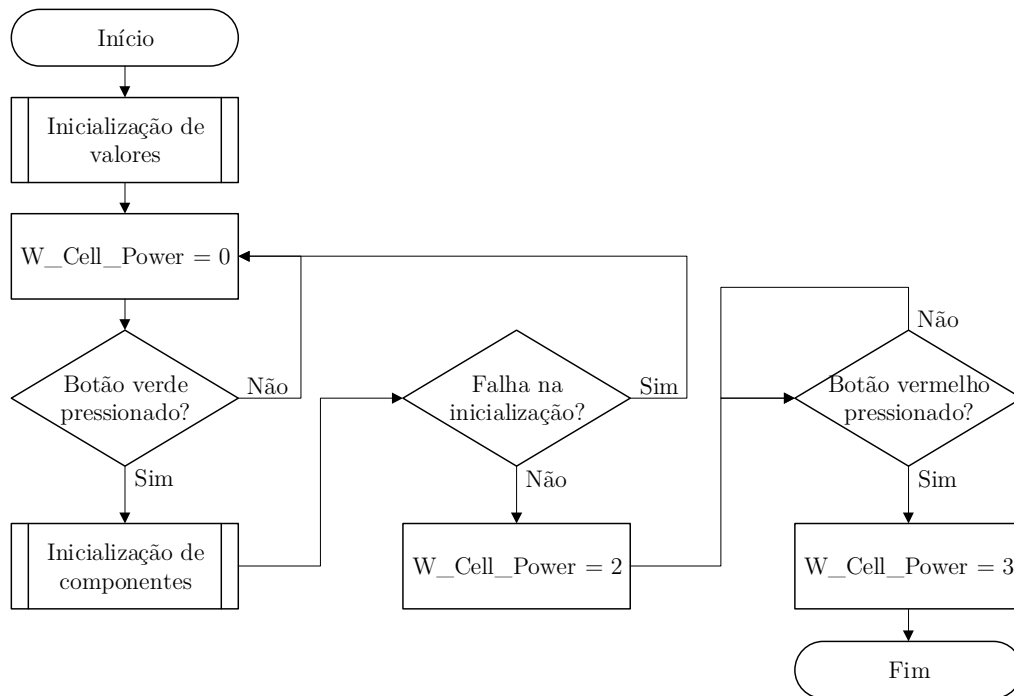


Figura 6.17: Fluxograma referente à *main*: secção *SartControl*.

Quando é pressionado o botão verde, os diversos componentes da célula são inicializados (pretende-se garantir as condições iniciais de arranque da célula, como por exemplo, presença de produto). No caso da falha da inicialização, de um dado componente, o sistema volta a entrar no modo “parado” e aguarda que seja pressionado o botão verde (após correção da falha através do operador), desencadeando de novo a inicialização dos componentes.

No caso de não ocorrer a falha da inicialização o sistema entra no modo de “funcionamento” ( $W\_Cell\_Power = 2$ ), ou seja, no estado de produção. Caso o operador pretenda efetuar o fim de produção, o mesmo poderá realizá-lo pressionando o botão vermelho, pelo que a célula irá entrar no modo de “paragem” ( $W\_Cell\_Power = 3$ ), desencadeando a paragem em cascata dos diversos componentes da célula.

A inicialização dos componentes é realizada através de um processo predefinido da função *StartControl* e pode ser observada na Figura 6.18. Assim, a inicialização começa por:

- seguranças (relés de segurança) - verificar se não se encontra premida nenhuma emergência e barreiras de segurança obstruídas;
- fornecimento de ar comprimido - verificar se a unidade de tratamento de ar possui pelo menos 6 bar;

- armazém - verificar se o armazém não se encontra vazio e se não possui planos acima do valor permitido;
- mesa de montagem - efetuar a atuação dos cilindros pneumáticos para a posição de início de ciclo e verificar o estado dos sensores;
- transportador de entrada - efetuar a atuação no variador de frequência, para a movimentação do transportador de peças, até encontrar um tabuleiro com todas as peças devidamente colocadas e verificar o estado dos sensores;
- mesa de fixação - efetuar a atuação dos cilindros pneumáticos para a posição de início de ciclo e verificar o estado dos sensores;
- transportador de saída - efetuar a verificação do estado dos sensores;
- centrador - efetuar a verificação do estado dos sensores (deve detetar a presença de um plano);
- robô R1 - efetuar a verificação da posição do robô R1 em *Home*, no modo de automático externo e o programa do robô inicializado;
- robô R2 - efetuar a verificação da posição do robô R1 em *Home*, no modo de automático externo e o programa do robô inicializado.

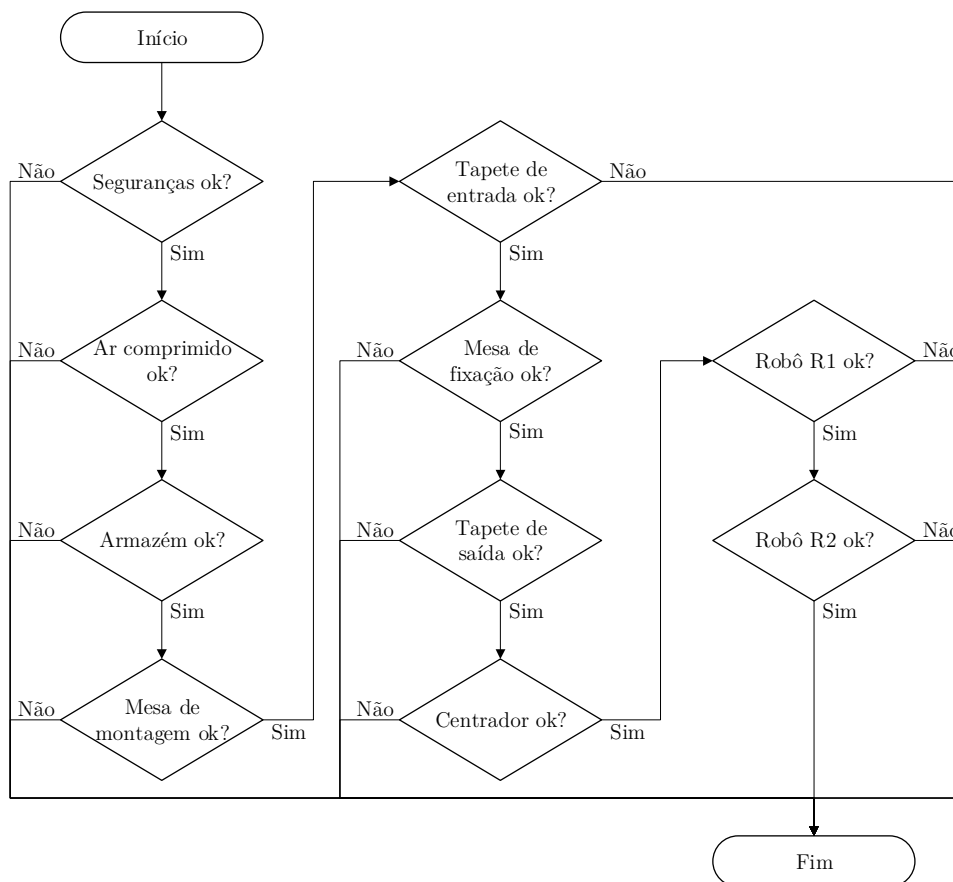


Figura 6.18: Processo predefinido do programa *Main*, da secção *SartControl*: inicialização dos componentes.

No caso de um componente não ser corretamente inicializado o programa irá espoletar um erro e todo o processo será espoletado do início.

### Programa referente ao controlo da célula

O funcionamento da célula, da interface luminosa com o operador e de todos os componentes assenta no estado das variáveis  $W\_Cell\_Power$  e/ou  $W\_Cell\_Status$ . A variável  $W\_Cell\_Status$  representa o estado da célula, sendo que alguns casos depende da variável  $W\_Cell\_Power$ . Estes estados assentam no modo de funcionamento das células da empresa (ver Figura 6.19).

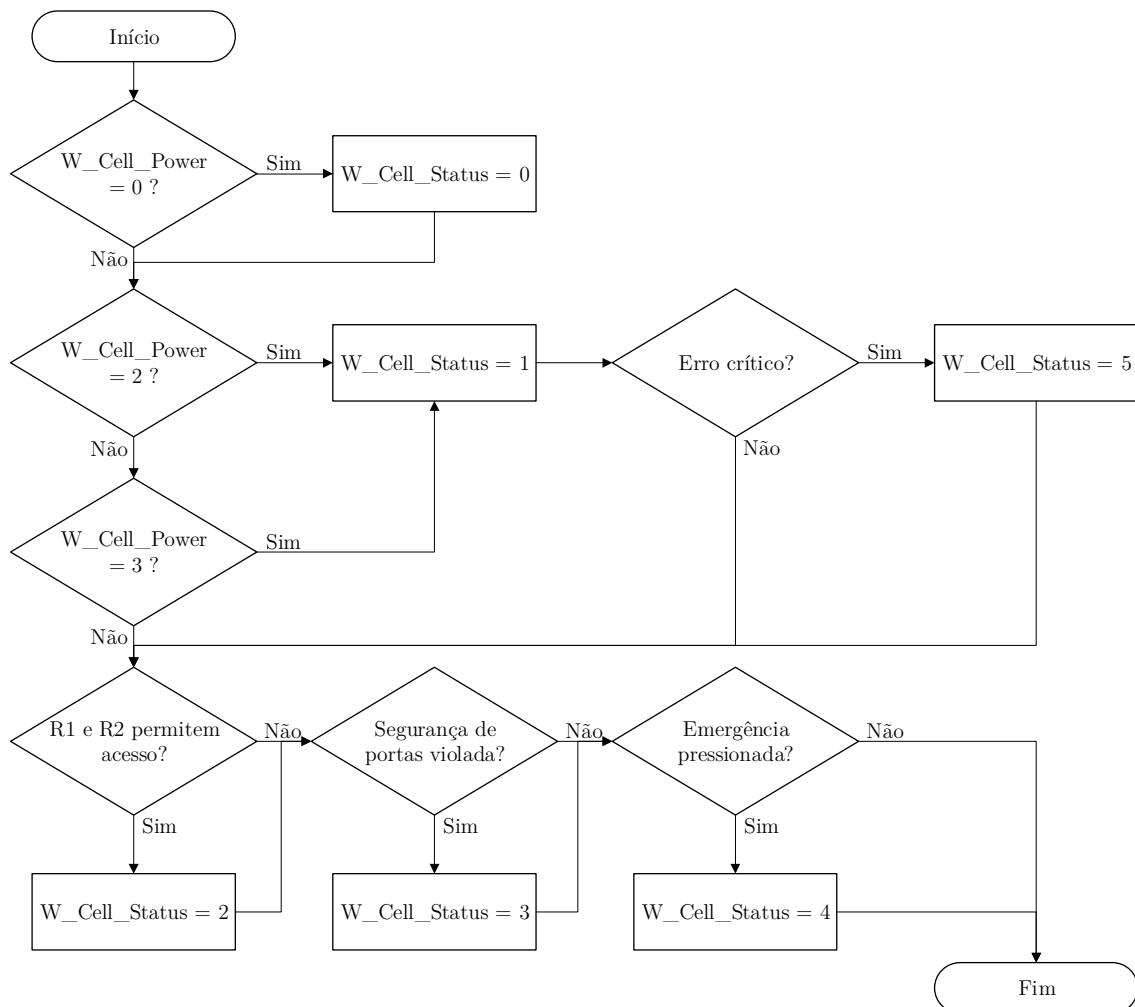


Figura 6.19: Fluxograma referente à *main*: secção *Cell*.

Se a célula se encontrar parada ( $W\_Cell\_Power = 0$ ) a variável tomará o valor de  $W\_Cell\_Status = 0$ , representando o estado de parada da célula. Por outro lado, se a célula se encontrar em funcionamento ( $W\_Cell\_Power = 2$ ) ou em paragem ( $W\_Cell\_Power = 3$ ) é efetuada a atribuição de  $W\_Cell\_Status = 1$ , por outro lado, no caso de se encontrar com um erro crítico - carece da intervenção do operador - é efetuada

a atribuição de  $W\_Cell\_Status = 5$ .

Contudo, existem operações que são inerentes a todos os estados de  $W\_Cell\_Power$  e que se sobrepõem a estes. Assim, no caso do operador pedir acesso e os robôs permitirem o acesso, será atribuído o valor de  $W\_Cell\_Status = 2$ . Se as portas de segurança estiverem abertas ou a barreira do armazém interrompida, o sistema entra no modo de segurança de portas, ou seja,  $W\_Cell\_Status = 3$ . Por fim, se for pressionada uma botoneira de emergência é realizada a atribuição de  $W\_Cell\_Status = 4$ .

Os diferentes valores assumidos pelas variáveis  $W\_Cell\_Power$  e  $W\_Cell\_Status$  (ver Tabela 6.3) levam aos estados luminosos apresentados anteriormente na Tabela 5.5. A diferença entre o acesso do tipo 1 e 2 é dada pelo estado dos robôs R1 e R2: parado ou em movimento, respetivamente.

Tabela 6.3: Estados das variáveis  $W\_Cell\_Power$  e  $W\_Cell\_Status$  para a HMI.

Estado	Tipo	$W\_Cell\_Power$	$W\_Cell\_Status$
Emergência	—	—	4
Segurança do operador	—	—	3
Acesso	1	—	2
	2	—	2
Funcionamento	—	2	1
Parado	—	0	0
Paragem	—	3	1
Erro	—	2 ou 3	5

### Programa referente ao transportador de entrada

O funcionamento do transportador de entrada encontra-se representado, de forma resumida, no fluxograma presente no Anexo F.1. O programa referente ao transportador de entrada começa por fazer mover o transportador até que seja detetada a presença de tabuleiro. De seguida é verificada a presença de peças mal colocadas, através do sensor de deteção de erro das peças. No caso de não detetar peças mal colocadas, o programa irá prosseguir e será verificada a presença das peças A, B, C e D nas respetivas posições. Aqui, caso não se detete nenhuma peça o transportador irá procurar um novo tabuleiro e verificar se possui as peças ou caso detete que o tabuleiro possui algumas peças, mas não todas, será espoletado um erro.

Se todas as peças estiverem presentes, o programa dará acesso ao robô R1 para retirar as peças A e B e depois dará saída; à posterior o robô efetuará o mesmo processo, contudo para as peças C e D. Por fim, o programa verificará se se encontra em fim de produção, e no caso de se encontrar irá parar.

### Programa referente à mesa de montagem

O funcionamento da mesa de montagem encontra-se representado, de forma resumida, no fluxograma presente no Anexo F.2. O programa referente à mesa de montagem começa

por verificar se o botão verde foi pressionado, ou seja, se o arranque da célula foi desencadeado e se a célula está no modo “parado” ( $W\_Cell\_Power = 0$ ). Posteriormente, a mesa de montagem é inicializada e aguarda que a célula entre no modo de “funcionamento”.

Seguidamente, o programa da mesa de montagem aguarda o pedido de acesso do robô R1 à mesa, e o processo de colocação da peça B na mesa, pelo que é espoletada a fixação da mesma na mesa (através dos cilindros pneumáticos respetivos). Após a colocação da peça B, segue-se a colocação da peça A na mesa, pelo que esta segue a mesma ideologia de colocação que a peça A. Após a colocação, o robô R1 retira o acesso à área da mesa.

Com a colocação das peças A e B, segue-se a colocação do plano, efetuando a troca de sinais para efetuar a entrada e saída do robô R2 no espaço da mesa. Com o plano colocado, efetua-se a montagem das peças ao plano.

Após a pré-montagem das peças A e B ao plano, a mesa de montagem recebe as peças D e C, respetivamente, segundo a mesma lógica de funcionamento ao apresentado para as peças B e A. De seguida, a mesa executa a montagem final das peças C e D ao conjunto pré-montado e realiza o “afastamento” dos cilindros e permite a entrada do robô R2 para efetuar a retirada do quadro montado da mesa. Por fim, o programa verificará se se encontra em fim de produção, e no caso de se encontrar irá parar.

#### **Programa referente ao armazém**

O funcionamento do armazém encontra-se representado, de forma resumida, no fluxograma presente no Anexo F.3. O programa executa o processo de inicialização e quando a célula entra em funcionamento é verificada a altura de planos no armazém.

Após esta verificação, o programa do armazém permite a entrada do robô R2 e fornece a altura de planos. De seguida, o robô efetua a saída do armazém e verifica a existência de fim de produção.

#### **Programa referente à mesa de fixação**

O funcionamento da mesa de fixação encontra-se representado, de forma resumida, no fluxograma presente no Anexo F.4. O programa começa por executar um processo de inicialização idêntico ao abordado na mesa de montagem. Assim, aguarda verde, realiza a inicialização da mesa de fixação e aguarda que a célula se encontre em modo de “funcionamento”.

Seguidamente é dada entrada do robô R2 para a colocação do quadro montado e a posterior saída do mesmo, da área. Após a colocação do quadro é desencadeado o processo de aparafusamento das peças de plástico às peças de perfil metálico e plano. Com o aparafusamento do plano concluído dá-se o amolgamento das peças metálicas ao plano.

No caso do transportador de saída se encontrar livre (sem quadros) o quadro dará saída para o transportador de saída e será verificada a existência de fim de produção.

Dado que o sistema de aparafusamento e amolamento são sistemas de desgaste, e de modo a permitir que a célula possa efetuar montagem de planos, foi prevista a possibilidade de se ignorar o processo de aparafusamento e/ou amolamento. Este controlo será efetuado através do operador na consola HMI.

### Programa referente ao transportador de saída

O funcionamento do transportador de saída encontra-se representado, de forma resumida, no fluxograma presente no Anexo F.5. O programa começa por executar o processo de inicialização. Assim, aguarda verde, verifica se o transportador se encontra desobstruído (sem peças) e aguarda que a célula se encontre em “funcionamento”.

Posteriormente, o programa aguarda que seja recebida a ordem da mesa de fixação para começar a andar com o transportador e efetua o controlo da movimentação do plano de acordo com os sensores existentes e com o modo de funcionamento do transportador selecionado. No fim será verificada a existência de fim de produção. O modo de funcionamento do transportador encontra-se implementado de acordo com o pedido pelo cliente (ver Subsecção 5.4.6).

A Figura 6.20 representa a análise/movimentação do plano em função dos sensores existentes nas mesa de fixação e transportador de saída. A indicação dos sensores corresponde aos sensores apresentados nas Subsecções 5.4.5 e 5.4.6.

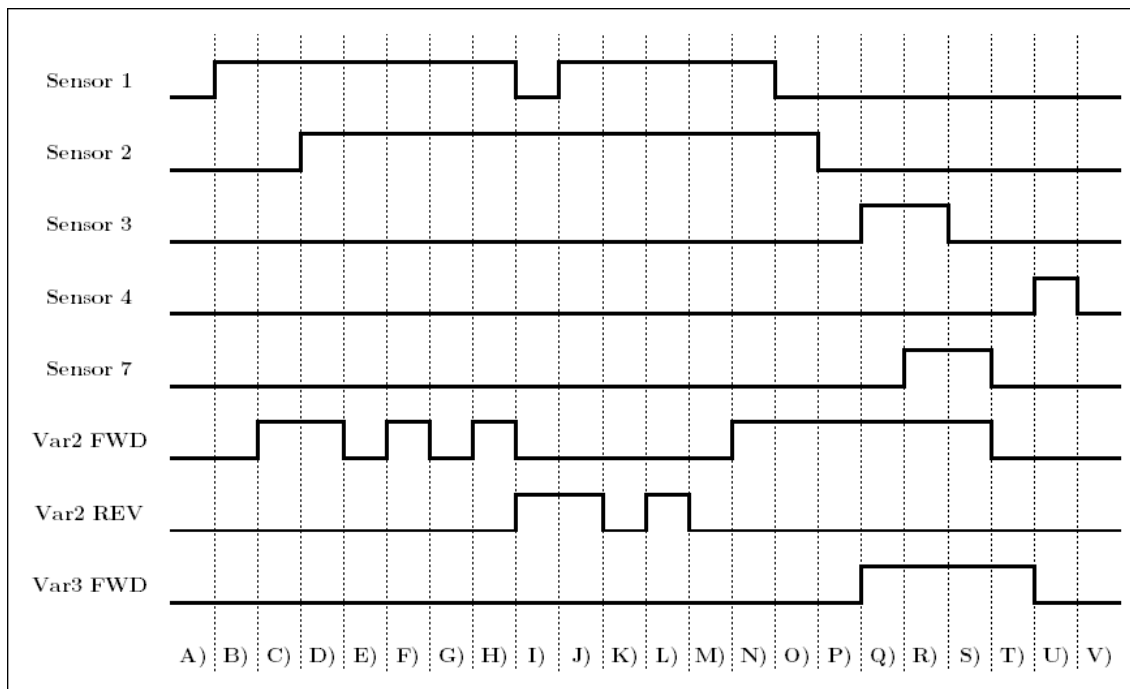


Figura 6.20: Sinais dos sensores e acionamento dos variadores de frequência.

Num momento A) não existe a presença de quadro, até que o robô R2 efetua a colocação

do mesmo e o sensor deteta o plano - B). Após essa condição e com a saída do robô, o plano é movimentado até que ocorra a detecção do sensor 2 - C). Após a detecção deste último sensor, ocorre o empurrar/encostar do plano a determinados batentes por um tempo definido - D).

No momento E) é realizada a atuação de cilindros pneumáticos, pelo que no momento F) ocorre, uma vez mais, o empurrar/encostar do plano aos batentes. De seguida executa-se o acionamento de cilindros pneumáticos, executando assim o aparafusamento - G).

Após o aparafusamento, o quadro é movimentado até que o sensor 1 deixe de detetar o plano e permita o acionamento de cilindros pneumáticos e o inverter da movimentação do plano - H).

No momento I) o plano é movimentado até que ocorra a detecção do sensor 1, mais o movimento do plano durante um tempo definido J), para que ocorra o empurrar/encostar do plano aos batentes. Em K) é realizada a atuação de cilindros pneumáticos, pelo que no momento L) ocorre, mais uma vez o empurrar/encostar do plano aos batentes. De seguida executa-se o segundo aparafusamento e o amolçamento - M).

A partir deste momento procede-se à saída do quadro da mesa de fixação e ativação do transportador de saída - N), O), P) e Q). De seguida, o sensor 7, do transportador de saída, detetará o quadro e o sensor 3, da mesa de fixação, deixará de detetar, pelo que neste momento o quadro encontra-se quase na sua totalidade no transportador de saída. O acionamento do movimento da mesa de fixação será terminado quando o sensor 7 deixar de detetar - R) e S).

A partir do momento T) e U) é realizado o transporte do plano para o fim do transportador (célula seguinte) e o momento V) indica a saída do plano do transportador de saída.

### **Programas referentes aos robôs R1 e R2**

Os programas referentes ao controlo dos robôs R1 e R2 são idênticos, *R1\_Control* e *R2\_Control*, respetivamente. Estes programas apenas efetuam a gestão dos programas dos robôs e realizam o fim de produção quando pedido pelo operador.

Por outro lado, os programas *R1\_Gripper* e *R2\_Gripper* realizam a troca de informação relativamente aos *grippers* dos robôs e algum controlo sobre a possibilidade de se atuar os mesmos pelo operador, por exemplo, só em modo manual.

Por fim, os programas referentes ao *R1\_AutExt* e *R2\_AutExt* são responsáveis por efetuar o arranque dos robôs em modo de automático externo - arrancar o robô em automático através de controlo externo (PLC) - e efetuar a resolução de situações de seguranças - emergências e segurança de portas. Estes programas foram desenvolvidos baseando-se nas informações fornecidas pela KUKA.

## **6.3 Interface com o operador**

Para realizar a interface com o operador foi desenvolvido um programa através do *software* NB Designer, da OMRON. A programação desta consola é realizada através de

programação em blocos. Esta permite apresentar estatísticas/dados, criar utilizadores, associar lâmpadas e botões a registos do PLC, entre outros.

No ecrã apresentado na Figura 6.21 é possível visualizar no bloco 1 um espaço destinado a mensagens relativas ao sistema, no bloco 2 o número de quadros produzidos, o tempo de produção (em dia, horas, minutos e segundos) e o número de quadros produzidos por hora - desde a última vez que se realizou *reset* (bloco 4) aos contadores e no bloco 3 o número de quadros e tempo de produção (não é possível realizar *reset* a estes contadores).

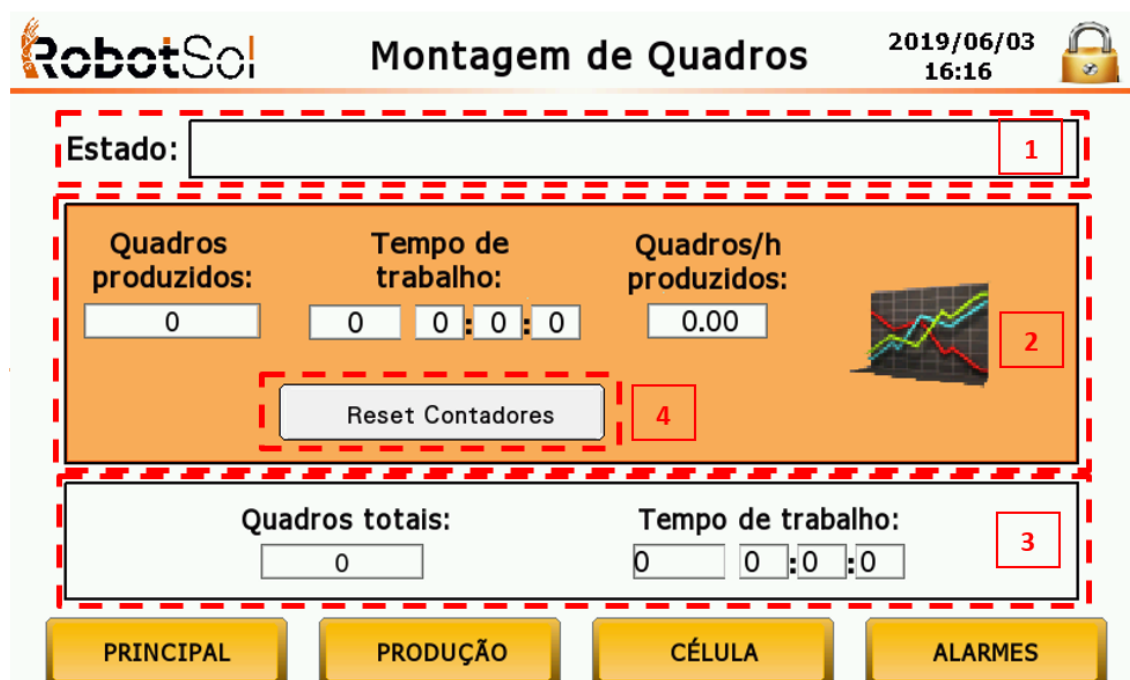


Figura 6.21: Consola HMI: ecrã principal.

Na Figura 6.22 é possível visualizar e selecionar o ecrã referente ao modo de funcionamento do transportador de saída (bloco 1) e a desabilitar/habilitar as aparafusadoras e o amolgamento. Estes parâmetros carecem de um acesso do operador para efetuar as seleções.

No ecrã referente à célula, apresentado na Figura 6.23 o operador poderá visualizar o estado em que se encontra a célula - emergência, segurança de porta, acesso, produção, parado e erro - e se os robôs se encontram na posição de *Home*.

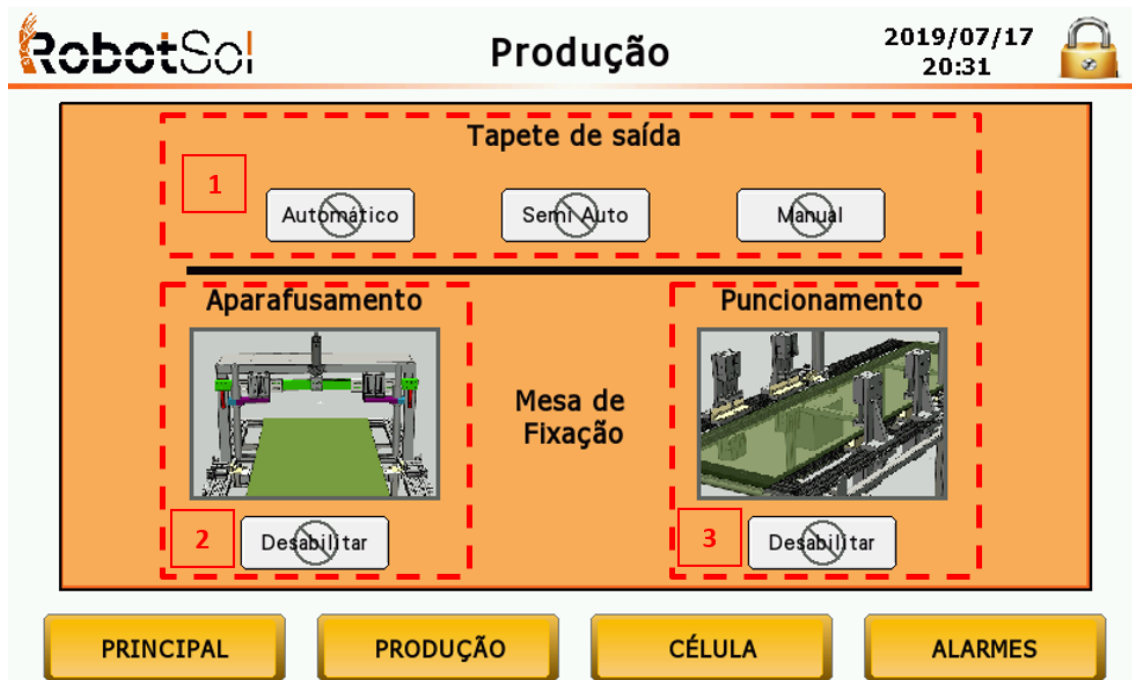


Figura 6.22: Consola HMI: ecrã de produção.

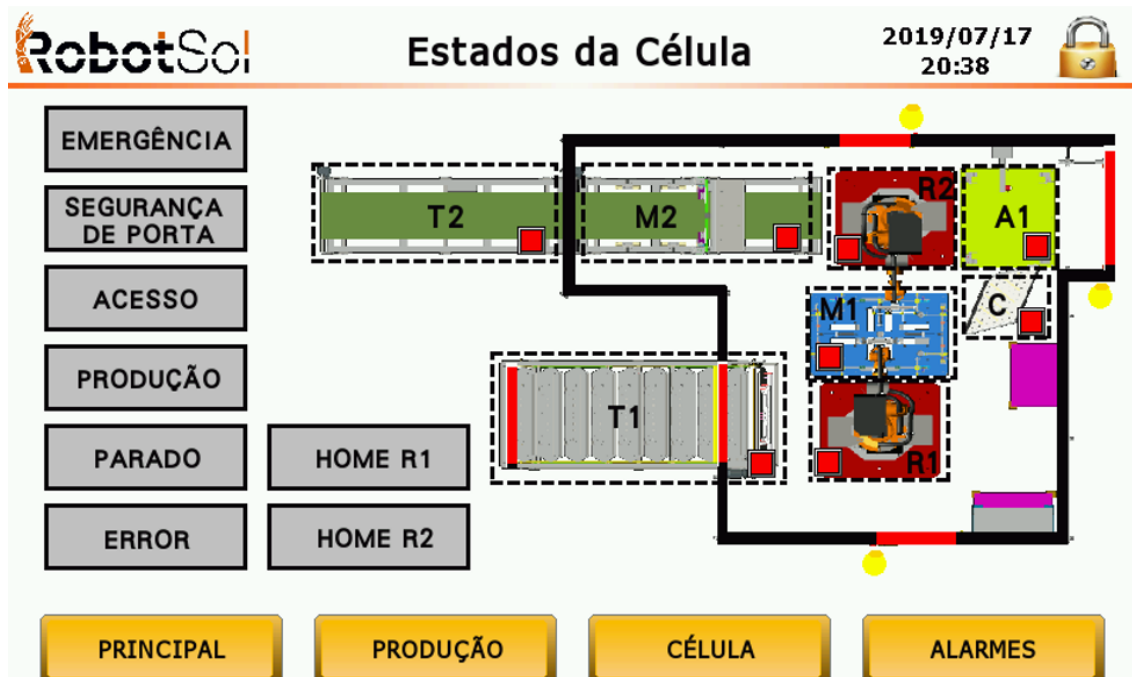


Figura 6.23: Consola HMI: ecrã da célula.

Nesta página é apresentado o *layout* da célula com os respetivos componentes. Existe associado a cada componente um quadrado (apresentado a vermelho) que indica o estado de funcionamento do componente em situação de arranque do sistema, ou seja, se o componente se encontra inicializado (estado verde) ou se possui algum problema (estado

vermelho).

Efetuada a seleção de um determinado componente poderá visualizar-se mais funções associadas ao mesmo. É ainda possível visualizar o estado das seguranças através do *layout* apresentado.

Na página de alarmes, que se encontra apresentada na Figura 6.24, é possível visualizar as horas do alarme, a que horas o operador tomou conhecimento e uma mensagem, ajudando o operador a identificar de forma rápida um determinado problema.



Figura 6.24: Consola HMI: ecrã de alarmes.

Se necessário o operador pode efetuar *reset* ao alarme (1) e o programa irá continuar de onde parou. No caso do operador possuir vários alarmes associados, o operador possui botões para fazer mover a lista (2).

Selecionando o símbolo da RobotSol existente na página é possível aceder à página de contactos da empresa (ver Figura 6.25a). Nesta, existe um botão- símbolo de operador - que permite o acesso à página de manutenção (ver Figura 6.25b), sendo apenas permitido o acesso a quem possuir as credenciais de manutenção. A página de manutenção permite realizar a gestão de utilizadores (ver Figura 6.25c) e ver a troca de comunicação dos robôs R1 e R2 (ver Figura 6.25d).

Além das informações atrás mencionadas, a página de manutenção também permite verificar as máquinas de estados de cada programa desenvolvido no PLC (ver Figura 6.25e) e verificar mais estatísticas (ver Figuras 6.25f e 6.25g), sendo que estas apenas se encontram associadas ao utilizador da RobotSol. Por fim, o operador ainda poderá efetuar configurações de sistema (ver Figura 6.25h).

**RobotSol** Contactos 2019/06/05 23:34

**RobotSol – Engenharia Industrial, Lda**  
 Zona Industrial da Maia, Sector X  
 R. José Maria Carvalho Ramos, Lt 390B  
 4470-407 Maia  
 Portugal

Latitude: 41.244656  
 Longitude: -8.627187

Telefone: +351 22 995 27 37  
 Fax: +351 22 995 30 56  
 Website: www.robotsol.pt  
 E-mail: geral@robotsol.pt

PRINCIPAL PRODUÇÃO CÉLULA ALARMES

(a) Página referente aos contactos.

**RobotSol** Manutenção 2019/08/30 00:05

Gestão de utilizadores

Robô R1

Robô R2

Steps

Produção

PRINCIPAL PRODUÇÃO CÉLULA ALARMES

(b) Página referente à manutenção.

**RobotSol** Gestão de Utilizadores 2019/08/30 00:07

N.º	Nome de Utilizador	Permissão
0	rs	111111111110000000000000
1	mnt	110000000000000000000000

PRINCIPAL PRODUÇÃO CÉLULA ALARMES

(c) Página referente à gestão de utilizadores.

**RobotSol** R1 - KUKA - KR 16-2 2019/08/30 00:07

INPUTS (PLC)	OUTPUTS (PLC)
\$PERL_DRY 0	\$DRIVES_OFF 0
\$I_O_ACTCONF 0	\$EXT_START 0
\$STOPMESS 0	\$DRIVES_ON 0
\$PRO_ACT 0	\$MOVE_ENABLE 0
\$IN_HOME 0	\$PGNO_PARITY 0
\$ALARM_STOP 0	\$CONF_MESS 0
Cell_Access 0	\$PGNO_VALID 0
AreaReq_2 0	AreaReady_2 0
AreaReq_3 0	AreaReady_3 0
AreaRelease_2 0	ColReady_1 0
AreaRelease_3 0	
ColRelease_1 0	

PRINCIPAL PRODUÇÃO CÉLULA ALARMES

(d) Página referente aos robôs.

**RobotSol** Máquina de Estados 2019/08/30 00:07

Start Control	0	Armazém	0
R1 Control	0	Mesa de Indexação	0
R2 Control	0	Mesa de Fixação	0
		Tapete de Entrada	0
		Tapete de Saída	0

PRINCIPAL PRODUÇÃO CÉLULA ALARMES

(e) Página referente ao PLC.

**RobotSol** Dados RobotSol 2019/08/30 00:08

Reset Temporizadores

Último reset: 0 / 0 / 0 0 : 0 : 0 Domingo

	Com reset			Retentivo			
Dias	HH	MIN	SEG	Dias	HH	MIN	SEG
Tempo da linha parada	0	0	: 0	0	0	: 0	: 0
Tempo da linha em trabalho	0	0	: 0	0	0	: 0	: 0
Tempo da linha em acesso	0	0	: 0	0	0	: 0	: 0
Tempo da linha em segurança de porta	0	0	: 0	0	0	: 0	: 0

PRINCIPAL PRODUÇÃO CÉLULA ALARMES

(f) Página 1 referente a estatísticas.

**RobotSol** Dados RobotSol 2019/08/30 00:08

Tempo da linha em emergência	0	0	: 0	: 0	0	0	: 0	: 0
Tempo da linha em erro	0	0	: 0	: 0	0	0	: 0	: 0
Tempo da linha sem peças	0	0	: 0	: 0	0	0	: 0	: 0

PRINCIPAL PRODUÇÃO CÉLULA ALARMES

(g) Página 2 referente a estatísticas.

**RobotSol** Configurações de Sistema 2019/06/06 08:35

Ajuste do relógio

6 / 6 / 2019 8 : 35  
 Dia Mês Ano Hora Minutos

Proteção de Ecrã 20 Minutos

Controlo USB

Buzzer On

Ajuste do brilho  
 Max = 32  
 Min = 0

PRINCIPAL PRODUÇÃO CÉLULA ALARMES

(h) Página referente a configurações.

Figura 6.25: Páginas de manutenção.

O programa desenvolvido relativamente à consola pode ser encontrado no Anexo G.

Foi ainda desenvolvido um manual de utilização da célula, o qual descreve o funcionamento da mesma, a resolução de diversos problemas e situações. Este documento pode ser encontrado no Anexo H.

## 6.4 Instalação da célula

Com a simulação, a programação *offline* e a montagem dos diversos componentes terminada, procedeu-se à implementação e interligação dos sistemas. A instalação da célula deu-se em duas fases distintas: instalação na RobotSol e instalação no cliente.

### Instalação na RobotSol

Com a instalação na RobotSol pretendeu-se efetuar a validação de todos os componentes à exceção dos transportadores de entrada e de saída.

Numa primeira instância foi realizada a passagem de programas para os robôs, PLC e HMI. Seguidamente, foi realizada a validação da atuação e dos sensores presentes nos diversos componentes, sendo possível fazê-lo através da consola HMI, uma vez que todos os sinais se encontram mapeados para a mesma.

Com a validação dos sinais terminada, realizou-se a programação *online* dos robôs. Nestes, começou por se definir uma ferramenta (ponteira) e através da mesma realizou-se a definição de algumas bases de trabalho. De seguida efetuou-se a definição de todas as ferramentas e validaram-se as mesmas através de testes.

Após este processo realizado, foi efetuada a marcação de pontos de acordo como planeado na simulação/programação *offline* e foram realizados testes ao programa desenvolvido.

Todos os programas foram testados individualmente e exaustivamente garantindo assim a inexistência de gralhas do sistema no que diz respeito à programação.

### Instalação em cliente

Por fim, com o sistema instalado em cliente e com os respetivos transportadores, foi repetido o processo efetuado na instalação da RobotSol. Este teste pretendia revalidar todo o sistema, dado que existiu a mudança do local do sistema.

Dado que o sistema não se encontrava no mesmo local, foi necessário ajustar as bases de trabalho e ajustar os pontos definidos para a realidade existente.

Com o sistema devidamente implementado, foram realizados testes intensos ao sistema desenvolvido tentando encontrar gralhas do sistema e corrigi-los. Com todas as validações e testes realizados deu-se por concluída a implementação da célula em cliente.

## 6.5 Sumário de capítulo

Em suma, neste capítulo foram abordadas as trajetórias efetuadas pelos robôs R1 e R2. Neste trabalho os movimentos utilizados são do tipo PTP e LIN.

Foi realizada a simulação do funcionamento da célula (robôs), validando os alcances, as trajetórias, a inexistência de singularidades e a suavidade dos movimentos. Assim, efetuou-se uma análise detalhada das trajetórias para cada componente, na qual os robôs possuem influência direta.

Com a simulação realizada foi possível proceder ao estudo do tempo de ciclo e concluir que se conseguirá cumprir o tempo pretendido, podendo até conseguir produzir mais quadros do que o pretendido pelo cliente.

Após a simulação, realizou-se a programação *offline* da rede de comunicação, dos robôs R1 e R2, e do PLC. Na rede de comunicação começou por se definir o tamanho da rede de comunicação necessária a cada módulo de comunicação, tendo-se passado à definição do endereço inicial e do endereço do nó na rede. De seguida efetuou-se a correspondência da rede criada para o PLC e robôs. Deste modo concluiu-se a definição da rede de comunicação.

Posteriormente apresentou-se a programação dos robôs e do PLC, com recurso a fluxogramas resumidos do trabalho desenvolvido e que representam o normal funcionamento dos diversos componentes. Começou por se apresentar a programação dos robôs R1 e R2, a estrutura de cada programa e a definição de cada função do programa.

Na programação do PLC apresentou-se a estrutura do programa desenvolvido, uma breve explicação do funcionamento dos programas (indo de encontro com o já abordado ao longo do Capítulo 5) e os fluxogramas referentes ao funcionamento geral da célula e de cada componente. Seguidamente apresentou-se de forma mais detalhada a movimentação do quadro ao longo da mesa de fixação e do transportador de saída.

De seguida apresentou-se a interface HMI desenvolvida. Esta permite visualizar os diferentes estados da célula, verificar estatísticas de produção, habilitar/deshabilitar componentes, alterar modos de funcionamento, efetuar controlo manual de componentes, verificações de sensores, entre outros.

Por fim, abordou-se a instalação da célula. Esta foi realizada parcialmente na RobotSol para a validação dos diferentes componentes e numa segunda fase a instalação em cliente já com todas as validações realizadas.



# Capítulo 7

## Testes e resultados

*Neste capítulo são apresentados os testes e verificações realizados ao longo de todo o trabalho desenvolvido. Aqui, serão apresentados os problemas encontrados ao longo do processo de implementação e a sua resolução. Ao longo deste capítulo vão sendo discutidos os resultados obtidos.*

### 7.1 Testes funcionais

Os testes podem ser divididos em duas fases: na RobotSol e no cliente. Numa primeira fase de realização de testes pretendeu validar-se o funcionamento de todos os componentes, com a exceção das seguranças e do transportador de entrada e de saída, na RobotSol. Numa segunda fase realizou-se a revalidação dos componentes, já validados na RobotSol, e validaram-se os restantes componentes que se encontravam no cliente.

#### 7.1.1 Testes realizados na RobotSol

Estes testes foram acontecendo ao longo de toda a implementação. Por exemplo, o desenvolvimento e a definição do *layout* aconteceu em simultâneo com os testes realizados nas mesas de montagem e de fixação.

Como mencionado anteriormente, o *layout* final não corresponde ao inicialmente projetado, em 2015. Comparando o sistema inicial com o final, o robô R1 possuía apenas uma garra e ventosas. Este robô colocava as peças provenientes do transportador de entrada (uma de cada vez) na mesa de montagem e também realizava a colocação dos planos do armazém para a mesa. Por outro lado, o robô R2 efetuava a colocação de cola nos planos e efetuava a movimentação do quadro montado para a mesa de fixação.

Com o passar do tempo, e com a mudança dos requisitos por parte do cliente, o robô R2 apenas fazia a movimentação do quadro para a mesa de fixação. Portanto, facilmente se conclui que as tarefas atribuídas a cada robô estavam desproporcionais e que poderia ser melhorado o tempo de ciclo, equilibrando os processos associados a cada robô.

A abordagem passou por transferir o processo de movimentação do plano do armazém, do robô R1 para o robô R2. Além disso, idealizou-se que cada robô deveria conseguir pegar/movimentar duas peças ou planos de cada vez. Ou seja, o robô R1 seria composto por duas garras e o robô R2 seria composto por ventosas, de modo que conseguisse efetuar a movimentação/troca do quadro para o plano na mesa de montagem. Desta forma, o departamento de projeto mecânico avançou com o projeto dos novos *grippers*.

Tendo os *grippers* idealizados era necessário simulá-los e definir o novo processo da célula. Assim, começou por se realizar a análise de cargas referente a cada robô, para os piores casos, ou seja, com peças e/ou plano. O *gripper* do robô R1 é idêntico ao apresentado anteriormente na Subsecção 5.4.8, pelo que este foi validado. Por outro lado, o *gripper* do robô R2 (com capacidade para mover dois planos: um por montar e outro montado) era mecanicamente diferente, possuindo uma massa de 8,6 kg. O *gripper* do robô R2, quando em carga, possuía um total de 21,6 kg com o centro de massa deslocado em Z de 392 mm.

Efetuando a relação do centro de massa e da massa do *gripper* - com carga -, depreendeu-se através da Figura 5.18 que o *gripper* não se encontrava dentro dos limites de massa para o centro de massa. Ainda assim, verificou-se através do *software* Kuka Load 5.0 e constatou-se que o *gripper* se encontrava fora dos limites. A abordagem passou pelo desenvolvimento de um *gripper* que conseguisse efetuar a movimentação de um plano/quadro. O *gripper* desenvolvido corresponde ao apresentado anteriormente na Subsecção 5.4.8.

Através das simulações verificou-se a colisão do *gripper* do robô R1 com as peças, em situação de *pick*, no transportador de entrada (ver Figura 7.1). Este problema foi solucionado com o aumento do comprimento dos dedos das garras, evitando a colisão com as peças.

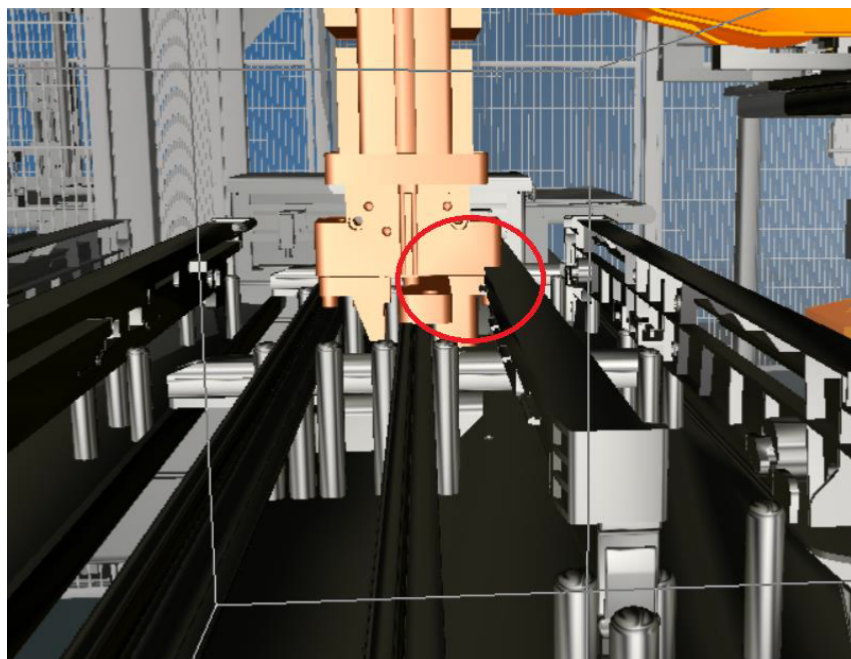


Figura 7.1: Colisão de *gripper* do robô R1 com a peça B.

Numa fase inicial do projeto, o centrador não existia no *layout*. Inicialmente, o centramento dos planos (para a montagem) era realizado através de cilindros pneumáticos (ver Figura 7.2) que se encontravam em torno da mesa, e só à posteriori é que se realizava a montagem das peças.

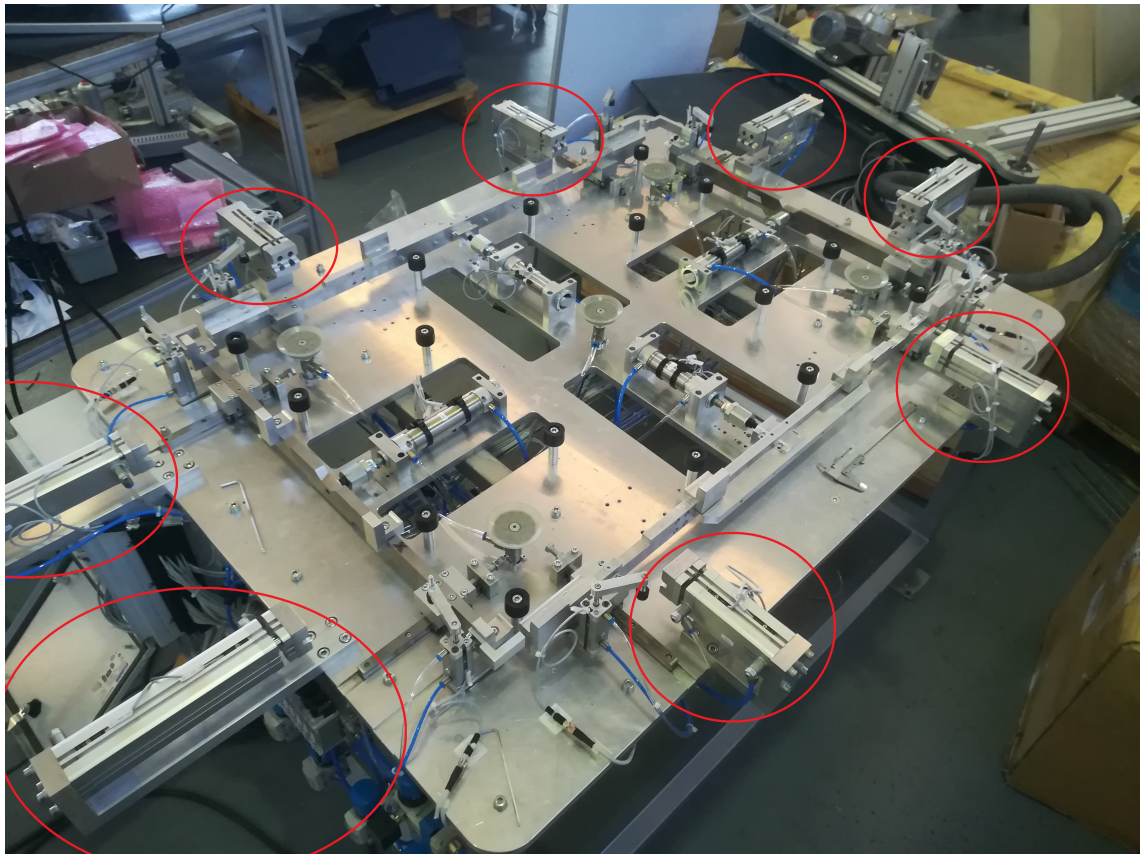
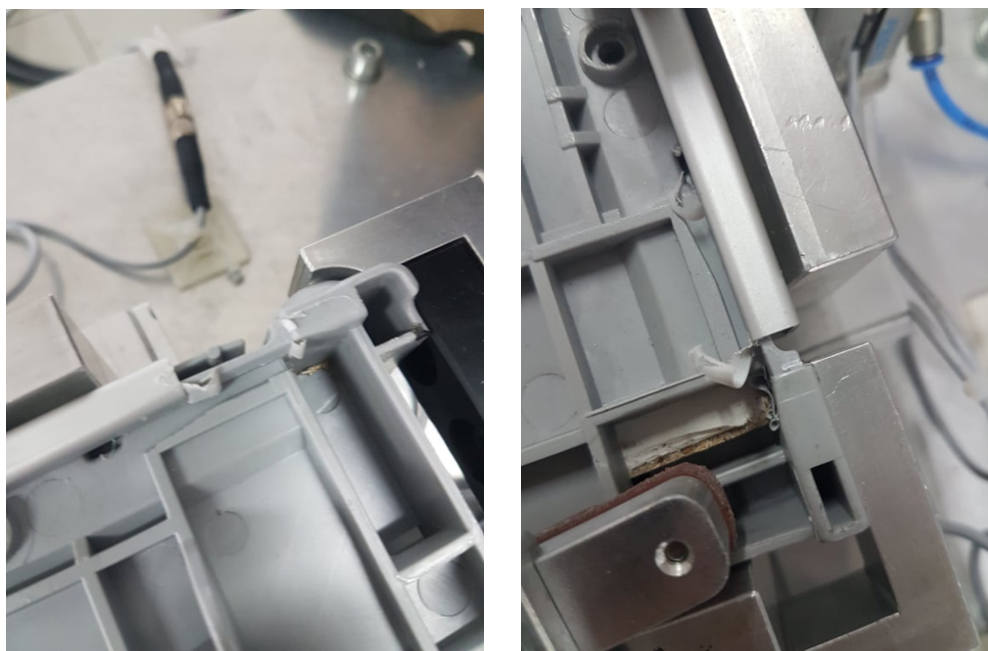


Figura 7.2: Mesa de montagem com cilindros centradores do plano.

Mecanicamente a mesa de montagem possui batentes mecânicos que garantem uma dada posição, para a montagem das peças ao plano. Contudo, este tipo de solução não é de fácil acesso, nem de fácil afinação.

Numa fase inicial foi desenvolvido o *software* para a mesa de montagem, que permitia realizar a atuação das eletroválvulas e obter o *feedback* dos vários sensores existentes na mesma. Após o desenvolvimento do *software* foi necessário realizar a afinação dos diferentes sensores existentes.

Com a afinação da mesa foi validado o *software* desenvolvido e efetuaram-se dezasseis testes de montagem de quadros, nos quais se constatou: 43,75% dos quadros foram bem montados; 43,75% dos quadros foram quase bem montados (estavam montados, mas não na totalidade); 12,50% dos quadros foram mal montados. Na Figura 7.3 é possível visualizar dois exemplos de testes mal sucedidos.



(a) Exemplo de quadro mal montado.

(b) Exemplo quadro quase bem montado.

Figura 7.3: Exemplos de quadros montados sem sucesso.

Com os testes desenvolvidos concluiu-se que a taxa de insucesso da mesa era alta. Assim, realizou-se uma análise detalhada sobre a componente mecânica da mesa e constatou-se que não existia paralelismo nem perpendicularidade entre o posicionamento das diferentes peças e destas com o centramento do plano.

Tendo-se verificado o problema, passou-se a respetiva informação ao departamento de projeto mecânico que atuou para a resolução do mesmo. Deste modo, surgiram algumas alterações mecânicas na mesa de montagem e foi descartado o centramento dos planos desta, para um centrador externo à mesa.

Após as alterações realizadas foram realizados mais testes e verificou-se a consistência dos resultados obtidos.

Inicialmente, a mesa de fixação não era idêntica ao apresentado nos capítulos anteriores. O conceito para o funcionamento da mesa baseava-se na precisão proveniente da mesa de montagem, a qual não existia e, assim, verifica-se a falha do sistema de aparafusamento.

Perante vários testes realizados nesta mesa concluiu-se que não havia qualquer tipo de consistência nos resultados obtidos, pelo que o aparafusamento foi sempre realizado sem sucesso.

Analisando com algum cuidado o sistema, percebeu-se que as aparafusadoras não garantiam sempre a mesma posição para o aparafusamento: a base de suporte do aparafusamento era instável e o conjunto de sistema mecânico/pneumático não se encontrava corretamente dimensionado. Assim, foi necessária a reformulação do conceito, pelo que se passou a realizar o centramento do quadros montados nesta mesa - através de cilindros

pneumáticos - e foi necessário criar estabilidade na base de aparafusamento. Após esta reformulação do conceito, passou-se a respetiva informação ao departamento de projeto mecânico, tendo atuado perante as dificuldades apresentadas.

Com o desenrolar das alterações foi-se desenvolvendo o *software* de controlo desta mesa e foi validado o mesmo após as alterações mecânicas realizadas. Nesse momento realizaram-se mais testes e concluiu-se que o sistema estava mais robusto, contudo as aparafusadoras falhavam esporadicamente (10 % das vezes). Esta falha das aparafusadoras foi assumida pela RobotSol como sendo um problema das próprias aparafusadoras, ou seja, do fornecedor, caindo sobre o mesmo a responsabilidade do correto funcionamento das aparafusadoras.

Com os testes realizados no armazém constatou-se a existência de vácuo entre os planos, o que dificulta o *pick* dos planos do armazém. Em vários testes realizados constatou-se que o *gripper* do robô R2 movimentava mais do que um plano ao mesmo tempo. Verificou-se que a existência de vácuo entre planos permitia que o robô efetuasse *pick* de, por exemplo, seis planos. Estes planos acabavam por se perder ao longo da trajetória sendo assim um problema.

Como medida corretiva desta situação, e através de testes realizados em conjunto com o departamento de projeto mecânico, constatou-se que a existência de uma inclinação e um movimento de torção era favorável para a resolução do problema. Deste modo, a base de suporte dos planos foi inclinada em 30° e foi aplicado um movimento de torção no plano superior contra os inferiores, de cerca de 2°, através do robô.

Após vários testes realizados constatou-se o sucesso das alterações realizadas.

Para a realização dos testes e afinações foram necessárias grandes quantidades de peças e planos, que o cliente ia fornecendo consoante as necessidades.

Ao longo do tempo constatou-se a inconsistência do material fornecido pelo cliente: planos colados uns aos outros e curvos, e peças com torções. Esta inconsistência levava à contínua afinação dos componentes perante as amostras que se iam obtendo.

Perante esta situação, foi necessário a RobotSol definir as dimensões, massas e tolerâncias do produto fornecido para se realizarem afinações/testes com material considerado conforme para o funcionamento do sistema.

Com o passar do tempo percebeu-se que o cliente estava a escoar as peças e planos que possuía em *stock*, sem verificar a qualidade das mesmas, além de que possuía problemas no processo de produção. Assim, o cliente teve de rever o seu processo e verificar a qualidade do seu produto, antes de entrar na célula, para solucionar este problema.

### 7.1.2 Testes realizados no cliente

Após a instalação da célula em cliente deu-se o início dos testes. Como tal, foram validados alguns componentes do sistema: a disposição dos robôs na célula, as posições

dos *grippers*, os transportadores, mesa, armazém e centrador.

Realizando a análise das trajetórias definidas na RobotSol e comparando com as observadas no cliente é possível validar os pontos definidos e os alcances simulados, e verificar que não ocorrem colisões com os diversos componentes. Para a realização deste teste foi necessário redefinir as bases de trabalho e remarcar os pontos anteriormente referidos. O resultado desta validação foi bem sucedido dado que os pontos definidos apenas necessitavam de um pequeno ajuste e não ocorriam quaisquer tipos de colisões.

Após a validação das trajetórias procedeu-se à validação da comunicação. Para isto foram realizadas verificações das entradas e saídas com todos os componentes da célula. Numa primeira fase começou por se verificar a comunicação do PLC com os robôs e as caixas de campo existentes. Numa segunda fase foi verificada a atuação das eletroválvulas e verificado o *feedback* dos sensores. De seguida, testou-se o acionamento dos variadores de frequência e as seguranças da célula. Deste modo, concluiu-se que estava tudo de acordo com o pretendido.

Relativamente ao funcionamento da HMI, começou por se validar a comunicação desta com o PLC e, de seguida, verificou-se o funcionamento de todas as páginas programadas - atuações e sensores - e de outras páginas com outro tipo de dados como, por exemplo, estatísticas. No final verificou-se que estava tudo de acordo com o previsto.

Com os testes realizados anteriormente - verificação de comunicação, sinais e trajetórias - procedeu-se aos testes às seguranças da célula. Assim, espoletaram-se os diferentes tipos de segurança existentes e verificou-se a paragem de diversos componentes e os estados da célula pretendidos (por exemplo, estados luminosos). No final, constatou-se que as seguranças estavam conforme o previsto.

De seguida realizaram-se testes de produção (em modo automático). Com estes testes fizeram-se espoletar: arranques de produção; produção contínua; fins de produção; paragens de emergência; pedidos de acesso; segurança de operador; erros. No final constatou-se que a célula se encontrava a funcionar. Contudo, verificou-se em alguns casos esporádicos a falha da montagem e do sistema de aparafusamento. Estas falhas deveram-se essencialmente às variações do produto e à aparafusadora, da qual não se obtém qualquer tipo de *feedback* e controlo direto deste sistema, e verificaram-se algumas oscilações no sistema de aparafusamento. Dadas estas falhas, informou-se os interessados sobre a situação, os quais ficaram de solucionar este problema.

Como validação final foi testado o habilitar/deshabilitar das aparafusadoras e amolamento, e os modos de funcionamento do transportador de saída. Todos os testes foram realizados com sucesso.

## 7.2 Tempo de ciclo real

Após a implementação da célula foi possível realizar o estudo do tempo de ciclo real e comparar com o simulado e pretendido pelo cliente.

No seguimento do apresentado na Subsecção 6.1.4, apresenta-se na Tabela 7.1 os diferentes processos que interferem no tempo de ciclo, com o tempo real de execução associado.

Tabela 7.1: Tempo real associado a cada processo.

Identificação		Processo	Tempo real (s)
TE	1	Entrada de peças	5
R1	10a	<i>Pick</i> de peças A e B (TE)	5
	10b	<i>Place</i> de peças A e B (MM)	5
	11a	<i>Pick</i> de peças C e D (TE)	5
	11b	<i>Place</i> de peças C e D (MM)	5
R2	12a	<i>Pick</i> do plano (armazém)	7
	12b	<i>Place</i> do plano (centrador)	3
	13a	<i>Pick</i> do quadro (MM)	3
	13b	<i>Place</i> do quadro (MF)	4
	14a	<i>Pick</i> do plano (centrador)	4
	14b	<i>Place</i> do plano (MM)	3
MM	15	Montagem das peças A e B ao plano	1
	16	Montagem das peças C e D ao plano	1
MF	17	Aparafusamento	15
	18	Amolgamento	8
TS	100	Saída do quadro	12

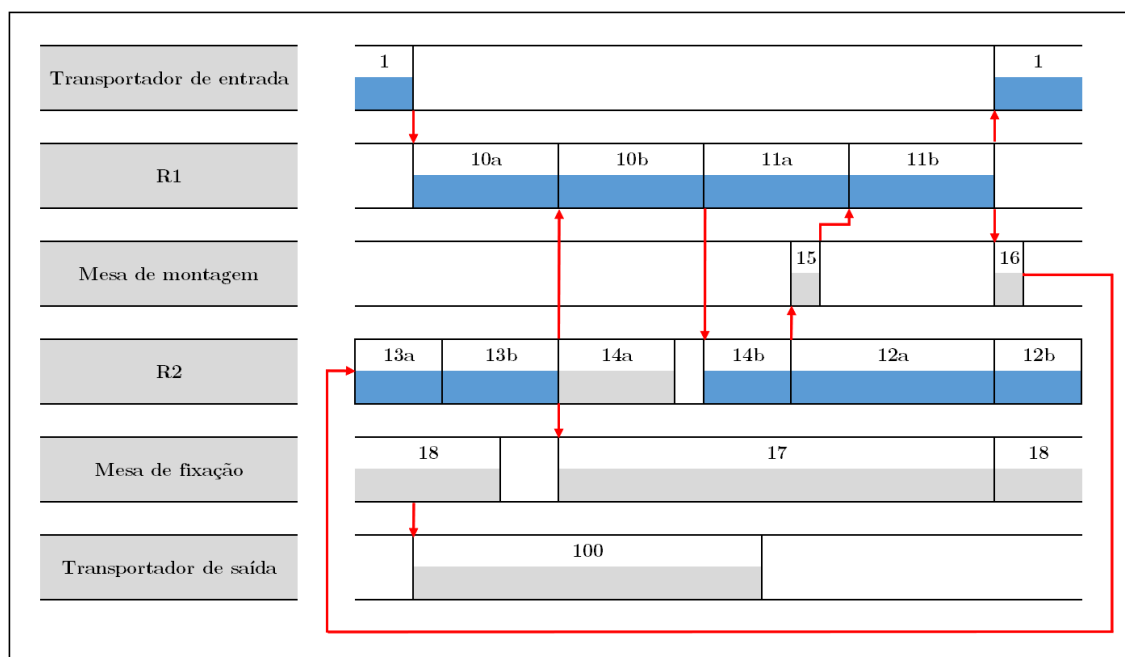
- TE, MM, MF e TS: transportador de entrada, mesa de montagem, mesa de fixação, e transportador de saída, respetivamente.

Numa primeira análise comparativa entre a tabela anterior e a Tabela 6.1, é possível constatar que os tempos assumidos pelos diferentes processos, de modo geral, encontram-se ligeiramente acima dos valores estimados, com correção de 30%. De modo geral, esta diferença acontece devido às velocidades de aproximação (baixas) e aos movimentos do tipo LIN (mais lentos que os PTP).

Com a atribuição do tempo real aos processos, apresentado na tabela anterior, é possível determinar o caminho crítico do processo da célula, as dependências da célula e o tempos de ciclo real.

Na Figura 7.4 é possível visualizar o processo da célula (quando em ciclo normal de funcionamento), bem como as tarefas realizadas em simultâneo, e deprender o caminho crítico e dependências de tarefas.

Através deste estudo consegue-se deprender que o tempo de ciclo será ditado pelo conjunto de tarefas que se encontram no caminho crítico. Através da análise da figura anterior, verifica-se que existem dois caminhos críticos, sendo eles: 13a, 13b, 10b, 14b,



- cinzento: indicação de tempo de processamento;
- azul: indicação de tempo de processamento e de caminho crítico;
- vermelho: dependências de tarefas.

Figura 7.4: Tempo de ciclo real.

12a e 12b ou 1, 10a, 10b, 11a e 11b. O resultado do tempo real é de 25s, resultando em 2,4 quadros/min.

Comparando o resultado do tempo real (2,4 quadros/min) com o pretendido pelo cliente (2,0 quadros/min a 2,5 quadros/min), depende-se que se estará de encontro com o requisito.

### 7.3 Sumário de capítulo

Em suma, neste capítulo foram abordados os testes e resultados obtidos. Os testes foram realizados na RobotSol e no cliente. Na empresa validaram-se os alcances e os *grippers* dos robôs com recurso a um *software* dedicado para o efeito. Em paralelo desenvolveu-se o *software* que permitiu validar as mesas de montagem e de fixação, e testou-se os respetivos componentes.

Numa fase seguinte, no cliente, foram realizados testes exaustivos a todo o sistema desenvolvido. Estes últimos testes resultaram na validação do sistema implementado.

Por fim, realizou-se a análise do tempo de ciclo real e a comparação com o tempo de ciclo estimado. Através do estudo do tempo de ciclo real validou-se o requisito de cadência de produção desejada pelo cliente.

## Capítulo 8

# Conclusões e trabalho futuro

*Neste capítulo será apresentada a satisfação dos objetivos, começando por realizar uma análise global sobre o trabalho realizado, e discutidas algumas possíveis futuras melhorias para o sistema desenvolvido.*

### 8.1 Satisfação dos objetivos

Esta tese tinha como principal objetivo o desenvolvimento de uma célula automatizada para a montagem de quadros brancos. Nesta célula, os principais intervenientes são os robôs e as mesas. Os robôs possuem a função de manipular as diferentes peças, entre os diferentes componentes, e as mesas a função de montar, fixar e amolgar o quadro. Esta célula surge na sequência do melhoramento do processo de montagem e fixação de quadros do cliente, tornando o mesmo mais eficiente, tendo como principal requisito o tempo de ciclo.

A robótica e a automação aplicadas neste tipo de indústria demonstram ser uma mais valia. Com a automatização dos processos associados à montagem e fixação de quadros, os operadores deixam de realizar trabalhos monótonos, repetitivos e fisicamente desafiantes, desempenhando funções na célula com melhores condições. Além disto, a automatização traduz-se no aumento de produtividade e a garantia de repetibilidade no processo. Após a realização do estudo, da simulação, da implementação e dos testes é possível afirmar que os objetivos definidos no início da dissertação foram cumpridos com sucesso.

No início desta dissertação foi realizado um estudo teórico relativamente à robótica e automação industrial. Este estudo começou pela apresentação de um breve enquadramento histórico da robótica e dos seus impulsionadores. De seguida, apresentaram-se algumas das várias definições de robô, para diferentes organizações, as leis da robótica, enunciadas pelo escritor e cientista russo Isaac Asimov, e as vantagens e desvantagens do uso dos robôs.

Seguidamente abordaram-se os constituintes mecânicos de um robô industrial e apresentaram-se as terminologias de maior ênfase na aplicabilidade da robótica. Para

terminar o estudo da robótica, apresentaram-se os conceitos de dinâmica e cinemática, os tipos de programação - *online* e *offline* - e os tipos de sistemas de controlo de movimento.

Posteriormente, foram abordados alguns conceitos relativos à automação industrial. Nestes, começou por se apresentar um breve enquadramento do PLC, segundo as vertentes histórica e de arquitetura do PLC, e foram apresentados alguns conceitos relativos aos sistemas de produção, da pneumática, das redes industriais e da segurança.

No seguimento da dissertação, apresentaram-se alguns casos de estudo que vão de encontro com o âmbito desta tese, abordando-se conceitos que se encontram presentes no trabalho final apresentado. Estes conceitos teóricos tiveram como objetivo conhecer alguns aspetos relativos à área da robótica e da automação industrial.

Após a abordagem teórica, realizou-se o desenvolvimento e implementação do projeto. Numa primeira fase descreveu-se o processo do sistema e apresentaram-se os diferentes componentes da célula de trabalho, com algum detalhe, tendo como objetivo definir o comportamento da célula, para a realização das movimentações e/ou orientações das peças, e a montagem e fixação. Aqui, também se validaram os *grippers* para os limites da massa para os centros de massa e a simulação das trajetórias. Posteriormente apresentaram-se os programas desenvolvidos para os robôs, PLC e HMI.

Por fim, realizaram-se os testes e resultados do sistema que permitiram validar o seu funcionamento. Foi ainda analisado o tempo de ciclo real, em comparação com o tempo de ciclo estimado, e verificou-se que o tempo de ciclo real é mais elevado. Contudo, o tempo de ciclo real encontra-se dentro do desejado pelo cliente, cumprindo assim com este requisito.

## 8.2 Futuras melhorias

Todos os objetivos foram alcançados com sucesso. Todavia, existem melhorias que se poderiam realizar no sistema. Um dos aspetos que poderia ser melhorado é a mesa de montagem. O produto base do quadro é um plano contraplacado que possui cotas variáveis, dependendo das condições atmosféricas e do processo de produção. A variação das cotas influencia diretamente o processo de montagem, podendo representar uma falha na montagem do sistema. A falha na montagem pode ser minimizada realizando a afinação mecânica da mesa - a qual não é de fácil afinação - e dos respetivos sensores dos cilindros pneumáticos.

O armazém poderia ser outro sistema a melhorar. Este permite o armazenamento de sensivelmente 60 planos, pelo que se o sistema realizasse um tempo de ciclo de 2,5 quadros/min (melhor tempo de ciclo pedido pelo cliente) representaria um abastecimento do armazém a cada 24 min. Atualmente, este abastecimento representa paragens da célula, para o abastecimento manual de um plano de cada vez, pelo operador. Assim, de modo a minimizar as paragens, a maximizar o rendimento da célula e dado o espaço

existente na célula, o sistema de armazenamento poderia ser substituído, por exemplo, por um armazém de troca automática.

As aparafusadoras são um sistema do qual não se obtém qualquer tipo de *feedback*. O controlo do aparafusamento é realizado através de um determinado tempo e pelo *feedback* dos sensores presentes nos cilindros pneumáticos, inerentes às aparafusadoras. No caso do aparafusamento não ser realizado com sucesso, da aparafusadora não possuir parafusos ou de haver um problema no débito do parafuso para a pistola de aparafusamento, não haverá uma forma direta de o sistema saber.

A verificação de qualidade do produto final será realizada por um operador no transportador de saída. Esta validação poderia ser realizada com recurso a um sistema que fizesse a inspeção visual do produto. Deste modo, o cliente pouparia a permanência do operador, quase que constante, no transportador de saída.



# Referências

- [1] B. Siciliano e O. Khatib, *Springer Handbook of Robotics*, 2nd ed. Springer International Publishing, 2016.
- [2] IFR, “Global industrial robot sales doubled over the past five years,” outubro 2018. Disponível em: <https://ifr.org/ifr-press-releases/news/global-industrial-robot-sales-doubled-over-the-past-five-years>. Acedido pela última vez a 22 de novembro de 2018.
- [3] L. Figueiredo, “Evolução histórica,” março 2018. Disponível em: [https://moodle.isep.ipp.pt/pluginfile.php/205960/mod\\_resource/content/5/T1%20Sistemas%20de%20producao%20-%20Evolucao%20Historica%20v2018.pdf](https://moodle.isep.ipp.pt/pluginfile.php/205960/mod_resource/content/5/T1%20Sistemas%20de%20producao%20-%20Evolucao%20Historica%20v2018.pdf). Acedido pela última vez a 22 de novembro de 2018.
- [4] IFR, “Robot density rises globally,” fevereiro 2018. Disponível em: <https://ifr.org/ifr-press-releases/news/robot-density-rises-globally>. Acedido pela última vez a 23 de novembro de 2018.
- [5] IFR, “Robots create jobs – new research,” abril 2018. Disponível em: <https://ifr.org/ifr-press-releases/news/robots-create-jobs-new-research>. Acedido pela última vez a 23 de novembro de 2018.
- [6] D. Birkett, “Leonardo: artist amp; engineer,” *Engineering Technology*, vol. 11, n.º 1, pp. 68–71, fevereiro 2016, acedido pela última vez a 28 de setembro de 2018. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7592640>.
- [7] M. E. Rosheim, “In the footsteps of leonardo articulated anthropomorphic robot,” *IEEE Robotics Automation Magazine*, vol. 4, n.º 2, pp. 12–14, junho 1997, acedido pela última vez a 1 de outubro de 2018. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/591641>.
- [8] S. Worrall, “What made leonardo da vinci a genius?” National Geographic, novembro 2017. Disponível em: <https://news.nationalgeographic.com/2017/11/leonardo-da-vinci-genius-walter-isacson/>. Acedido pela última vez a 28 de setembro de 2018.
- [9] D. Frazão, “Biografia de leonardo da vinci,” eBiografia, agosto 2018. Disponível em: [https://www.ebiografia.com/leonardo\\_vinci/](https://www.ebiografia.com/leonardo_vinci/). Acedido pela última vez a 28 de setembro de 2018.
- [10] A. Davis, “History of robotics: Timeline,” IEEE, abril 2017. Disponível em: <http://theinstitute.ieee.org/tech-history/technology-history/timeline-the-rise-of-robots>. Acedido pela última vez a 28 de setembro de 2018.

- [11] M. F. Stollenga, “Advances in humanoid control and perception,” Tese de Doutorado, Faculty of Informatics of the Università della Svizzera Italiana, maio 2016, acessado pela última vez a 1 de outubro de 2018. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/304346489\\_Advances\\_in\\_Humanoid\\_Control\\_and\\_Perception](https://www.researchgate.net/publication/304346489_Advances_in_Humanoid_Control_and_Perception).
- [12] S. Y. Nof, *Handbook of Industrial Robotics*, 2nd ed. Wiley, 1999.
- [13] J. Pearce, “George c. devol, inventor of robot arm, dies at 99,” *The New York Times*, agosto 2011. Disponível em: <https://www.nytimes.com/2011/08/16/business/george-devol-developer-of-robot-arm-dies-at-99.html>. Acessado pela última vez a 28 de setembro de 2018.
- [14] S. J. Keating, “Renaissance robotics: Novel applications of multipurpose robotic arms spanning design fabrication, utility, and art,” Tese de Mestrado, Massachusetts Institute of Technology, setembro 2012, acessado pela última vez a 28 de setembro de 2018. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/279815778\\_MIT\\_MSc\\_Thesis\\_-\\_Renaissance\\_robotics\\_novel\\_applications\\_of\\_multipurpose\\_robotic\\_arms\\_spanning\\_design\\_fabrication\\_utility\\_and\\_art](https://www.researchgate.net/publication/279815778_MIT_MSc_Thesis_-_Renaissance_robotics_novel_applications_of_multipurpose_robotic_arms_spanning_design_fabrication_utility_and_art).
- [15] E. Garcia, M. A. Jimenez, P. G. D. Santos, e M. Armada, “The evolution of robotics research,” *IEEE Robotics Automation Magazine*, vol. 14, n.º 1, pp. 90–103, março 2007, acessado pela última vez a 28 de setembro de 2018. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4141037>.
- [16] R. N. Jazar, *Theory of Applied Robotics: Kinematics, Dynamics, and Control*, 2nd ed. Springer US, 2010.
- [17] S. . Committee ISO/TC, “Iso 8373:2012(en),” *IEEE*, março 2012, acessado pela última vez a 1 de outubro de 2018. Disponível em: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:8373:ed-2:v1:en>.
- [18] BARA, “Robots,” maio 2016. Disponível em: <http://www.bara.org.uk/definition-of-robots.html>. Acessado pela última vez a 3 de outubro de 2018.
- [19] M. F. d. S. Silva, “Introdução à robótica,” outubro 2017. Disponível em: [https://moodle.isep.ipp.pt/pluginfile.php/176488/mod\\_resource/content/3/ROBIN\\_Cap\\_1\\_Introducao\\_Robotica\\_2017\\_18.pdf](https://moodle.isep.ipp.pt/pluginfile.php/176488/mod_resource/content/3/ROBIN_Cap_1_Introducao_Robotica_2017_18.pdf). Acessado pela última vez a 2 de outubro de 2018.
- [20] A. M. Lopes, “Manipuladores de estrutura paralela,” março 2002. Disponível em: [https://paginas.fe.up.pt/~aml/maic\\_files/Rob\\_para.pdf](https://paginas.fe.up.pt/~aml/maic_files/Rob_para.pdf). Acessado pela última vez a 2 de outubro de 2018.
- [21] M. F. d. S. Silva, “Noções básicas de robótica,” outubro 2017. Disponível em: [https://moodle.isep.ipp.pt/pluginfile.php/176490/mod\\_resource/content/3/ROBIN\\_Cap\\_2\\_Nocoos\\_Basicas\\_Robotica\\_\\_2017\\_18.pdf](https://moodle.isep.ipp.pt/pluginfile.php/176490/mod_resource/content/3/ROBIN_Cap_2_Nocoos_Basicas_Robotica__2017_18.pdf). Acessado pela última vez a 2 de outubro de 2018.
- [22] A. d. M. e. Neto, “Robótica industrial,” fevereiro 2017. Disponível em: <https://www.ime.usp.br/~adao/ROBOTICAINDUSTRIAL1.pdf>. Acessado pela última vez a 12 de outubro de 2018.

- [23] P. V. G. Simplício, B. R. Lima, e J. A. Junkes, “Manipuladores robóticos industriais,” em *Cadernos de Graduação - Ciências Exatas e Tecnológicas*, vol. 3, outubro 2016, pp. 85–94, acessado pela última vez a 12 de outubro de 2018. Disponível em: <https://periodicos.set.edu.br/index.php/cadernosexatas/article/viewFile/3572/1950>.
- [24] V. F. Romano, *Robótica Industrial: Aplicação na Indústria de Manufatura e de Processos*, 1st ed. Edgard Blucher, 2002.
- [25] Parlamento Europeu e Conselho da União Europeia, “Diretiva 1999/92/CE,” Bruxelas, pp. 57–64, dezembro 1999. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:31999L0092&from=PT>. Acessado pela última vez a 17 de junho de 2019.
- [26] M. P. Groover, *Automation, Production Systems, and Computer-Integrated Manufacturing*, 2nd ed. Prentice Hall, 2000.
- [27] M. F. d. S. Silva, “Atuadores finais para robôs industriais,” novembro 2016. Disponível em: [https://moodle.isep.ipp.pt/pluginfile.php/176490/mod\\_resource/content/3/ROBIN\\_Cap\\_2\\_Nocoas\\_Basicas\\_Robotica\\_\\_2017\\_18.pdf](https://moodle.isep.ipp.pt/pluginfile.php/176490/mod_resource/content/3/ROBIN_Cap_2_Nocoas_Basicas_Robotica__2017_18.pdf). Acessado pela última vez a 15 de outubro de 2018.
- [28] A. Şirinterlikçi, M. Tiryakioğlu, A. Bird, A. Harris, e K. Kweder, “Repeatability and accuracy of an industrial robot: Laboratory experience for a design of experiments course,” *International Journal of Modelling and Simulation*, vol. 9, n.º 2, janeiro 2009, acessado pela última vez a 8 de novembro de 2018. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/260336817\\_Repeatability\\_and\\_Accuracy\\_of\\_an\\_Industrial\\_Robot\\_Laboratory\\_Experience\\_for\\_a\\_Design\\_of\\_Experiments\\_Course](https://www.researchgate.net/publication/260336817_Repeatability_and_Accuracy_of_an_Industrial_Robot_Laboratory_Experience_for_a_Design_of_Experiments_Course).
- [29] P. S. Shiakolas, K. L. Conrad, e T. C. Yih, “On the accuracy, repeatability, and degree of influence of kinematics parameters for industrial robots,” *International Journal of Modelling and Simulation*, vol. 22, n.º 3, pp. 245–254, janeiro 2002, acessado pela última vez a 8 de novembro de 2018. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7592640>.
- [30] A. R. Ismail, A. Hassan, S. Shamsuddin, M. Z. Nuawi, e M. N. A. Rahman, “The performance analysis of industrial robot under loaded conditions and various distance,” *International Journal of Mathematical Models and Methods in Applied Sciences*, vol. 2, n.º 2, pp. 277–284, janeiro 2008, acessado pela última vez a 8 de novembro de 2018. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/260336817\\_Repeatability\\_and\\_Accuracy\\_of\\_an\\_Industrial\\_Robot\\_Laboratory\\_Experience\\_for\\_a\\_Design\\_of\\_Experiments\\_Course](https://www.researchgate.net/publication/260336817_Repeatability_and_Accuracy_of_an_Industrial_Robot_Laboratory_Experience_for_a_Design_of_Experiments_Course).
- [31] D. Collins, “Xy tables: How do they differ from cartesian and gantry systems?” agosto 2017. Disponível em: <https://www.linearmotiontips.com/xy-tables-how-do-they-differ-from-cartesian-and-gantry-systems/>. Acessado pela última vez a 23 de outubro de 2018.
- [32] M. F. d. S. Silva, “Métodos de programação de robôs industriais,” outubro 2017. Disponível em: [https://moodle.isep.ipp.pt/pluginfile.php/176494/mod\\_resource/content/3/ROBIN\\_Cap\\_4\\_Metodos\\_Programacao\\_Robos\\_\\_2017\\_18.pdf](https://moodle.isep.ipp.pt/pluginfile.php/176494/mod_resource/content/3/ROBIN_Cap_4_Metodos_Programacao_Robos__2017_18.pdf). Acessado pela última vez a 27 de novembro de 2018.

- [33] A. Toroman e E. Mujčić, “Application of industrial plc for controlling intelligent traffic lights,” em *2017 25th Telecommunication Forum (TELFOR)*, novembro 2017, pp. 1–4, acessado pela última vez a 28 de setembro de 2018. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8249411>.
- [34] V. Shrivastava, S. Iyer, e V. Bhajipale, “Plc based intelligent traffic control system,” em *International Journal of Industrial Electronics and Electrical Engineering*, vol. 4, novembro 2016, pp. 20–23, acessado pela última vez a 07 de outubro de 2018. Disponível em: [http://pep.ijieee.org.in/journal\\_pdf/-148179565120-23.pdf](http://pep.ijieee.org.in/journal_pdf/-148179565120-23.pdf).
- [35] OMRON, “Curso de autômatos programáveis,” julho 2010.
- [36] D. H. Hanssen, *Programmable Logic Controllers*, 2nd ed. Wiley, 2015.
- [37] F. D. Petruzella, *Programmable Logic Controllers*, 5th ed. McGraw-Hill Education, 2017.
- [38] W. Bolton, *Programmable Logic Controllers*, 6th ed. Elsevier, 2015.
- [39] PLCopen, “Logic.” Disponível em: <https://www.plcopen.org/technical-activities/logic>. Acessado pela última vez a 3 de junho de 2019.
- [40] K. Kamel e E. Kamel, *Programmable Logic Controllers: Industrial Control*. McGraw-Hill Education, 2014.
- [41] L. Figueiredo, “Sistemas flexíveis de fabrico - sistemas produtivos (parte 1),” março 2018. Disponível em: [https://moodle.isep.ipp.pt/pluginfile.php/208973/mod\\_resource/content/4/Docs/Sistemas%20Produtivos%20P1%20v1\\_4%202018.pdf](https://moodle.isep.ipp.pt/pluginfile.php/208973/mod_resource/content/4/Docs/Sistemas%20Produtivos%20P1%20v1_4%202018.pdf). Acessado pela última vez a 10 de junho de 2019.
- [42] L. Figueiredo, “Sistemas flexíveis de fabrico - sistemas produtivos (parte 2),” março 2018. Disponível em: [https://moodle.isep.ipp.pt/pluginfile.php/205968/mod\\_resource/content/3/Docs/Sistemas%20Produtivos%20P2%20v1\\_4%202018.pdf](https://moodle.isep.ipp.pt/pluginfile.php/205968/mod_resource/content/3/Docs/Sistemas%20Produtivos%20P2%20v1_4%202018.pdf). Acessado pela última vez a 10 de junho de 2019.
- [43] Renato Dall’Amico, “Fundamentos da pneumática i,” julho 2005. Disponível em: <http://www.marioloureiro.net/tecnica/pneumatica/fundamentos1.pdf>. Acessado pela última vez a 17 de junho de 2019.
- [44] Caldas Pinto, “Introdução à pneumática,” maio 2008. Disponível em: <https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/3779571818692/PneumaticaAlunos.pdf>. Acessado pela última vez a 17 de junho de 2019.
- [45] Dennis Brandão, “Acionamento e circuitos pneumáticos,” fevereiro 2016. Disponível em: [https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/2854501/mod\\_resource/content/1/Notas%20de%20Aula\\_SEL406\\_2017\\_Parte1\\_Pneum%C3%A1tica.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/2854501/mod_resource/content/1/Notas%20de%20Aula_SEL406_2017_Parte1_Pneum%C3%A1tica.pdf). Acessado pela última vez a 11 de agosto de 2019.
- [46] L. Figueiredo, “Sistemas flexíveis de fabrico - redes industriais,” junho 2017. Disponível em: [https://moodle.isep.ipp.pt/pluginfile.php/206015/mod\\_resource/content/2/Docs/Redes%20Industriais%20v2\\_1%202017.pdf](https://moodle.isep.ipp.pt/pluginfile.php/206015/mod_resource/content/2/Docs/Redes%20Industriais%20v2_1%202017.pdf). Acessado pela última vez a 10 de junho de 2019.

- [47] L. Indusmelec Material Eléctrico & Automatismos Industriais, “Redes de comunicação industrial - indusmelec,” julho 2016. Disponível em: <http://www.indusmelec.pt/newsletter/21/RedesIndustriais.pdf>. Acedido pela última vez a 11 de junho de 2019.
- [48] Parlamento Europeu e Conselho da União Europeia, “Diretiva 2006/42/EU,” Bruxelas, pp. 24–86, maio 2006. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2006:157:0024:0086:pt:PDF>. Acedido pela última vez a 15 de junho de 2019.
- [49] M. F. d. S. Silva, “Segurança na programação e operação de robôs industriais,” outubro 2011. Disponível em: [https://moodle.isep.ipp.pt/pluginfile.php/176496/mod\\_resource/content/2/ROBIN\\_Cap\\_5\\_Seguranca\\_Aplicacoes\\_Robos.pdf](https://moodle.isep.ipp.pt/pluginfile.php/176496/mod_resource/content/2/ROBIN_Cap_5_Seguranca_Aplicacoes_Robos.pdf). Acedido pela última vez a 15 de junho de 2019.
- [50] ISO/TC 199, “ISO 13855:2010(E): Safety of machinery - Positioning of safeguards with respect to the approach speeds of parts of the human body,” International Organization for Standardization, Geneva, Standard, maio 2010.
- [51] KUKA, “Otimizar máquinas-ferramenta por meio da automação.” Disponível em: <https://www.kuka.com/pt-br/ramos-de-atividade/ind%C3%BAstria-metal%C3%BArgica/m%C3%A1quinas-ferramenta>. Acedido pela última vez a 24 de junho de 2019.
- [52] FANUC, “Smart ideas for automated sheet metal processing.” Disponível em: <https://www.fanuc.eu/cz/en/industrial-automation/sheet-metal>. Acedido pela última vez a 24 de junho de 2019.
- [53] KUKA, “Kuka kr 120 r3900 ultra k loads and unloads injection molding machines at krumpholz.” Disponível em: <https://www.kuka.com/en-de/industries/solutions-database/2016/07/solution-robotics-krumpholz>. Acedido pela última vez a 25 de junho de 2019.
- [54] KUKA, “Kr 120 r3900 ultra k,” março 2019. Disponível em: [https://www.kuka.com/-/media/kuka-downloads/imported/6b77eecacf542d3b736af377562ecaa/0000189662\\_en.pdf](https://www.kuka.com/-/media/kuka-downloads/imported/6b77eecacf542d3b736af377562ecaa/0000189662_en.pdf). Acedido pela última vez a 25 de junho de 2019.
- [55] Universal Robots, “Por que a terceira maior montadora de motocicletas optou pela universal robots,” junho 2019. Disponível em: <https://www.universal-robots.com/br/hist%C3%B3rias-de-casos/bajaj-auto/>. Acedido pela última vez a 27 de junho de 2019.
- [56] J. Hwang, D. Jung, Y. Roh, K. Nam, e D. Hwang, “Low-cost automatic screw machine using a commercial electric screwdriver,” em *2012 12th International Conference on Control, Automation and Systems*, outubro 2012, pp. 1055–1060, acedido pela última vez a 30 de junho de 2019. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6393384>.
- [57] Tom Schreier, “The growing role of electromechanical actuators in automotive manufacturing,” novembro 2018. Disponível em: <https://www.robotics.org/content-detail.cfm/Industrial-Robotics->

- Case-Studies/The-Growing-Role-of-Electromechanical-Actuators-in-Automotive-Manufacturing/content\_id/7581. Acedido pela última vez a 6 de julho de 2019.
- [58] Sumake Industrial Co., Ltd., “Push start or push & trigger start shut off air screwdriver.” Disponível em: <https://www.sumake.com/push-or-push-trigger-to-start-shut-off-air-screwdriver-app48.html>. Acedido pela última vez a 8 de setembro de 2019.
- [59] KUKA Roboter GmbH, “Kr 6, 16 f, kr c4 operating instructions,” março 2013, acedido pela última vez a 8 de setembro de 2019.

## Anexo A

# Sinais digitais e analógicos da célula

### A.1 Sinais presentes no transportador de entrada

Tabela A.1: Sinais analisados para o controlo do transportador de entrada.

Componentes	Sinais	E/S	Descrição
Sensores	di_frame_a	E	Sensor de deteção de peça A
	di_frame_b	E	Sensor de deteção de peça B
	di_frame_c	E	Sensor de deteção de peça C
	di_frame_d	E	Sensor de deteção de peça D
	di_detect_error_frame	E	Sensor de deteção de erro de peças
	di_board	E	Sensor de deteção de tabuleiro
Motor 1	di_Alarm_Var1	E	Sinal de alarme do variador de frequência 1
	do_Var1_MovFwd	S	Sinal de ativação do variador de frequência do motor 1, sentido frente

### A.2 Sinais presentes na mesa de montagem

Tabela A.2: Sinais gerais analisados para o controlo da mesa de montagem.

Componentes	Sinais	E/S	Descrição
Sensores	di_air_supply	E	Sensor de pressão de ar comprimido da mesa de montagem

Tabela A.3: Sinais analisados para o controlo da mesa de montagem, referentes aos cilindros pneumáticos posicionadores.

Componentes	Sinais	E/S	Descrição
Sensores	di_pos_top1_adv	E	Sensor do cilindro Top 1 em avanço
	di_pos_top1_rtn	E	Sensor do cilindro Top 1 em avanço
	di_pos_top2_adv	E	Sensor do cilindro Top 2 em avanço
	di_pos_top2_rtn	E	Sensor do cilindro Top 2 em avanço
	di_pos_base1_adv	E	Sensor do cilindro Base 1 em avanço
	di_pos_base1_rtn	E	Sensor do cilindro Base 1 em avanço
	di_pos_base2_adv	E	Sensor do cilindro Base 2 em avanço
	di_pos_base2_rtn	E	Sensor do cilindro Base 2 em avanço
	di_pos_r1_adv	E	Sensor do cilindro Right 1 em avanço
	di_pos_r1_rtn	E	Sensor do cilindro Right 1 em avanço
	di_pos_r2_adv	E	Sensor do cilindro Right 2 em avanço
	di_pos_r2_rtn	E	Sensor do cilindro Right 2 em avanço
	di_pos_l1_adv	E	Sensor do cilindro Left 1 em avanço
	di_pos_l1_rtn	E	Sensor do cilindro Left 1 em avanço
	di_pos_l2_adv	E	Sensor do cilindro Left 2 em avanço
	di_pos_l2_rtn	E	Sensor do cilindro Left 2 em avanço
Eletroválvulas	do_pos_top_adv	S	Atuação de cilindro Top para avanço
	do_pos_top_rtn	S	Atuação de cilindro Top para recuo
	do_pos_base_adv	S	Atuação de cilindros Base para avanço
	do_pos_base_rtn	S	Atuação de cilindros Base para recuo
	do_pos_r_adv	S	Atuação de cilindros Right para avanço
	do_pos_r_rtn	S	Atuação de cilindros Right para recuo
	do_pos_l_adv	S	Atuação de cilindros Left para avanço
	do_pos_l_rtn	S	Atuação de cilindros Left para recuo

Tabela A.4: Sinais analisados para o controlo da mesa de montagem, referentes aos cilindros pneumáticos do vácuo.

Componentes	Sinais	E/S	Descrição
Sensores	di_vac	E	Sensor de vácuo
	di_vac_pos1_adv	E	Sensor do cilindro Pos 1 em avanço
	di_vac_pos1_rtn	E	Sensor do cilindro Pos 1 em recuo
	di_vac_pos2_adv	E	Sensor do cilindro Pos 2 em avanço
	di_vac_pos2_rtn	E	Sensor do cilindro Pos 2 em recuo
	di_vac_pos3_adv	E	Sensor do cilindro Pos 3 em avanço
	di_vac_pos3_rtn	E	Sensor do cilindro Pos 3 em recuo
	di_vac_pos4_adv	E	Sensor do cilindro Pos 4 em avanço
	di_vac_pos4_rtn	E	Sensor do cilindro Pos 4 em recuo
	di_vac_pos5_adv	E	Sensor do cilindro Pos 5 em avanço
di_vac_pos5_rtn	E	Sensor do cilindro Pos 5 em recuo	
Eletroválvulas	do_vac	S	Atuação do gerador de vácuo
	do_vac_pos_adv	S	Atuação dos cilindros Pos para avanço
	do_vac_pos_rtn	S	Atuação dos cilindros Pos para recuo

Tabela A.5: Sinais analisados para o controlo da mesa de montagem, referentes aos cilindros de montagem.

Componentes	Sinais	E/S	Descrição
Sensores	di_asm_top_adv	E	Sensor do cilindro Asm Top em avanço
	di_asm_top_rtn	E	Sensor do cilindro Asm Top em recuo
	di_asm_base_adv	E	Sensor do cilindro Asm Base em avanço
	di_asm_base_rtn	E	Sensor do cilindro Asm Base em recuo
	di_asm_r_adv	E	Sensor do cilindro Asm Right em avanço
	di_asm_r_rtn	E	Sensor do cilindro Asm Right em recuo
	di_asm_l_adv	E	Sensor do cilindro Asm Left em avanço
	di_asm_l_rtn	E	Sensor do cilindro Asm Left em recuo
Eletroválvulas	do_asm_tops_adv	S	Atuação dos cilindros Asm Tops para avanço
	do_asm_tops_rtn	S	Atuação dos cilindros Asm Tops para recuo
	do_asm_sides_adv	S	Atuação dos cilindros Asm Sides para avanço
	do_asm_sides_rtn	S	Atuação dos cilindros Asm Sides para recuo

### A.3 Sinais presentes no armazém

Tabela A.6: Sinais analisados para o controlo do armazém.

Componentes	Sinais	E/S	Descrição
Sensores	di_warehouse_height	E	Sensor de altura (sinal analógico)

### A.4 Sinais presentes no centrador

Tabela A.7: Sinais analisados para o controlo do centrador.

Componentes	Sinais	E/S	Descrição
Sensores	di_sensor_5	E	Sensor 1 de deteção do plano
	di_sensor_6	E	Sensor 2 de deteção do plano

## A.5 Sinais presentes na mesa de fixação

Tabela A.8: Sinais analisados para o controlo da mesa de fixação, referentes aos cilindros que efetuam amolgamento.

Componentes	Sinais	E/S	Descrição
Sensores	di_punch_lt1_adv	E	Sensor do cilindro Punch LT1 em avanço
	di_punch_lt1_rtn	E	Sensor do cilindro Punch LT1 em recuo
	di_punch_lt2_adv	E	Sensor do cilindro Punch LT2 em avanço
	di_punch_lt2_rtn	E	Sensor do cilindro Punch LT2 em recuo
	di_punch_rt1_adv	E	Sensor do cilindro Punch RT1 em avanço
	di_punch_rt1_rtn	E	Sensor do cilindro Punch RT1 em recuo
	di_punch_rt2_adv	E	Sensor do cilindro Punch RT2 em avanço
	di_punch_rt2_rtn	E	Sensor do cilindro Punch RT2 em recuo
	di_punch_lb1_adv	E	Sensor do cilindro Punch LB1 em avanço
	di_punch_lb1_rtn	E	Sensor do cilindro Punch LB1 em recuo
	di_punch_lb2_adv	E	Sensor do cilindro Punch LB2 em avanço
	di_punch_lb2_rtn	E	Sensor do cilindro Punch LB2 em recuo
	di_punch_rb1_adv	E	Sensor do cilindro Punch RT1 em avanço
	di_punch_rb1_rtn	E	Sensor do cilindro Punch RT1 em recuo
	di_punch_rb2_adv	E	Sensor do cilindro Punch RT1 em avanço
	di_punch_rb2_rtn	E	Sensor do cilindro Punch RT1 em recuo
Eletroválvulas	do_punch_top_adv	S	Atuação dos cilindros Punch Top para avanço
	do_punch_top_rtn	S	Atuação dos cilindros Punch Top para recuo
	do_punch_base_rtn	S	Atuação dos cilindros Punch Base para recuo
	do_punch_base_rtn	S	Atuação dos cilindros Punch Base para avanço

Tabela A.9: Sinais analisados para o controlo da mesa de fixação, referentes aos cilindros da aparafusadora.

Componentes	Sinais	E/S	Descrição
Sensores	di_screwdriver_t1_adv	E	Sensor do cilindro Screwdriver T1 em avanço
	di_screwdriver_t1_rtn	E	Sensor do cilindro Screwdriver T1 em recuo
	di_screwdriver_t2l_adv	E	Sensor do cilindro Screwdriver T2L em avanço
	di_screwdriver_t2l_rtn	E	Sensor do cilindro Screwdriver T2L em recuo
	di_screwdriver_t2r_adv	E	Sensor do cilindro Screwdriver T2R em avanço
	di_screwdriver_t2r_rtn	E	Sensor do cilindro Screwdriver T2R em recuo
	di_screwdriver_br_adv	E	Sensor do cilindro Screwdriver BR em avanço
	di_screwdriver_br_rtn	E	Sensor do cilindro Screwdriver BR em recuo
	di_screwdriver_bl_adv	E	Sensor do cilindro Screwdriver BL em avanço
	di_screwdriver_bl_rtn	E	Sensor do cilindro Screwdriver BL em recuo
Eletroválvulas	do_screwdriver_t1_adv	S	Atuação dos cilindros Screwdriver Top 1 para avanço
	do_screwdriver_t1_rtn	S	Atuação dos cilindros Screwdriver Top 1 para avanço
	do_screwdriver_t2_rtn	S	Atuação dos cilindros Screwdriver Top 2 para avanço
	do_screwdriver_t2_rtn	S	Atuação dos cilindros Screwdriver Top 2 para avanço
	do_screwdriver_b_rtn	S	Atuação dos cilindros Screwdriver Base para avanço
	do_screwdriver_b_rtn	S	Atuação dos cilindros Screwdriver Base para avanço

Tabela A.10: Sinais analisados para o controlo da mesa de fixação, referentes aos cilindros que efetuam a paragem e centramento de quadro.

Componentes	Sinais	E/S	Descrição
Sensores	di_stopper_1_1_adv	E	Sensor do cilindro Stopper 1 1 em avanço
	di_stopper_1_1_rtn	E	Sensor do cilindro Stopper 1 1 em recuo
	di_stopper_1_2_adv	E	Sensor do cilindro Stopper 1 2 em avanço
	di_stopper_1_2_rtn	E	Sensor do cilindro Stopper 1 2 em recuo
	di_stopper_2_1_adv	E	Sensor do cilindro Stopper 2 1 em avanço
	di_stopper_2_1_rtn	E	Sensor do cilindro Stopper 2 1 em recuo
	di_stopper_2_2_adv	E	Sensor do cilindro Stopper 2 2 em avanço
	di_stopper_2_2_rtn	E	Sensor do cilindro Stopper 2 2 em recuo
Eletroválvulas	do_stopper_1_adv	S	Atuação dos cilindros Stopper 1 para avanço
	do_stopper_1_rtn	S	Atuação dos cilindros Stopper 1 para recuo
	do_stopper_2_adv	S	Atuação dos cilindros Stopper 2 para avanço
	do_stopper_2_rtn	S	Atuação dos cilindros Stopper 2 para recuo

Tabela A.11: Sinais analisados para o controlo da mesa de fixação, referentes aos sensores fotoelétricos e de controlo do motor.

Componentes	Sinais	E/S	Descrição
Sensores	di_sensor_1	E	Sensor de deteção de presença de quadro
	di_sensor_2	E	Sensor de deteção de presença de quadro
	di_sensor_3	E	Sensor de deteção de presença de quadro
Motor	di_Alarm_Var2	E	Sinal de alarme do variador de frequência 2
	do_Var2_MovFwd	S	Sinal de ativação do variador de frequência do motor 2, sentido frente
	do_Var2_MovRev	S	Sinal de ativação do variador de frequência do motor 2, sentido inverso

## A.6 Sinais presentes no transportador de saída

Tabela A.12: Sinais analisados para o controlo do transportador de saída.

Componentes	Sinais	E/S	Descrição
Sensores	di_sensor_4	E	Sensor de deteção de presença de quadro
	di_sensor_7	E	Sensor de deteção de presença de quadro
Motor	di_Alarm_Var3	E	Sinal de alarme do variador de frequência 3
	do_Var3_MovFwd	S	Sinal de ativação do variador de frequência do motor 3, sentido frente

## A.7 Sinais referentes ao robô R1

Tabela A.13: Sinais analisados para o controle do robô R1.

Componentes	Sinais	E/S	Descrição
Sensores	di_gripper1_r1_adv	E	Garra A aberta
	di_gripper1_r1_rtn	E	Garra A fechada
	di_gripper1_r1_a	E	Sensor de peça A, na garra 1
	di_gripper1_r1_b	E	Sensor de peça B, na garra 1
	di_gripper1_r2_adv	E	Garra B aberta
	di_gripper1_r2_rtn	E	Garra B fechada
	di_gripper1_r2_a	E	Sensor de peça A, na garra 2
	di_gripper1_r2_b	E	Sensor de peça B, na garra 2
Eletroválvulas	do_gripper1_r1_adv	S	Atuação da garra 1, para abrir
	do_gripper1_r1_rtn	S	Atuação da garra 1, para fechar
	do_gripper1_r2_adv	S	Atuação da garra 2, para abrir
	do_gripper1_r1_rtn	S	Atuação da garra 2, para fechar

## A.8 Sinais referentes ao robô R2

Tabela A.14: Sinais analisados para o controle do robô R2.

Componentes	Sinais	E/S	Descrição
Sensor	di_vac_gripper1_r2	E	Sensor de detecção de vácuo
Eletroválvula	do_gripper1_r2	S	Atuação de vácuo

## A.9 Sinais gerais da célula

Tabela A.15: Sinais gerais analisados para controlo da célula.

Componentes	Sinais	E/S	Descrição
Acessos	di_Psen1_Acesso	E	Pedido de acesso na porta 1
	di_Psen2_Acesso	E	Pedido de acesso na porta 2
	di_Bar2_Acesso	E	Pedido de acesso no armazém
	di_Psen1_Status_ESTOP	E	Botoneira de emergência na porta 1 premida
	di_Psen2_Status_ESTOP	E	Botoneira de emergência na porta 2 premida
	do_Psen1_Solenóide	S	Ordem de abertura da porta 1
	do_Psen2_Solenóide	S	Ordem de abertura da porta 2
	do_Azul_Warehouse	S	Luz azul no controlo de acesso do armazém
Ar comprimido	di_press_geral	E	Sensor de ar comprimido da célula
Segurança	di_seg1_status	E	Sinal do estado do relé de segurança 1
	di_seg2_status	E	Sinal do estado do relé de segurança 2
	di_seg3_status	E	Sinal do estado do relé de segurança 3
	di_seg4_status	E	Sinal do estado do relé de segurança 4
Geral	di_Verde	E	Botão verde no quadro elétrico
	di_Vermelho	E	Botão vermelho no quadro elétrico
	do_Verde_QE_Led	S	Luz verde no quadro elétrico
	do_Vermelho_QE_Led	S	Luz vermelha no quadro elétrico
	do_Laranja_QE_Led	S	Luz laranja no quadro elétrico
	do_Verde_Tower_Led	S	Luz verde na torre luminosa
	do_Vermelho_Tower_Led	S	Luz vermelha na torre luminosa

## Anexo B

# Configuração da comunicação DeviceNet

A configuração da comunicação DeviceNet referenciada ao longo deste documento encontra-se no CD disponibilizado com os ficheiros de anexo correspondentes à dissertação, de forma a possibilitar uma visualização mais detalhada.



## Anexo C

# Mapeamento dos sinais dos robôs e PLC

Os sinais e fluxogramas apresentados e/ou referenciados ao longo deste documento encontram-se no CD disponibilizado com os ficheiros de anexo correspondentes à dissertação, de forma a possibilitar uma visualização mais detalhada.



## Anexo D

# Fluxograma do robô R1 e R2

Os fluxogramas referenciados ao longo deste documento encontram-se no CD disponibilizado com os ficheiros de anexo correspondentes à dissertação, de forma a possibilitar uma visualização mais detalhada.



## Anexo E

# Programas desenvolvidos: PLC e robôs

Os programas referenciados ao longo deste documento encontram-se no CD disponibilizado com os ficheiros de anexo correspondentes à dissertação, de forma a possibilitar uma visualização mais detalhada.



## Anexo F

# Fluxogramas inerentes ao programa do PLC

### F.1 Fluxograma referente ao transportador de entrada

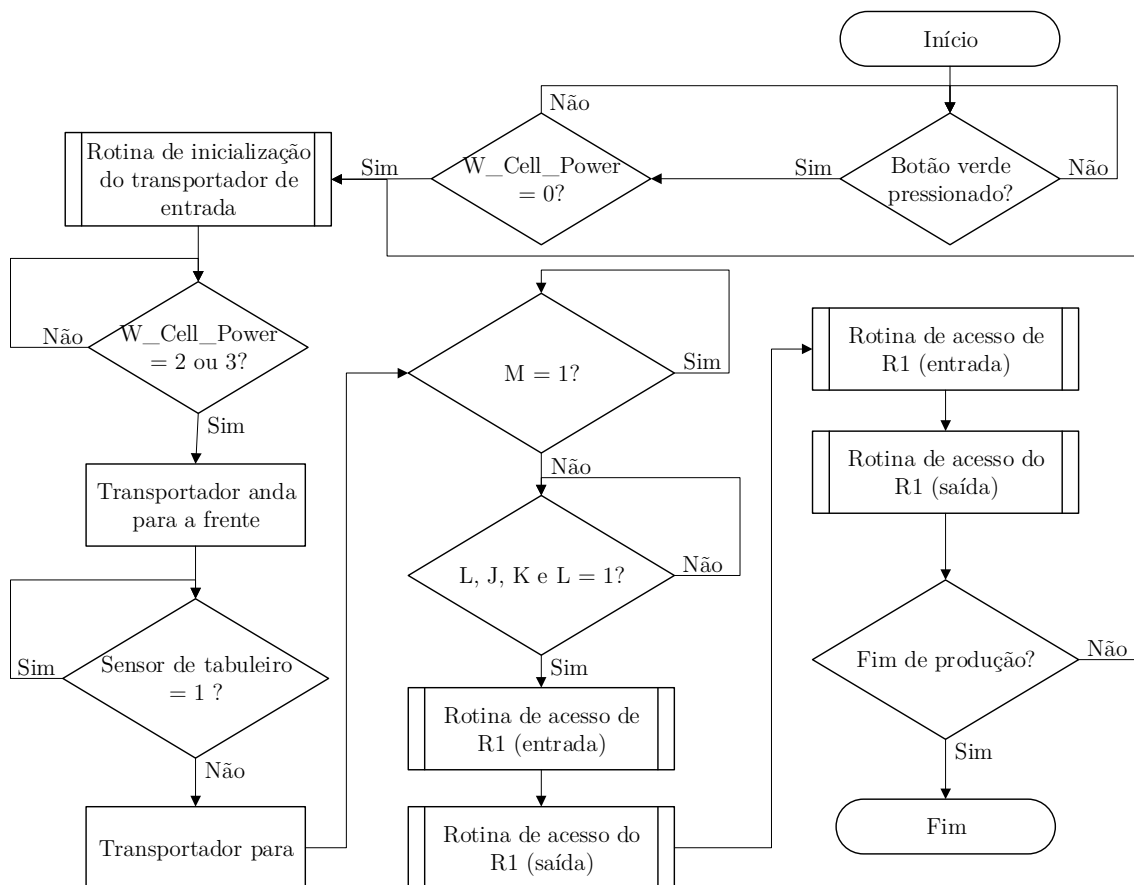


Figura F.1: Fluxograma referente à *main*: seção *ConveyorIn*.

## F.2 Fluxograma referente à mesa de montagem

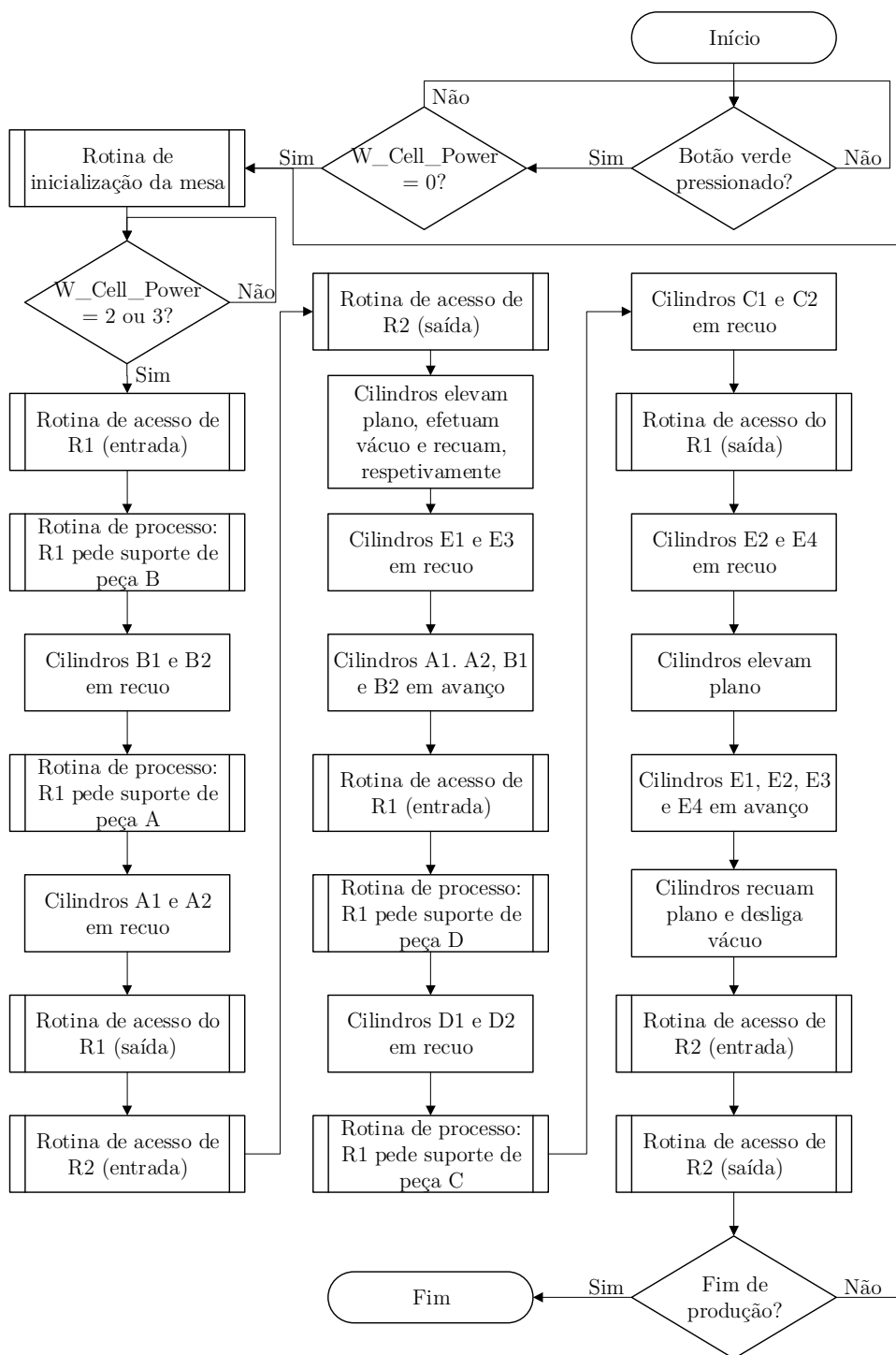
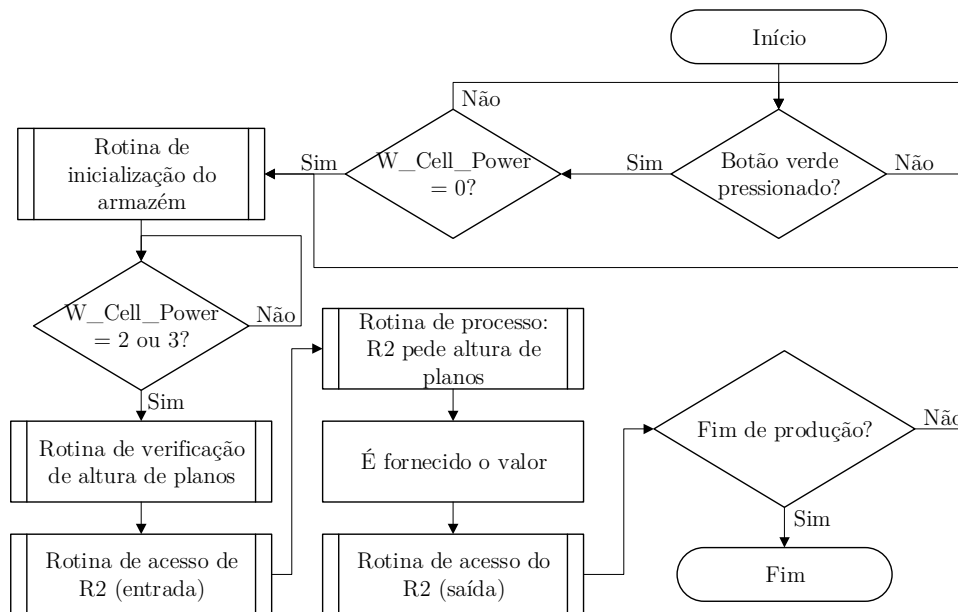


Figura F.2: Fluxograma referente à *main*: secção *TableIndex*.

## F.3 Fluxograma referente ao armazém

Figura F.3: Fluxograma referente à *main*: secção *Warehouse*.

## F.4 Fluxograma referente à mesa de fixação

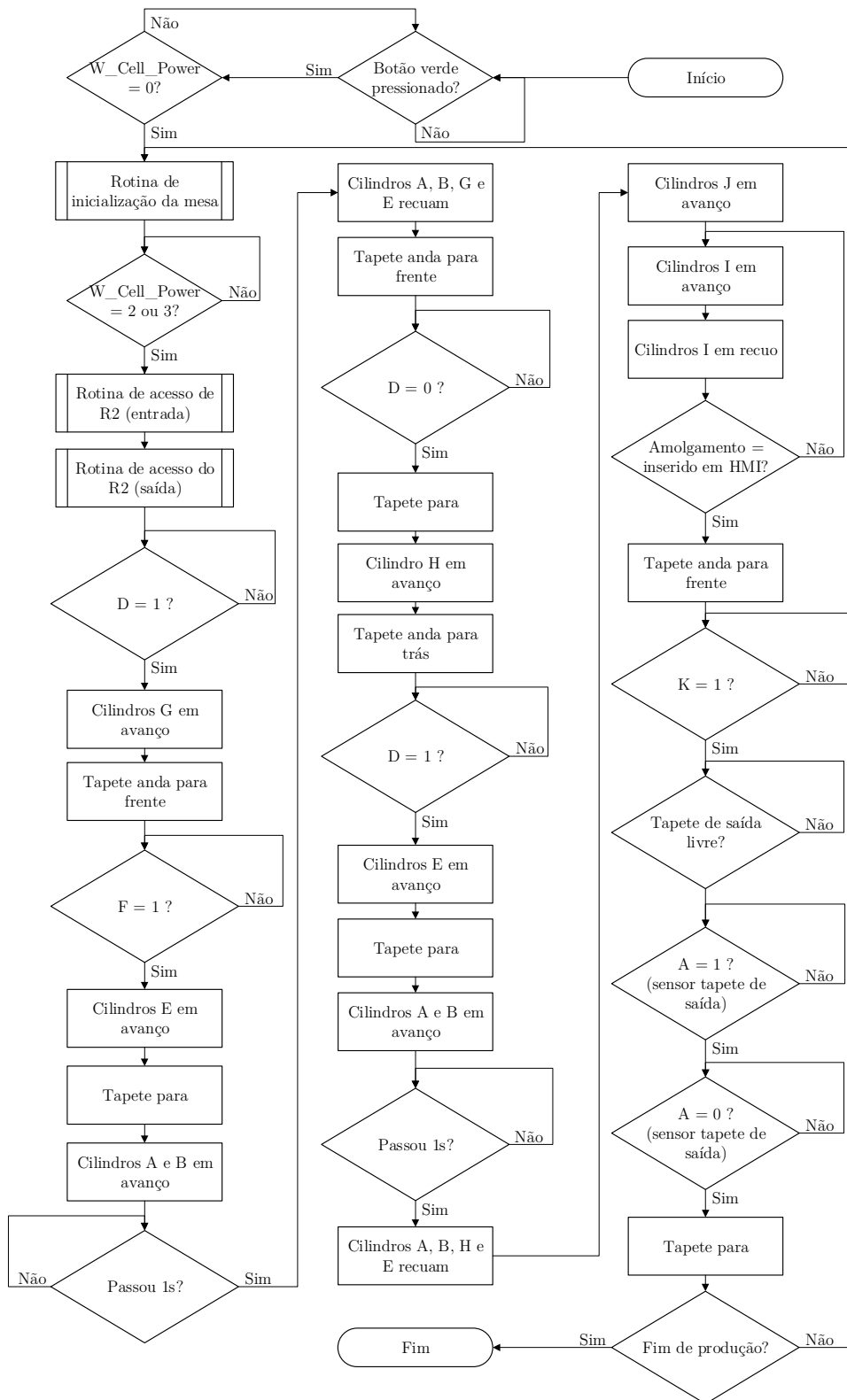
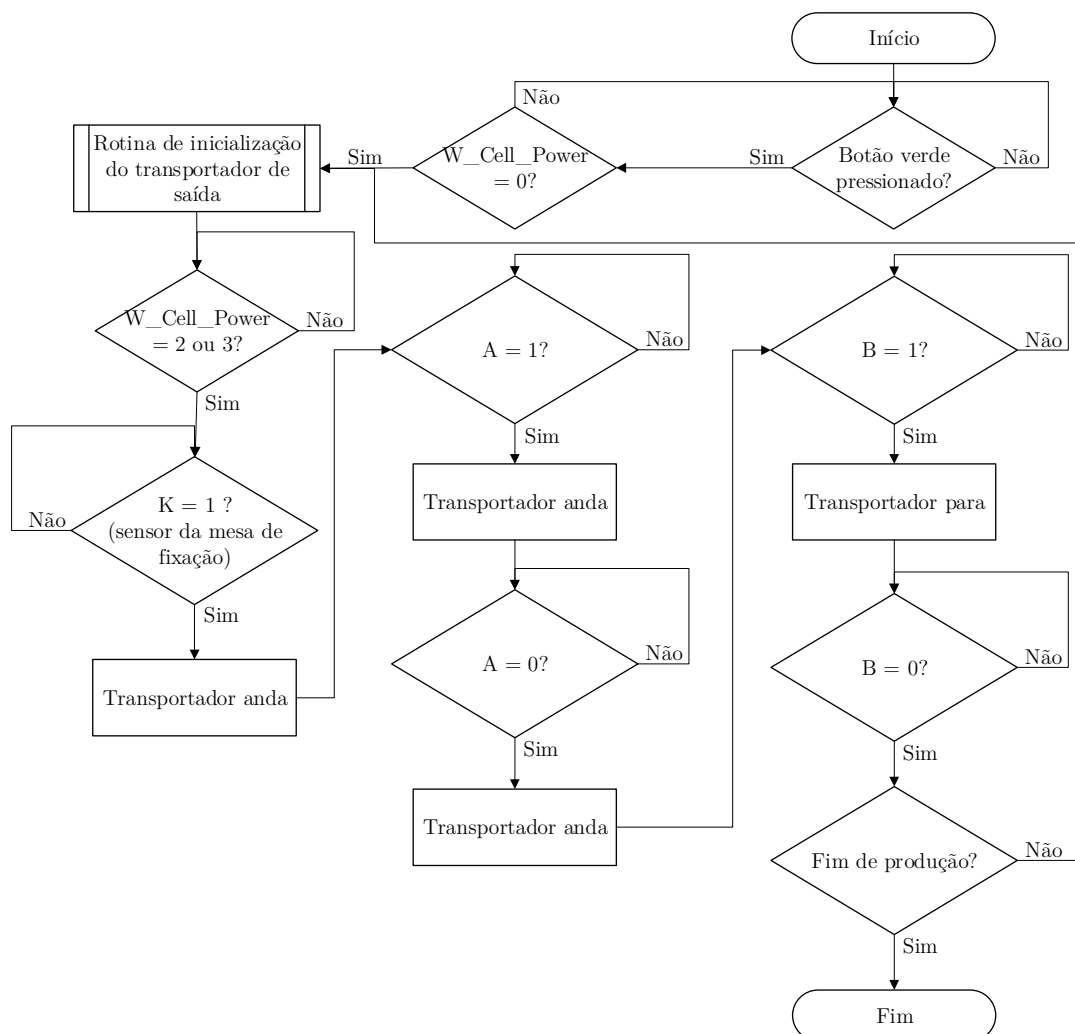


Figura F.4: Fluxograma referente à *main*: secção *TableFix*.

## F.5 Fluxograma referente ao transportador de saída

Figura F.5: Fluxograma referente à *main*: secção *ConveyorOut*.



## Anexo G

# Consola HMI

O programa da consola HMI referenciado ao longo deste documento encontra-se no CD disponibilizado com os ficheiros de anexo correspondentes à dissertação, de forma a possibilitar uma visualização mais detalhada.



## Anexo H

# Manual do utilizador

O manual de utilizador referenciado ao longo deste documento encontra-se no CD disponibilizado com os ficheiros de anexo correspondentes à dissertação, de forma a possibilitar uma visualização mais detalhada.