



Sistema robotizado para extração de peças e lubrificação de moldes de injeção de alumínio.

MIGUEL FONSECA MIRA

outubro de 2019

Sistema robotizado de extração de peças e lubrificação de moldes de injeção de alumínio

Miguel Fonseca Mira



Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Área de Especialização de Automação e Sistemas

Departamento de Engenharia Eletrotécnica

Instituto Superior de Engenharia do Porto

2019

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

Candidato: Miguel Fonseca Mira, Nº 1141096, 1141096@isep.ipp.pt
Orientação científica: Manuel Fernando dos Santos Silva, mss@isep.ipp.pt
Empresa: RobotSol - Engenharia Industrial, SA.
Supervisão: Mário Miguel Cardoso Tavares Silva Martins,
mario.martins@robotsol.com



Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Área de Especialização de Automação e Sistemas

Departamento de Engenharia Eletrotécnica

Instituto Superior de Engenharia do Porto

14 de Outubro de 2019

*“Failure is central to engineering.
Every single calculation that an engineer makes is a failure calculation.
Successful engineering is all about understanding
how things break or fail.”*

Henry Petroski

Agradecimentos

Agradeço aos meus pais todos os incentivos e apoios prestados durante o percurso no ensino superior, fundamentais para a continuação dos meus estudos.

Agradeço também aos meus orientadores Prof. Doutor Manuel Fernando dos Santos Silva e Mestre Eng. Mário Miguel Cardoso Tavares Silva Martins pela oportunidade, todo o conhecimento transmitido, no momento em que a inexperiência no mundo da automação e robótica industrial falava mais alto, todo o apoio prestado na escrita desta dissertação e pelos conselhos valiosos, vitais nas alturas mais trágicas. Aos dois um especial obrigado.

Agradeço ainda aos meus colegas Bernardo Pedrosa, Vítor Sousa e Luís Almeida pela amizade, espírito de equipa e ambiente de entreaajuda criados ao longo da realização desta dissertação na RobotSol.

Por último, mas não menos importante, agradeço ao Eng. Jorge Oliveira e ao Eng. Manuel Silva pela amizade e partilha de conhecimento científico e ao Prof. António Gomes pelo apoio e ajuda na revisão deste documento. Agradeço também a toda a equipa de automação, projeto mecânico e projeto elétrico da RobotSol e ainda a todos os familiares e amigos, que contribuíram de alguma forma na minha formação pessoal e académica.

A todos, o meu mais sincero obrigado.

Miguel Mira

Resumo

A constante evolução dos métodos de produção/processamento industriais são consequência de uma era de consumismo acentuada onde os produtos têm um ciclo de vida cada vez mais curto. Este consumismo obriga as indústrias a inovarem e melhorarem os seus métodos de produção através da implementação de soluções tecnologicamente avançadas para melhorarem a sua produtividade e eficiência, a qualidade do produto final e reduzirem os custos de produção. Estes objetivos podem ser atingidos através da implementação de robôs industriais. Este tipo de soluções confere ao sistema um grau elevado de flexibilidade, podendo-se reaproveitar a maquinaria em sistemas futuros. Além da melhoria de processo, a robótica industrial também permite a melhoria das condições de trabalho dos operadores das fábricas. Particularizando, a indústria da fundição injetada apresenta um ambiente de trabalho agreste para o ser humano, uma vez que este está em contacto direto com temperaturas elevadas, exposição excessiva a poeiras e químicos e ainda manuseamento de objetos pesados, podendo causar lesões ou doenças aos operadores deste tipo de indústria, a curto ou longo prazo.

A presente tese de Mestrado aborda a criação, desenvolvimento e implementação de células robotizadas para extração de peças de alumínio e lubrificação de moldes para a indústria da fundição injetada. Após a definição inicial do modo operativo do sistema a implementar, é feito um estudo de posicionamento dos vários componentes que integram a célula para garantir a integridade da solução. Seguidamente são efetuadas simulações de trajetórias *offline* a fim de compreender o melhor tipo de movimentação entre as várias operações de cada manipulador. Após a simulação é desenvolvido todo o código que controlará o braço robótico em ambiente de simulação, possibilitando o teste e validação do mesmo. Uma vez finalizado todo o trabalho de simulação, são efetuados testes de validação a todos os elementos que constituem a célula. Após este passo, procede-se à implementação da célula em cliente. Após a retificação do código do robô, é feito um acompanhamento de produção para validação do bom funcionamento do sistema.

Palavras-Chave: Robótica, Robótica industrial, Automação, ABB, RobotStudio, Injeção de alumínio, Fundição de alumínio.

Abstract

The constant evolution of industrial production methods are the result of the new consumerism patterns where products have a shorter life cycle. This consumerism forces industries to innovate and improve their production methods by implementing technologically advanced solutions to improve their productivity and efficiency, improve final product quality and reduce production costs. These goals can be achieved by implementing industrial robots. These give a high degree of flexibility and they can be reused in future systems. In addition to process improvement, industrial robots also allow for improved working conditions. The injected foundry industry presents a harsh working environment for humans, as they are in direct contact with high temperatures, excessive exposure to dust and chemicals and handling of heavy parts and objects, which may cause injury or illness, in short or long term.

This thesis addresses the creation, development and implementation of robotic cells for extracting aluminum parts and mold lubrication for the injected foundry industry. After the initial definition of the operating mode of the system, it's made a layout study of the various components that integrate the cell, to ensure the integrity of the solution. Trajectory offline simulations are then performed in order to understand the best type of movement between the various operations of each robotic arm. After the simulation it is made all the code that will control the robotic arm in a simulation environment. Once all the simulation work is completed, tests and validation are performed on all elements that make up the cell. After this step, the cell is implemented on the client. After rectification of the robot program, a production follow-up is performed to validate that the system is functioning well.

Keywords: Robotics, Industrial robotics, Automation, ABB, RobotStudio, Aluminium die casting, Aluminium foundry.

Conteúdo

Agradecimentos	v
Conteúdo	xi
Lista de Figuras	xvii
Lista de Tabelas	xxi
Acrónimos	xxiii
1 Introdução	1
1.1 Contextualização	1
1.2 Objetivos	2
1.3 Calendarização	3
1.4 Organização da Dissertação	5
2 Fundamentos de Robótica Industrial	7
2.1 Contextualização Histórica	7
2.1.1 Primeira Geração (1950-1967)	9
2.1.2 Segunda Geração (1968-1977)	11
2.1.3 Terceira Geração (1978-1999)	12
2.1.4 Quarta Geração (a partir do ano 2000)	14
2.2 Constituição de um Robô Industrial	15
2.2.1 Controlador	16
2.2.2 Interface com Utilizador (Teach Pendant)	16
2.2.3 Manipulador Robótico	17
2.2.4 Atuadores	17
2.2.4.1 Atuadores Hidráulicos	18
2.2.4.2 Atuadores Pneumáticos	18
2.2.4.3 Atuadores Elétricos	18
2.2.4.4 Atuação Direta ou Indireta	19
2.2.5 Sensores	19
2.2.6 Atuador Final	19

2.2.6.1	Garras	20
2.2.6.2	Ferramentas	21
2.3	Tipologia e Volume de Trabalho	22
2.3.1	Robôs de Estrutura Série	22
2.3.1.1	Configuração Cartesiana	22
2.3.1.2	Configuração Cilíndrica	23
2.3.1.3	Configuração Esférica	23
2.3.1.4	Configuração SCARA	24
2.3.1.5	Configuração Articulada	24
2.3.2	Robôs de Estrutura Paralela	24
2.4	Sistemas de Controlo de Movimento	25
2.4.1	Movimento de Sequência Fixa	25
2.4.2	Movimento Ponto a Ponto (PTP)	25
2.4.3	Movimento Contínuo (CP)	25
2.4.4	Controlo Inteligente	26
2.5	Terminologia da Robótica	26
2.5.1	Capacidade de Carga	26
2.5.2	Graus de Liberdade	26
2.5.3	Velocidade	27
2.5.4	Aceleração	27
2.5.5	Repetibilidade	27
2.5.6	Resolução e Precisão	27
2.6	Cinemática e Singularidades	28
2.6.1	Cinemática Direta	28
2.6.2	Cinemática Inversa	28
2.6.3	Singularidades	29
2.7	Programação de Robôs Industriais	29
2.7.1	Programação <i>Online</i>	30
2.7.2	Programação <i>Offline</i>	30
2.8	Suma do Capítulo	30
3	Implementação de Células Robotizados	33
3.1	Aplicações Industriais da Robótica	33
3.1.1	Operações de Manuseamento	34
3.1.2	Operações de Montagem e Inspeção	35
3.1.3	Operações de Processamento	36
3.2	Segurança	38
3.2.1	Medidas de Proteção Passivas	39
3.2.2	Medidas de Proteção Ativas	39
3.3	Redes de Comunicação	40
3.3.1	Ethernet Industrial	40
3.3.2	PROFINET	41

3.3.3	Ethernet/IP	41
3.4	Metodologia de Implementação	42
3.4.1	Planeamento	42
3.4.2	Desenvolvimento	43
3.4.3	Fase de Testes	43
3.4.4	Instalação	43
3.4.5	Arranque e Acompanhamento	44
3.5	Suma do Capítulo	44
4	Robotização na Indústria da Fundição Injetada	45
4.1	Indústria da Fundição	46
4.2	Fundição Injetada	46
4.2.1	Injetoras de Câmara Quente	47
4.2.2	Injetoras de Câmara Fria	48
4.3	Descrição do Processo de Fundição	49
4.4	Casos de Estudo - uso de robôs ABB para operações de fundição .	51
4.4.1	Apresentação da Solução	51
4.4.2	Conclusão	52
4.5	Casos de Estudo - internacionalização e aumento de produção atra-	
	vés da robotização na MP Filtri	52
4.5.1	Apresentação da Solução	52
4.5.2	Conclusão	54
4.6	Casos de Estudo - robotização de uma linha com três células de	
	fundição de alumínio	54
4.6.1	Apresentação da Solução	54
4.6.2	Conclusão	56
4.7	Casos de Estudo - célula de fundição injetada de alumínio com um	
	robô kuka	56
4.7.1	Apresentação da Solução	56
4.7.2	Conclusão	57
4.8	Suma do Capítulo	58
5	Definição da Célula e Construção do Modelo de Simulação	59
5.1	Descrição do Problema	59
5.2	Modo Operativo e Constituintes da Solução	61
5.2.1	Máquina Injetora	62
5.2.2	Prensa	63
5.2.3	Matriz de Sensores	64
5.2.4	Tina de Água	64
5.2.5	Rampas	65
5.2.6	Robô Extrator	65
5.2.6.1	Manipulador	65

5.2.6.2	Pedestal	66
5.2.6.3	Atuador Final	67
5.2.7	Robô Lubrificador	69
5.2.7.1	Manipulador	69
5.2.7.2	Pedestal	70
5.2.7.3	Atuador Final	70
5.2.8	Quadro de Fluídos	72
5.2.9	Segurança	72
5.3	<i>Layout</i> da Célula	73
5.4	Planeamento de Trajetórias	74
5.4.1	Injetora	75
5.4.2	Matriz de Sensores	75
5.4.3	Tina de Água	76
5.4.4	Prensa	77
5.4.5	Rampa de Inspeção	77
5.4.6	Rampa de Não Conformes (Nok)	78
5.4.7	Lubrificação e Sopro	79
5.5	Zonas de Trabalho	80
5.6	Suma do Capítulo	82
6	Programação dos Robôs	83
6.1	Comunicações e Sinais Digitais	83
6.2	Programação do Robô Extrator	85
6.2.1	Rotina Principal (main)	85
6.2.2	Extração	89
6.2.3	Inspeção	91
6.2.4	Arrefecimento	92
6.2.5	Prensa	93
6.2.6	Rampa de Inspeção e Rampa Nok	94
6.3	Programação Robô Lubrificador	95
6.3.1	Rotina Principal (main)	95
6.3.2	Lubrificação	98
6.3.3	Sopro	99
6.4	Zonas de Trabalho	100
6.5	Interface com o Operador	100
6.6	Suma do Capítulo	102
7	Implementação e Resultados	103
7.1	Testes Internos	103
7.2	Implementação em Cliente	106
7.3	Tempo de Ciclo	112
7.4	Suma do Capítulo	113

8 Conclusão	115
8.1 Síntese do Trabalho Desenvolvido	115
8.2 Melhorias e Futuros Desenvolvimentos	117
Bibliografia	119
A Sinais	125
A.1 Robô extrator	125
A.1.1 Rede PROFINET	125
A.1.2 Carta de Sinais Digitais	126
A.1.3 Sinais Simulados	127
A.2 Robô lubrificador	128
A.2.1 Rede PROFINET	128
A.2.2 Carta de Sinais Digitais	128
A.2.3 Sinais Simulados	130
B Mensagens da consola	131
B.1 Robô extrator	131
B.2 Robô lubrificador	132

Lista de Figuras

1.1	Calendarização do trabalho desenvolvido ao longo do projeto.	4
2.1	Estrutura interna do autómato humanóide de Leonardo Da Vinci. . .	8
2.2	Kawasaki-Unimate 2000 construído em 1969.	10
2.3	Unimate PUMA 200.	11
2.4	ASEA IRB-6.	12
2.5	Robôs SCARA AdeptOne em 1984.	13
2.6	Robô IRB 340 Flexpicker da ABB.	14
2.7	Robô colaborativo Yu-Mi da ABB.	15
2.8	Constituintes de um robô industrial.	15
2.9	Controlador IRC5 <i>Single Cabinet</i> da ABB.	16
2.10	ABB IRB 6700 com 6 eixos de rotação (A,B,C,D,E e F).	17
2.11	Garra mecânica Zimmer GPD5000 com 3 dedos.	20
2.12	Robô cartesiano (a) e respetivo espaço de trabalho (b).	23
2.13	Robô cilíndrico (a) e respetivo espaço de trabalho (b).	23
2.14	Robô esférico (a) e respetivo espaço de trabalho (b).	23
2.15	Robô SCARA (a) e respetivo espaço de trabalho (b).	24
2.16	Robô articulado (a) e respetivo espaço de trabalho (b).	24
2.17	Robô de estrutura paralela (a) e espaço de trabalho (b).	25
2.18	Diferença entre resolução e precisão.	28
3.1	Descarga de máquina de injeção com um robô ABB.	35
4.1	Molde permanente para fabrico de pistões.	46
4.2	Máquina de injeção de câmara quente.	47
4.3	Sequência de injeção numa máquina de câmara quente.	48
4.4	Máquina de injeção de câmara fria.	48
4.5	Sequência de injeção numa máquina de câmara fria.	49
4.6	Sequência de acontecimentos do processo de fundição.	50
4.7	IRB 6650 da ABB na fábrica de fundição da FORM.	52
4.8	IRB 4400 da ABB na fábrica de fundição da MP Filtri.	53
4.9	Robô invertido no eixo linear em ambiente de simulação.	55
4.10	Submersão da peça para arrefecimento.	57

5.1	Sequência de operações dos robôs.	62
5.2	Modelo da máquina injetora (IDRA 950 toneladas) da célula B.	63
5.3	Desenho da prensa KZP50 da célula B.	63
5.4	Modelos da matriz de sensores da célula B, tipo bandeira (esquerda) e tipo pórtico (direita).	64
5.5	Robô ABB IRB 4600 45/2,05.	66
5.6	Definição da altura do pedestal do robô extrator da célula B.	66
5.7	<i>Gripper</i> de aperto mecânico do robô extrator da célula B.	67
5.8	Definição do comprimento da extensão do <i>gripper</i> do R1.	68
5.9	Resultados do teste de cargas do R1 da célula B.	69
5.10	Robô ABB IRB 2600 20/1.65.	70
5.11	Ferramenta do robô lubrificador das células B, C, D, E1, E2 e F.	71
5.12	Alcance máximo dos bicos de sopro do R2 na célula B.	71
5.13	Resultados do teste de cargas do R2 da célula B.	72
5.14	<i>Layout</i> da célula B.	74
5.15	Trajetória de extração da peça da injetora.	75
5.16	Trajetória de inspeção da peça.	76
5.17	Trajetória de arrefecimento da peça na tina de água.	76
5.18	Trajetória de <i>place</i> da peça na prensa de corte.	77
5.19	Trajetória de <i>place</i> da peça na rampa de inspeção.	78
5.20	Trajetória de <i>place</i> da peça na rampa <i>Nok</i>	78
5.21	Trajetória de lubrificação e sopro do R2.	79
5.22	Zonas de trabalho do robô extrator da célula B.	81
5.23	Zonas de trabalho do robô lubrificador da célula B.	81
6.1	Diagrama da arquitetura de comunicação do sistema.	84
6.2	Fluxograma da função <i>main</i> do programa.	88
6.3	Fluxograma da função de extração da peça da injetora.	90
6.4	Fluxograma da função de inspeção da peça.	91
6.5	Fluxograma da função de arrefecimento da peça na tina de água.	92
6.6	Fluxograma da função da prensa.	93
6.7	Fluxograma da função das rampas de escoamento da peça.	94
6.8	Fluxograma da função principal do robô lubrificador.	97
6.9	Fluxograma da sequência de lubrificação do robô lubrificador.	98
6.10	Fluxograma da sequência de sopro do robô lubrificador.	99
6.11	Interface do sistema com o operador.	101
7.1	Eletroválvula de atuação da garra de aperto mecânico.	104
7.2	Eletroválvula de atuação da ferramenta de lubrificação.	105
7.3	Teste do atuador final do robô lubrificador da célula B.	105
7.4	Porta e botoneiras da célula B.	107
7.5	Robô extrator da célula B em posição de <i>home</i>	108

7.6	Robô lubrificador da célula B em posição de <i>home</i>	109
7.7	Teste de recuperação automática da rampa <i>Nok</i>	110
7.8	Tempo de ciclo da célula B.	113

Lista de Tabelas

5.1	Atribuição dos robôs para cada célula.	60
5.2	Altura dos pedestais dos robôs extratores de cada célula.	67
5.3	Garras de aperto mecânico implementadas.	68
7.1	Tabela de tempos de ciclo do robô extrator em simulação.	112

Acrónimos

ABB Asea Brown Boveri

CAD *Computer-Aided Design*

DOF *Degree of Freedom*

EUA Estados Unidos da América

GSD *General Station Description*

I/O *Input/Output*

IEC International Electrotechnical Commission

IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers

IFR International Federation of Robotics

IP *Internet Protocol*

ISEP Instituto Superior de Engenharia do Porto

ISO International Organization for Standardization

ODVA Open DeviceNet Vendors Association

PLC *Programmable Logic Controllers*

PUMA *Programmable Universal Machine for Assembly*

RIA Robotic Industries Association

SCARA *Selective Compliance Assembly Robot Arm*

TCP *Transmission Control Protocol*

T3 The Tomorrow Tool

VAL *Variable Assembly Language*

XML *Extensible Markup Language*

Capítulo 1

Introdução

A integração de novas tecnologias no nosso quotidiano modifica os padrões de sobrevivência da sociedade, tornando-a cada vez mais dependente de tecnologia. A invenção do automóvel revolucionou o transporte de pessoas e bens. A invenção do computador revolucionou a comunicação e tratamento de dados. A automação e robótica industrial estão a revolucionar as fábricas e os métodos de processamento/produção de bens a nível mundial. De acordo com o presidente da federação internacional de robótica (*International Federation of Robotics, IFR*), Junji Tsuda, os robôs industriais são cruciais para o desenvolvimento e progresso das indústrias. Como consequência da melhoria da produtividade, a implementação de robôs industriais irá aumentar. A IFR estima que, em 2021, o número de robôs fornecidos para as unidades fabris chegará às 630000 unidades [1].

1.1 Contextualização

No âmbito da unidade curricular Tese/Dissertação, do 2º ano do Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, Ramo de Automação e Sistemas, do Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP) e em conjunto com a empresa RobotSol - Engenharia Industrial sediada na zona industrial da Maia, foi desenvolvida uma tese de Mestrado, descrita ao longo desta dissertação, que visa a implementação de sistemas robotizados para a extração de peças de alumínio e lubrificação de moldes, numa indústria de fundição injetada de alumínio. O sistema implementado tem por base dois manipuladores robóticos, em cada célula, que serão controlados por uma máquina injetora, já existente, através da troca de sinais pela rede de comunicação PROFINET, criada para o efeito. Será implementado um robô para extração da peça fundida da máquina injetora e outro robô para lubrificar o molde, preparando-o para o próximo ciclo de injeção. Com esta solução, pretende-se obter um sistema flexível, compatível com várias referências de produtos, com tempos de mudança entre referências curtos, e facilmente adaptável a eventuais soluções futuras

Com o constante desenvolvimento tecnológico e com a evolução dos métodos de processo/produção industriais, as empresas, têm, cada vez mais, que dar resposta a uma procura mais exigente que prima por produtos de maior qualidade com custos de produção reduzidos. A robotização deste tipo de processos ajuda a garantir qualidade no produto final, possibilita a redução dos custos de produção de um dado produto e permite a melhoria das condições de trabalho nas indústrias.

A indústria da fundição possui tarefas, inerentes ao processo, que são prejudiciais ao ser-humano. Movimentação de cargas e objetos pesados, ruído excessivo, exposição direta a altas temperaturas, quer em pré-injeção ou pós-injeção, manuseamento de químicos, como é o caso da pulverização/lubrificação dos moldes com desmoldante, exposição direta a poeiras, ou ainda carga e descarga de máquinas, entre outras, são tarefas que podem ter efeitos nefastos, a curto ou longo prazo, para a saúde dos operadores.

A integração de robôs no processo, nesta indústria de fundição injetada, permitirá retirar aos operadores tarefas como descarga de peças das máquinas injetoras manualmente, inspeção manual dos brutos de fundição, lubrificação manual dos moldes antes da próxima injeção de alumínio, carga e descarga manual das prensas de corte dos excessos de fundição (macelotes), entre outras, reduzindo significativamente o tempo de manuseamento manual da peça e conseqüentemente o esforço físico inerente à movimentação das mesmas, ou ainda, reduzindo quase na totalidade o tempo de exposição direta às altas temperaturas ou químicos.

1.2 Objetivos

O objetivo principal deste trabalho de tese é o desenvolvimento e implementação de 7 células robotizadas com 2 robôs por célula, perfazendo um total de 14 robôs, para extração de peças de alumínio e lubrificação de moldes para a indústria da fundição injetada de alumínio. Com a implementação destas soluções pretende-se criar sistemas flexíveis para aumentar a produtividade das máquinas, já existentes, melhorar a qualidade do produto final e ainda melhorar as condições de trabalho dos operadores, reduzindo os esforços físicos derivados da descarga das máquinas injetoras, exposição direta a temperaturas elevadas e exposição à pulverização dos agentes químicos, da lubrificação dos moldes de fundição.

Cada célula robotizada que se pretende implementar será composta por dois robôs. O primeiro robô, denominado de extrator ou R1, será colocado num pedestal que servirá de suporte ao braço robótico, e efetuará a extração da peça de alumínio através de um *grripper*, ou atuador, de aperto mecânico. O segundo robô, denominado de lubrificador ou R2, também será colocado num pedestal e terá como atuador final um conjunto de bicos de atomização com ar e água para lubrificar o molde e um conjunto de bicos de sopro para retirar o excesso de

desmoldante que fica no molde após a atomização/lubrificação. Após a extração da peça o manipulador levará a peça a uma estrutura, denominada de matriz de sensores, para verificar se a peça foi extraída na totalidade. Após a aferição do bom estado da peça, o manipulador levará a peça a um tanque de água para a arrefecer. Depois do arrefecimento da peça o robô extrator deverá colocar a peça num dos três destinos possíveis: prensa de corte, rampa de inspeção ou rampa de produto não conforme. Esta decisão será tomada consoante o estado da peça e consoante o estado de operação da prensa de corte. Imediatamente após a saída do robô extrator de dentro da máquina injetora o robô lubrificador deverá efetuar o ciclo de lubrificação do molde.

A concretização deste objetivo principal é conseguido dividindo o projeto em: estudo da solução a implementar, desenho e simulação dos componentes e implementação da solução. Com base nestas 3 etapas principais foram definidos os seguintes objetivos:

- definição de componentes e verificação do *layout* das células de injeção;
- simulação *offline* para criação de trajetórias e ajuste de componentes;
- desenho de esquemas pneumáticos para orientação de montagem;
- validação dos desenhos 3D dos componentes que integram a célula;
- parametrização e programação *offline* dos robôs;
- validação de código *offline*;
- validação de código *online*;
- teste de validação de componentes;
- desenvolvimento e validação de código em obra;
- validação do funcionamento do sistema em automático e acompanhamento de produção.

1.3 Calendarização

A Figura 1.1 apresenta a calendarização do trabalho de desenvolvimento para o projeto e da escrita desta dissertação separadamente. A verde encontram-se os períodos de desenvolvimento das tarefas, a azul o período de férias e a amarelo o período de baixa médica.

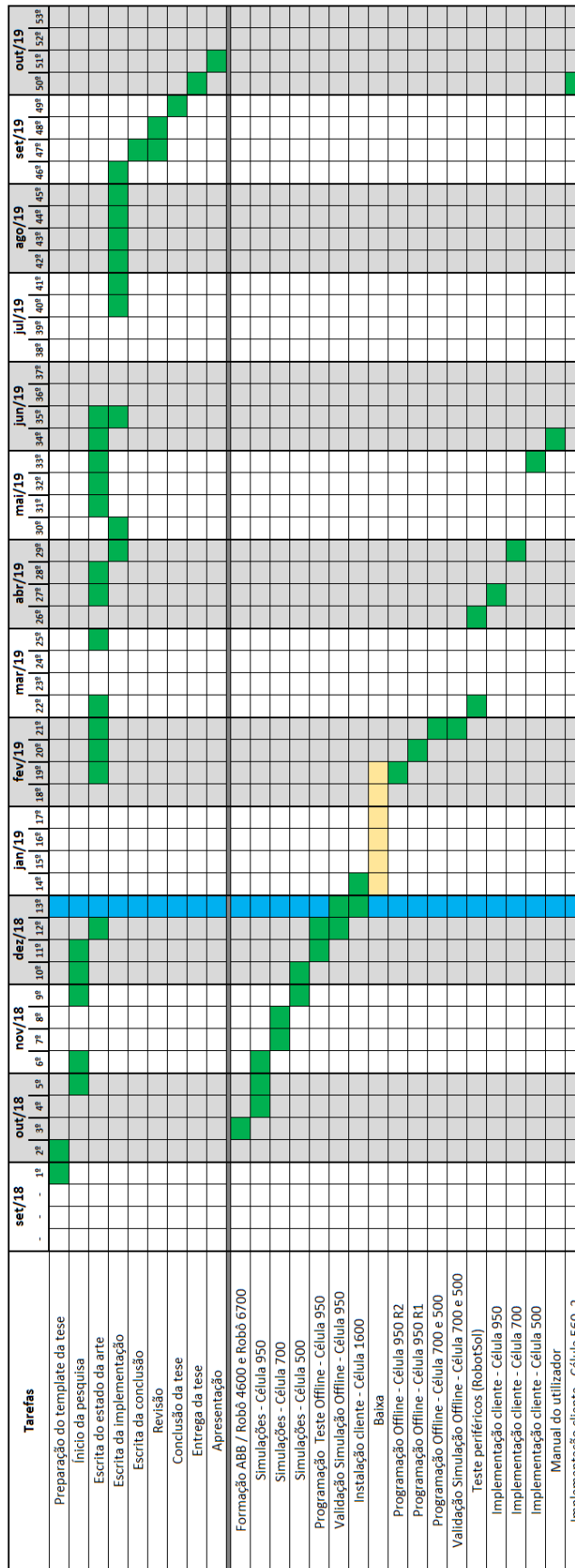


Figura 1.1: Calendarização do trabalho desenvolvido ao longo do projeto.

1.4 Organização da Dissertação

Esta tese de dissertação é composta por 8 capítulos, seguidamente sintetizados, onde é apresentado todo o trabalho desenvolvido ao longo deste projeto:

O Capítulo 1 contém uma breve introdução a esta dissertação, através da contextualização do tema deste trabalho e do estabelecimento de objetivos/metast, que se pretendem alcançar com a sua realização. Ainda neste capítulo é apresentada a calendarização do trabalho desenvolvido e a organização da dissertação.

No Capítulo 2 é realizada uma breve contextualização histórica, seguindo-se a apresentação da constituição de um robô industrial. Ainda neste capítulo é feita uma introdução teórica à robótica industrial, para apresentar os conceitos e terminologia utilizada, e também são analisados os métodos de programação de robôs industriais.

No Capítulo 3 são apresentadas algumas temáticas inerentes à implementação de células robotizadas. Em primeiro lugar serão apresentadas as aplicações industriais da robótica, através da descrição dos vários tipos de operações industriais. De seguida são apresentados conceitos de segurança na operação e programação de sistemas robotizados. Seguidamente inicia-se uma subsecção sobre redes de comunicação industrial e, para concluir, serão apresentadas as fases de desenvolvimento e implementação num projeto de robótica industrial

No Capítulo 4 é realizada uma breve análise da importância da implementação de sistemas robotizados na indústria da fundição. De seguida são introduzidos conceitos inerentes a esta indústria e são apresentados os diferentes tipos de fundição injetada. Após esta introdução é apresentada a sequência de processos num ciclo de trabalho de uma célula de fundição, particularizando a função que os sistemas robotizados podem desempenhar. Para concluir é efetuada uma análise a algumas soluções robotizadas já implementadas, na secção dos casos de estudo. Esta secção destina-se a estudar e compreender a configuração e mais valia da implementação de robôs neste tipo de indústria.

No Capítulo 5 é realizada a descrição do trabalho implementado, através da descrição do modo operativo do sistema e da apresentação de cada componente que integra a célula de injeção. Neste capítulo é efetuado um estudo de posicionamento de cada componente na célula (*layout*) e é apresentado o modelo de simulação que foi construído para efetuar o planeamento de trajetórias dos robôs. Este planeamento permitiu obter a melhor solução de movimento com o melhor tempo de ciclo.

O Capítulo 6 aborda a configuração dos sinais e parametrização dos protocolos de comunicação, configuração das zonas de trabalho para as recuperações automáticas e a estrutura de código implementada para controlar o manipulador nas operações da célula.

No Capítulo 7 é apresentado o processo de implementação do código nos robôs, seguido da metodologia de testes ao sistema nas instalações da RobotSol e em cliente. Neste capítulo, também é apresentado o método de ajuste das zonas de trabalho definidas em cada robô.

No Capítulo 8 é feito um resumo das conclusões apresentadas ao longo da dissertação e são enumerados trabalhos futuros de melhoria a implementar neste projeto.

Capítulo 2

Fundamentos de Robótica Industrial

Robótica! Atualmente, ninguém fica indiferente ao termo robô, independentemente do contexto em que se insere. Áreas de aplicação da robótica como uso doméstico, educação, entretenimento, medicina, indústria, aplicações espaciais, aplicações militares, entre outras, permitem à sociedade atual conceptualizar/visualizar o impacto da robótica no seu quotidiano. A constante evolução da robotização de processos industriais é a consequência de um mercado global cada vez mais competitivo, a fim de dar resposta a padrões de consumo cada vez mais exigentes, onde o consumidor final privilegia produtos de qualidade superior com o menor custo final possível.

Neste capítulo serão abordados os conceitos fundamentais da robótica industrial. Primeiramente, será efetuada uma breve análise histórica a fim de explorar a origem do termo robô, bem como o desenvolvimento da robótica industrial ao longo do tempo. Seguidamente será feita uma introdução teórica aos conceitos inerentes à robótica industrial e à terminologia utilizada na área. Para finalizar esta introdução serão analisados os métodos de programação de robôs industriais.

2.1 Contextualização Histórica

Desde os primórdios civilizacionais que o Homem inventa e cria, artefactos e máquinas, para desempenhar diversos tipos de funções, com o objetivo de replicar ou enaltecer as capacidades humanas. A primeira referência que apresenta este conceito foi escrita por Aristóteles (século IV A.C.): “se os instrumentos pudessem realizar suas próprias tarefas, obedecendo ou antecipando o desejo de pessoas”. Na mitologia grega, durante a idade do bronze (3000 A.C.), Hefesto, deus dos ferreiros e do fogo, forjou um autómato gigante de bronze semelhante à figura humana, Talos, cuja função era proteger a ilha grega de Creta, atirando rochas ao navios

inimigos [2]. A clepsidra ou relógio de água, foi um dos primeiros dispositivos para medir o tempo criado pelos Babilônios (1400 A.C.) [3]. O polímata muçulmano, Al-Jazari, inventou vários mecanismos, documentados no livro da sua autoria *"The Book of Knowledge of Ingenious Mechanical Devices"*, (1206 D.C.), entre os quais se encontram dispositivos programáveis e humanóides, como a servente de bebidas, um lavatório automatizado, uma banda musical robotizada, entre outros [4].

De 1495 a 1497, Leonardo Da Vinci desenhou e construiu um autómato humanóide assente numa armadura de cavaleiro. O mecanismo atuado por cabos, feito de madeira com partes de couro, latão e bronze, era composto por, pelo menos, dois sistemas independentes. A parte inferior com 3 graus de liberdade era constituída por pernas, tornozelos, joelhos e ancas. A parte superior com 4 graus de liberdade era composta pelos braços, ombros, cotovelos, pulsos e mãos [5], Figura 2.1.

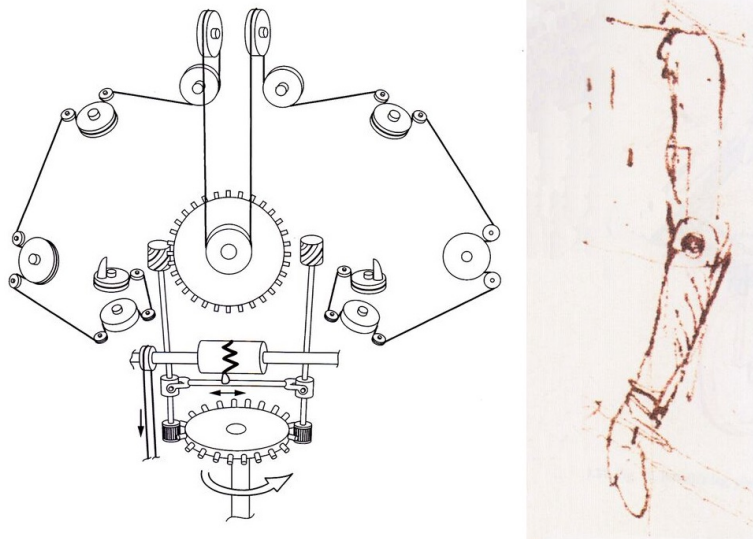


Figura 2.1: Estrutura interna do autómato humanóide de Leonardo Da Vinci [6].

Em 1739, o inventor francês Jacques de Vaucanson abriu ao público parisiense uma exposição que integrava duas das suas mais recentes criações, dois autómatos muito semelhantes à figura humana, um tocava flauta e o outro tocava tamborim [7].

No início do século XIX, em 1805, Henri Maillardet, um mecânico e relojoeiro suíço, construiu um autómato com aparência humana, capaz de desenhar e escrever poemas em inglês e francês. Este autómato ficou conhecido com o "Desenhista-Escritor" e era uma criação muito inovadora para a época [8].

O termo robô proveniente da palavra checa *"robot"*, que significa trabalho forçado ou servo, foi introduzido em 1921 pelo dramaturgo checo Karel Capek, na peça de ficção científica R.U.R. (Rossum's Universal Robots), onde se aborda a perda da humanização numa sociedade cada vez mais tecnológica. Nesta peça, que começa numa fábrica de pessoas artificiais, os robôs eram criados a partir de processos químicos, muito semelhantes à figura do ser humano e serviam para substituir mão de obra humana. No decorrer da peça estes robôs ficam cada vez mais inteligentes, revoltam-se contra a raça humana e tentam aniquilá-la [9].

Em 1941, Isaac Asimov define a ética das interações entre humanos e robôs, na sua obra de ficção científica *"Runaround"*, enunciando as três leis fundamentais da robótica, que permitem a coexistência entre robôs inteligentes e seres humanos [3]:

- 1.^a lei: um robô não pode fazer mal a um ser humano e nem, por inação, permitir que algum mal lhe aconteça;
- 2.^a lei: um robô deve obedecer às ordens dos seres humanos, exceto quando estas contrariarem a primeira lei;
- 3.^a lei: um robô deve proteger a sua integridade física, desde que com isto não contrarie as duas primeiras leis.

A lei zero da robótica foi introduzida mais tarde por Asimov:

- Lei zero: um robô não pode fazer mal à humanidade e nem, por inação, permitir que ela sofra algum mal.

Ambos os escritores de ficção científica já possuíam uma visão de um mundo com robôs, no entanto as duas abordagens são distintas. Na ótica de Capek os robôs iriam revoltar-se e tentar erradicar a raça humana, enquanto Asimov conceptualizou robôs que, sendo construídos respeitando as leis fundamentais da robótica, seriam sempre benevolentes com os seres humanos.

Após a segunda guerra mundial surgiram três tecnologias que contribuiriam de forma crucial para o sucesso da robótica, servo-motores, computação digital e eletrônica de estado sólido, que só viriam a ser utilizadas no final da década de 70 [10].

2.1.1 Primeira Geração (1950-1967)

A primeira geração de robôs industriais é caracterizada por atuação hidráulica, uma vez que os servo-motores eram muito ineficientes, e o controlo dos robôs era feito com recurso a eixos excêntricos que ativavam válvulas pneumáticas ou

relés que acionavam eletroválvulas. Esta primeira geração de robôs não possuía comunicação com o exterior [11].

Em 1959 Joseph Engelberger e George Devol instalaram o primeiro robô industrial numa linha fabril de fundição da *General Motors*, em Nova Jérсия. O protótipo Unimate #001, criado pelos dois norte americanos, usava juntas hidráulicas. Em 1961 o Unimate 1900 foi o primeiro braço robótico a ser produzido em série com a aplicação de cerca de 450 robôs na indústria da fundição injetada. Em 1966 Engelberger começou a expandir o mercado robótico além fronteiras através do licenciamento da Nokia na Finlândia para produzir robôs para o mercado europeu, e em 1969 assinou, com a Kawasaki Heavy Industries (atualmente Kawasaki Robotics), um acordo de licenciamento para produzir e comercializar robôs Unimate no mercado asiático [12]. O primeiro robô fabricado no Japão, para o mercado asiático, foi o Kawasaki-Unimate 2000. Este manipulador de atuação hidráulica era composto por 5 eixos e tinha uma capacidade de carga de 12 kg, Figura 2.2 [13].



Figura 2.2: Kawasaki-Unimate 2000 construído em 1969 [13].

Do outro lado do oceano pacífico, nos Estados Unidos da América (EUA), a General Motors possuía a fábrica automóvel mais avançada do mundo através da reconstrução de uma das unidades fabris, em Ohio, com robôs Unimate de soldadura por ponto. Este investimento permitiu à empresa americana a construção de 110 carros por hora, mais do dobro da cadência das fábricas de automóveis nessa altura. As fabricantes europeias de automóveis rapidamente começaram a investir em robôs Unimate para desempenhar tarefas desagradáveis ou perigosas para os trabalhadores humanos [12].

2.1.2 Segunda Geração (1968-1977)

A segunda geração de robôs industriais caracteriza-se pela capacidade de interação com o exterior e pelo uso de servo-motores, que permitiu a programação de trajetórias contínuas e ponto-a-ponto. O controlo desta nova geração de manipuladores robóticos era realizado com microprocessadores ou *Programmable Logic Controllers* (PLC) programados por um operador através de uma consola. Contudo esta geração de robôs ainda é caracterizada pela fraca flexibilidade da implementação uma vez que cada aplicação tinha *software* e *hardware* específico, dedicado a uma dada tarefa [11].

Em 1969 Victor Scheinman, ainda estudante de engenharia na universidade de Stanford, projetou e construiu o primeiro robô com atuação puramente elétrica, que ficou conhecido como Stanford Arm. O robô desenvolvido por Scheinman era constituído por cinco juntas rotacionais e uma junta prismática que permitem um total de 6 graus de liberdade [14]. Quatro anos mais tarde, em 1973, Scheinman construiu outro robô de atuação elétrica, denominado de Vicarm. Este robô de pequena dimensão tornou-se adequado para tarefas de montagem onde não era necessário manusear objetos de grande dimensão e/ou pesados. O potencial dos Vicarm levou a Unimation a comprar a fábrica onde estes eram produzidos. Em 1978 a Unimation lança no mercado o *Programmable Universal Machine for Assembly* (PUMA), Figura 2.3.



Figura 2.3: Unimate PUMA 200 [11].

O PUMA foi desenhado para ser rápido, ágil e preciso em tarefas de montagem de acessórios para automóveis, num espaço de trabalho equivalente ao do ser humano. Este robô foi o primeiro a ser controlado através de uma linguagem de

programação para robôs, *Variable Assembly Language* (VAL), que revolucionou o método de programação na robótica, tornando o processo mais simples para o programador [13].

Em 1974 a companhia sueca ASEA (atualmente Asea Brown Boveri (ABB)) iniciou a produção de robôs da série IRB, conhecidos mundialmente pela cor laranja, Figura 2.4. O primeiro robô desta série, produzido durante 20 anos, foi o IRB-6. Este robô industrial foi bastante implementado em várias indústrias a desempenhar tarefas complexas, como por exemplo, maquinação ou soldadura por arco [11].



Figura 2.4: ASEA IRB-6 [15].

2.1.3 Terceira Geração (1978-1999)

A terceira geração de robôs industriais caracteriza-se pelo desenvolvimento das capacidades de interação deste tipo de sistemas com operadores/programadores e o meio envolvente, através de interfaces humano-máquina. A programação destes robôs realizava-se ora *on-line*, com consolas ou teclados, ora *off-line*, com um computador ou PLC. Esta geração destaca-se ainda pela evolução das capacidades de diagnóstico e resolução de erros, indicando ao operador a localização e o motivo da falha no sistema.

Em 1978, Hiroshi Makino, cientista e professor na universidade de Yamanashi (Japão), apresentou um modelo cinemático constituído por três juntas rotacionais e uma prismática no final da estrutura, denominado de *Selective Compliance Assembly Robot Arm* (SCARA). Este robô de pequena dimensão foi desenvolvido para desempenhar tarefas de montagem de objetos de pequena dimensão.

Em 1981, Haruhiko Asada e Takeo Kanade desenvolveram um robô de atuação direta, ou seja, os motores do manipulador robótico atuam diretamente no eixo, eliminando a necessidade de sistemas mecânicos de interligação. Este tipo de robôs tem maior precisão e rapidez de movimento uma vez que não há folgas mecânicas associadas aos sistemas de transferência de energia mecânica. Esta tecnologia foi comercializada pela primeira vez em 1984, nos robôs SCARA AdeptOne, Figura 2.5 [14].

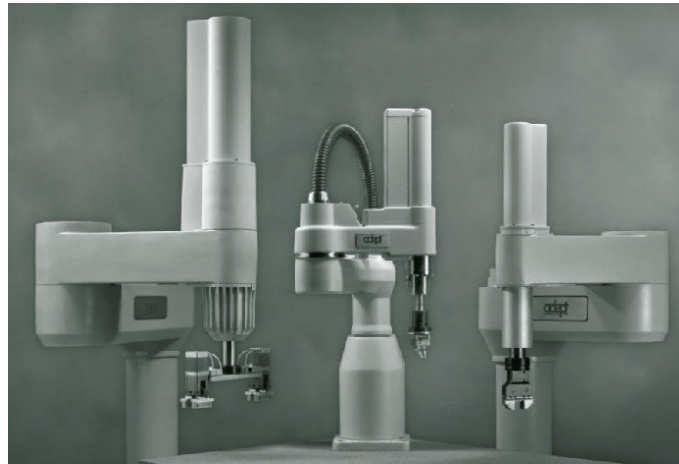


Figura 2.5: Robôs SCARA AdeptOne em 1984 [14].

Apesar do avanço da robótica industrial na década de 80, as indústrias precisavam de robôs com velocidades de movimento mais rápidas. Esta necessidade originou o aparecimento de novos modelos cinemáticos e, conseqüentemente, o aparecimento de robôs de estrutura paralela. Este robôs têm mais precisão e velocidades de deslocamento mais elevadas que os robôs série, uma vez que o manipulador é significativamente mais leve.

O primeiro robô de estrutura paralela foi desenvolvido pelo cientista suíço Reymond Clavel, em 1981, na sua tese de doutoramento. Este robô possuía 3 graus de liberdade translacionais e um grau de liberdade rotacional. Apesar do espaço de trabalho ser limitado pela estrutura de suporte do manipulador, este tipo de robôs movia-se com velocidades mais rápidas do que os manipuladores robóticos existentes e maior com precisão no movimento [14]. Em 1992 a companhia suíça Demareux desenvolveu e instalou um robô de estrutura paralela para efetuar tarefas de *pick and place*. Os robôs de estrutura paralela, ou Delta, foram um sucesso comercial, desde então, devido às suas capacidades a nível de desempenho. Um exemplo deste tipo de robô é o IRB 340 Flexpicker da ABB (1999), Figura 2.6 [11].



Figura 2.6: Robô IRB 340 Flexpicker da ABB [14].

2.1.4 Quarta Geração (a partir do ano 2000)

A quarta geração da robótica industrial inicia-se no ano 2000 e continua em desenvolvimento atualmente. Esta geração de robôs industriais caracteriza-se pela consolidação da tecnologia através da criação de sistemas mais inteligentes que primam a interação humano-robô. Tecnologias como a inteligência artificial, avanço nas tecnologias de sensorização e implementação de tecnologia sem fios revolucionaram o conceito de automação industrial nas fábricas. Além da inovação na robótica industrial, esta geração também se define pela integração em grande escala de robôs em unidades fabris, tornando as fábricas em ambientes mais seguros para o ser humano e mais eficientes.

A integração de novos sistemas de sensorização, juntamente com robôs mais inteligentes e sistemas de segurança mais avançados, originaram uma nova vertente de robôs, os robôs colaborativos. Estes foram desenvolvidos a pensar na partilha do espaço de trabalho com os seres humanos, criando sistemas de fabrico cada vez mais flexíveis. Em 2015, a ABB lançou comercialmente o seu primeiro robô colaborativo, o Yu-Mi, com a premissa de revolucionar a interação robô-humano. Este robô é composto por 2 braços com 7 juntas rotacionais cada um, com um alcance máximo de 0,559 m e destina-se a tarefas de montagem de objetos de pequena dimensão, Figura 2.7 [16].



Figura 2.7: Robô colaborativo Yu-Mi da ABB [16].

2.2 Constituição de um Robô Industrial

Segundo a Associação de Robótica Industrial (Robotic Industries Association (RIA)) um robô industrial define-se como um manipulador multifuncional, reprogramável projetado para movimentar materiais, peças, ferramentas ou dispositivos especiais, através de diversos movimentos programados, para a realização de uma variedade de tarefas. Uma definição mais completa é apresentada pela norma 10218 da International Standards Organization (ISO), como sendo "uma máquina manipuladora com vários graus de liberdade, controlada automaticamente, reprogramável, multifuncional, que pode ter base fixa ou móvel para utilização em aplicações de automação industrial"[17].

Um robô industrial é formado pela integração de um controlador com um braço ou manipulador robótico, uma interface com o utilizador (*teach pendant*), sensores e uma ferramenta, ou atuador final, de acordo com o esquema da Figura 2.8.

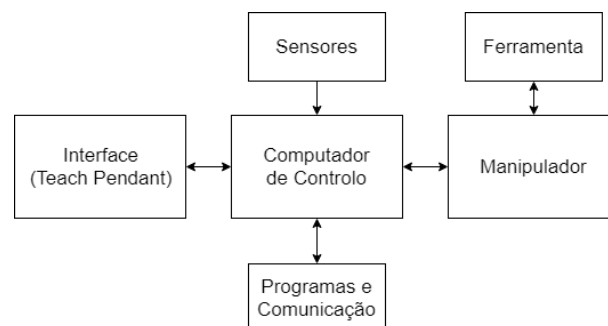


Figura 2.8: Constituintes de um robô industrial.

2.2.1 Controlador

O controlador de um robô industrial é, por norma, um computador que executa o sistema operativo do robô, que é programado e reprogramado com instruções de movimento e controlo do braço robótico. O controlador também pode conter a unidade de potência do sistema que aplica potência aos atuadores, motores do braço robótico, consoante o sinal de comando dos mesmos. Além da alimentação dos motores do manipulador robótico e do controlo da posição do atuador final, o controlador é responsável pelo controlo de sinais de entrada e saída, digitais ou analógicos, para controlar periféricos e/ou atuadores finais acoplados ao manipulador. O controlador possui, igualmente, ligações para comunicar com a interface humano máquina, o *teach pendant* [10]. A Figura 2.9 apresenta a quinta geração de controladores da ABB.



Figura 2.9: Controlador IRC5 *Single Cabinet* da ABB [18].

2.2.2 Interface com Utilizador (Teach Pendant)

A interface com utilizador interliga a unidade de comando do sistema, controlador, com o operador através da consola, denominada de *teach pendant*, ou um computador. Esta interface permite ao operador criar programas, mover o robô, ensinar posições, diagnosticar e corrigir erros, entre outras operações. Atualmente, a maioria das consolas possui um ecrã tátil e botões para navegação de menus e programação, uma ou várias possibilidades de movimentar o robô e ainda um dispositivo de segurança, denominado de botão de homem morto, que necessita de ser pressionado numa posição intermédia para habilitar potência aos motores do manipulador, fora do funcionamento em modo automático [10].

2.2.3 Manipulador Robótico

Um manipulador robótico é uma estrutura mecânica composta por uma base, elos, juntas ou eixos e um punho [10]. A distinção entre os vários tipos de robôs é feita com base na configuração das juntas que integram o braço robótico ou manipulador. Os elos são elementos estruturais do manipulador robótico, normalmente rígidos, ligados entre si através de juntas. As juntas são a articulação entre dois elos adjacentes que permitem movimentos de rotação, translação ou a combinação destes. Existem dois tipos de juntas que ditam o tipo de movimentação entre dois elos, juntas de rotação (R) e juntas prismáticas (P). Outros tipos de juntas, como por exemplo, juntas de torção, juntas revolventes, juntas esféricas, juntas helicoidais, juntas cilíndricas ou juntas planares, são obtidas através da combinação dos dois tipos de juntas fundamentais [3]. A Figura 2.10 apresenta um braço robótico com 6 juntas rotacionais. Este tipo de configuração é a mais comum nas indústrias.

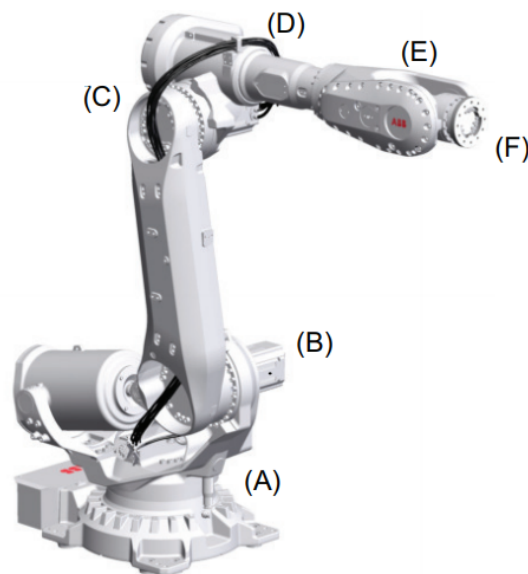


Figura 2.10: ABB IRB 6700 com 6 eixos de rotação (A,B,C,D,E e F) [19].

2.2.4 Atuadores

O atuador é um dispositivo que move uma ou mais juntas do braço robótico ou atuador final. O comando e controlo destes atuadores permite o controlo dos movimentos do braço robótico e da ferramenta (atuador final). Os 3 tipos de atuadores mais utilizados na robótica industrial são, os atuadores hidráulicos, pneumáticos e elétricos.

2.2.4.1 Atuadores Hidráulicos

Os atuadores hidráulicos foram o primeiro tipo de atuadores de robôs industriais. Este tipo de atuadores apresentam grande capacidade de carga, aplicam grandes forças às juntas e ao atuador final e apresentam uma boa relação potência/peso. A fonte de energia de um sistema hidráulico é uma bomba de fluido hidráulico, óleo, movida por um motor, elétrico ou a combustão, que pressuriza um circuito. O controlo deste tipo de atuador é feito através de eletroválvulas ou válvulas de controlo proporcional, que são atuadas por um circuito eletrónico de baixa potência [3]. Os atuadores hidráulicos têm um custo de implementação elevado e necessitam de manutenção devido ao aparecimento de fugas. Estes atuadores não são adequados para velocidades de movimentação elevadas, a sua miniaturização é difícil e requerem reservatórios de fluido que ocupam espaço físico. No entanto, estes atuadores são auto-lubrificantes, auto-arrefecidos, operam em condições de sobrecarga sem se danificar e são seguros em atmosferas inflamáveis ou explosivas [20].

2.2.4.2 Atuadores Pneumáticos

Os atuadores pneumáticos encontram-se normalmente em manipuladores simples. Estes atuadores ou manipuladores têm poucos graus de liberdade, pouco controlo de movimento e requerem limites mecânicos para efetuar a paragem do sistema, sendo portanto, ideais para aplicações com movimento ponto a ponto. O uso extensivo deste tipo de atuadores requer a instalação de um compressor de ar comprimido dedicado, tornando-se numa solução cara, para um sistema com uma eficiência energética baixa [3]. Além da dificuldade de controlo das velocidades e levantamento de cargas, a compressibilidade do ar limita os aspetos de controlo e precisão de movimento, exceto em movimento de posições fixas. Estes sistemas também requerem maior manutenção devido a fugas de ar ou má qualidade na produção de ar comprimido. No entanto, os atuadores pneumáticos são soluções de baixo custo, podem executar operações a alta velocidade, aguentam sobrecargas sem se danificar e são de fácil implementação devido à sua construção modular com equipamento *standard* disponível no mercado [20].

2.2.4.3 Atuadores Elétricos

Os atuadores elétricos são o tipo de atuadores mais usados em robôs, nomeadamente os motores *brushless*, motores de ímanes permanentes de corrente contínua e motores passo-a-passo. Os motores *brushless* são o tipo de motores mais usados na robótica industrial. Estes apresentam bom desempenho a um custo reduzido devido à baixa complexidade do motor. Os motores de ímanes permanentes produzem, normalmente, o maior binário e potência para o seu tamanho. Uma vez que este tipo de motores têm uma armadura não ferrosa, ou seja,

fracas capacidades de dissipação térmica, estes precisam de refrigeração ou limitação de *duty-cycle* quando são alimentados com potências elevadas. Os motores passo-a-passo, usados normalmente em robôs simples e de pequena dimensão, são motores de baixo custo e fáceis de controlar. A relação potência/peso é mais baixa que a grande maioria dos outros motores elétricos [3].

Os atuadores elétricos são rápidos e precisos, permitindo executar trajetórias complexas de forma suave e contínua, através de técnicas de controlo mais sofisticadas. No entanto, velocidades elevadas com baixo binário requerem engrenagens de transmissão e estas introduzem folga no sistema, apesar das técnicas de controlo atenuarem o efeito da folga. Estes atuadores têm problemas de sobreaquecimento quando trabalham em sobrecarga e são necessários travões para manter o atuador na posição [20].

2.2.4.4 Atuação Direta ou Indireta

Existem dois tipos de atuação de robôs indústrias, atuação direta e indireta. Num sistema de atuação direta o elemento móvel do atuador está diretamente acoplado à junta. Em atuação indireta o elemento móvel do atuador está acoplado à junta através de um sistema de transmissão ou engrenagens.

2.2.5 Sensores

Sensores são dispositivos que fornecem dados sobre o comportamento do manipulador, posição e velocidade dos elos, ou sobre a interação do robô com periféricos. Os sensores podem-se classificar como sendo proprioceptivos (internos) ou exteroceptivos (externos).

Os sensores internos são usados para medição do estado do manipulador internamente através de, por exemplo, codificadores ou (*encoders*), fins-de-curso, sensores de força e temperatura. As juntas de um braço robótico estão acopladas a sensores para criar um circuito em malha fechada para controlo de posição. A cada ciclo de análise do controlador a leitura destes sensores é realimentada no algoritmo de controlo do manipulador.

Os sensores externos são usados para obter informações sobre dispositivos exteriores ao manipulador, por exemplo, presença de objetos, distâncias a objetos, forças de interação, temperaturas, entre outros. Este tipo de sensores divide-se em sensores de contacto e sem contacto [3].

2.2.6 Atuador Final

O atuador final é um dispositivo que se adapta no punho do braço robótico, e que permite a realização de uma dada tarefa com o manipulador [21]. O tipo de atuador final, implementado num robô, depende da tarefa que este vai realizar.

Se se pretende efetuar tarefas que implicam o manuseamento ou transporte de um objeto, o atuador final será uma garra. No entanto, o atuador final também pode ser uma ferramenta se for necessário executar operações de lixagem ou rebarbagem, por exemplo.

2.2.6.1 Garras

As garras são atuadores finais para manipular e segurar objetos e são usadas normalmente quando se pretende mover objetos entre pontos de pega e pontos de destino (*pick and place*). Existem vários tipos de atuação de garras distinguindo-se em várias categorias: garras mecânicas, garras magnéticas, garras de sucção, entre outras [22].

Garras Mecânicas

As garras mecânicas são atuadores finais que utilizam dedos mecânicos, atuados por um mecanismo que permite a abertura ou fecho dos dedos, possibilitando que objetos sejam agarrados ou largados no ambiente do sistema robotizado. A atuação das garras pode ser feita através de pneumática, hidráulica ou eletricamente. As garras de atuação pneumática utilizam ar comprimido para deslocar um êmbolo, criando um movimento que pode ser linear ou angular. Devido ao seu baixo custo e facilidade de implementação este é o tipo de garra mais implementado em soluções robotizadas. No entanto, o controle de força e velocidade é limitado. A Figura 2.11 apresenta uma garra mecânica Zimmer GDP5000 com 3 dedos.



Figura 2.11: Garra mecânica Zimmer GDP5000 com 3 dedos [23].

Garras Magnéticas

As garras magnéticas são atuadores finais que utilizam ímanes ou eletroímãs para manusear materiais ferrosos, como por exemplo, chapas ou placas metálicas. Este tipo de garras apresenta um tempo de pega muito rápido, não necessita de

ser projetado para uma determinada peça de trabalho, tolera variações nas peças e permite o manuseamento de peças com furos. No entanto, além do magnetismo residual, as aparas metálicas ficam coladas às garras e basta que a superfície do objeto esteja contaminada com óleo para reduzir a força de pega da garra.

Garras de Sucção

As garras de sucção são dispositivos simples que usam vácuo para agarrar em peças. A criação de vácuo pode ser feita através da instalação de uma bomba de vácuo ou através do princípio de Venturi. O material das ventosas de sucção pode ser diferente de acordo com a aplicação pretendida. Para manipular um objeto rígido, normalmente utilizam-se materiais plásticos ou macios para permitir que a ventosa de adapte ao objeto. Quando se pretende manipular um objeto macio ou deformável utilizam-se ventosas rígidas, normalmente metálicas, para que o objeto se adapte à forma da ventosa.

2.2.6.2 Ferramentas

As ferramentas são atuadores finais que permitem a realização de trabalho sobre uma dada peça sem pegar nela. Este tipo de atuadores é necessário quando se pretende realizar operações como pintura, corte, rebarbagem, polimento, soldadura, entre outras [22].

A robotização de processos de pintura é realizado através da instalação de uma pistola ou atomizador no punho do braço robótico. A função destas ferramentas é vaporizar e projetar a tinta ou pigmento na peça alvo do processo, através do controlo de fluxo de fluído, grau de atomização e tamanho do padrão. O pigmento e a alimentação da pistola chegam ao punho através de tubagens flexíveis fixas ao manipulador.

Nas operações de rebarbagem e polimento, normalmente, utiliza-se ferramentas rotativas que podem integrar mecanismos de auto-compensação com ajuste axial para o esforço da operação, uma vez que o robô efetua sempre a mesma trajetória, permitindo variação entre as peças que entram no sistema e melhorando a qualidade do produto, no final da operação. Este tipo de operações também pode ser feito com ferramentas fixas na célula robotizada, sendo o robô a mover a peça sobre a ferramenta.

A aplicação de robôs industriais em soldadura é das soluções mais implementadas nas indústrias, existindo pacotes de *software* específico para este tipo de operações, que podem requerer a integração de uma tocha de soldadura, em soldadura por arco-elétrico, ou uma pinça para soldadura por pontos. Na soldadura por arco-elétrico o eletrodo e o gás de soldadura passam dentro da tocha e a alimentação destes é feita através um sistema de tubagens flexíveis que pode estar fixo ao longo do braço robótico, facilitando a sua movimentação geral, ou com fixação estática exterior, garantindo a folga necessária para a movimentação do

robô. Nas operações de soldadura por pontos o robô é instalado com uma pinça de soldadura que possui dois elétrodos. O fecho desta provoca a passagem de corrente elétrica num ponto e cria uma fusão localizada dos dois materiais. A alimentação destes sistemas, normalmente é realizado por meio de cabos elétricos que estão fixos ao braço robótico.

2.3 Tipologia e Volume de Trabalho

A classificação dos vários tipos de robôs industriais baseia-se no número e configuração de juntas e elos que o manipulador possui, especificando o tipo de aplicação do robô na indústria.

2.3.1 Robôs de Estrutura Série

Os robôs de estrutura série são constituídos por um conjunto de elos e juntas ligados sequencialmente da base do manipulador até ao punho. Os elos e juntas deste tipo de estruturas são configurados para garantir movimentos de translação e orientação, separadamente, no atuador final. As primeiras 3 juntas de um manipulador são usadas para posicionar/referenciar um ponto no espaço e as últimas 3 juntas são usadas para orientar o atuador final à volta deste ponto no espaço. A configuração das 3 primeiras juntas define o tipo de configuração do robô industrial, sendo que as ligações entre elos adjacentes e juntas rotacionais (R) ou prismáticas (P) podem ser paralelas, perpendiculares ou ortogonais. O alcance máximo que o punho do robô consegue atingir denomina-se de volume ou espaço de trabalho e difere consoante o número, configuração e tamanho das juntas e elos [3]. Existem vários tipos de robôs de estrutura série dando-se destaque aos robôs de configuração cartesiana (PPP), cilíndrica (RPP), esférica (RRP), SCARA (RRP) e articulada (RRR).

2.3.1.1 Configuração Cartesiana

Um robô cartesiano define-se pela interligação ortogonal das três primeiras juntas prismáticas. Normalmente este tipo de robô apresenta um espaço de trabalho de grande dimensão apesar de ser limitado exteriormente pela estrutura de suporte do manipulador. As características de precisão, velocidade e capacidade de cargas elevadas mantêm-se constantes ao longo de todo o volume de trabalho [20]. Este tipo de robôs é utilizado geralmente em aplicações que implicam grandes volumes de trabalho, como por exemplo, corte a jato de água ou laser. A Figura 2.12 apresenta uma representação do tipo de estrutura, Figura 2.12 a, e o respetivo volume de trabalho, Figura 2.12 b.

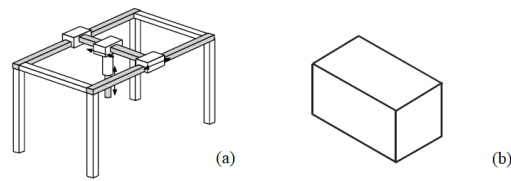


Figura 2.12: Robô cartesiano (a) e respectivo espaço de trabalho (b) [10].

2.3.1.2 Configuração Cilíndrica

Um robô de configuração cilíndrica é caracterizado pela combinação de uma junta de rotação com duas juntas prismáticas. Estes robôs apresentam um sistema de controlo simples com velocidades de trabalho elevadas [20]. Apesar da baixa implementação deste tipo de robôs estes destinam-se a aplicações de paletização, carga e descarga de máquinas. A Figura 2.13 apresenta uma representação do tipo de estrutura, Figura 2.13 a, e o respectivo volume de trabalho, Figura 2.13 b.

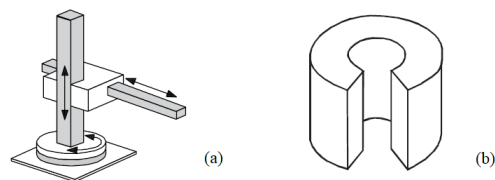


Figura 2.13: Robô cilíndrico (a) e respectivo espaço de trabalho (b) [10].

2.3.1.3 Configuração Esférica

Os robôs de configuração esférica possuem duas juntas de rotação ligadas a uma junta prismática. Este tipo de robôs apresenta capacidades de velocidade, precisão e repetibilidade elevadas [20]. Tal como os robôs cilíndricos, este tipo de robôs destinam-se a aplicações de paletização, carga e descarga de máquinas, apesar da sua baixa implementação. A Figura 2.14 apresenta uma representação do tipo de estrutura, Figura 2.14 a, e o respectivo volume de trabalho, Figura 2.14 b.

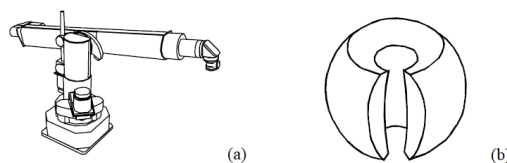


Figura 2.14: Robô esférico (a) e respectivo espaço de trabalho (b) [10].

2.3.1.4 Configuração SCARA

Os robôs SCARA caracterizam-se pela combinação de duas juntas de rotação com uma junta prismática, que permite movimento linear vertical. Estes robôs têm boa manobrabilidade e velocidade de trabalho, precisão e repetibilidade elevadas, adequando-se a tarefas de montagem [20]. A Figura 2.15 apresenta uma representação do tipo de estrutura, Figura 2.15 a, e o respetivo volume de trabalho, Figura 2.15 b.

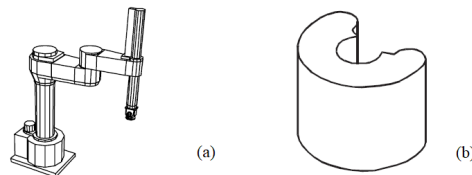


Figura 2.15: Robô SCARA (a) e respetivo espaço de trabalho (b) [10].

2.3.1.5 Configuração Articulada

Os robôs articulados, ou de configuração antropomórfica, são a configuração mais comum em aplicações de robotização e caracterizam-se pela interligação de pelo menos três juntas rotacionais. Este tipo de manipuladores têm um volume de trabalho elevado relativamente à sua estrutura, possibilitando a sua instalação em locais restritos. Esta configuração possui boa manobrabilidade e velocidades de trabalho elevadas [20]. A Figura 2.16 apresenta uma representação do tipo de estrutura, Figura 2.16 a, e o respetivo volume de trabalho, Figura 2.16 b.

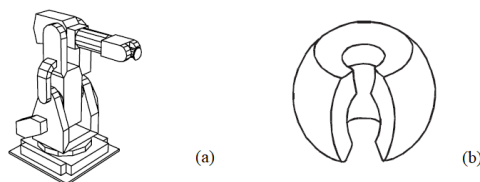


Figura 2.16: Robô articulado (a) e respetivo espaço de trabalho (b) [10].

2.3.2 Robôs de Estrutura Paralela

Os robôs industriais de estrutura paralela caracterizam-se pela ligação de 2 ou mais elos ao atuador final, através de juntas [3]. O espaço de trabalho deste tipo de estrutura é a interseção do espaço de trabalho de cada elo de suporte, no entanto, como os elos estão interligados num atuador final, o espaço de trabalho é maior se o atuador final estiver perto da base do robô e diminui com o afastamento do atuador final em relação à base [10]. A Figura 2.17 apresenta

uma representação de um robô de estrutura paralela, Figura 2.17 a, e o respetivo espaço de trabalho, Figura 2.17 b.

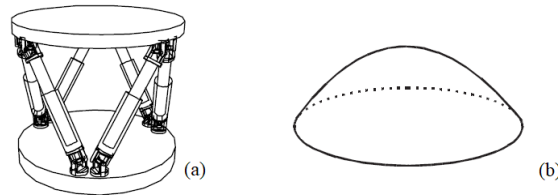


Figura 2.17: Robô de estrutura paralela (a) e respetivo espaço de trabalho (b) [10].

2.4 Sistemas de Controlo de Movimento

O controlo de movimento de um robô é realizado através da atuação coordenada de uma ou mais juntas do manipulador, para efetuar a trajetória pretendida. Diferentes tipos de aplicações requerem diferentes tipos de controlo de movimento. Assim, o controlo de movimento pode ser de sequência fixa, ponto a ponto (PTP), trajetória contínua (CP) e de controlo inteligente [24].

2.4.1 Movimento de Sequência Fixa

O controlo por sequência fixa é a forma de controlo de movimento mais elementar e pode ser usada para a implementação de ciclos de movimento simples, como, por exemplo, operações de *pick and place*. Neste tipo de controlo os movimentos são realizados entre dois pontos extremos através da definição de limites mecânicos para cada junta do atuador e o ajuste de velocidade é quase inexistente [24].

2.4.2 Movimento Ponto a Ponto (PTP)

O controlo de movimento ponto a ponto é um tipo de controlo mais complexo que o anterior. Na movimentação ponto a ponto as posições do atuador final no espaço de trabalho são guardadas em memória e o manipulador consegue atingir aquele ponto sem necessitar de limites mecânicos nas juntas. Neste tipo de controlo a trajetória e velocidade não são controláveis ao longo do movimento entre dois pontos [24].

2.4.3 Movimento Contínuo (CP)

No controlo de movimento contínuo a trajetória do manipulador é controlada durante a movimentação do mesmo, contrariamente ao que acontece no controlo

PTP, onde a trajetória para atingir um dado ponto não é controlada. Este tipo de controlo (CP) permite um espaçamento reduzido entre pontos para atingir um movimento mais suave e contínuo, criando a possibilidade de controlar o movimento e velocidade de cada junta em simultâneo, para atingir a trajetória linear ou circular especificada [24].

2.4.4 Controlo Inteligente

O controlo inteligente de movimento permite ajuste de trajetória por interação com o meio ambiente, ou tomada de decisões consoante a informação de sensores durante a realização de uma tarefa. Este tipo de controlo requer maior capacidade de computação e uma linguagem de programação mais avançada para as operações de lógica [24].

2.5 Terminologia da Robótica

A implementação de um sistema robotizado bem definido e estruturado tem várias vantagens, como, por exemplo, o aumento da produtividade e qualidade do produto final. Portanto, a escolha do robô deve ser feita de acordo com a necessidade do processo tendo em conta as características de cada robô. Nas subsecções seguintes será apresentada a terminologia que caracteriza as capacidades de desempenho dos robôs industriais.

2.5.1 Capacidade de Carga

A capacidade de carga especifica as condições em que o braço se encontra para uma dada massa acoplada ao punho e pode-se denominar de nominal ou máxima [20]. A capacidade de carga nominal é a movimentação da carga máxima à velocidade máxima sem perda de precisão. A capacidade de carga máxima é a movimentação da carga máxima a velocidade reduzida sem perda de precisão. Quanto maior for a distância entre o centro de gravidade do conjunto atuador final/ferramenta ao punho do robô menor será a capacidade de carga devido ao aumento da carga inercial sobre o manipulador [3].

2.5.2 Graus de Liberdade

O número mínimo de movimentos independentes que precisam de ser especificados para se definir a posição e orientação de todas um objeto ou mecanismo denomina-se de graus de liberdade (*Degree of Freedom (DOF)*) [3]. Um objeto livre no espaço pode deslocar-se em 3 direções e rodar em torno de 3 eixos, como tal tem 6 graus de liberdade.

2.5.3 Velocidade

A velocidade de operação de um robô é uma grandeza medida no punho do manipulador e determina o tempo de ciclo de uma tarefa considerando acelerações e desacelerações. A velocidade de operação depende do peso do objeto que está a ser manipulado e da distância a atingir. Quanto maior for a velocidade de execução de um movimento menor será a precisão devido à massa inercial do objeto [20][3].

2.5.4 Aceleração

Na maioria dos manipulador modernos, uma vez que a massa da carga é pequena quando se compara com o peso do manipulador, perde-se mais energia na aceleração do manipulador do que na aceleração da carga. Os manipuladores capazes de atingir maiores acelerações são geralmente mais robustos estruturalmente [3]. A variação dos parâmetros de aceleração durante a movimentação pode permitir ao programador a estabilização de transporte da carga, uma vez que pode não ser necessário efetuar movimentos bruscos perto de zonas de contacto com a célula (pontos de *pick and place*) ou zonas de análise que recorrem a sensores.

2.5.5 Repetibilidade

A repetibilidade é a especificação que representa a habilidade do manipulador retornar repetidamente ao mesmo ponto. Os fabricantes de robôs utilizam esta grandeza para indicar o raio da esfera, com centro num dado ponto, ao qual o manipular retorna quando a mesma instrução de movimento é executada nas mesmas condições de carga e parametrização [3].

2.5.6 Resolução e Precisão

A resolução de um robô especifica o menor incremento de movimento que o manipulador pode efetuar, que conseqüentemente é o menor movimento incremental de uma junta do manipulador [20].

A precisão é a capacidade do robô se posicionar sobre um ponto programado dentro do volume de trabalho. Esta especifica a distância entre o ponto programado e a posição atingida efetivamente. A precisão de um robô é condicionada pela posição do ponto no espaço de trabalho, limitações no ciclo de movimento ou pela carga transportada.

A Figura 2.18 representa graficamente a diferença entre estes dois conceitos.

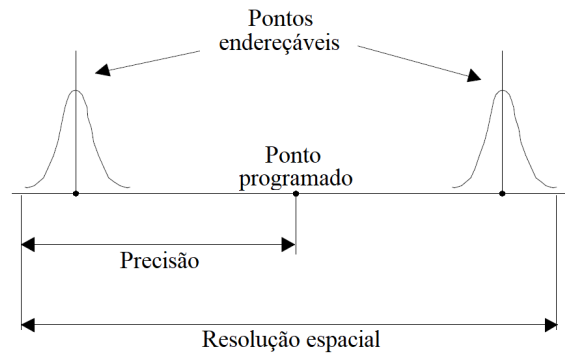


Figura 2.18: Diferença entre resolução e precisão [20].

2.6 Cinemática e Singularidades

Em robótica, a cinemática é o estudo analítico de movimento do manipulador de um robô. A criação de modelos cinemáticos dos manipuladores é crucial para analisar o comportamento e localização no espaço dos robôs industriais [25]. A modelação cinemática de um manipulador é efetuada em relação a um sistema de coordenadas de referência fixo (base) e apenas considera a estrutura geométrica dos elos e o posicionamento das juntas que os interligam [20]. Os modelos cinemáticos podem ser categorizados por: cinemática direta e cinemática inversa.

2.6.1 Cinemática Direta

O cálculo da posição e orientação do atuador final, com base nos parâmetros do elos e nas coordenadas das juntas, denomina-se de cinemática direta. Este cálculo é feito relativamente a um sistema de coordenadas de referência e apresenta uma única solução que é a posição e orientação do atuador final [20][25].

2.6.2 Cinemática Inversa

A cinemática inversa calcula o valor das coordenadas das juntas do manipulador para uma posição e orientação do atuador final. Este tipo de cálculo pode apresentar mais que uma solução uma vez que o atuador final pode atingir um ponto no espaço com várias configurações de juntas [20][25]. A posição e orientação do atuador final é mais conveniente para o programador se for especificada em relação a um sistema de coordenadas cartesiano da base do robô, ou relativamente a um sistema definido pelo utilizador, como por exemplo uma mesa de indexação de peças. Neste caso, é necessário aplicar cinemática inversa para determinar a posição das juntas do manipulador.

2.6.3 Singularidades

As singularidades especificam o momento em que, matematicamente, as equações de cinemática tendem para infinito apresentando movimentos de juntas impossíveis para atingir um dado ponto no espaço [26]. Na prática o sistema dá aviso ou erro de singularidade quando existe alinhamento colinear de dois ou mais eixos do manipulador, resultando em movimentos e velocidades inesperadas. As singularidades podem se manifestar de duas formas: singularidades de braço ou punho. As singularidades de braço ocorrem quando o centro do punho passa diretamente por cima da junta 1 do manipulador. As singularidades de punho acontecem quando as juntas 4 e 6 estão alinhadas e a junta 5 está com um ângulo de 0 graus [27].

2.7 Programação de Robôs Industriais

A robótica industrial pode ser aplicada a uma variedade de processos desde *pick and place*, soldadura por arco elétrico ou por ponto, operações de pintura, montagem, entre outros. Para um robô industrial, a execução destes processos e operações define-se como uma sequência de pontos no espaço que formam uma trajetória de movimento [28]. No caso da robótica, a programação de um robô é a criação da sequência de pontos no espaço que este tem que percorrer com uma determinada orientação, velocidade e aceleração, combinada com a atuação ou leitura de periféricos [10]. Estas ações de periféricos incluem a abertura e fecho de garras, controlo de ferramentas, tomadas de decisão com base em operações de lógica, leitura de sensores, comunicação com outros periféricos na célula, entre outras.

Cada fabricante de robôs industriais tem o seu método e linguagem de programação. Esta particularidade pode ser um fator decisivo na escolha de robôs. Normalmente uma indústria que já tenha células com robôs de uma dada marca, mantém-se nessa marca, uma vez que os operários ou técnicos de manutenção já possuem conhecimentos de manobrabilidade e programação. A programação de robôs industriais consome muito tempo e é cara, uma vez que o tempo de programação pode provocar a paragem de linhas de produção. Assim, os fabricantes procuram oferecer, aos programadores e integradores, ferramentas de programação poderosas que facilitam a programação de robôs e permitem poupar tempo, através do desenvolvimento prévio do código do robô, com recurso a *softwares* de simulação. Os métodos de programação de robôs industriais dividem-se em programação *online* e programação *offline*.

2.7.1 Programação Online

A programação *online* envolve diretamente o próprio robô [28]. A criação de pontos de movimentação é, normalmente, realizada com o *teach pendant* do sistema, enquanto que a decisão e análise lógica pode ser feita com recurso a um computador ligado diretamente ao controlador do robô. A criação de código num computador, por norma, torna-se mais rápida e flexível do que a introdução das condições lógicas de forma manual na consola. Salvo raras exceções, a implementação de células robotizadas implica sempre programação *online* para afinação de pontos no local real, no melhor cenário.

Este método de programação é relativamente simples de aprender a realizar, no entanto, é necessário ter o robô para o programar. A paragem da célula ou linha de produção onde se encontra o robô, para efetuar a sua programação, causa perdas de produtividade. Além da paragem do sistema, aquando da fase de testes das alterações implementadas, podem surgir erros de programação provocando colisões com outros equipamentos e consequentemente, danos materiais.

2.7.2 Programação Offline

A programação *offline* consiste em programar o robô sem ser necessária a presença física do sistema durante esta tarefa [28]. Este tipo de programação é cada vez mais usado, especialmente em aplicações complexas ou aplicações que possuem tempos de desenvolvimento de programas muito elevados. A programação *offline* está diretamente associada aos *softwares* de simulação 3D, que permitem a importação dos modelos dos componentes da célula. A possibilidade de ter um modelo/representação tridimensional da célula permite um desenvolvimento de código, com teste de trajetórias, mais rápido, reduzindo o tempo de paragem da célula e consequentemente aumentando a eficiência de implementação [29]. A programação de trajetórias nos manipuladores melhora significativamente, uma vez que é possível testar várias aproximações para o mesmo problema. Este tipo de análise é incomportável pelo método de programação *online*.

No entanto, a construção do modelo tridimensional da célula no simulador pode não coincidir na totalidade com a célula real. Este fator implica, quase sempre, alteração de pontos no programa do robô. Apesar da programação *offline* reduzir o tempo de implementação em obra, é necessário despende tempo extra a construir o modelo tridimensional da célula e a testar a programação nesse modelo.

2.8 Suma do Capítulo

Este capítulo apresenta, de forma breve, os conceitos e notação básica inerentes à robótica industrial. Inicia-se pela contextualização histórica que pretende

localizar temporalmente o desenvolvimento da tecnologia. Seguidamente é apresentada a constituição, classificação, volume de trabalho e os tipos de sistemas de controlo de movimento que podem ser implementados nos robôs industriais. Seguidamente é apresentada a terminologia que caracteriza um robô industrial e os conceitos de cinemática direta, cinemática inversa e singularidades. Para concluir apresentam-se os métodos de programação de robôs industriais. Os conceitos apresentados neste capítulo permitem fundamentar o trabalho desenvolvido.

Capítulo 3

Implementação de Células Robotizadas

A venda de robôs industriais atingiu um novo recorde de 387000 unidades em 2017, verificando-se um aumento de 31% comparativamente com o ano anterior, com 294300 unidades vendidas. Cerca de 58% das vendas de 2017 foram adquiridas para o mercado chinês. A compra de robôs industriais nos Estados Unidos da América aumentou cerca de 6% e na Alemanha aumentou cerca de 8% comparativamente com o ano de 2016 [30].

O presidente da IFR, Junji Tsuda, afirma que a robótica industrial está a desenvolver-se a um ritmo impressionante e que áreas como a digitalização, simplificação e interação colaborativa robô-humano vão mudar o futuro da indústria e permitir um desenvolvimento maior. A nível do volume de vendas a Ásia tem um dos mercados mais fortes. Os cinco países que lideram o mercado de implementação de robôs industriais são a China, Japão, República da Coreia, Estados Unidos da América e Alemanha [30].

Neste capítulo serão apresentados os componentes e métodos de implementação de sistemas robotizados. Primeiro será feita uma breve análise expositiva das aplicações da robótica industrial. Segue-se a apresentação das medidas de segurança na operação e programação de robôs e de seguida é feita uma breve apresentação sobre redes de comunicação. Para finalizar são apresentadas as fases de implementação de um sistema robotizado.

3.1 Aplicações Industriais da Robótica

A maioria das aplicações de robótica industrial pode subdividir-se em três tipos de operações mais comuns: operações de manuseamento, montagem e inspeção e operações de processamento [31].

3.1.1 Operações de Manuseamento

As operações de manuseamento de materiais caracterizam-se pela movimentação de uma localização para outra da peça ou objeto que está agarrada ao atuador final do robô. Este tipo de operações evita a manipulação de cargas elevadas ou volumosas por parte dos operadores, aumenta a segurança dos sistemas na interação entre operadores e máquinas e assegura a repetibilidade das operações em execução. Para o desenvolvimento de células robotizadas, com o objetivo de desempenhar operações de manuseamento, é necessário conhecer o posicionamento, orientação e dimensão dos objetos a manipular, para o desenvolvimento de garras que permitam pegar na peça de forma estável, robusta e consistente. A rentabilização do tempo de ciclo das operações pode ser conseguida através da minimização das distâncias de manipulação, ou, em alternativa, através da criação de garras duplas, diminuindo o número de deslocamentos.

O manuseamento de materiais pode ser classificado de acordo com o tipo de aplicação: transferência de material (*pick and place*) ou carga e descarga de máquinas.

As operações de *pick and place* caracterizam-se pela transferência de objetos de uma localização para outra [31]. Neste tipo de aplicações as peças alimentam o sistema numa posição e orientação fixa e conhecida. O robô pega no objeto, move-se até ao ponto de destino e larga-o. A complexidade destes sistemas pode aumentar significativamente quando o ponto de pega é dinâmico, porque a peça não para no tapete transportador de alimentação. A indústria de embalamento alimentar é um dos exemplos deste tipo de aplicações da robótica.

Nas aplicações de carga e descarga de máquinas o robô está, normalmente, localizado no meio de uma ou mais máquinas produtivas. A implementação deste tipo de soluções permite a eliminação de esforços físicos, que por vezes são efetuados constantemente em posições pouco ergonómicas, e elimina o acontecimento de acidentes por decréscimo de atenção na operação de maquinaria pesada. Quando o ambiente de trabalho é prejudicial para a saúde, a robotização deste tipo de operações, reduz a exposição aos agentes nocivos.

A indústria da fundição injetada é um bom exemplo do benefício deste tipo de aplicações. A descarga de injetoras de fundição ou carga e descarga de prensas de corte são operações potencialmente perigosas que expõem o operador a esforços físicos, temperatura e, possivelmente, níveis de poluição atmosférica elevados. Além disso, o processo pode ser rentabilizado para trabalhar com uma cadência maior, aumentando a produtividade da máquina injetora.

A Figura 3.1 apresenta uma solução implementada com um robô da ABB, para efetuar a descarga de blocos de motor de uma máquina de fundição injetada na empresa norte americana Mercury Marine's.

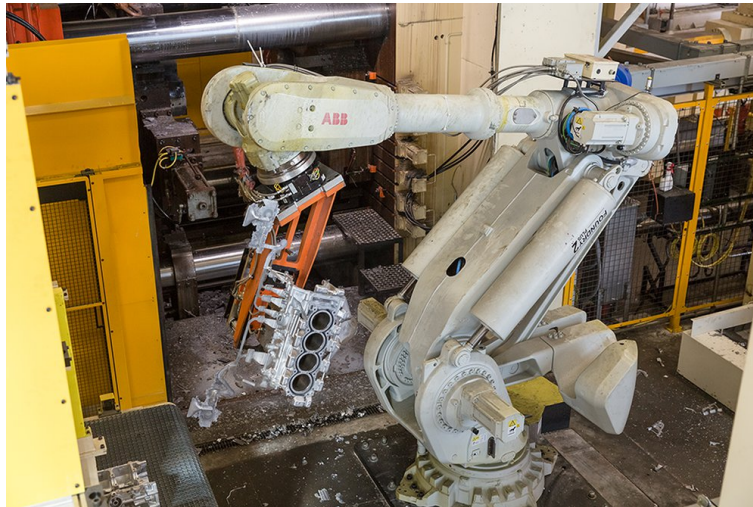


Figura 3.1: Descarga de máquina de injeção com um robô ABB [32].

3.1.2 Operações de Montagem e Inspeção

As operações de montagem e inspeção caracterizam-se pelo uso da robótica para efetuar a agregação dos diferentes componentes de uma montagem e/ou para efetuar algum tipo de inspeção ao componente em estado de pré-montagem ou pós-montagem. A montagem automática para séries de grandes quantidades de produtos é realizada com recurso a automação fixa. No entanto, para produtos com ciclos de vida curtos e com volumes de produção médios ou pequenos os sistemas automáticos feitos à medida não são rentáveis pela falta de flexibilidade de produção. A solução para a produção destes volumes mais pequenos passa por sistemas flexíveis de fabrico que podem incluir robôs. Os sistemas de montagem podem ser classificados como linhas de montagem, onde o produto é deslocado ao longo de linhas sendo-lhe acrescentados componentes, ou como células de montagem, onde o movimento do produto está restrito a um espaço (célula).

A tendência do mercado da robótica para instalação de sistemas robotizados de montagem e inspeção é a introdução de robôs colaborativos. Este tipo de robôs permite a interação no mesmo espaço de trabalho entre o operador da linha de montagem e o robô. Ambos desempenham tarefas de montagem, sendo que quando não há mecanismos de inspeção digital, o operador fica encarregue de verificar o produto antes de o enviar para outra célula ou linha. A ABB Elektro-Praga, na República Checa, possui uma linha de montagem de tomadas elétricas onde o robô colaborativo Yu-Mi, da ABB, é responsável pela montagem dos dispositivos de segurança para crianças. O processo é iniciado com a colocação por parte do operador de duas tampas de tomadas nas zonas de fixação concebidas

para o efeito. O robô procede à montagem de molas e do dispositivo plástico de segurança e depois o operador faz uma última inspeção visual, antes de dar continuidade do produto para outra linha de montagem [33]. A utilização da robótica neste caso permitiu aumentar a eficiência da linha, reduzir o custo de produção, aumentar a qualidade do produto final e melhorar as condições de trabalho dos operadores, uma vez que já não têm que executar aquela tarefa de natureza pouco ergonómica repetidamente.

3.1.3 Operações de Processamento

As operações de processamento caracterizam-se pelo uso de uma ferramenta como atuador final, em vez de uma garra, para efetuar algum tipo de operação de processamento numa dada peça ou objeto, como por exemplo soldadura ou maquinação, rebarbagem, polimento, entre outras.

As operações de soldadura, principalmente na indústria automóvel, representam uma grande parte das aplicações da robótica industrial. Além da consistência e qualidade das soldaduras, este tipo de aplicações melhora as condições de trabalho dos operadores, retirando-os das condições hostis características desta operação. Em robótica, as operações de soldadura dividem-se em soldadura por arco elétrico e soldadura por pontos.

Soldadura por Arco Elétrico

Nas aplicações de soldadura por arco elétrico é usada uma tocha de soldadura, como ferramenta, e a alimentação do eléctrodo e gás de soldadura são feitas com recurso a tubagens flexíveis fixas ao braço robótico. Devido às características técnicas deste tipo de operações é necessário que o sistema robotizado tenha sensores e funções para controlo de movimento, que permitam desvios de trajetória, funções de oscilação relativamente a um ponto ou trajetória de referência, ou ainda, funções de seguimento de juntas para soldadura de peças cilíndricas, por exemplo.

Para rentabilizar as células robotizadas para soldadura por arco elétrico, podem ser construídos mecanismos que efetuam uma carga e descarga semi-automática da célula. Enquanto o robô está a realizar operações de soldadura numa peça, um operador pode preparar a próxima peça numa estrutura de indexação. Quando o robô termina uma peça terá outra pronta imediatamente a seguir. Este tipo de dispositivos permite reduzir o custo de carga e descarga da célula, uma vez que está a ser rentabilizado com a soldadura de outra peça.

A empresa americana de estampagem e produção de componentes AFC (Dayton, EUA) conseguiu eliminar as rejeições de produtos não conformes por falhas nas soldaduras dos seus componentes. No primeiro ano, os custos de produção reduziram cerca de 64000 dólares [34].

Soldadura por Pontos

Nas aplicações de soldadura por pontos os robôs possuem pinças de soldadura acopladas ao punho do manipulador. A execução deste tipo de operações com robôs industriais requer, normalmente, robôs de grande dimensão, com capacidades de carga elevadas, para manipular a pinça de soldadura. À semelhança da soldadura por arco elétrico, a robotização de operações de soldadura por pontos melhora a qualidade do produto final, melhora o controlo do processo produtivo e aumenta a segurança nos ambientes de execução destas tarefas. Um exemplo deste tipo de aplicações na indústria automóvel é a fase de junção de várias peças estruturais que integram o chassi de um veículo.

A empresa Ogihara America Howell (EUA), produtora de painéis e subconjuntos estruturais para marcas como Toyota, Mercedes, Ford e GM, possui quatro linhas de soldadura com vinte robôs no total. A implementação destes robôs foi importante para a melhoria da qualidade dos subconjuntos fabricados e permitiu eliminar a estação de re-soldadura existente. O investimento efetuado nesta solução foi recuperado ao fim de seis meses de produção [35].

Maquinação, Rebarbagem e Polimento

A implementação de operações de maquinação, rebarbagem e polimento requer robôs com capacidades de programação e movimentação mais avançadas. Este tipo de operações pode caracterizar-se pelo acoplamento de uma ferramenta de desbaste ou polimento no punho do robô, ou, em alternativa, o robô possui uma garra de aperto que pega na peça e desloca-a até à ferramenta, que está numa posição fixa dentro do espaço de trabalho robô.

Este tipo de operações são de difícil implementação e exigem um conhecimento profundo sobre o processo, relativamente a propriedades de materiais, ferramentas, parâmetros de avanço e velocidades de corte. A repetibilidade deste tipo de operações pode ser comprometida pela variação das peças, provenientes de um molde de fundição. A integração de mecanismos de adaptabilidade neste tipo de operações, como o *Force Control* da ABB, permite solucionar estes problemas através do controlo contínuo da trajetória com base nos parâmetros velocidade ou pressão [36].

A realização manual deste tipo de operações sujeita os operadores a ambientes com elevados níveis de poeiras e ruído, vibrações excessivas por parte das ferramentas de desbaste e apresenta taxas de acidentes elevadas. A robotização deste tipo de processos permite uma maior garantia no cumprimento de tolerâncias, uniformidade nas operações e consequentemente aumento da qualidade do produto final. As operações de maquinação mais comuns na indústria são limpeza de peças fundidas ou estampadas e polimento.

3.2 Segurança

Os robôs industriais são cada vez mais aplicados em pequenas, médias e grandes indústrias. Para aproveitar ao máximo as capacidades de um sistema robótico, os operadores devem estar devidamente informados dos métodos e boas práticas de operação da célula a fim de garantirem a sua segurança e bem estar. Contudo, os acidentes com robôs industriais normalmente não ocorrem durante a fase de produção, mas sim nas fases de implementação, programação ou manutenção [37]. Apesar de o número de ocorrências ser muito pequeno, este tipo de acidentes pode provocar, infelizmente, lesões graves ou fatalidades e ocorrem, normalmente, com operadores experientes ou trabalhadores fora do ciclo normal de produção, como por exemplo, técnicos de manutenção ou programadores [38].

Os robôs industriais são máquinas perigosas e a sua integração com outras máquinas aumenta a potencialidade de ocorrência de acidentes. A implementação deste tipo de sistemas é projetado, quer a nível de *software*, quer a nível de *hardware*, para uma aplicação específica partindo do princípio que as regras de segurança estão a ser cumpridas. As marcas fabricantes de robôs industriais não se responsabilizam pelo uso impróprio dos seus sistemas. Além dos danos pessoais, podem ocorrer danos materiais. Atualmente os fabricantes, integradores e utilizadores de robôs industriais, aplicam vários métodos de segurança, como por exemplo [39]:

- integração de funcionalidades de segurança nos robôs;
- limites físicos de segurança;
- sinalização e marcação de áreas;
- sistemas inteligentes de deteção e aviso de colisões;
- desenvolvimento da célula orientado à segurança.

As causas dos acidentes na robótica industrial podem ter várias origens, como por exemplo, entrada não autorizada de pessoas na área de trabalho, erros de programação e manutenção, falhas elétricas, hidráulicas ou pneumáticas, erros de controlo, falhas mecânicas, falhas ambientais, entre outros. Para minimizar o risco da ocorrência de acidentes, além do cumprimento das normas de segurança, é necessário respeitar 3 pressupostos fundamentais [40]:

1. se um robô não se encontra em movimento não se deve partir do princípio que ele não se vai mexer;
2. se o robô está a repetir um padrão de movimento não se deve assumir que o vai continuar a repetir;

3. manter o respeito pelo que o robô é pelo que pode fazer.

A implementação de sistemas de automação e robótica industrial segue um conjunto de normas internacionais e legislação nacional criadas para tornar a operação e implementação destes equipamentos o mais segura possível. Há dois tipos de medidas de proteção que podem ser implementadas, as medidas passivas e as medidas ativas [40].

3.2.1 Medidas de Proteção Passivas

As medidas de proteção passivas são regras de conduta que devem ser implementadas para evitar situações que possam levar à ocorrência de acidentes. Estas medidas passam pela formação de operadores e atribuição de responsabilidades na operação e utilização do sistema. A nível da célula deve-se limitar o espaço dos robôs ao mínimo necessário, definir e sinalizar as zonas de segurança e zonas de trabalho, inspecionar e limpar periodicamente a célula de trabalho, operar manualmente o robô somente em condições de erro, utilizar o vestuário e proteção adequados e instalar sistemas de proteção do operador, como extração de fumos e poeiras ou proteção de cabos e tubos [40].

3.2.2 Medidas de Proteção Ativas

As medidas de proteção ativas são implementadas na fase de desenvolvimento do projeto e destinam-se a limitar os efeitos ou consequências dos acidentes quando as medidas passivas não o conseguem evitar. Estas passam pela implementação de circuitos de paragem de emergência, sistemas de segurança ativa que impeçam o acesso à área de trabalho do robô, ou ainda proteção contra colisões [40].

Para melhorar a segurança do programador na implementação da célula, os controladores possuem vários mecanismos de segurança que precisam de se encontrar em funcionamento para manipular o robô. Os controladores têm, por norma, três modos de funcionamento que limitam a velocidade do manipulador na execução de código.

A operação, programação e manutenção da célula devem ser efetuadas de acordo com todas as normas de segurança. Particularmente na fase de manutenção do sistema os técnicos têm que garantir que o robô se encontra desligado ou se não for possível, garantir que o robô não se mexe em circunstância alguma de forma inesperada. A movimentação do robô durante a fase de manutenção deve ser efetuada sempre em modo manual, a velocidade reduzida, e deve ser garantido que apenas se encontra uma pessoa dentro da zona de perigo do robô, senda esta a pessoa que está a movimentar/operar o robô, salvaguardando a segurança de todos.

3.3 Redes de Comunicação

A partilha de dados e informação em sistemas de automação industrial é realizada seguindo uma estrutura hierárquica, que define o fluxo de dados e latência dos sistemas de comunicação. Como tal, a implementação de redes de comunicação varia de acordo com o nível hierárquico de empresa. As redes de comunicação podem ser divididas em nível de administração/gestão, nível de célula, nível das máquinas e nível dos sensores/atuadores [41].

O nível administrativo caracteriza-se pelo elevado fluxo de dados e pela partilha de recursos por grupos de utilizadores, como impressoras, bases de dados, gestão de *stocks*, entre outros. Ao nível da célula, as redes de comunicação interligam dispositivos fabris de controlo e supervisão. Neste nível são necessários bons mecanismos de controlo de erros para garantir que a produção não é interrompida por dificuldades de comunicação ou erros de transmissão. Ao nível das máquinas, as redes de comunicação interligam vários dispositivos que necessitam de cooperar entre si para realizar determinadas operações. A latência da comunicação é, por isso, um fator crucial. Normalmente implementam-se redes *fieldbus* ou, mais recentemente, *ethernet* industrial. O nível dos sensores/atuadores é o nível mais baixo da hierarquia com um fluxo de dados reduzido e com características de transmissão em tempo real. Neste nível a troca de dados é feita entre dispositivos simples e os dispositivos do nível das máquinas [41][42].

À exceção de aplicações de automação e robótica mais recentes, as redes de comunicação *fieldbus* eram implementadas em larga escala, ao nível das máquinas, para interligar e assegurar a troca de dados entre os dispositivos de controlo das máquinas industriais. Protocolos como PROFIBUS ou DeviceNet ainda se encontram amplamente implementados na indústria. No entanto, com o aumento constante do volume de dados e evolução da tecnologia estas redes de comunicação industriais evoluíram para sistemas de redes baseados em *Ethernet* [43].

3.3.1 Ethernet Industrial

O termo *Ethernet* industrial é usado normalmente para descrever protocolos de comunicação baseados em *Ethernet* (norma IEEE 802.3), como, por exemplo, PROFINET, Ethernet/IP, entre outros. As redes *Ethernet* modernas permitem velocidade de transmissão de 100 Mb/s ou superiores, sendo que começam a aparecer algumas aplicações com velocidades de transmissão na ordem do Gigabit por segundo. Estas velocidades de transmissão permitem o controlo de sistemas de tempo-real. A implementação deste tipo de redes facilita a escalabilidade, flexibilidade e robustez dos sistemas de transmissão de dados [42].

3.3.2 PROFINET

As redes PROFINET são redes de comunicação *standard* para a *Ethernet* industrial. Estas podem ser aplicadas em todos os tipos de sistemas automatizados, como aplicações de controlo de movimento em tempo real isócronas, permitindo a integração de sistemas de redes de campo, como PROFIBUS ou DeviceNet, sem a alteração de equipamentos e máquinas já instaladas nas indústrias. Esta flexibilidade permite a proteção dos investimentos já realizados nas unidades fabris. As redes PROFINET são definidas segundo as normas de redes de campo IEC 61158 e IEC 61784. Este *standard* integra mecanismos de redundância automáticos e de diagnóstico. O envio de dados de diagnóstico fornece informações importantes sobre o estado da rede e dispositivos, incluindo a apresentação do tipo de rede.

Os sistemas de redes PROFINET para a troca de sinais *Input/Output* (I/O) podem ser classificados em: controlador, dispositivo e supervisor. O controlador é normalmente um PLC que fornece sinais de saída para os dispositivos configurados na rede e recebe sinais de entrada desses mesmos dispositivos. Os dispositivos de uma rede PROFINET podem estar ligados a um ou mais controladores e apenas efetuam trocas de dados com os controladores. Os sinais de saída dos controladores são os sinais de entrada dos dispositivos e vice-versa. Os supervisores são normalmente computadores ou interfaces humano máquina com funções de monitorização e diagnóstico das redes PROFINET.

Todos os dispositivos PROFINET que estão integrados numa rede possuem um ficheiro com as suas propriedades. Este ficheiro, denominado de *General Station Description* (GSD), é um ficheiro XML que contém toda a informação que o controlador precisa de saber para efetuar a troca de dados e comunicar com o dispositivo. A estrutura do ficheiro GSD corresponde à norma ISO 15745, que define regras para a descrição de redes de comunicação para dispositivos baseados em PROFINET, norma IEC 61158 [42].

3.3.3 Ethernet/IP

A rede de comunicação industrial *Ethernet/IP* usa a estrutura da *Ethernet* para configurar, interligar e controlar vários dispositivos de automação, como robôs, máquinas, PLC, sensores ou módulos de sinais digitais através de TCP/IP. Esta rede industrial é gerida pela Open DeviceNet Vendors Association (ODVA) e o protocolo da camada de aplicação baseia-se no Protocolo Comum Industrial (*Common Industrial Protocol*, CIP). Este protocolo abrange um conjunto de mensagens e serviços em várias áreas das aplicações de automação. O facto de ser uma rede industrial complacente com o *standard* IEEE da *Ethernet* permite alcançar velocidades de transmissão de 10 Mb/s, 100 Mb/s ou 1 Gb/s, sendo apropriadas à implementação de sistemas de muito baixa latência na transmissão de dados [42][44].

3.4 Metodologia de Implementação

A competitividade entre mercados a nível nacional e internacional obriga as empresas a inovar e otimizar os métodos de produção tendo em vista preços mais competitivos, maior qualidade no produto final e tempos de entrega mais curtos. Só assim uma empresa consegue crescer com o modelo económico atual, onde a oferta é, na grande maioria dos casos, superior à procura. Além disso, o cliente é cada vez mais exigente por um produto de boa qualidade, flexível, com o menor custo possível e com um tempo de entrega o mais curto possível.

A solução para as falhas e ineficiências dos métodos de produção das indústrias pode passar pela integração de sistemas automatizados de produção, como a robótica industrial, para melhorar o processo. A implementação ou integração de robôs industriais é uma solução que providencia vários tipos de flexibilidade [45], a saber:

- flexibilidade mista: define-se pela capacidade de ter vários tipos de produtos no mesmo processo ao mesmo tempo;
- flexibilidade de volume: define-se pela capacidade de aumentar ou diminuir a produção consoante a necessidade;
- multi-funcionalidade: define-se pela capacidade do robô de desempenhar várias tarefas distintas através de trocas de ferramentas;
- flexibilidade com novos produtos: capacidade de reprogramar o sistema adaptando o novo processo a novos produtos.

Além da flexibilidade, os outros benefícios da implementação de robôs industriais incluem a melhoria da qualidade do produto e conseqüentemente satisfação dos clientes, melhoria na eficiência de produção, consistência do produto final, melhores condições de trabalho, melhoria na gestão e operação de recursos, diminuição dos tempos de *set-up* das máquinas aquando da troca de produto e ainda facilidade na reutilização dos robôs para outros processos [45].

A criação e implementação de sistemas robotizados pode ser dividida em 5 fases distintas que caracterizam o ritmo e tipo de trabalho ao longo de um projecto, a saber: planeamento, desenvolvimento, fase de testes, instalação e, por fim, arranque e acompanhamento de produção [46].

3.4.1 Planeamento

O planeamento de uma aplicação robotizada é a primeira fase de um projeto. Nesta fase é necessário identificar os objectivos a alcançar com a implementação, identificar pontos contra e a favor da necessidade de robotizar o processo

e efetuar uma análise de segurança relativamente aos sistemas envolventes. A documentação detalhada da parte do cliente é crucial para a avaliação e estruturação da solução. Esta documentação deverá conter *layouts*, tempos de ciclos das máquinas alvo de integração, tempos de operação manual, registos de produção, registos de qualidade, dados dos produtos, como dimensão, peso e estabilidade, ou outro tipo de documentação que seja relevante para a definição inicial do sistema. Após a análise desta documentação é necessário selecionar um robô, escolher o atuador final e o tipo de atuação deste, verificar as condições de ar e temperatura e escolher as especificações computacionais e funções do controlador do robô. Por fim é necessário estimar o custo do sistema robotizado [46].

3.4.2 Desenvolvimento

A fase de desenvolvimento de uma aplicação robotizada é um processo iterativo onde vários sistemas são testados a fim de chegar à melhor solução. O número de iterações efetuadas depende da experiência e criatividade do projetista e da utilização de componentes *standard*. A especificidade da aplicação irá definir o tipo e grau de complexidade da implementação. Nesta fase define-se todo o conjunto de sistemas que vão integrar e interagir com o robô. Depois desta definição é efetuado um estudo do *layout* por *softwares* de simulação e programação *offline* para determinar trajetórias, tempos de ciclo, confirmar a existência de colisões e verificar se os atuadores finais se adequam ao processo. Os resultados das simulações e análise de estabilidade do processo poderão ou não obrigar à redefinição de componentes ou à adopção de outra estratégia para a resolução do problema. Após a verificação do bom desempenho e integridade do conceito é dada a ordem de fabrico dos componentes e os robôs são encomendados [46].

3.4.3 Fase de Testes

A fase de testes é definida pela recriação das condições reais e características fundamentais da aplicação com objetivo de testar todos os sistemas que integram a solução robotizada. Em aplicações de grande dimensão, ou que envolvem integração de maquinaria pesada, os testes são realizados para diminuir ao máximo erros de *software* e *hardware*. Nesta fase são efetuados testes ao código *offline* desenvolvido para a aplicação, corrigindo, se necessário, erros e pontos do robô. Se as condições de teste permitirem, realizam-se ciclos em funcionamento automático com as velocidades de movimentação reais, caso contrário a velocidade terá que ser diminuída [46].

3.4.4 Instalação

A instalação de uma solução robotizada está dependente do rigor dos testes na fase de testes. Depois da montagem do sistema nas instalações do cliente devem

ser realizadas afinações mecânicas finas e verificação do correto funcionamento do sistema à velocidade nominal, sem processo. A implementação fabril deve ser rápida para evitar longas interrupções de produção, para ajuste do equipamento. A falta de rigor na fase de testes pode provocar o aparecimento de situações que provocam alterações do projeto [46].

3.4.5 Arranque e Acompanhamento

A última fase da implementação de células robotizadas é a fase de arranque e acompanhamento. Na fase de arranque o sistema é iniciado com o processo a uma velocidade mais baixa que a nominal para verificar que tudo funciona de acordo com o esperado. Quaisquer erros encontrados neste fase devem ser corrigidos o mais rápido possível. Após o sucesso da fase de arranque, o projeto entra em acompanhamento. Durante a fase de acompanhamento é realizada uma avaliação contínua do processo para correção de pequenos problemas a fim de garantir estabilidade de funcionamento máxima [46].

3.5 Suma do Capítulo

A implementação de sistemas robotizados na indústria apresenta várias vantagens, quer a nível financeiro quer a nível social. Ao longo deste capítulo é possível apreender que a implementação de robôs industriais ajuda a assegurar a produtividade de uma empresa. Além disso, melhoram as condições de trabalho dos operadores retirando a exposição direta a tarefas que têm efeitos nefastos para a saúde. No entanto, nem tudo são vantagens. Os robôs industriais são máquinas perigosas sendo necessário saber operá-los e respeitá-los para evitar danos pessoais e/ou materiais. Neste capítulo são apresentadas medidas de proteção passivas e ativas para prevenção e impedimento, respetivamente, de acidentes. A secção seguinte, redes de comunicação, introduz e apresenta dois tipos de redes de transferência de dados utilizadas na indústria: PROFINET e *Ethernet/IP*. Estes dois tipos de redes fazem parte de uma nova geração nas redes de comunicações. Para finalizar o capítulo é apresentada a metodologia de implementação de células robotizadas. A definição inicial e criteriosa dos objetivos a atingir, com uma dada solução, é fundamental para o seu sucesso.

Capítulo 4

Robotização na Indústria da Fundição Injetada

As indústrias de fundição são vulgarmente caracterizadas pela utilização de maquinaria pesada para efetuar vários processos de transformação de metais ou ligas metálicas.

O chão de fábrica deste tipo de indústrias apresenta condições ambientais poluídas e perigosas, desfavoráveis aos operadores. Fatores como a exposição direta a altas temperaturas, agentes químicos de lubrificação, ambientes sujos, poeiras, níveis de ruído elevados, entre outros, aliados ao desempenho de tarefas de operação de maquinaria pesada com um nível de exigência física elevada, têm um impacto negativo na saúde dos operadores que trabalham neste tipo de indústrias. Estas condições podem desencadear acidentes pessoais graves provocados pela fadiga e distração, característicos da execução de tarefas repetitivas e pouco ergonómicas. A implementação de sistemas robotizados na indústria da fundição apresenta uma melhoria significativa das condições de trabalho dos operadores.

Além das mais valias sociais, a robotização de processos na indústria da fundição injetada melhora as metodologias de produção e qualidade. A qualidade do processo e do produto melhoram através da redução do desperdício da fundição e do controlo dos tempos de ciclo das máquinas. A consistência da pega e manipulação da peças não fere os moldes de injeção, aumentando a sua longevidade. O controlo sobre as rotinas de arrefecimento melhora a qualidade final das peças. A eliminação de custos não produtivos, baixa taxa de refundição, aumento da velocidade de produção, diminuição dos tempos de inspeção de peças e a utilização de um robô para várias máquinas permite o aumento da produtividade e redução dos custos de produção [47].

4.1 Indústria da Fundição

Os processos de fundição metalúrgica podem ser classificados segundo dois tipos: processos de fundição de moldes descartáveis e processos de fundição de moldes permanentes.

Um exemplo de fundição de moldes descartáveis é a fundição de areia, também designada de fundição em moldes de areia. Neste processo a liga metálica derretida é vazada para um molde de areia prensada permitindo que esta solidifique. Após o processo de solidificação e arrefecimento, o molde é partido para remover a peça de fundição. Depois da libertação da peça do molde, esta é limpa, inspecionada e alvo de tratamentos térmicos para melhorar as propriedades metalúrgicas da peça [48].

Os processos de fundição de moldes permanentes usam moldes que são usados muitas vezes. Os moldes deste processo de fundição, normalmente feitos em aço ou ferro fundido, são constituídos por duas ou mais partes maquinadas com a forma do negativo da peça no molde, permitindo obter consistência dimensional e bom acabamento. As ligas metálicas mais usadas neste tipo de fundição são ligas de alumínio, zinco, magnésio, cobre e ferro de fundição. Este processo de fundição é limitado, normalmente, pelo uso de ligas metálicas com um ponto de fusão baixo. Devido ao custo de fabrico dos moldes, este processo destina-se a grandes volumes de produção [48]. A Figura 4.1 apresenta uma ilustração de um molde permanente para um pistão.

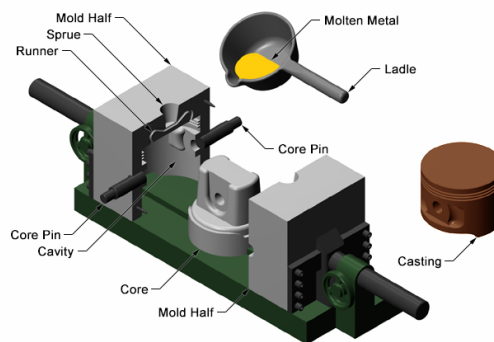


Figura 4.1: Molde permanente para fabrico de pistões [49].

4.2 Fundição Injetada

A fundição injetada é um dos processos de fundição de moldes permanentes, onde a liga metálica, derretida num forno, é injetada para a cavidade do molde a alta pressão, garantindo que a liga metálica preenche por completo o molde.

A pressão é mantida durante a fase da solidificação, depois da qual o molde é aberto e a peça removida. Este processo é realizado com um tipo especial de maquinaria desenvolvido para criar pressões elevadas e manter o molde fechado durante a injeção. Uma célula de injeção é constituída por uma máquina de injeção, um forno de manutenção, equipamentos de manuseamento de peças de fundição, denominadas de jitos, sistemas de corte para remover os excessos dos jitos e sistemas de lubrificação para limpar e preparar o molde para o próximo ciclo de injeção [49].

Existem dois tipos de máquinas de injeção que se classificam como máquinas injetoras de câmara quente ou máquinas injetoras de câmara fria, distinguindo-se pelo método de injeção da liga metálica.

4.2.1 Injetoras de Câmara Quente

As máquinas injetoras de câmara quente são utilizadas para a injeção de ligas metálicas com pontos de fusão baixos, como o zinco, estanho e chumbo. Nestas máquinas o sistema de injeção está em contacto directo com a liga metálica que está contida numa panela de fundição, dentro de um forno que mantém um certo valor de temperatura para manter o estado líquido do metal. A Figura 4.2 apresenta uma ilustração deste tipo de máquina de injeção onde é possível visualizar o sistema de injeção mergulhado dentro do zinco líquido [50].

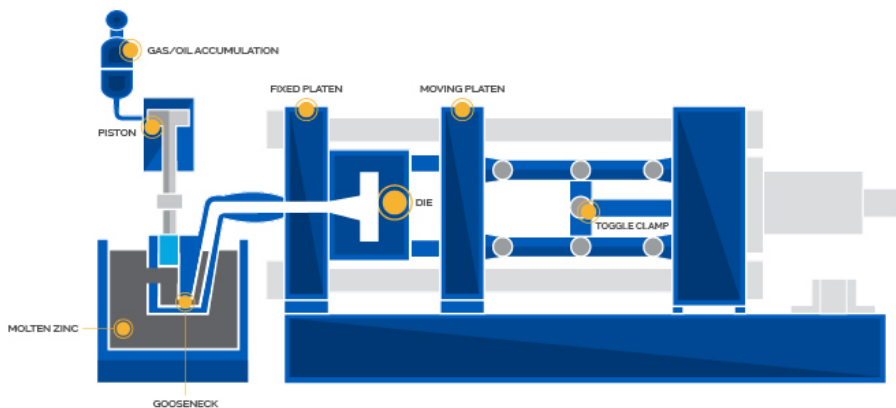


Figura 4.2: Máquina de injeção de câmara quente [51].

Quando o pistão de injeção está recolhido a liga metálica derretida enche a câmara de injeção através de uma abertura no sistema de injeção. O molde é fechado e o pistão, atuado hidraulicamente, injeta a liga metálica dentro do molde a alta pressão, através do canal de alimentação. As pressões de injeção para este tipo de máquinas injetoras pode ser entre 6,8 MPa e 34,5 MPa. Após a injeção

o pistão continua em baixo para manter a pressão enquanto a peça de fundição solidifica. A descarga da máquina de injeção inicia com o recuo do pistão de injeção e prossegue com a abertura do molde, recuo dos pinos de enchimento e avanço dos pinos de extração para soltar a peça do molde. Após a descarga da máquina esta pode iniciar outro ciclo de injeção [50]. A Figura 4.3 ilustra cada passo do processo de injeção.

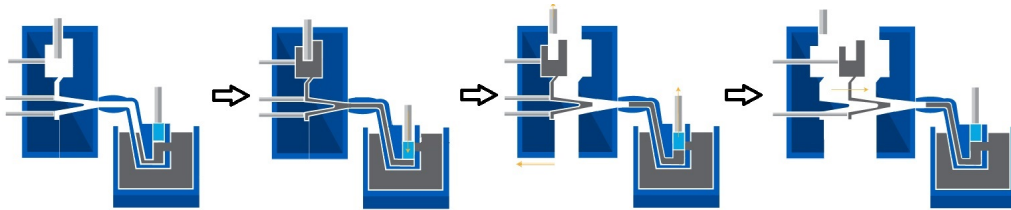


Figura 4.3: Sequência de injeção numa máquina de câmara quente [51].

4.2.2 Injetoras de Câmara Fria

As máquinas injetoras de câmara fria são utilizadas para a injeção de ligas metálicas, como alumínio, latão ou magnésio, com pontos de fusão mais altos, impossibilitando a colocação da câmara e sistema de injeção dentro do metal líquido. À semelhança das máquinas de câmara quente, o metal derretido é mantido dentro de uma panela de fundição que está colocada num forno de manutenção de temperatura. No entanto, como a panela de fundição está separada da máquina injetora, a liga é retirada com uma colher, peça a peça, para a entrada do canal de alimentação da máquina injetora. A Figura 4.4 apresenta uma ilustração de uma máquina de injeção de câmara fria, onde é possível observar a ausência da panela que alimenta a câmara de injeção.

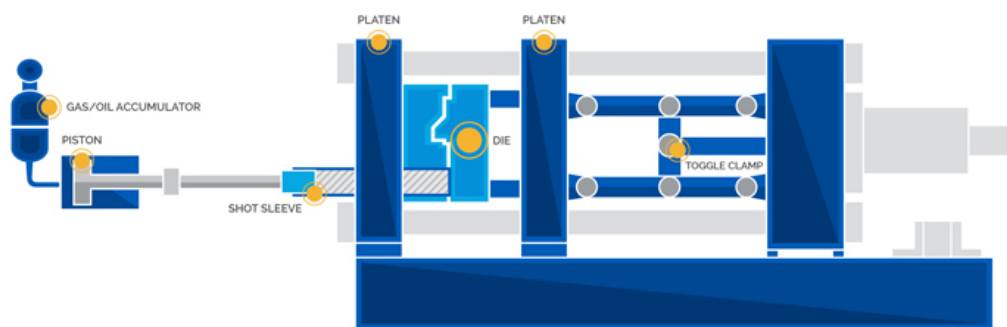


Figura 4.4: Máquina de injeção de câmara fria [51].

O sistema de injeção nas máquinas de câmara fria funciona pelo mesmo prin-

cípico que as máquinas de câmara quente, no entanto, o injetor, composto pelo êmbolo e pistão, estão numa configuração horizontal e não incluem afunilamento do canal de alimentação. Depois de um mecanismo carregar a câmara de injeção com a quantidade certa de metal derretido, o pistão força o metal para a cavidade do molde. As pressões de injeção neste tipo de máquina podem-se encontrar entre 14 MPa e 140 MPa, muito superiores às de injeção de câmara fria. Depois da injeção, o pistão mantém-se na posição para manter a pressão enquanto o metal solidifica. Após a solidificação o circuito hidráulico recua o pistão, abre o molde e avança os pinos extratores que possibilitam a descarga da máquina [50]. A Figura 4.5 ilustra cada passo do processo de injeção com máquinas de câmara fria.

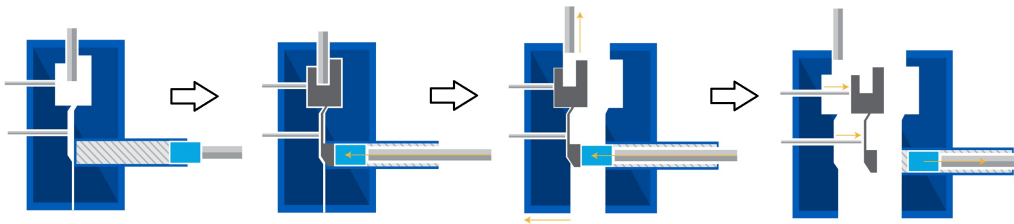


Figura 4.5: Sequência de injeção numa máquina de câmara fria [52].

4.3 Descrição do Processo de Fundição

O processo cíclico da fundição injetada consiste na repetição de oito operações que podem ser classificadas em cinco categorias: preparação e fecho do molde, injeção, solidificação, extração e arrefecimento e corte, Figura 4.6 [50].

A preparação e fecho do molde é a primeira fase do ciclo de fundição injetada. O molde tem que ser lubrificado e limpo para facilitar a injeção da liga metálica, garantir que a peça fundida fica com bom acabamento e para não danificar o molde, podendo ser só necessária após dois ou três ciclos, dependendo do material. O tempo de lubrificação varia consoante o tamanho do molde e o número e forma das cavidades. Após a lubrificação, o molde é soprado para limpar o excesso de desmoldante que possa ter permanecido da fase anterior. De seguida o molde é fechado com força suficiente para o manter fechado aquando da injeção. O tempo de fecho do molde pode variar, dependendo do tamanho da máquina.

A segunda fase do ciclo de fundição injetada é a injeção. A liga metálica é mantida no estado líquido com um forno de manutenção que se localiza perto do canal de alimentação do sistema de injeção. A cada ciclo é transferida uma quantidade de metal para a câmara de injeção, que depois será injetada na cavidade do molde. A pressão de injeção e o tempo de avanço do êmbolo variam consoante o tipo de máquina de injeção (câmara quente ou fria).

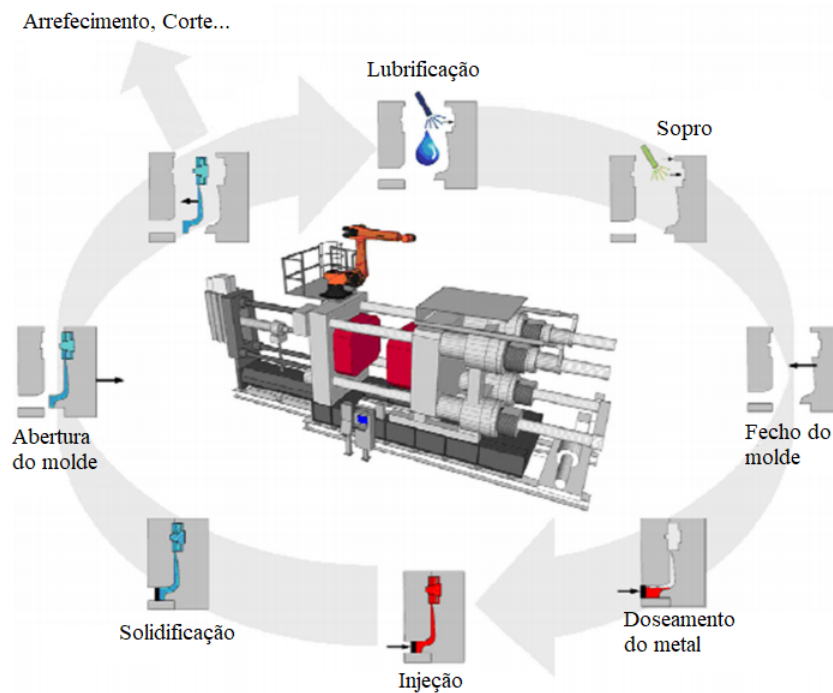


Figura 4.6: Sequência de acontecimentos do processo de fundição (Adaptado [52]).

Após a injeção, o metal que está dentro da cavidade do molde começa a solidificar e a arrefecer, esta fase denomina-se de solidificação. O tempo de solidificação varia de acordo com as propriedades termodinâmicas do material injetado e aumenta quanto maior for a espessura e complexidade da peça.

A extração inicia-se com a abertura do molde enquanto a peça permanece na parte móvel do molde. De seguida o sistema extrator irá buscar a peça pela bolacha de suporte da peça. O tempo entre a solidificação e a extração, apesar de curto, é suficiente para que a peça contraia e se agarre ao molde, sendo necessário o uso de pinos extratores para libertar a peça. O sistema de extração pode agarrar a peça com os pinos extratores avançados ou recuados. Neste último caso, é necessário que o sistema de extração consiga ceder à força dos pinos extratores sem oferecer resistência para não danificar ou partir a peça de fundição. Após a extração a máquina injetora reinicia o ciclo, procedendo à limpeza do molde. Enquanto decorre a lubrificação o sistema extrator manipula a peça em operações de corte da peça.

As operações de corte consistem na remoção dos canais que ligam e orientam o metal na fase da injeção. Estes canais têm que ser retirados manualmente, com recurso a discos de corte ou serras, ou com recurso a uma prensa de corte. Em

ambos os casos, a operação de corte pode ser realizada pelo sistema extrator se este possuir os graus de liberdade necessários para a operação.

4.4 Casos de Estudo - uso de robôs ABB para operações de fundição

4.4.1 Apresentação da Solução

As indústrias da fundição são sítios com fracas condições de trabalho por causa das temperaturas elevadas, ruídos, trabalhos fisicamente exigentes e tarefas potencialmente perigosas, além do *stress* associado quando a operação envolve proximidade com alumínio em estado líquido a 600 °C.

A robotização destas tarefas é importante, não só para a melhoria das condições de trabalho das operações mas também para o aumento de produtividade da Form, que é uma empresa líder na indústria da fundição injetada de alumínio e maquinaria, que fornece, maioritariamente, a indústria automóvel. Esta empresa tem cerca de 200 robôs nas três unidades fabris em Itália [53].

A Form usa robôs especialmente desenvolvidos para a indústria da fundição, como é o caso da linha *Foundry Prime* da ABB, que possuem componentes e acabamentos capazes de aguentar as condições agrestes da indústria da fundição. O investimento nestes robôs é amortizado pelas máquinas ao fim de cinco anos. Os primeiros robôs instalados em 1983 continuam a trabalhar nas fábricas de forma robusta e com poucos custos de manutenção.

Numa célula da unidade fabril da Form em Milão, um robô ABB IRB 6650 manipula componentes em alumínio a alta temperatura e executa uma série de tarefas como perfuração, remoção de excesso de material, arrefecimento numa tina de água, gravação de data e hora de produção e paletização dos componentes, que são posteriormente enviados para outra célula. Nesta célula o robô é capaz de processar 30 componentes por hora. Um trabalhador humano apenas conseguiria fazer 10 peças por hora a um ritmo de trabalho elevado. A Figura 4.7 apresenta o robô ABB IRB 6650 na fase de extração das peças de fundição.

Numa outra célula, um robô ABB IRB 6600 recebe componentes em alumínio e executa várias tarefas de manipulação da peça. O robô começa por colocar a peça numa prensa para perfurar e formar, de seguida insere-as num forno de decapagem com jato de areia, remove-a da estação de decapagem e efetua um furo para lubrificação a óleo. A peça segue para uma zona de testes e inspeção e depois o robô coloca-a numa linha que a transportará até ao próximo processo.

O robô processa o mesmo número de peças num turno que o mesmo processo realizado ao longo de dois turnos por dois operários. A Form conseguiu reduzir em



Figura 4.7: IRB 6650 da ABB na fábrica de fundição da Form [53].

50% o número de trabalhadores desde que implementou três turnos de trabalho por dia, mantendo os padrões de qualidade.

4.4.2 Conclusão

Cerca de 90% da produção da Form é dedicada à indústria automóvel, onde os padrões de qualidade são muito elevados. Os robôs industriais são soluções consistentes e robustas que desempenham as tarefas mais árduas e monótonas melhorando as condições de trabalho para os operadores. O aumento da produtividade e tempo de ciclo, mantendo a robustez do processo, permitem à Form a melhoria da qualidade do produto final [53].

4.5 Casos de Estudo - internacionalização e aumento de produção através da robotização na MP Filtri

4.5.1 Apresentação da Solução

A empresa italiana MP Filtri (Milão) é uma das maiores produtoras mundiais de filtros de óleo. No início da década de 90 esta empresa decidiu apostar em

expandir o mercado, através da internacionalização, e rapidamente começou a competir com empresas americanas e alemães. No entanto, já em 1990 esta empresa tinha alguma dificuldade em contratar operadores qualificados para realizar tarefas, como por exemplo, operar prensas hidráulicas. A temperatura excessiva, o *stress* e o excesso de ruído começaram a originar falhas no controlo de qualidade e os postos de trabalho com maquinaria pesada começaram a ficar perigosos para os trabalhadores [54].

Uma das vantagens que esta empresa tinha face aos seus concorrentes, era o facto de possuir unidades de fundição para as peças de alumínio dos filtros, permitindo o controlo de todo o processo de fabrico, assegurando um nível de qualidade do produto final maior. A empresa começou a crescer internacionalmente e teve que recorrer a robôs para conseguir satisfazer as encomendas. Em 1995 a empresa instalou dois ABB IRB 4400 e no ano seguinte um ABB IRB 2400. Os robôs foram instalados para efetuar a descarga das máquina de injeção, lubrificar os moldes e depositar as peças em sistemas de transporte que arrefeciam a peça antes de a levarem para a célula de maquinação. A implementação destes robôs permitiu retirar tarefas árduas e perigosas aos trabalhadores. Além da melhoria das condições de trabalho, os robôs produziam 60 filtros por hora, face aos 6 produzidos manualmente, e podiam ser controlados por uma só pessoa. A Figura 4.8 apresenta o robô IRB 4400 da ABB a retirar uma peça e a lubrificar o molde de fundição.



Figura 4.8: IRB 4400 da ABB na fábrica de fundição da MP Filtri [54].

Devido ao sucesso da implementação de robôs nas operações de fundição, a empresa decidiu investir em robôs ABB para outras áreas da empresa além da fundição. Em 2002 a empresa adquiriu um IRB 2400 e um IRB 6600 e em 2005 adquiriu mais um IRB 4400. Este conjunto de robôs foi implementado a

desempenhar tarefas de manuseamento na área da maquinação, para melhorar a produtividade das máquinas e precisão nos acabamentos.

O robô IRB 2400 e o IRB 6600 são usados para pegar em filtros que chegam da célula de lavagem num sistema de transporte, onde o peso do filtro determina qual é o robô que lhe vai pegar. De seguida o robô leva o filtro até uma estação de secagem e após este processo coloca os filtros num cesto. Quando a camada dos filtros estiver cheia o robô pega numa divisória intercalar em cartão a coloca-a no cesto, permitindo a construção de outra camada de filtros. O robô IRB 4400 manipula os filtros nas operações de maquinação. Este robô pega num filtro e coloca-o numa plataforma de posicionamento para assegurar que a peça se encontra devidamente posicionada, de seguida volta a pegar na peça e coloca-a dentro de uma das máquinas. Retira-a da primeira máquina e insere a peça numa estação de sopro para limpar limalhas e coloca-a numa paleta. Os robôs aumentaram a produtividade das operações uma vez que deixou de existir tempo de inatividade das máquinas.

4.5.2 Conclusão

O constante crescimento da empresa, aliado aos sucessos da robotização dos processos, estão a permitir a inovação de processo com robôs noutras áreas como a pintura. Atualmente a MP Filtri é uma das 10 especialistas a nível mundial na sua área, com uma produção de 1 milhão de filtros em alumínio, ferro fundido e aço, anualmente. A integração de robôs nos processos da fundição e posteriormente na maquinação permitiram aumentar a produtividade, sendo que a linha de produção consegue atingir em duas horas o mesmo que oito horas de trabalho apenas com operadores de linha, e aumentar a qualidade do produto final.

4.6 Casos de Estudo - robotização de uma linha com três células de fundição de alumínio

4.6.1 Apresentação da Solução

A Artimpianti é uma empresa italiana especializada na instalação de maquinaria para a indústria da fundição, incluindo soluções robotizadas. Os maiores focos de atividade desta empresa são o ramo automóvel e dos caminhos de ferro, sendo que 92% das soluções desenvolvidas são para exportação. Atualmente esta empresa tem 43 trabalhadores na fábrica em Itália e 32 numa fábrica no México. Aliado ao conhecimento na área da fundição e integração de sistemas robotizados desde 1991, esta empresa consegue otimizar os tempos de concepção dos projetos através da utilização de ferramentas de *software* de simulação 3D [55].

As primeiras soluções de integração de robôs nos processos de fundição, desenvolvidas pela Artimpianti, foram instaladas com o objetivo de retirar aos operadores tarefas com elevado risco de acidentes, aumentar o tempo de produção e melhorar a qualidade do produto final. Atualmente a eficiência e flexibilidade da linha são uma preocupação constante no desenvolvimento das células robotizadas. O uso de *softwares* de simulação permite reduzir o tempo de implementação e o tempo de arranque da obra significativamente, ajudando o cliente a ter uma melhor percepção da célula no seu estado final.

Atualmente as indústrias de fundição que fornecem para a indústria automóvel preferem sistemas de fabrico flexíveis em vez de sistemas de fabrico específicos para um só produto com capacidade de produção em massa. O caso de estudo analisado, nesta secção, é o desenvolvimento de duas linhas para uma indústria de fundição russa. A Artimpianti desenvolveu e implementou duas linhas para operações de fundição que interligam três zonas de fundição, substituindo os robôs cartesianos e articulados dedicados a cada estação.

Para este projeto foi desenvolvido um eixo linear aéreo com dois suportes. No topo da estrutura existem dois robôs cartesianos que são responsáveis pela manipulação e transporte dos núcleos dos moldes e pelo transporte da liga metálica no estado líquido até ao molde. Na parte de baixo do eixo linear está um ABB IRB 6620 invertido, Figura 4.9, que efetua a descarga dos moldes de fundição seguido do transporte da peça para uma estação de arrefecimento e limpeza da peça, antes de seguir para a estação de corte. Por fim a peça é colocada num tapete de transporte que encaminha a peça para uma célula de acabamento.

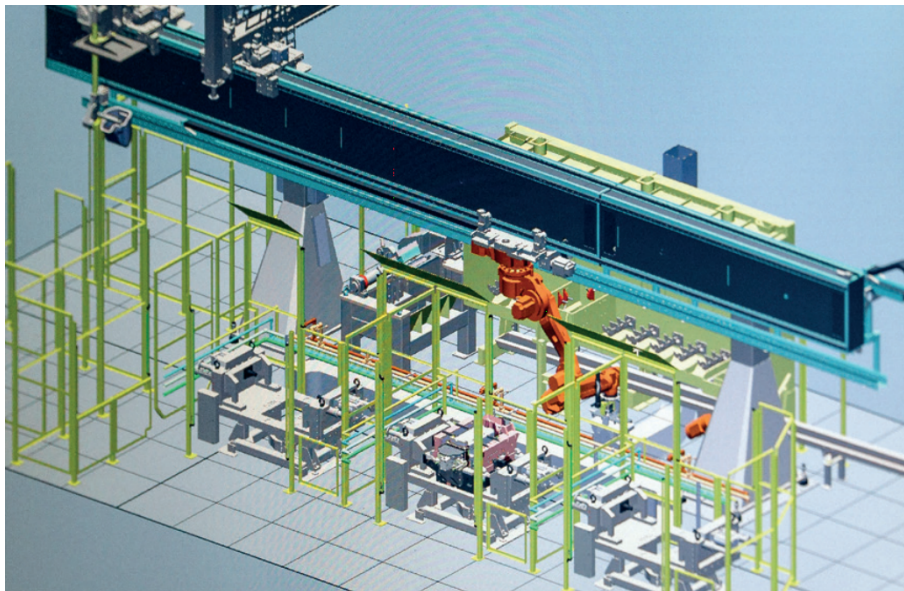


Figura 4.9: Robô invertido no eixo linear em ambiente de simulação [55].

O *layout* desta aplicação foi desenhado para garantir a mobilidade e segurança dos operadores, com a vantagem de permitir a monitorização visual do trabalho. Os operadores podem estar perto dos moldes, podendo interromper o ciclo de trabalho daquela secção da célula sem interferir com o resto dos processos. No caso de mudança do produto, o operador pode intervir na célula para efetuar a troca do molde, mantendo as outras duas estações de trabalho em funcionamento. O funcionamento sem interrupções e a atenuação dos tempos de troca do produto aumentam a produtividade e eficiência desta solução.

A nível de controlo do sistema, a célula é composta por 14 eixos que são controlados a partir do controlador do robô. Além dos seis eixos do manipulador robótico, o controlador também gere quatro eixos do robô cartesiano, responsável pela colocação dos núcleos dos moldes, e mais quatro eixos do robô cartesiano que abastece cada molde com a liga metálica em estado líquido. Este tipo de controlo permitiu reduzir do número de maquinaria necessária a efetuar as operações inerentes ao processo da fundição.

4.6.2 Conclusão

A solução robotizada desenvolvida pela Artimpianti, em colaboração com a ABB, melhorou as condições de segurança, produtividade e satisfação dos clientes, num mercado cada vez mais tecnológicas e que prima por soluções eficientes e inovadoras.

4.7 Casos de Estudo - célula de fundição injetada de alumínio com um robô kuka

4.7.1 Apresentação da Solução

A Auto Heinen é uma empresa sediada em Bad Münstereifel (Alemanha) com 70 anos de experiência no ramo da fundição injetada. A necessidade constante de inovar para dar resposta às encomendas, aliada aos critérios de qualidade do produto final, levaram esta empresa a renovar uma das células de injeção através da troca de equipamento e instalação de um robô Kuka [56].

Todos os passos inerentes ao processo de fundição injetada serão desempenhados dentro da célula, desde a injeção, a extração, o corte dos excessos de fundição e a lubrificação do molde. O sistema foi desenhado para produzir 200000 peças por ano, com três turnos diários. Além disso, para aumentar a produtividade do equipamento, os moldes foram desenhados para produzir quatro peças num ciclo de injeção de alumínio. Neste tipo de fábricas a flexibilidade do sistema é um fator importante devido às variações de encomendas dos produtos, que podem mudar na mesma semana. Assim, a robotização deste processo é uma das manei-

ras de garantir flexibilidade de produção, uma vez que mediante o envio de um conjunto de sinais com a referência do produto, ou mediante o ajuste simples de pontos, a célula pode voltar a produzir outro produto.

O ponto central da célula de injeção é um robô Kuka *foundry*, que tem especificações e acabamentos desenhados para resistir às condições ambientes típicas das indústrias de fundição. Este robô está equipado com uma garra de dois dedos que pega nas peças de fundição pela bolacha, manipulando a peça ao longo dos vários processos implementados na célula. Após a injeção, o robô entra dentro da máquina injetora e efetua a extração da peça para prosseguir para uma estação de inspeção, equipada com sensores de infra-vermelhos que detectam a constituição da peça. Após a verificação da peça, o robô submerge-a numa solução aquosa de arrefecimento para que esta atinja a temperatura ideal, antes de prosseguir para a próxima fase do processo, tal como se pode observar na Figura 4.10. Depois do arrefecimento a peça é colocada numa prensa onde todos os excessos de fundição serão cortados, separando as quatro peças finais.

Depois da extração da peça, a lubrificação do molde é feita com recurso a um sistema de três eixos prismáticos que efetuam um ciclo de lubrificação com uma solução aquosa, seguido de um ciclo de sopro para remover o excesso de líquido do molde ou remover peças alumínio que possam ter ficado presas.



Figura 4.10: Submersão da peça para arrefecimento [56].

4.7.2 Conclusão

A implementação deste tipo de células robotizadas permitiu à Auto Heinen melhorar o controlo de desperdício de material, uma vez que consegue controlar os tempos de extração e arrefecimento, garantindo que a peça final tem o melhor acabamento possível. A implementação do robô permite o controlo dos parâ-

metros de força durante a fase da extração, reduzindo o desgaste provocado no molde e melhorando a longevidade do mesmo.

4.8 Suma do Capítulo

A implementação de sistemas robotizados nas indústrias da fundição injetada advém da necessidade de criar sistemas mais produtivos e flexíveis, sem colocar em causa a saúde e bem estar dos operadores. Este tipo de indústria tem processos e operações que são potencialmente perigosas para os trabalhadores, como por exemplo, operação de máquinas injetoras, prensas de corte, fornos ou outros tipos de maquinaria pesada. A implementação de robôs neste tipo de fábricas reduz significativamente a exposição direta a elementos como temperatura, agentes químicos, ruído, esforços físicos pouco ergonómicos, entre outros. Neste capítulo foi apresentado o processo e os tipos de máquinas de fundição injetada utilizados na indústria. De seguida foi apresentada a sequência de operações inerentes à fundição injetada. Por fim, foram apresentados casos de estudo da implementação de soluções robotizadas na indústria da fundição. Com estes casos de estudo é possível concluir que a implementação de robôs neste tipo de indústria não só aumenta a produtividade e eficiência de produção, como também facilita a mudança de produção através da flexibilidade característica dos sistemas robotizados.

Capítulo 5

Definição da Célula e Construção do Modelo de Simulação

A RobotSol, Engenharia Industrial é uma empresa integradora de robôs industriais, que cria e desenvolve soluções para vários ramos industriais, com projetos implementados na indústria alimentar, automóvel, corticeira e indústrias de fundição. Neste capítulo será apresentado o início do desenvolvimento de sete células para a indústria da fundição injetada. Primeiramente, será efetuada uma descrição da solução que se pretende implementar, seguida da análise da arquitetura do sistema com a descrição dos componentes que integram esta solução. Ainda neste capítulo será realizado um estudo de *layout* da solução para determinar o posicionamento de cada componente. Por fim, será apresentado o planeamento de trajetórias realizado no *software* de simulação da ABB, RobotStudio. A apresentação do trabalho neste capítulo será efetuado tendo por base a célula de injeção B (950 ton). Apesar de algumas particularidades na implementação, o desenvolvimento e instalação das outras células segue a mesma metodologia da célula B.

5.1 Descrição do Problema

A proposta elaborada pela RobotSol, para uma empresa de fundição injetada, consiste na robotização de sete células de fundição, através da integração de robôs industriais da marca ABB, com as sete máquinas injetoras de câmara fria e prensas de corte, já existentes. Pretende-se criar um sistema de fabrico flexível, compatível com várias referências de produtos. Neste projeto foram implementados três modelos de robôs da marca ABB, adaptados às necessidades de capacidade de carga e alcance em cada célula.

A escolha dos robôs, para cada célula, foi realizada com base nas dimensões das máquinas injetoras, distância mínima de alcance entre robô, injetora e prensa

de corte e dimensão das peças produzidas. A Tabela 5.1 apresenta a atribuição dos 14 robôs pelas células de injeção consoante as necessidades de capacidade de carga e alcance de cada uma.

Tabela 5.1: Atribuição dos robôs para cada célula.

Célula	Injetora	Robôs Extratores	Robôs Lubrificadores
A	1600 ton	ABB IRB6700 175/3.05	ABB IRB4600 45/2.05
B	950 ton	ABB IRB4600 45/2.05	ABB IRB2600 20/1.65
C	750 ton	ABB IRB4600 45/2.05	ABB IRB2600 20/1.65
D	700 ton	ABB IRB2600 20/1.65	ABB IRB2600 20/1.65
E1	560 ton	ABB IRB2600 20/1.65	ABB IRB2600 20/1.65
E2	560 ton	ABB IRB2600 20/1.65	ABB IRB2600 20/1.65
F	500 ton	ABB IRB2600 20/1.65	ABB IRB2600 20/1.65

A operação manual das injetoras e prensas de corte expõe diretamente os operadores a temperaturas elevadas, poeiras de alumínio, níveis de ruído elevados, entre outros. Estes fatores ambientais são nocivos para a saúde dos operadores deste tipo de máquinas. A utilização de robôs em mais sete células de injeção permitirá ao cliente aumentar a sua produtividade na produção de peças de alumínio, especialmente na máquina de injeção de maior dimensão, onde a manipulação manual da peça é dificultada pela sua dimensão e peso. A robotização destas células também melhorará as condições de trabalho dos operadores.

Cada célula robotizada será integrada com dois robôs, um robô extrator e um robô lubrificador. O robô extrator, ou R1, é responsável pela extração da peça de alumínio da máquina de injeção e pela manipulação da peça nas operações seguintes. O robô lubrificador é responsável pela lubrificação e sopro do molde, preparando-o para o próximo ciclo de injeção. Além da integração dos robôs com a máquina injetora e a prensa de corte, é necessário desenvolver uma matriz de sensores para analisar a peça de fundição depois da extração, uma rampa de inspeção e uma rampa de produto não conforme (*Nok, Not Ok*), para escoamento das peças.

A criação do *layout* da célula será realizado em torno da máquina injetora. Esta será o ponto de partida para definir o posicionamento de cada elemento. A máquina injetora controlará todos os dispositivos inteligentes da célula através da troca de sinais pela rede de comunicação industrial PROFINET. O controlo de sinais entre os robôs, sensores e atuadores será realizado através das cartas de sinais digitais instaladas nos controladores dos robôs.

5.2 Modo Operativo e Constituintes da Solução

Como já foi referido, cada célula de injeção é constituída por dois robôs: um robô extrator e um robô lubrificador. À exceção da injetora e da prensa, que serão a referência para a colocação do robô extrator, todos os elementos da célula serão posicionados em relação a este manipulador. O robô R1 é elevado através de um pedestal e possui, como atuador final, uma garra, ou *gripper*, de aperto mecânico. Este robô será responsável pela extração da peça de alumínio, da máquina de injeção, e seguidamente dará continuidade ao processo através da manipulação da peça ao longo do ciclo definido.

Imediatamente após a extração o robô levará a peça a uma matriz de sensores para analisar a sua composição quantitativa, permitindo saber se a peça está completa. Caso a peça não se encontre completa é dado um sinal que indica peça não conforme.

Após a avaliação do estado da peça, o robô mergulha o jito numa tina com uma solução aquosa para o arrefecer. O controlo temporal e de movimento do arrefecimento é realizado segundo a especificação do cliente. Se a dimensão da peça permitir, o arrefecimento será efetuado com um conjunto de movimentos de oscilação da peça na tina de água.

A próxima fase do processo é o escoamento da peça para o exterior da célula, havendo três possibilidades para largar a peça, dependendo das condições desta ou mediante as condições de operacionalidade da prensa. A peça será colocada na rampa de peças não conformes se durante o ciclo esta tiver sido assinalada como não conforme pela injetora ou pela matriz de sensores. Caso contrário, o robô poderá colocá-la na prensa ou na rampa de inspeção. A peça será colocada na prensa se não houver nenhum sinal da injetora e a matriz de sensores indicar peça conforme. A colocação de peças na rampa de inspeção poderá ser motivada pela indicação da injetora ou pela inoperabilidade da prensa.

Imediatamente após a extração da peça e da confirmação de área livre pelo robô extrator, o robô lubrificador efetuará um ciclo de lubrificação e sopro do molde. Este manipulador será colocado sobre um pedestal e terá, como atuador final, uma ferramenta de lubrificação que possui um conjunto de bicos para atomização com ar e água, e outro para sopro. O ciclo deste robô pode ser dividido em duas fases: lubrificação e sopro. Durante a lubrificação o robô percorre um determinado conjunto de pontos e lubrifica o molde, na parte fixa e na parte móvel, com uma solução aquosa com desmoldante. Após a lubrificação o robô procede para o sopro do molde, que consiste na remoção do excesso da solução desmoldante deixada na fase anterior. Depois da limpeza do molde o robô volta para uma posição definida e espera a ordem do próximo ciclo de lubrificação e sopro. A Figura 5.1 apresenta a sequência de operações definidas pelo modo operativo.

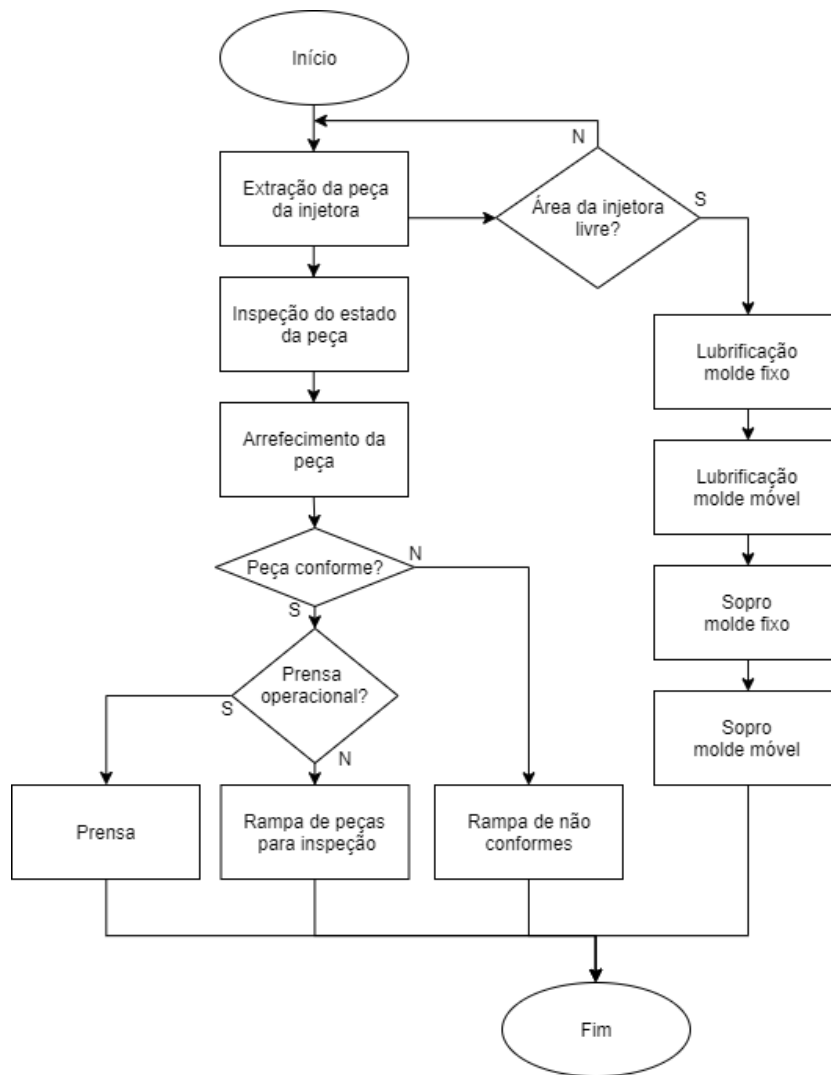


Figura 5.1: Sequência de operações dos robôs.

Após a definição da sequência de operações é necessário desenvolver e integrar todos os componentes da célula de acordo com as necessidades de implementação. Os componentes que integram as células de injeção robotizadas podem ser diferenciados em cinco grupos principais: injetora, matriz de sensores, tina de água, prensa e rampas.

5.2.1 Máquina Injetora

A unidade central de controlo que irá comandar a célula e ordenar a execução das várias operações, aos seus periféricos, é a máquina injetora. Estes comandos serão dados através da troca de sinais entre o controlador da célula e os

dispositivos, robôs e prensa. A máquina injetora de câmara fria será um dos elementos de referência para a construção do *layout* da célula, abordado na secção seguinte. A Figura 5.2 apresenta o modelo 3D, disponibilizado pelo cliente, que será importado no RobotStudio para simulação e planeamento de trajetórias.

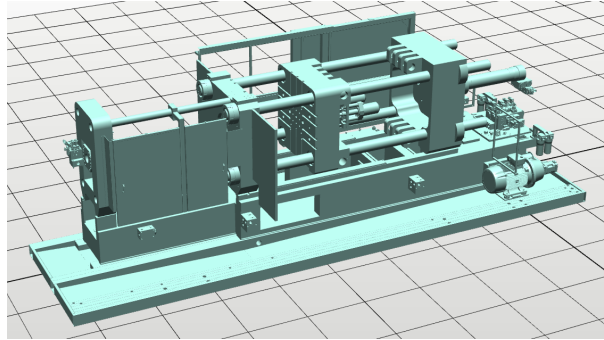


Figura 5.2: Modelo da máquina injetora (IDRA 950 toneladas) da célula B.

5.2.2 Prensa

A prensa de corte é um dispositivo controlado pela injetora. Esta possui uma ferramenta de corte que retira os macelotes e excessos da peça de fundição. Em funcionamento normal o robô coloca a peça na ferramenta de corte e retorna à posição de início de ciclo. Caso a prensa se encontre inoperacional o robô coloca a peça na rampa de inspeção. A Figura 5.3 apresenta o desenho técnico da prensa. O modelo 3D para a simulação foi construído com base na documentação da prensa.

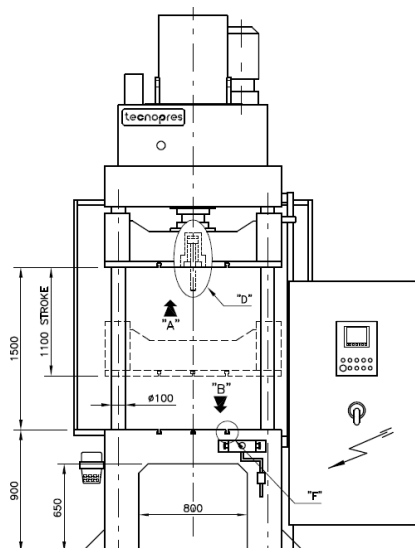


Figura 5.3: Desenho da prensa KZP50 da célula B.

5.2.3 Matriz de Sensores

A matriz de sensores é composta por 8 sensores foto-elétricos que avaliam o estado do jito após a extração, montados em altura num painel perfurado de acordo com a forma da peça. Se algum destes sensores indicar um zero lógico no momento de aferição, a peça é considerada não conforme, caso contrário a peça é conforme. Inicialmente foram estudados dois tipos de suporte para a matriz de sensores: pórtico e bandeira. Apesar de a estrutura em pórtico fornecer maior suporte para o painel perfurado, foi adoptado o modelo em bandeira por facilitar a montagem em obra sem comprometer a integridade estrutural da matriz de sensores. A Figura 5.4 apresenta a matriz de sensores tipo bandeira (esquerda) e tipo pórtico (direita).

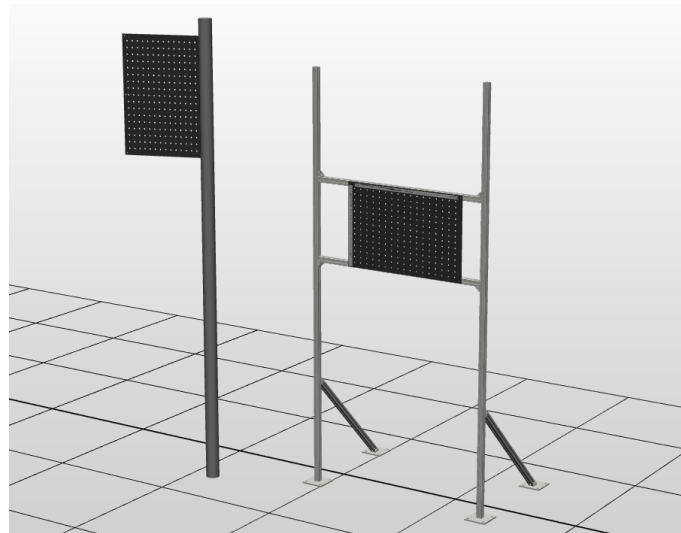


Figura 5.4: Modelos da matriz de sensores da célula B, tipo bandeira (esquerda) e tipo pórtico (direita).

5.2.4 Tina de Água

A tina de água é responsável pelo arrefecimento da peça, após a aferição desta na matriz de sensores. Este dispositivo é automatizado e não está interligado com nenhum componente da célula.

A tina de água consiste num reservatório aberto que contém uma solução aquosa. As especificações de tempo e movimentação de arrefecimento são indicadas pelo cliente. Caso a dimensão do jito permita, a rotina de arrefecimento deve executar movimentos oscilatórios para permitir melhor dissipação de calor.

5.2.5 Rampas

As rampas são um conjunto de plataformas que permitem escoar as peças de fundição em situações distintas. Foram definidos dois tipos de rampas para cada célula, rampa de inspeção e rampa de produto não conforme (*Nok*). O dimensionamento das rampas foi realizado através das dimensões das peças produzidas em cada célula.

As rampas de inspeção destinam-se ao escoamento de peças quando a máquina injetora dá indicação, através de um sinal definido para o efeito. As peças também podem ser escoadas por esta rampa caso a prensa se encontre inoperável. No exterior da célula, esta rampa possui um túnel de segurança que impede o operador de alcançar o interior da célula. Sempre que o robô coloca uma peça nesta rampa o operador tem que a retirar manualmente.

As peças podem ser encaminhadas para a rampa *Nok*, por indicação da injetora ou indicação da matriz de sensores, através de um sinal definido para o efeito. A indicação de peça não conforme por um dos dispositivos prevalece mesmo que o outro indique peça conforme ou peça para inspeção. As rampas *Nok* não possuem túneis de segurança uma vez que a descarga da peça é feita automaticamente para um contentor, sem necessidade de interferência por parte do operador.

5.2.6 Robô Extrator

Tal como já foi referido, o robô extrator é responsável pela extração da peça de alumínio, após a injeção, e pela manipulação da mesma ao longo das operações que se seguem à extração.

5.2.6.1 Manipulador

As dimensões e especificações dos robôs extratores variam de acordo com a dimensão da máquina injetora. Assim, são usados três modelos de robôs para realizar a extração das peças. A correspondência entre robôs e células de injeção encontra-se na Tabela 5.1, secção 5.1.

O robô implementado na célula B é um ABB IRB 4600 45/2.05, Figura 5.5. Este manipulador de seis eixos tem um alcance máximo de 2,05 m, uma capacidade de carga de 45 kg e repetibilidade de 0,05 mm[57]. Este manipulador é o modelo *Foundry Plus* que inclui uma tinta mais resistente e proteções contra salpicos de metal. Os manipuladores *Foundry Plus* destinam-se a ambientes agrestes e rigorosos como o da indústria da fundição.



Figura 5.5: Robô ABB IRB 4600 45/2.05.[57]

5.2.6.2 Pedestal

Uma vez que a injetora é uma máquina de grande dimensão é necessário colocar o robô sobre um pedestal, para que este possa operar mais eficientemente dentro do seu espaço de trabalho. A heurística para a definição da altura do pedestal baseia-se no alinhamento do meio do eixo dois com o centro da área de trabalho. Neste caso existem duas áreas de trabalho importantes para o robô, a injetora e a prensa. Assim, a definição da altura do pedestal vai ser obtida alinhando o eixo dois com o meio dos dois centros de trabalho. A Figura 5.6 apresenta o posicionamento do robô em relação ao centro da injetora e à base de trabalho da prensa, na célula B. As duas linhas vermelhas apresentam o alinhamento do centro de trabalho da injetora (cima) e da prensa (baixo). A linha amarela representa a região ideal para posicionar o robô.

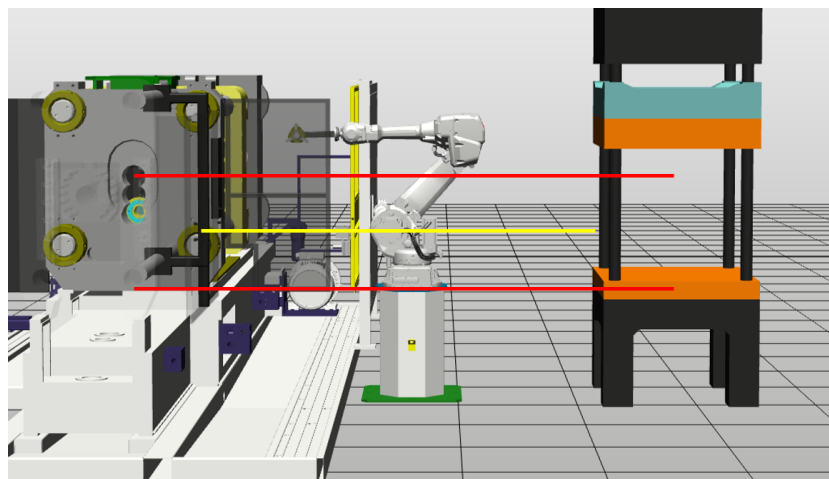


Figura 5.6: Definição da altura do pedestal do robô extrator da célula B.

Após a aplicação da heurística para todas as células foi possível definir a altura de cada pedestal. A Tabela 5.2 apresenta as alturas dos pedestais de todas as células.

Tabela 5.2: Altura dos pedestais dos robôs extratores de cada célula.

Célula	Robô Extrator	Altura (mm)
A	ABB IRB6700	900
B, C	ABB IRB4600	950
D, E1, E2, F	ABB IRB2600	850

5.2.6.3 Atuador Final

O atuador final do robô extrator é uma garra de aperto mecânico, acoplada a uma extensão com um ângulo de 90° . Esta garra será atuada com uma eletroválvula instalada no eixo 3 do manipulador.

O comprimento da extensão foi definido colocando o robô no seu alcance máximo para o lado da injetora, sendo que, à distância necessária para agarrar o jito foi adicionado o diâmetro da bolacha do jito (90 mm), permitindo a folga necessária para eventuais desvios no posicionamento do molde na injetora. O comprimento definido para o *gripper* de aperto mecânico da célula B é de 325 mm. A Figura 5.7 apresenta o *gripper* de aperto mecânico instalado na célula B e a Figura 5.8 apresenta a margem de folga estabelecida. A vermelho é possível visualizar o centro de trabalho do molde e a verde o limite da margem de folga atribuída. O comprimentos das extensões dos *grippers* das outras células foi calculado pelo mesmo método.

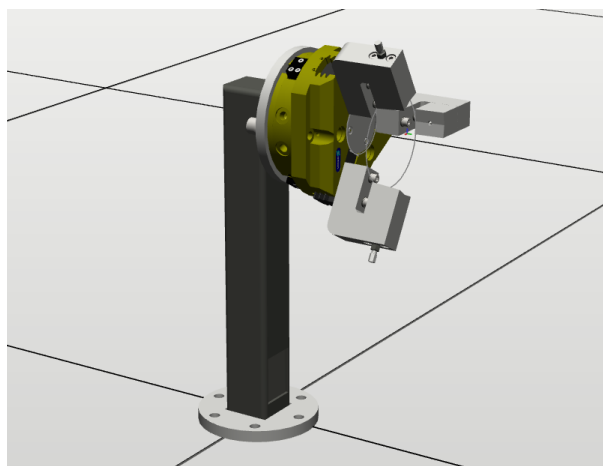


Figura 5.7: *Gripper* de aperto mecânico do robô extrator da célula B.

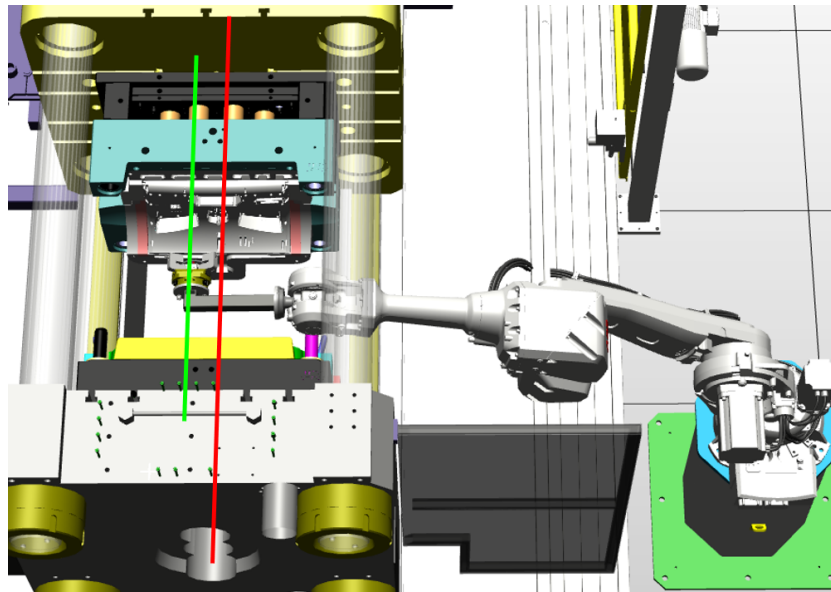


Figura 5.8: Definição do comprimento da extensão do *gripper* do R1.

A definição das garras de aperto mecânico implementadas em cada célula tem por base a análise da bolacha da peça de menor e maior diâmetro que o cliente vai produzir em cada célula. Na Tabela 5.3 são apresentadas as garras da marca Schunk instaladas nas células de injeção.

Tabela 5.3: Garras de aperto mecânico implementadas.

Célula	Robô Extrator	Garra Schunk
A	ABB IRB6700	PZN-Plus 160-1-AS-V
B, C	ABB IRB4600	PZN-Plus 125-1-AS-V
D, E1, E2, F	ABB IRB2600	PZN-Plus 100-1-AS-V

A capacidade de carga do robô diminui quanto maior for a distância entre o centro de massa da carga e o centro do punho, de acordo com o diagrama de cargas do robô. A movimentação do manipulador com excesso de carga reduz o seu tempo de vida, criando desgastes prematuros. Para verificar que os *grippers* se encontram dentro dos limites de carga, foi realizada uma simulação de cargas num *software* específico, à parte do RobotStudio, o RobotLoad. Na Figura 5.9 são apresentados os resultados da simulação de carga efetuada.

Após a introdução da massa da carga, centro de gravidade, momento de inércia e centro da garra (*tool center point*, TCP), o programa apresenta percentualmente vários valores que permitem analisar se o atuador final se encontra devidamente dimensionado para um dado manipulador. A primeira coluna dá

a conhecer a carga máxima do robô, (*total handling weight*, THW), ou seja, a manipulação do atuador final com a peça representa 26% da carga que o manipulador suporta. A segunda e terceira coluna apresentam a distância do centro de gravidade da carga (*center of gravity*, *CoG*) ao centro do punho do robô, *CoGZ* e *CoGL*, respectivamente. O centro de gravidade encontra-se dentro dos limites definidos pelo fabricante. A quarta e quinta coluna (J5 e J6, respectivamente) apresentam o efeito do momento de inércia da carga nos eixos 5 e 6. As colunas T6 a T2 apresentam o binário estático entre os eixos 6 a 2, respectivamente.

Nesta aplicação é possível concluir que os *grippers* estão dimensionados de acordo com as especificações do fabricante, uma vez que todos os valores se encontram abaixo do limite. Apesar do aumento do custo e dimensão do manipulador, o sobredimensionamento do robô relativamente à capacidade de carga do manipulador é um fator que ajuda a aumentar a longevidade do sistema.

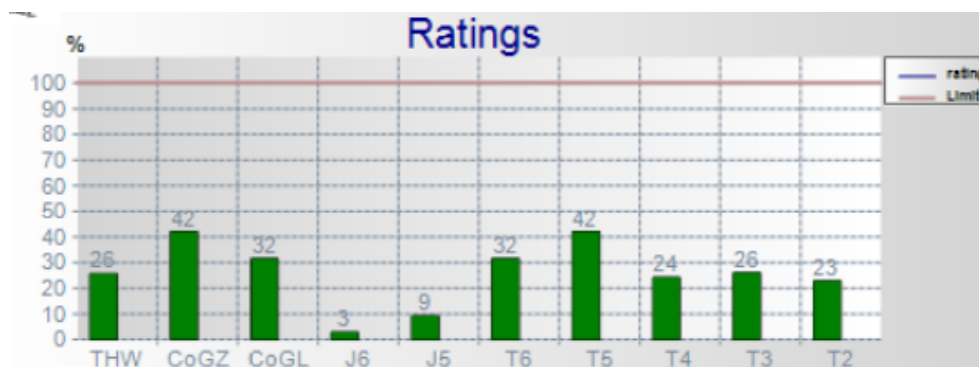


Figura 5.9: Resultados do teste de cargas do R1 da célula B.

5.2.7 Robô Lubrificador

O robô lubrificador é responsável pela lubrificação e sopro do molde. Após a injeção, quando o robô extrator sinalizar área dentro da injetora livre, o robô lubrificador fará um ciclo de lubrificação e um ciclo de sopro no molde.

5.2.7.1 Manipulador

À semelhança dos robôs extratores, o manipulador dos robôs de lubrificação também varia de acordo com a dimensão da máquina injetora. Neste caso, são utilizados dois modelos de robôs para efetuar a lubrificação dos moldes. A correspondência entre robôs e células encontra-se na Tabela 5.1, secção 5.1.

O robô de lubrificação implementado na célula B é um ABB IRB 2600 20/1.65, Figura 5.10. Este manipulador de seis eixos tem um alcance máximo de 1,65 m, uma capacidade de carga máxima de 20 kg e repetibilidade de 0,04 mm[58]. Tal como o robô extrator, este manipulador também é um modelo *Foundry Plus*.



Figura 5.10: Robô ABB IRB 2600 20/1.65.[58]

5.2.7.2 Pedestal

O robô lubrificador será colocado no topo do prato fixo da injetora. A heurística para dimensionamento da altura do pedestal não se aplica neste caso, uma vez que a área de trabalho que se pretende utilizar, encontra-se abaixo do nível da base do manipulador. O pedestal foi dimensionado para suportar o manipulador no topo do prato fixo da injetora, sendo que a base do robô está centrada relativamente ao prato fixo da injetora. Esta posição garante boa fixação do manipulador e permite que a zona de trabalho deste inclua a zona entre moldes da injetora.

5.2.7.3 Atuador Final

O atuador final do robô lubrificador é uma ferramenta de lubrificação e de sopro. A alimentação com ar e água/desmoldante desta ferramenta é feita com tubos fixos no braço do manipulador. A atuação desta ferramenta é realizada através da atuação de um bloco de eletroválvulas que controla as pilotagens dos bicos de atomização. Os bicos de sopro são controlados com duas eletroválvulas, uma para cada lado da ferramenta.

Sempre que o manipulador efetua um movimento ascendente ou desce ao longo do molde, o robô passa por uma singularidade de punho. Para eliminar o efeito desta, foi necessário adicionar à ferramenta um ângulo de 20° para que os eixos 4 e 6 nunca se alinhem. Além do ângulo, a ferramenta possui um aumento na parte de cima para permitir a passagem dos tubos e para garantir que os bicos de sopro chegam à base do molde. A Figura 5.11 apresenta a ferramenta desenvolvida para o manipulador das células B, C, D, E1, E2 e F. A ferramenta do robô lubrificador da célula A é de maior dimensão e possui mais bicos de atomização e sopro.

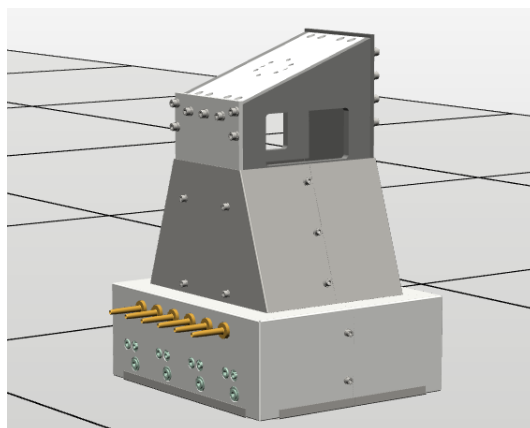


Figura 5.11: Ferramenta do robô lubrificador das células B, C, D, E1, E2 e F.

A Figura 5.12 apresenta o alcance do robô para o pior caso da lubrificação. A vermelho encontra-se o ponto limite de lubrificação e a verde o limite do alcance máximo do robô.

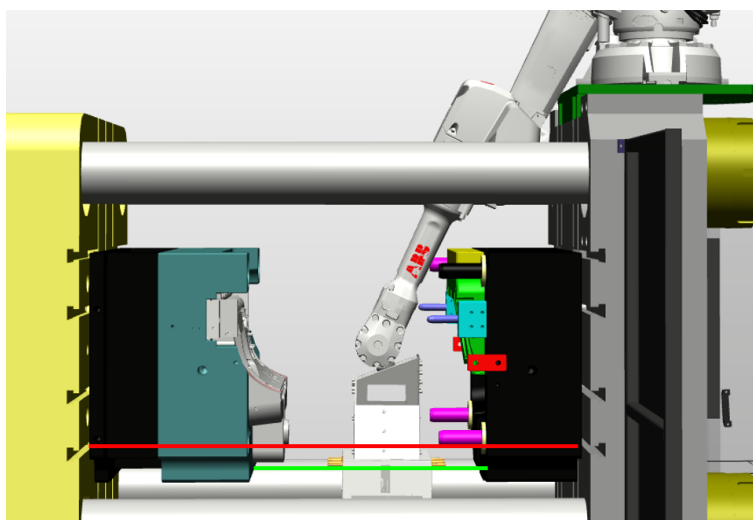


Figura 5.12: Alcance máximo dos bicos de sopro do R2 na célula B.

À semelhança do atuador final do robô extrator, foi realizada a análise de cargas da ferramenta de lubrificação. Esta análise é válida para as células B, C, D, E1, E2 e F, uma vez que possuem o mesmo conjunto manipulador, atuador final. Após a introdução dos dados de massa, momento de inércia, centro de gravidade e TCP da ferramenta, foram obtidos os resultados apresentados na Figura 5.13.

O resultado da simulação de carga permite concluir que, apesar de a ferramenta de lubrificação passar no teste, o robô vai operar perto do limite de

carga. No entanto, o manipulador não perderá as características de precisão e repetibilidade, desde que a carga se encontre dentro dos limites estipulados pelo fabricante.



Figura 5.13: Resultados do teste de cargas do R2 da célula B.

A ferramenta de lubrificação da célula A é constituída por dois conjuntos de 8 bicos de atomização e dois conjuntos de 9 bicos de sopro. Apesar de esta ferramenta ser de maior dimensão e possuir mais peso, o manipulador da célula A tem uma capacidade de carga maior e a simulação de carga da ferramenta apresenta melhores resultados que as outras células.

5.2.8 Quadro de Flúidos

O quadro de fluidos é o elemento do sistema onde se encontram as unidades de tratamento de ar (UTA) que alimentam a célula e as eletroválvulas de comando dos bicos de sopro e atomização. Este quadro é composto por quatro unidades de ar comprimido, com corte geral, e cinco eletroválvulas.

A UTA1 alimenta as pilotagens da ferramenta do R2 e das eletroválvulas do quadro. A UTA2 alimenta a garra do robô extrator. A UTA3 alimenta o sopro do R2 e a UTA4 alimenta os bicos de atomização. As quatro eletroválvulas de ar comprimido comandam os bicos de sopro e atomização da ferramenta do robô lubrificador. Há ainda uma quinta eletroválvula que comanda a passagem de lubrificante para a ferramenta.

5.2.9 Segurança

A célula é delimitada por barreiras de segurança que impedem o acesso ao seu interior de forma indevida. A única maneira de aceder ao interior célula de forma responsável é através da porta que se encontra perto dos controladores. Esta porta possui um trinco eletrónico que apenas abre pelo exterior se o botão de acesso à célula for pressionado ao mesmo tempo que se abre a porta. O manípulo de emergência que se encontra do lado de dentro da célula abre a porta se for

rodado. Além do trinco eletrônico, o quadro elétrico possui três relés de segurança da Omron (G9SE-401 DC24). O primeiro monitoriza o circuito de emergências da máquina injetora, o segundo monitoriza as emergências dos robôs e o terceiro monitoriza a porta da célula robotizada. O funcionamento automático da célula só é permitido quando os três relés se encontram devidamente rearmados.

5.3 Layout da Célula

A avaliação dimensional dos componentes para a definição do *layout* da célula pode ser realizada com recurso a *softwares* de simulação tridimensional. Atualmente, os fabricantes de robôs industriais disponibilizam acesso a ambientes de simulação e programação *offline*. A ABB possui uma ferramenta de simulação e programação *offline*, RobotStudio, que além da programação *offline* do robô, permite a criação e manipulação 3D de objetos.

A construção do *layout* começa pela importação da injetora, prensa e do robô extrator, para o ambiente de simulação. Como já foi referido, a altura do pedestal é definida alinhando o centro do eixo dois do manipulador com o meio das áreas de trabalho mais importantes para o robô. Com o manipulador a atingir o seu alcance máximo horizontalmente, o pedestal e o robô são posicionados garantido equidistância entre a base do manipulador e os centros de trabalho da injetora e prensa. Como a deslocação do robô foi limitada pela dimensão da injetora, foi necessário adicionar uma extensão à garra do robô extrator para possibilitar a extração da peça.

A fase seguinte na definição do *layout* é a colocação da matriz de sensores, tina de água e rampas. A inspeção do jito é a segunda fase do processo para o robô extrator. A saída da peça de fundição da injetora obriga a que o robô suba o *gripper* para facilitar a sua movimentação. A última versão da matriz de sensores foi colocada na trajetória de saída da injetora para que o movimento do robô fosse o mais suave possível. A tina de água foi colocada entre a matriz de sensores e a prensa, de acordo com o processo definido para o robô extrator. A proximidade entre componentes com operações adjacentes reduz o tempo de manipulação da peça, melhorando o tempo de ciclo.

A rampa de inspeção e rampa *Nok* são colocadas a seguir à prensa. Do ponto de vista do processo, as rampas estão localizadas no sítio mais longe do início de ciclo do robô extrator. No entanto, em funcionamento normal, a utilização destas será reduzida.

A posição do robô lubrificador foi obtida iterativamente, com o objetivo de atingir a base do molde com a trajetória de lubrificação mais desfavorável para o sistema. A simulação e programação foi efetuada para dois tipos de moldes

a fim de garantir a flexibilidade do sistema. A base deste robô foi centrada relativamente ao prato fixo da máquina injetora.

A Figura 5.14 apresenta o *layout* da célula B, com a disposição de todos os componentes que interferem diretamente com o planeamento das trajetórias dos robôs. É possível observar que o pedestal do R1 se encontra equidistante ao centro da injetora e ao centro da prensa. Após a extração o manipulador irá mover-se para a direita e efetua a inspeção da peça, seguido do arrefecimento da mesma. Seguidamente irá colocar a peça na prensa ou nas rampas. Na figura também é possível observar as redes de segurança a porta da célula. As duas circunferências a vermelho e azul representam o alcance dos manipuladores de lubrificação e extração, respectivamente.

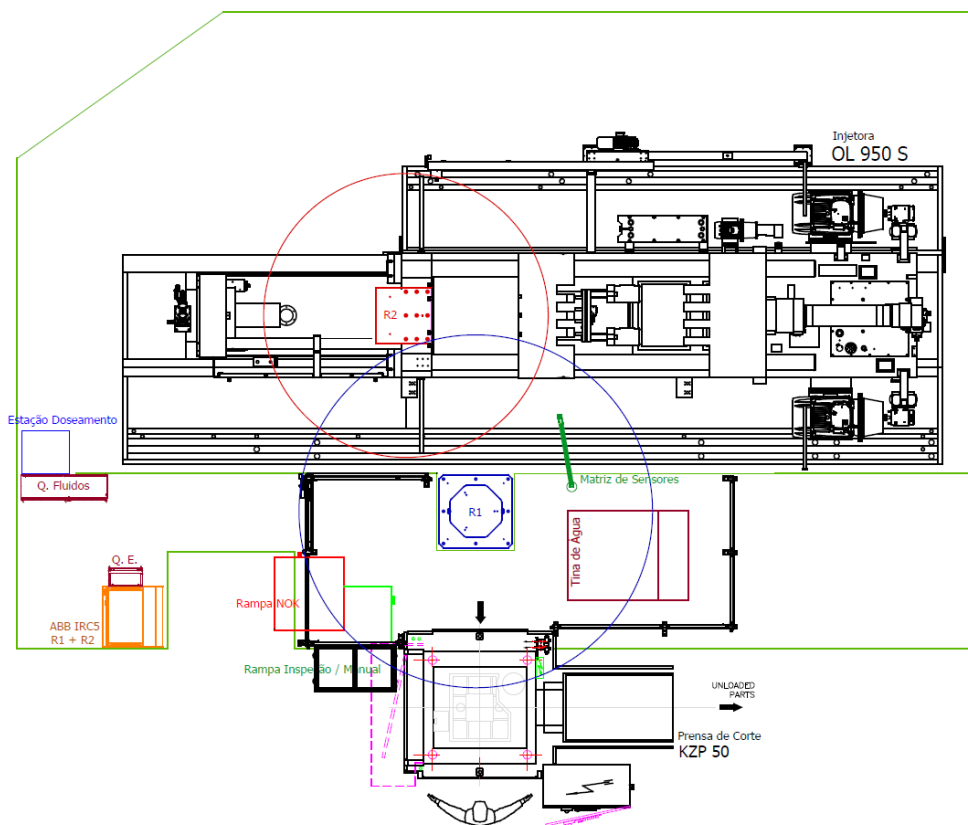


Figura 5.14: *Layout* da célula B.

5.4 Planeamento de Trajetórias

O planeamento de trajetórias em ambiente de simulação é uma fase crucial para o desenvolvimento do projeto, que pode reduzir significativamente o tempo de implementação em cliente. Este tipo de estudo é um processo iterativo onde

o programador cria trajetórias com base nas referências do modelo de simulação construído. As trajetórias criadas nesta fase, são a base da programação *offline*.

5.4.1 Injetora

A trajetória para a extração da peça da máquina de injeção segue quatro pontos principais, aproximação à injetora, a aproximação ao jito, o ponto de *pick* e a saída da injetora. Quando a máquina injetora dá ordem de extração, o robô parte da posição de *home*, Figura 5.15a, e desloca-se até à posição de aproximação da injetora, Figura 5.15b. De seguida efetua a extração através da aproximação à bolacha do jito, Figura 5.15c, seguido do ponto de *pick*, Figura 5.15d. Para sair da injetora o robô volta à posição de aproximação da bolacha e sai linearmente até passar as colunas da injetora, preparando-se para a rotina de inspeção na matriz de sensores, Figura 5.15b.

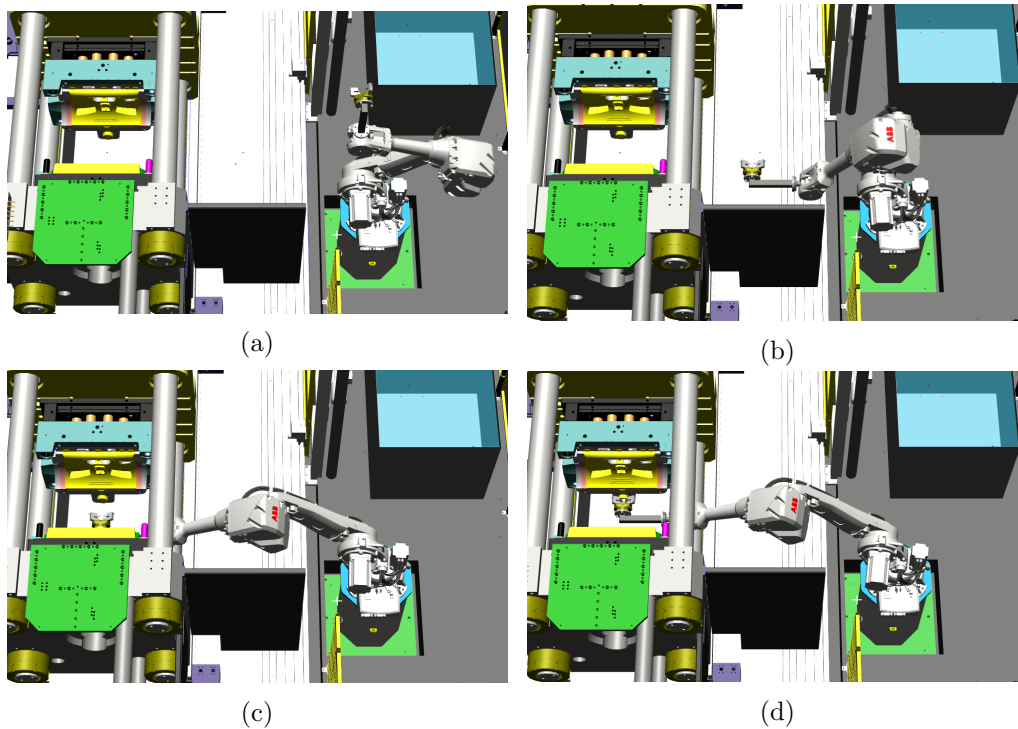


Figura 5.15: Trajetória de extração da peça da injetora.

5.4.2 Matriz de Sensores

Após a extração da peça, o robô manipula a peça até à matriz de sensores para realizar uma inspeção quantitativa da peça. O manipulador inicia a aproximação à matriz e, de seguida, efetua uma paragem numa posição onde os sensores foto-elétricos ficam alinhados com as partes da peça a analisar, Figura 5.16a. Depois da inspeção o robô afasta-se da matriz em direção à tina de água, Figura 5.16b.

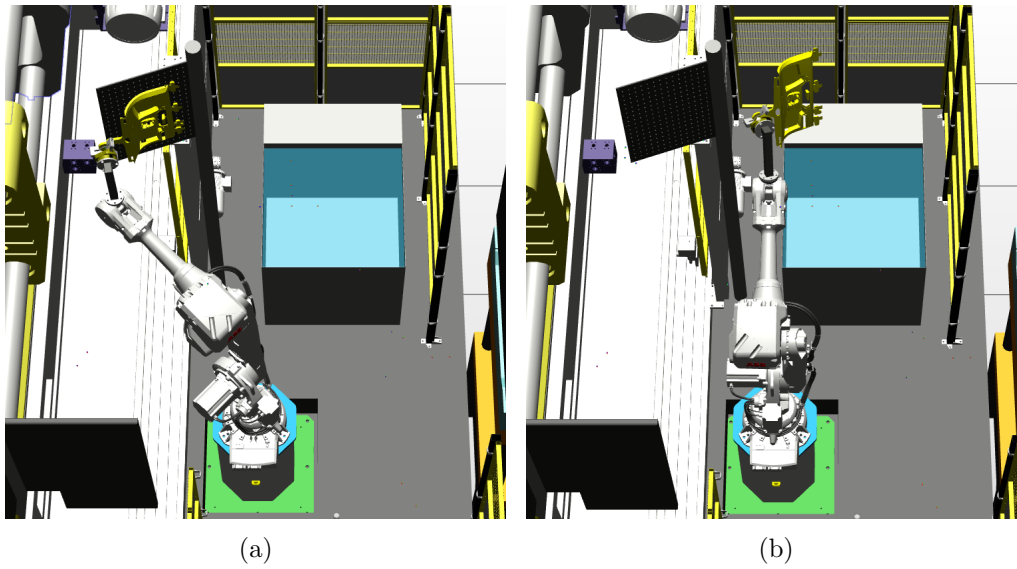


Figura 5.16: Trajetória de inspeção da peça.

5.4.3 Tina de Água

Para realizar o arrefecimento da peça o manipulador aproxima-a à tina de água, Figura 5.17a, e só depois é que a mergulha na solução aquosa, Figura 5.17b. A pedido do cliente, o manipulador deverá oscilar a peça dentro da tina de água para melhorar a dissipação de calor da peça de alumínio.

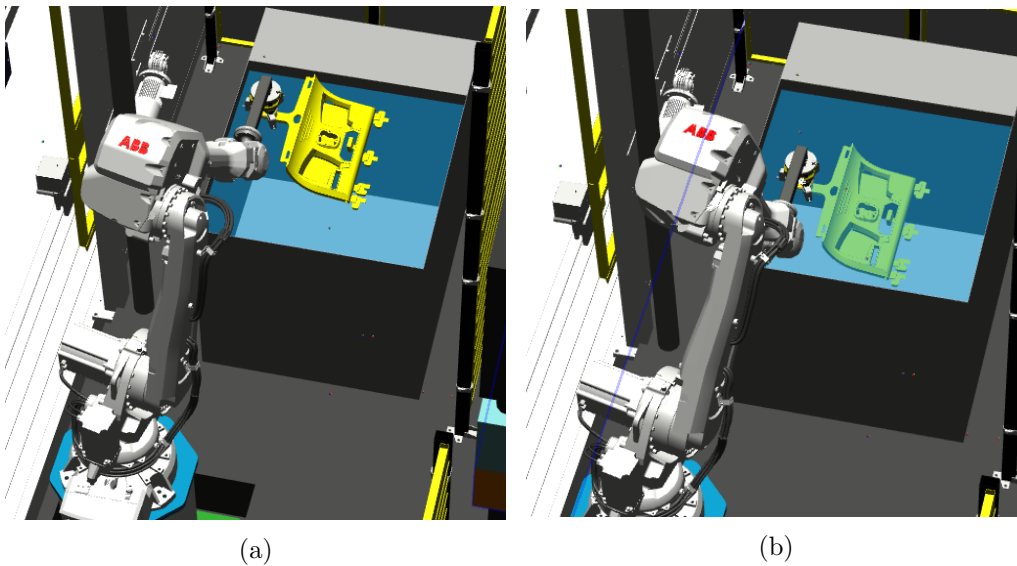


Figura 5.17: Trajetória de arrefecimento da peça na tina de água.

5.4.4 Prensa

Após o arrefecimento da peça, o robô executa um ponto genérico que lhe permite ir para a prensa ou para as rampas. Para colocar a peça na prensa o robô desloca-se para um ponto em frente à porta da prensa, Figura 5.18a, aproxima-se à ferramenta de corte e coloca a peça na posição e orientação definida pelo cortante, Figura 5.18b. De seguida o manipulador recua linearmente até libertar a zona da prensa, Figura 5.18c, e segue para uma posição intermédia, Figura 5.18d, antes de regressar à posição de *home*. Esta posição intermédia é necessária para garantir que o manipulador não colide com a porta da injetora.

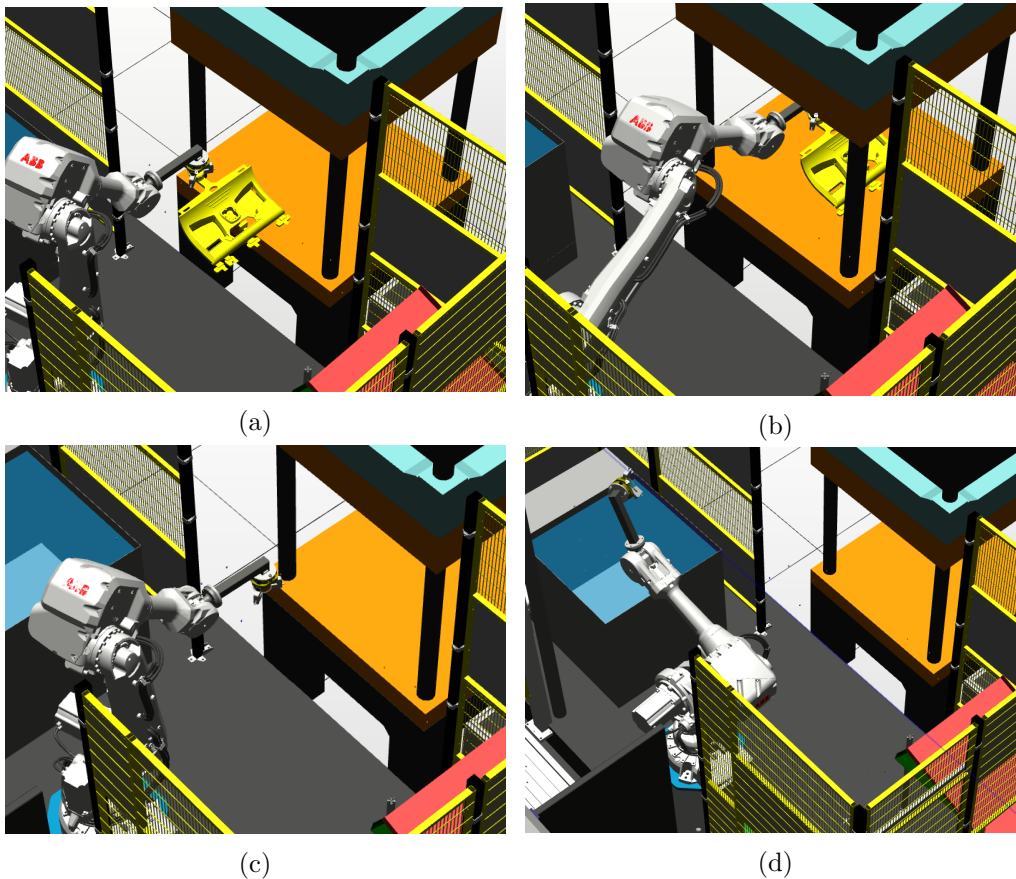


Figura 5.18: Trajetória de *place* da peça na prensa de corte.

5.4.5 Rampa de Inspeção

A colocação da peça na rampa de inspeção começa pela movimentação do manipulador para um ponto em frente à prensa, Figura, 5.19a. O *place* da peça é realizado com um movimento linear, para empurrar a peça de inspeção anterior, Figura 5.19b e Figura 5.19c. Após a abertura da garra o manipulador desloca-se para um posição em frente à prensa, Figura 5.19d, e passa por um ponto

intermédio, Figura 5.19e, antes de voltar à posição de *home*, Figura 5.19f.

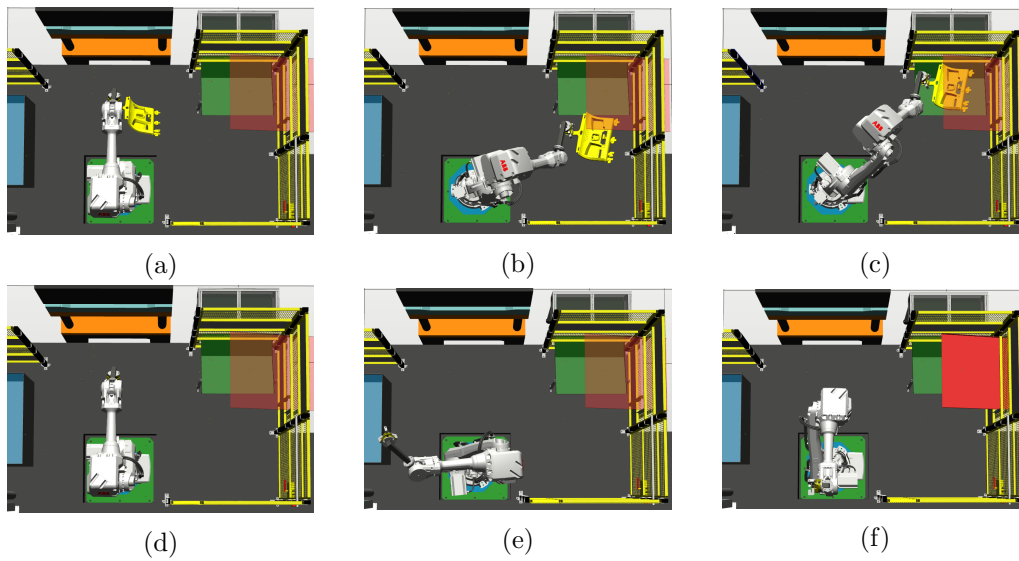


Figura 5.19: Trajetória de *place* da peça na rampa de inspeção.

5.4.6 Rampa de Não Conformes (Nok)

A colocação de uma peça na rampa *Nok*, começa num ponto em frente à prensa, comum à rotina da rampa de inspeção, Figura 5.20a. A colocação da peça é realizada movimentando-a sobre a rampa para empurrar alguma peça que possa permanecer nesta, Figura 5.20b e Figura 5.20c. Para finalizar o manipulador volta à posição em frente à injetora, Figura 5.20d, e passa por uma posição intermédia, Figura 5.20e, antes de regressar a *home*, Figura 5.20f.

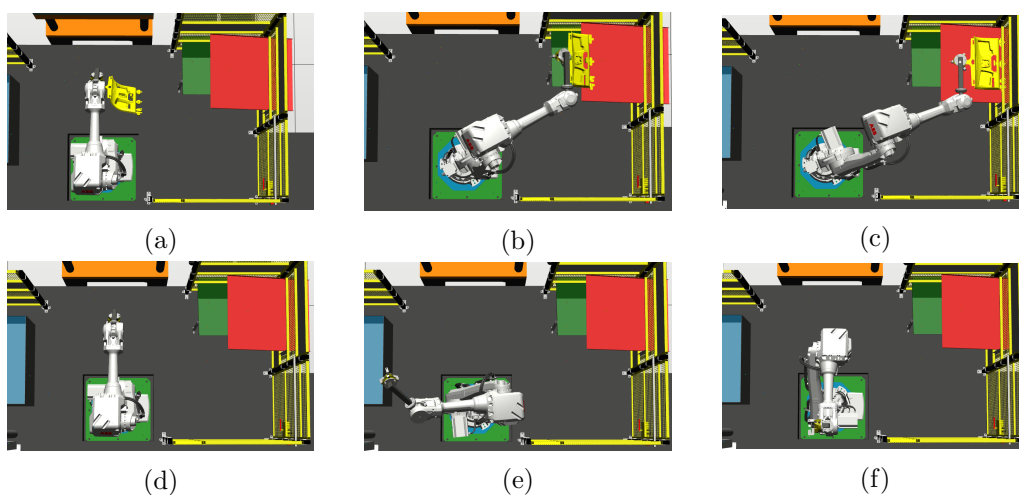


Figura 5.20: Trajetória de *place* da peça na rampa *Nok*.

5.4.7 Lubrificação e Sopro

A lubrificação e sopro são realizados pelo robô lubrificador e seguem o mesmo conjunto de pontos no espaço.

A lubrificação da parte fixa inicia-se quando os bicos de atomização se encontram alinhados com a parte superior do molde, Figura 5.21a, e termina quando estes descem abaixo do nível da parte inferior do molde, Figura 5.21b. A lubrificação da parte móvel do molde realiza-se segundo o mesmo princípio, Figura 5.21c e Figura 5.21d.

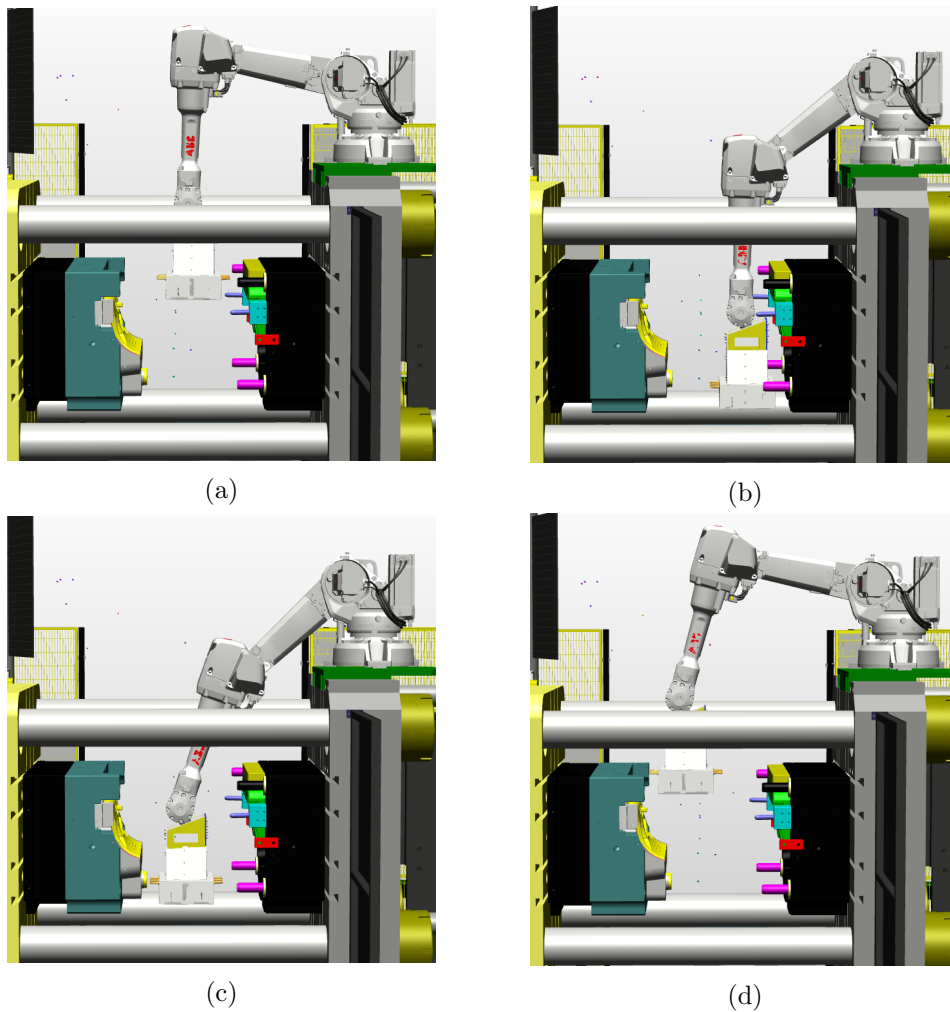


Figura 5.21: Trajetória de lubrificação e sopro do R2.

O sopro e limpeza do molde seguem os mesmos pontos das rotinas de lubrificação, deslocados de 80 mm verticalmente para que os bicos de sopro fiquem alinhados com a parte superior e inferior do molde.

5.5 Zonas de Trabalho

O arranque de produção da célula pode ser motivado por vários fatores: introdução de um novo produto, paragem do ciclo anterior para inspeção ou devido a alguma anomalia no sistema. Para arrancar novamente o ciclo de produção é necessário que os robôs se encontrem na posição de *home*. A recuperação para esta posição pode ser feita manualmente ou de forma automática. A recuperação manual requer que um operador execute um dado ponto de um programa na consola do robô, para que o manipulador regresse à posição de início de ciclo, no entanto, se o robô se encontrar numa posição desfavorável, com obstáculos à volta, o operador tem que mexer o robô manualmente, através do *joystick* da consola, e só depois pode executar o ponto de *home*. Este tipo de recuperação requer atenção redobrada porque o manipulador pode colidir com algum objeto na célula. Para evitar que o operador se possa enganar ao executar a recuperação, implementaram-se rotinas de recuperação automática.

Uma recuperação automática consiste na execução de uma sequência de pontos que colocam o manipulador na posição de *home* sem colidir, desde que os objetos da célula se mantenham na mesma posição. No entanto, como o robô pode parar em fases diferentes do seu ciclo, é necessário saber a localização do atuador final para ajustar a rotina de recuperação. Estas recuperações são implementadas através da definição de zonas de trabalho que estão interligadas a sinais digitais. Se o atuador final do robô se encontrar dentro de uma dada área de trabalho o sinal digital que corresponde a essa zona estará com o nível lógico 1. Sempre que o ciclo é interrompido e reiniciado, o programa principal verifica se o robô se encontra dentro de alguma área e executa uma rotina de recuperação criada para aquele caso específico.

Nos robôs da marca ABB, a definição das zonas de trabalho é realizada através da declaração da forma e da distância, entre a base do robô e o ponto de referência sobre o qual se pretende criar a zona. Para as zonas de trabalho esféricas indica-se o raio da esfera e a distância entre a base do manipulador e o centro da zona, definida nas 3 coordenadas cartesianas. Para zonas de trabalho retangulares definem-se dois pontos no espaço correspondentes aos vértices diagonais do volume.

O robô extrator possui 9 zonas de trabalho, 2 zonas esféricas para o interior da injetora e para o interior da prensa e 7 zonas retangulares, a saber: zona em frente à injetora, zona da matriz de sensores, zona da tina de água, zona por cima da tina de água, zona em frente à prensa, zona da rampa de inspeção e zona da rampa *Nok*. Se o manipulador se encontrar no meio de alguma zona não definida, o operador terá que movimentar o manipulador para a posição de *home* ou então desloca-o para dentro de uma das zonas já definidas. A Figura 5.22 apresenta uma vista geral da simulação, com a definição das zonas do robô extrator.

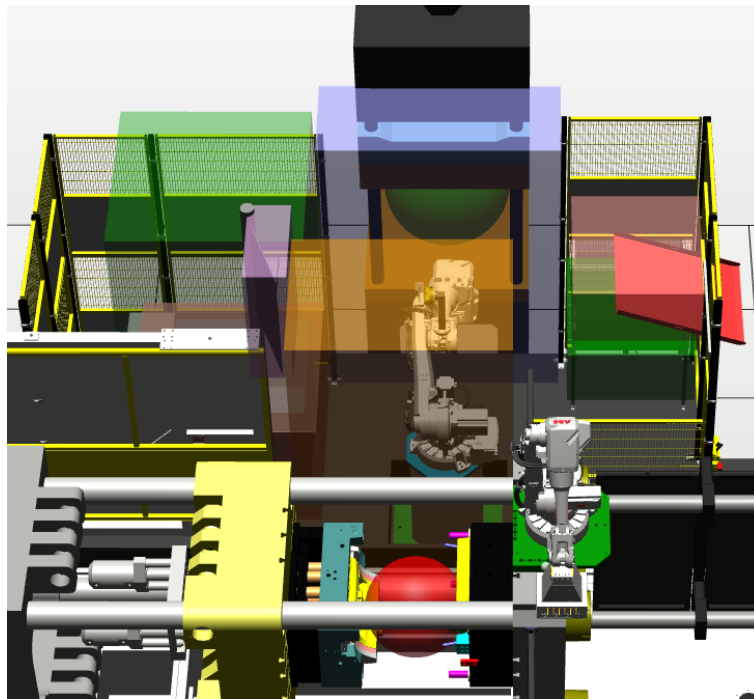


Figura 5.22: Zonas de trabalho do robô extrator da célula B.

O robô lubrificador possui 4 zonas de trabalho retangulares: centro, lado esquerdo, lado direito e por cima da injetora. Estas 4 zonas são suficientes para assegurar que o manipulador nunca colide com nenhum objeto se estiver dentro destas áreas, Figura 5.23.

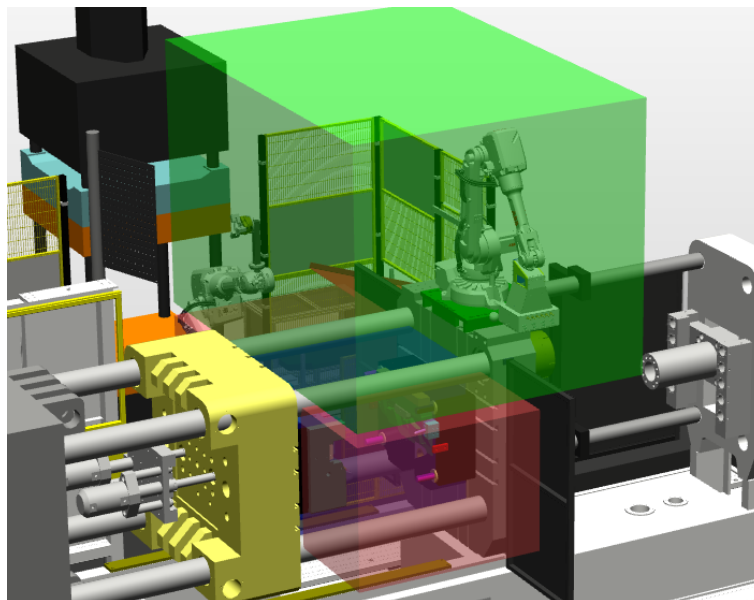


Figura 5.23: Zonas de trabalho do robô lubrificador da célula B.

5.6 Suma do Capítulo

Este capítulo começa por descrever o problema e o modo operativo da célula robotizada. Cada célula de injeção será composta por dois robôs. O robô extrator é responsável pela extração da peça e manipulação desta durante a inspeção, arrefecimento e escoamento da peça, que pode ser realizada na prensa ou numa das rampas. O robô lubrificador é responsável pela lubrificação e sopro do molde da injetora.

O dimensionamento dos robôs está adequado às necessidades da célula. O robô extrator encontra-se sobredimensionado na capacidade de carga mas tem o alcance necessário para realizar todas as operações inerentes ao processo da célula de fundição injetada. O sobredimensionamento em relação à capacidade de carga ajuda a aumentar o tempo de vida da solução, sem ocorrerem desgastes prematuros do manipulador. O robô lubrificador está devidamente dimensionado quer em capacidade de carga, quer em alcance.

Além do estudo de *layout*, foi realizado um estudo de planeamento de trajetórias que será a base da programação *offline*, apresentada no próximo capítulo. Este planeamento é um processo iterativo, que permite ao programador encontrar a melhor configuração do robô para obter transições suaves entre pontos. Este tipo de estudo reduz significativamente o tempo de implementação em cliente, uma vez que os pontos do manipulador já se encontram perto da posição final, se o modelo de simulação estiver de acordo com a célula real.

Para terminar foram implementadas zonas de trabalho que permitem localizar o robô no espaço. Estas zonas são utilizadas para efetuar recuperações automáticas após a interrupção do ciclo dos robôs. Este tipo de recuperações evita que os operadores movimentem o robô manualmente, podendo provocar colisões entre o manipulador e um dado objeto da célula, acidentalmente.

Capítulo 6

Programação dos Robôs

A programação de robôs pode ser realizada diretamente na consola do robô, *online*, ou recorrendo a um *software* de simulação e programação, *offline*. A ABB disponibiliza um *software* de programação *offline*, o RobotStudio, onde se pode desenvolver e testar o código, que mais tarde será implementado no robô real. Após a definição das trajetórias no programa de simulação, estas são importadas para o controlador virtual do RobotStudio. O conjunto de rotinas criadas previamente no simulador é a base da programação *offline*, apresentada ao longo deste capítulo.

Neste capítulo será apresentada a arquitetura das redes de comunicação, para a troca de sinais entre dispositivos, e serão apresentados os fluxogramas dos programas principais dos robôs, a fim de explicar a base do código desenvolvido para cada manipulador. Seguidamente será apresentado o método de implementação das zonas de trabalho e a interface do sistema com o utilizador. Para finalizar realizar-se-á uma breve summa do capítulo.

6.1 Comunicações e Sinais Digitais

Antes de se iniciar o desenvolvimento de código para os robôs, é necessário estabelecer e configurar os sinais que irão permitir a troca de informação entre a máquina injetora e os outros dispositivos, assegurando o correto funcionamento da célula. Tal como já foi referido no Capítulo 5, os elementos que integram as células de injeção e que interagem com os robôs, podem-se diferenciar em cinco grupos: injetora, matriz de sensores, tina de água, prensa, rampa de inspeção e rampa *Nok*. A troca de informação entre estes componentes é efetuada através de duas redes de comunicação industriais: PROFINET e Ethernet/IP.

A Figura 6.1, apresenta a arquitetura das redes de comunicação que interligam os vários dispositivos da célula. O mapeamento e descrição dos sinais dos robôs encontra-se detalhado no Anexo A.

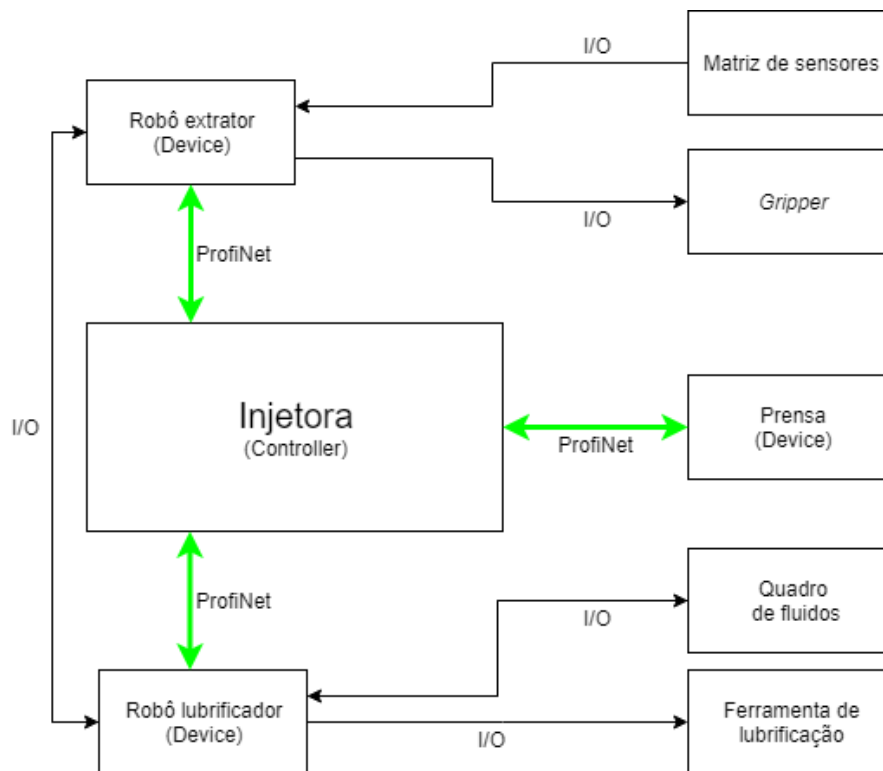


Figura 6.1: Diagrama da arquitetura de comunicação do sistema.

A injetora troca sinais com os robôs e a prensa através da rede de comunicação PROFINET. Esta rede de comunicação permite a troca de sinais relativos ao funcionamento da máquina injetora e da prensa, como por exemplo, ordens para início de ciclo, avanço dos extratores, peça para inspeção, peça não conforme, prensa operacional, cortante da prensa sem peça, entre outros. A configuração da rede PROFINET nos controladores dos robôs resume-se à criação de uma instância onde é definido o nome e tamanho da rede.

A monitorização e atuação dos dispositivos de campo, matriz de sensores e atuadores finais, é realizada com cartas de sinais, instaladas nos controladores, que comunicam por Ethernet/IP com o computador do controlador. A configuração desta rede de comunicação resume-se à atribuição de um nome e um endereço IP à carta de sinais. À carta de sinais do robô extrator são ligados os sensores da matriz e a atuação da garra de aperto mecânico. É ainda realizada uma troca de sinais com o controlador do robô lubrificador que indica quando a área no interior da injetora se encontra livre, para evitar colisões entre manipuladores. Os sinais de atuação da ferramenta de lubrificação, sinais de pressão de ar comprimido e sinais de controlo da célula são ligados nas cartas de sinais digitais do robô lubrificador.

6.2 Programação do Robô Extrator

Após a declaração dos sinais e da importação das trajetórias de movimentos realizadas no simulador para o controlador virtual do *software* da ABB, inicia-se a programação do robô extrator de acordo com o modo operativo definido anteriormente. Recapitulando, o robô extrator será responsável pela extração da peça da máquina injetora e posterior manipulação durante as fases de inspeção na matriz de sensores, arrefecimento na tina de água e escoamento da peça através da prensa, rampa de inspeção ou rampa de produto não conforme.

O arranque da célula apenas pode ser iniciado se todas as condições de segurança estiverem asseguradas. Assim, o programa do robô extrator pode ser executado em duas circunstâncias diferentes: com o robô em manual ou em automático. Para facilitar a recuperação do robô para a posição de *home*, caso o manipulador não se encontre dentro de nenhuma área de trabalho definida para as recuperações automáticas, o operador pode executar o programa principal para que a instrução de movimento do ponto de *home* seja executada. A execução do programa em modo manual é mais lenta e permite ao operador acompanhar o percurso do manipulador até à posição de *home* garantido que este não colide com nenhum objeto da célula.

As subsecções seguintes apresentam o funcionamento das rotinas principais do programa do robô extrator, esquematizando o seu funcionamento com fluxogramas.

6.2.1 Rotina Principal (main)

A rotina principal do robô extrator começa por executar uma inicialização que atribui o valor lógico 0 às variáveis de ordem de fecho do molde da máquina injetora, ordem de fecho da porta da máquina injetora, sinal de avanço dos extratores e sinal de peça não conforme. Esta rotina também desactiva o *SoftServo*, abordado na subsecção 6.2.2. Após a inicialização, o programa verifica se o robô se encontra em automático para poder efetuar uma recuperação automática. Caso o manipulador não se encontre na posição de *home* ou dentro de uma área de trabalho, será gerada uma mensagem de alerta na consola, para o operador passar o robô a manual e executar manualmente a instrução de movimentação para a posição *home*.

Este procedimento pode ser realizado executando o mesmo programa com o robô em manual, ou através da execução da rotina de *home* diretamente. Quando o robô se encontrar em *home* o operador pode voltar a passar o robô para automático e iniciar novamente a execução do programa. Se o atuador final do robô se encontrar dentro de uma zona de trabalho, previamente definida, será execu-

tada um rotina que contém instruções de movimento, que permitem deslocar o manipulador para a posição de *home*.

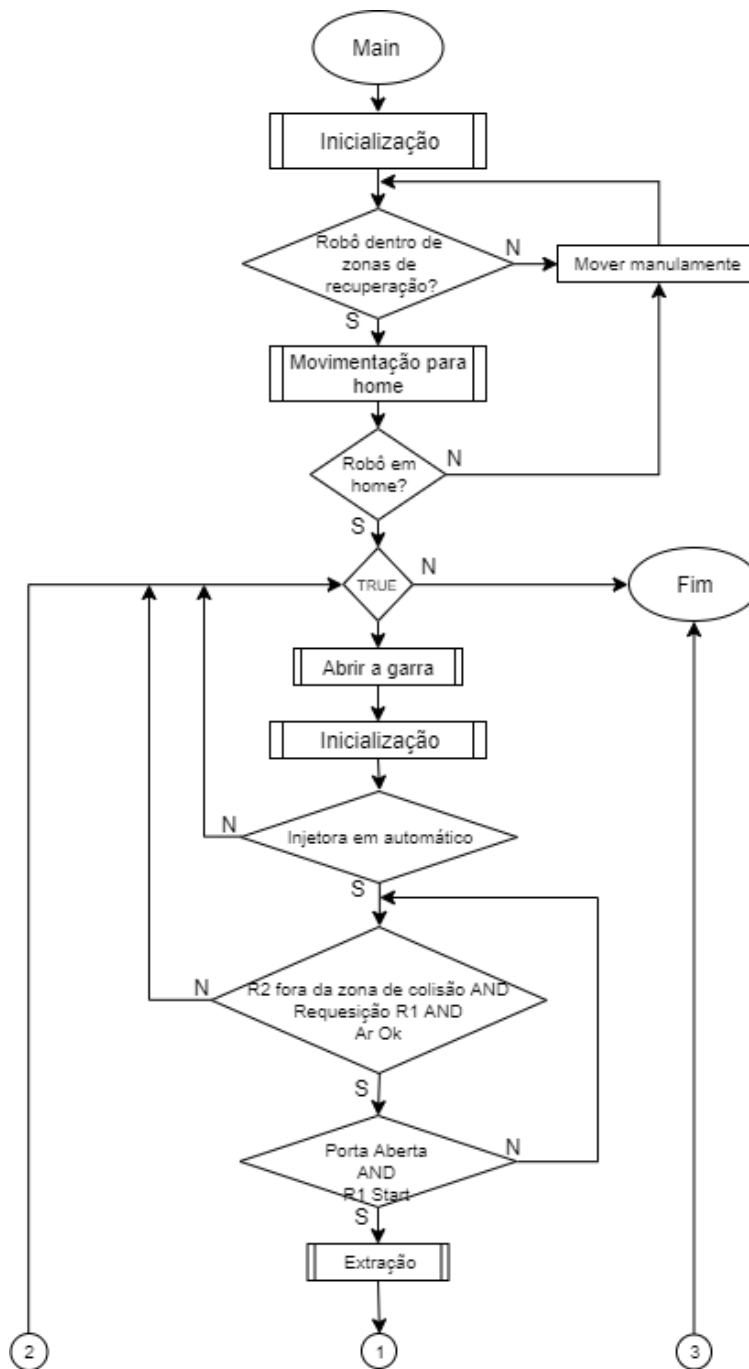
Após a execução da instrução de movimento de *home* coloca-se com valor lógico 1 os seguintes sinais: robô em posição de *home*, robô fora da máquina injetora, robô fora da prensa e robô fora da zona de colisão dentro da máquina injetora.

Com o manipulador devidamente posicionado, o ciclo de produção inicia-se com a abertura da garra de aperto mecânico seguido da inicialização de variáveis, novamente. Com a inicialização do sistema concluída, o ciclo principal verifica se a máquina injetora se encontra em automático. Caso isto não aconteça será gerada uma mensagem de alerta na consola. De seguida são verificados os sinais de ar comprimido, requisição do robô extrator e robô lubrificador fora da área de colisão. Após esta verificação o robô aguarda a abertura da porta da injetora e ordem para iniciar a extração da peça. Por sua vez, é executada a rotina de extração, subsecção 6.2.2. Se a extração da peça da máquina injetora decorrer sem problemas o programa do robô procede para a inspeção quantitativa da peça na matriz de sensores, subsecção 6.2.3. No entanto, se ocorrerem erros que impossibilitem a extração a peça, o robô executa uma rotina para abortar o ciclo de produção. Esta rotina abre a garra de aperto mecânico, movimenta o robô para uma posição fora da injetora e interrompe o processo, parando a execução do programa do robô. O reinício de produção requer o re-arranque do sistema, garantindo todas as condições de segurança.

Após a execução da rotina de inspeção da peça é gerada uma mensagem de alerta na consola que indica peça conforme ou peça não conforme. A injetora não pode fechar sem a garantia que o molde se encontra limpo e pronto para o próximo ciclo de injeção. A permanência de macelotes ou partes do jito poderá danificar o molde. Se a peça for conforme é dada ordem para fechar o molde da injetora, caso contrário, o sinal de peça não conforme é colocado com o valor lógico 1. Em ambos os casos o programa avança para a rotina de arrefecimento da peça na tina de água, subsecção 6.2.4.

O escoamento da peça da célula é executado após o arrefecimento e pode ser efetuado na prensa, subsecção 6.2.5, na rampa de inspeção ou na rampa de produto não conforme, subsecção 6.2.6. A decisão de encaminhamento da peça é realizada após a rotina de arrefecimento. Se a prensa estiver em modo automático, sem alarmes, e se não houver nenhum sinal a indicar não conformidade, o robô coloca a peça na prensa. Antes da execução da rotina da prensa o programa verifica o sinal de presença de peça no cortante da prensa, sinal de porta do robô aberta e o sinal de porta do operador fechada. A peça é colocada na rampa de inspeção se a máquina injetora o indicar, ou se a prensa não se encontrar operacional. O robô irá colocar a peça na rampa *Nok* se a injetora ou a matriz de

sensores indicarem peça não conforme. Após a execução de uma das rotinas de escoamento da peça o programa retorna ao início a variável de controlo do estado da peça é reiniciada, o manipulador volta para a posição de *home* e o programa aguarda nova ordem de início de ciclo. A Figura 6.2 apresenta o fluxograma da rotina principal do programa de acordo com a descrição efetuada.



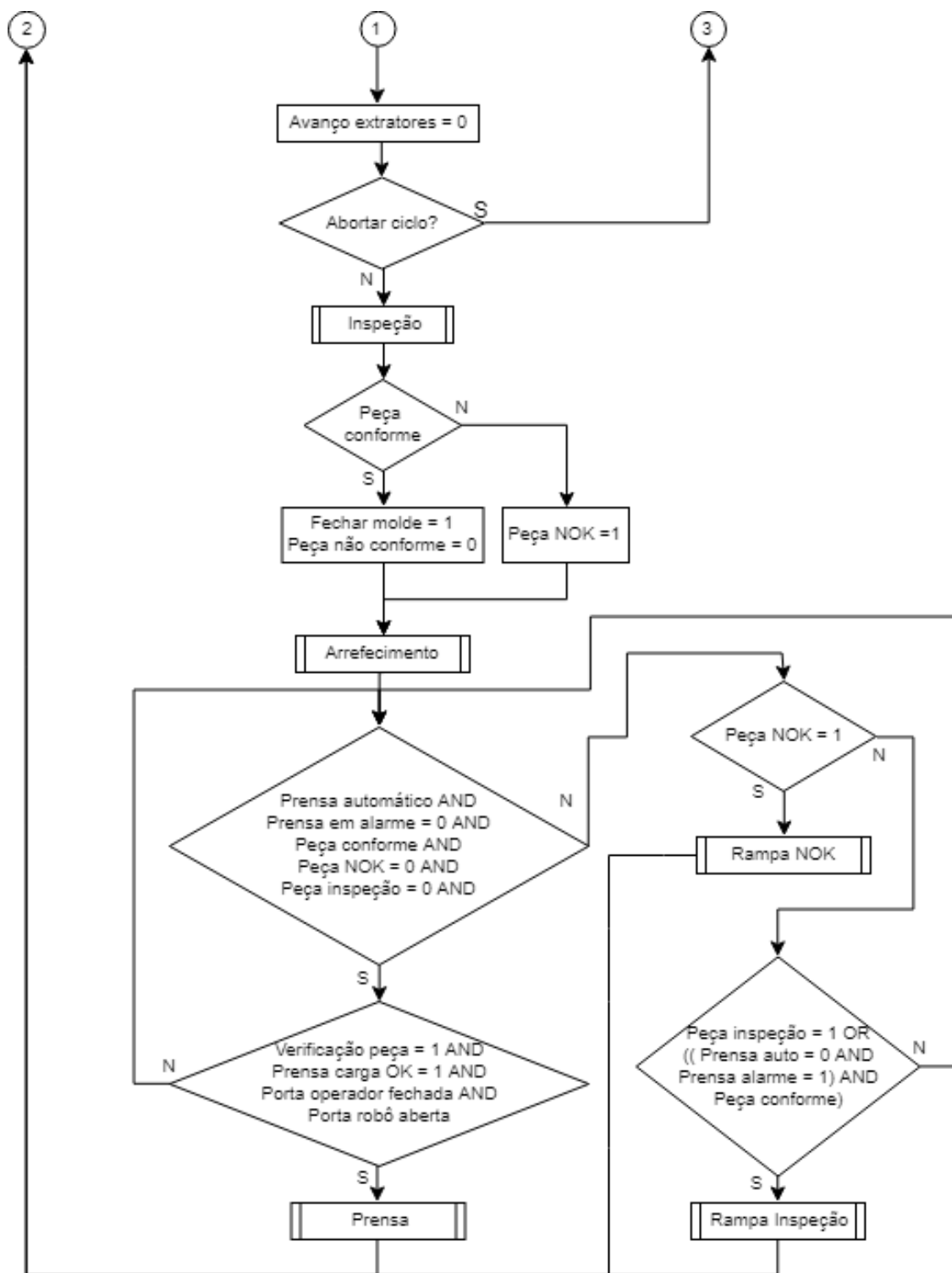


Figura 6.2: Fluxograma da função *main* do programa.

6.2.2 Extração

A extração da peça de fundição, da máquina injetora, é realizada com recurso à funcionalidade *Soft Servo* do robô. Em algumas aplicações é necessário que o manipulador possa ceder a forças externas, atuando como uma mola mecânica. Nesta tipo de aplicação é necessário permitir que o jito solidifique dentro do molde para que a peça possa manter a forma quando é extraída. Este tempo de solidificação provoca a expansão do alumínio e, como tal, a peça de fundição fica agarrada ao molde. Os pinos extratores do molde servem para retirar a peça deste sem a danificar. Estes extratores são controlados hidraulicamente e possuem forças elevadas, características deste tipo de sistemas. A peça de fundição possui um ponto para se efetuar a pega, denominado de bolacha, que possui ligações estruturais fracas à peça final e, como tal, a extração da peça com o robô iria partir ou danificar o jito.

A funcionalidade *Soft Servo* é utilizada para garantir que o robô cede à força dos extratores, sem danificar a peça de fundição e sem provocar colisões entre o avanço dos pinos extratores e o manipulador. Para ativar o *Soft Servo* é necessário indicar os eixos pretendidos e uma percentagem de suavidade. Quando maior for a percentagem atribuída a um dado eixo, mais facilmente o manipulador vai ceder a forças externas. A aplicação de valores demasiado elevados pode originar movimentos descontrolados no manipulador [59].

A rotina de extração começa por colocar a 0 os sinais que indicam robô fora da zona de colisão (dentro da injetora), robô em posição de *home* e robô fora da máquina injetora. A movimentação do robô em locais onde não é necessário precisão de movimento deve ser realizada com movimentos de juntas através da instrução de movimento *MoveJ*, possibilitando a execução com mais velocidade. A movimentação do manipulador em locais onde é necessário garantir que o manipulador se desloca linearmente e com precisão é realizada com a instrução de movimento *MoveL*. A aproximação ao centro do molde para agarrar a peça é realizada com movimentos de juntas e a aceleração do manipulador é reduzida para cerca de 30%, para tornar o fim de movimento mais suave.

Seguidamente o atuador final é movimentado linearmente para a posição de pega da peça, é dada a ordem para fechar a garra do robô, o *Soft Servo* é ativado para os eixos 1, 3, 4, 5 e 6 e é dado sinal de avanço dos extratores. O programa do robô fica bloqueado até ter confirmação que os extratores foram avançados. Neste momento, como o manipulador teve que ceder ao movimento dos pinos extratores é necessário calcular a nova posição do robô e movê-lo para essa mesma posição. A função *CRobT* é usada para calcular a posição e orientação do atuador final no espaço, é executada uma instrução de movimento linear para esse novo ponto e o *Soft Servo* é desativado. A saída do manipulador da máquina injetora pode ocorrer em duas circunstâncias. Se os pinos extratores se encontrarem avançados

o manipulador sai do interior da injetora com a peça de fundição, no entanto, se a máquina injetora abortar o ciclo ou os pinos extratores não avançarem o robô abre a garra e sai da injetora para a posição de *home* sem peça. Neste último caso, é necessário verificar o que causou a anomalia na injeção e a célula tem que ser reiniciada. A Figura 6.3 apresenta o fluxograma da função de extração da peça da máquina injetora.

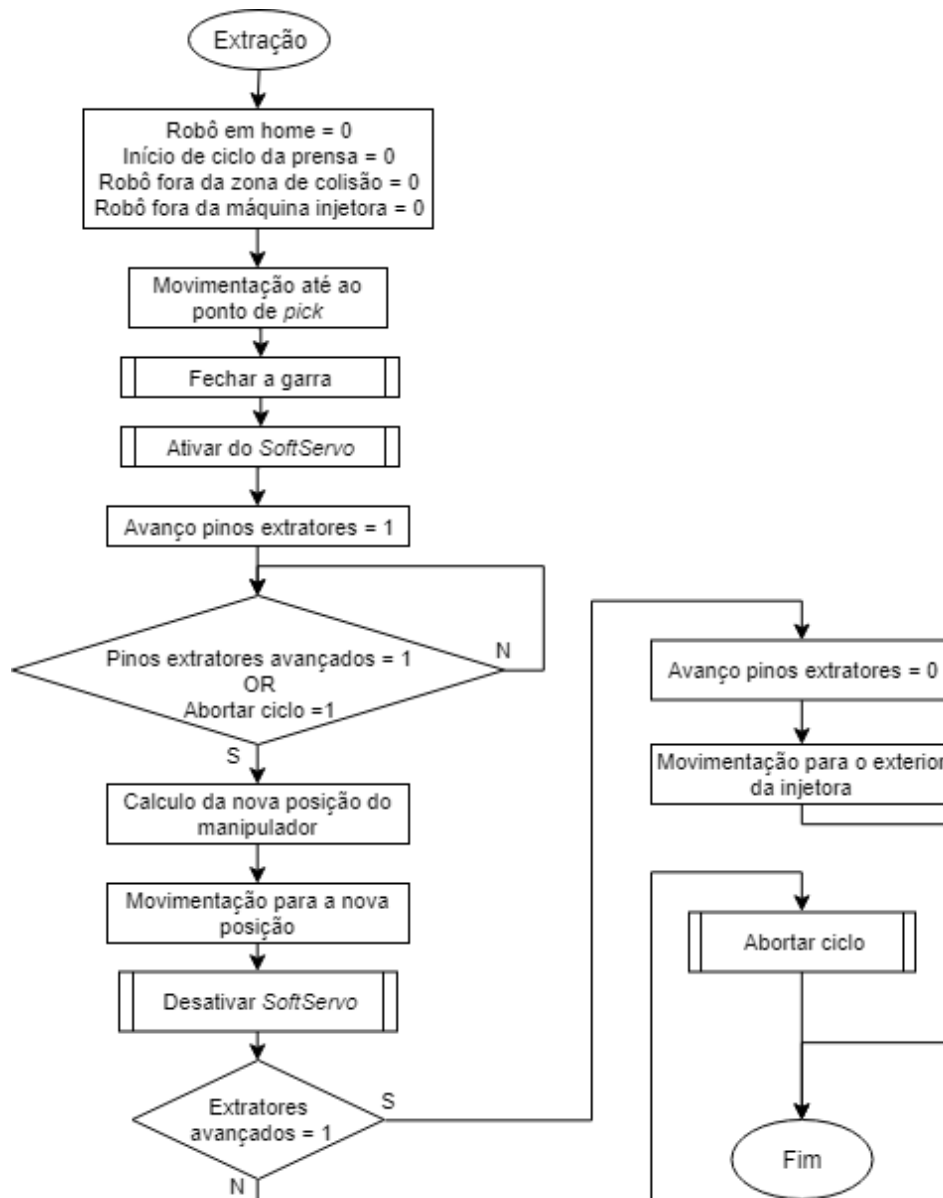


Figura 6.3: Fluxograma da função de extração da peça da injetora.

6.2.3 Inspeção

A matriz de sensores é constituída por um painel perfurado com 8 sensores foto-elétricos que se encontram ligados à carta de sinais digitais do robô extrator. Após a extração da peça de fundição, o robô executa a função de inspeção quantitativa da peça. Esta rotina começa por ativar o sinal que indica robô extrator fora da zona de colisão, uma vez que neste ponto do programa já foram executadas instruções de movimento na rotina da extração que retiraram o manipulador de dentro da injetora. Posteriormente o manipulador é movimentado linearmente para a posição de análise da peça, deslocando-se previamente para uma posição de aproximação ao painel com um movimento de juntas. Já na posição de análise o robô indica que está fora da injetora e que esta pode fechar a porta do lado do robô. Seguidamente são verificados os 8 sensores foto-elétricos sendo que a peça é assinalada como conforme se todos os sensores a detectarem. Após a análise o manipulador executa um movimento de juntas em direção à tina de água. A Figura 6.4 apresenta o fluxograma da função de inspeção da peça na matriz de sensores.

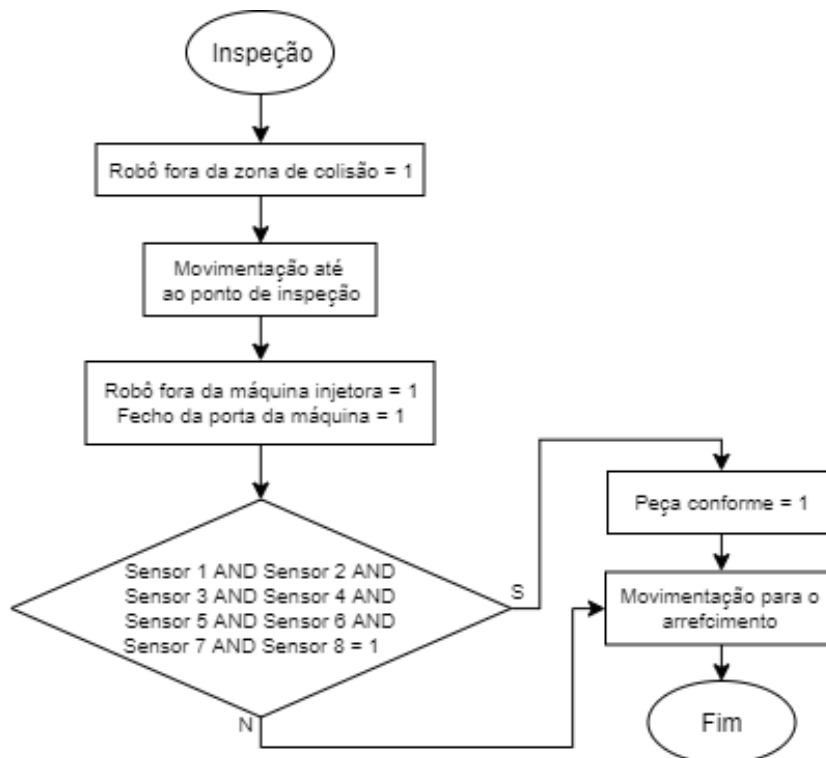


Figura 6.4: Fluxograma da função de inspeção da peça.

6.2.4 Arrefecimento

O arrefecimento da peça de fundição na tina de água começa pela execução de uma instrução de movimento que aproxima o robô da solução aquosa da tina. De seguida é atribuído um 0 lógico ao sinal de peça *Nok* e o manipulador desloca-se linearmente, mergulhando a peça na tina de água. A pedido do cliente, sempre que a dimensão da peça permitir, é executado um ciclo de instruções de movimento lineares que criam um movimento de oscilação permitindo um melhor arrefecimento da peça. Sempre que o ciclo de oscilação se repete, uma variável de contagem é incrementada até atingir um limite definido pelo cliente. Após este movimento cíclico, a variável de contagem é colocada a zero, são executadas instruções de movimento linear para retirar a peça da tina de água e é adicionado um tempo de espera de 2 segundos para escoamento do excesso de água da peça. Por fim o manipulador desloca-se para um ponto fora da tina de água que alinha o manipulador, preparando-o para executar uma das rotinas de escoamento da peça. A Figura 6.5 apresenta o fluxograma a da função de arrefecimento da peça.

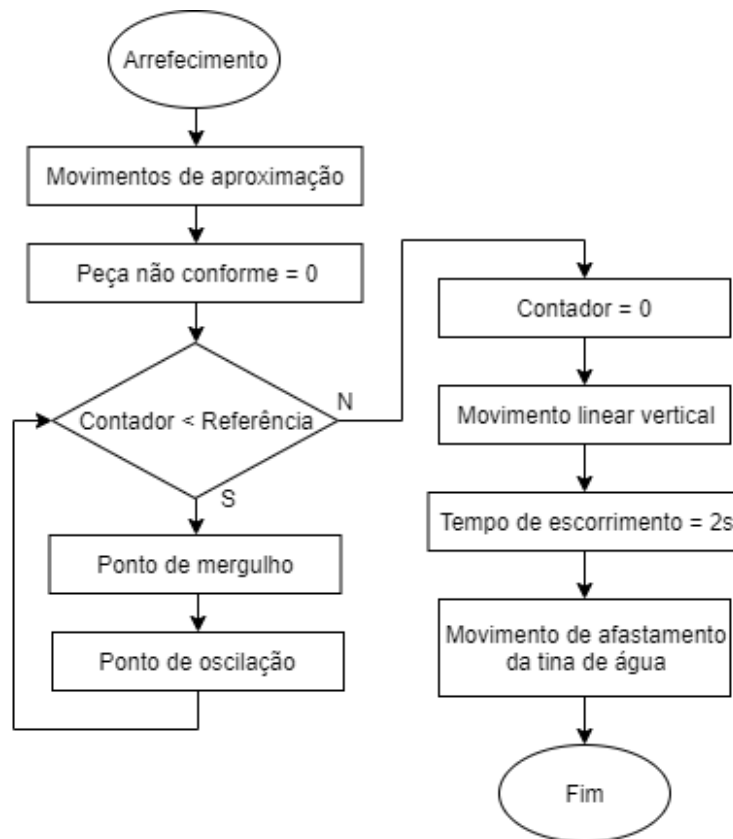


Figura 6.5: Fluxograma da função de arrefecimento da peça na tina de água.

6.2.5 Prensa

Após as verificações de operacionalidade da prensa o robô executa a rotina da prensa que contém maioritariamente instruções de movimento. Nesta rotina começa-se por colocar com 0 lógico o sinal de robô fora da prensa e movimentar-se o manipulador para uma posição perto da porta desta. É esperado o sinal de ferramenta pronta. O robô entra dentro da prensa através de movimentos de juntas e, de seguida, desloca-se linearmente até ao ponto de *place* da peça. A garra de aperto mecânico é aberta e o manipulador sai da prensa de corte indicando que não está dentro da prensa com a ativação de um sinal.

Para terminar, o manipulador regressa à posição de *home* e dá indicação à prensa que pode iniciar o ciclo de corte da peça de fundição. A Figura 6.6 apresenta o fluxograma da função da prensa.

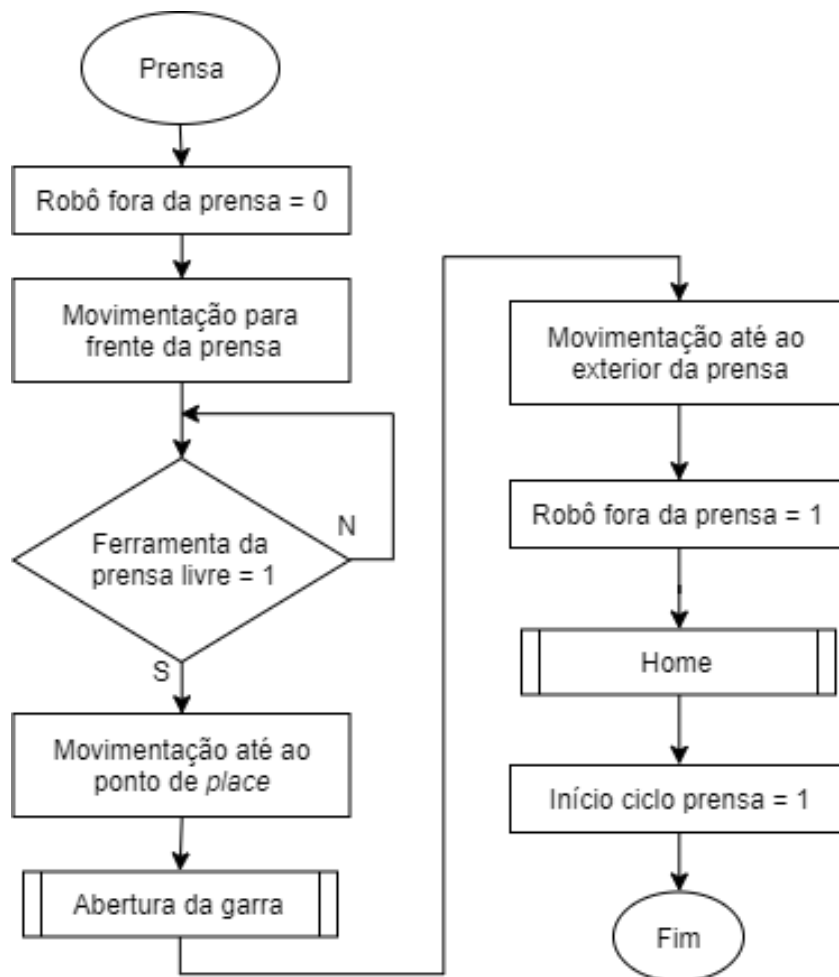


Figura 6.6: Fluxograma da função da prensa.

6.2.6 Rampa de Inspeção e Rampa Nok

A execução da rotina da rampa de inspeção ocorre quando a peça é conforme, mas a prensa não se encontra operacional, ou quando a máquina injetora assinala que a peça tem que ser inspecionada manualmente. Esta rotina consiste num conjunto de instruções de movimento de juntas que movem o robô desde o último ponto da rotina da tina de água até ao ponto de aproximação da rotina da rampa de inspeção. De seguida é executado um movimento linear com a mesma orientação da rampa para empurrar alguma peça ou objeto que possa permanecer na rampa desde o último ciclo. A garra é aberta e a peça fica livre na rampa. Para terminar, o robô afasta-se da peça com um movimento linear e, depois, volta à posição de *home* com movimentos de juntas.

Na rotina da rampa de peças não conformes são executadas instruções de movimento que deslocam o robô até à rampa, seguido de um movimento linear que empurra peças de ciclos anteriores, que possam permanecer na rampa. A garra do robô abre, larga a peça e o robô retorna à posição de *home*, através de movimentos de juntas. Ambas as rotinas das rampas seguem a mesma metodologia de implementação.

A Figura 6.7 apresenta o fluxograma das funções das rampas de inspeção e produto não conforme

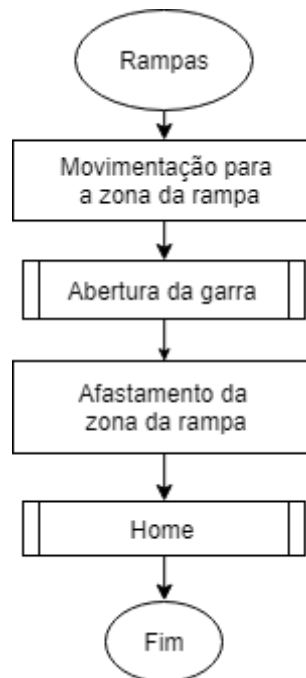


Figura 6.7: Fluxograma da função das rampas de escoamento da peça.

6.3 Programação Robô Lubrificador

O robô lubrificador é responsável pela lubrificação e sopro dos moldes da injetora. À semelhança do robô extrator, é necessário declarar os sinais que interagem com os periféricos deste robô antes de se iniciar a programação propriamente dita. A execução do programa deste robô pode ser realizada manualmente ou em automático. A execução do programação com o robô em modo manual permite a execução da rotina de *home* que colocará o manipulador nesta posição sem que o operador tenha que procurar a instrução de movimento e executá-la ou movimentar o manipulador manualmente. As subsecções seguintes apresentam as rotinas principais deste robô, esquematizando o seu funcionamento com fluxogramas.

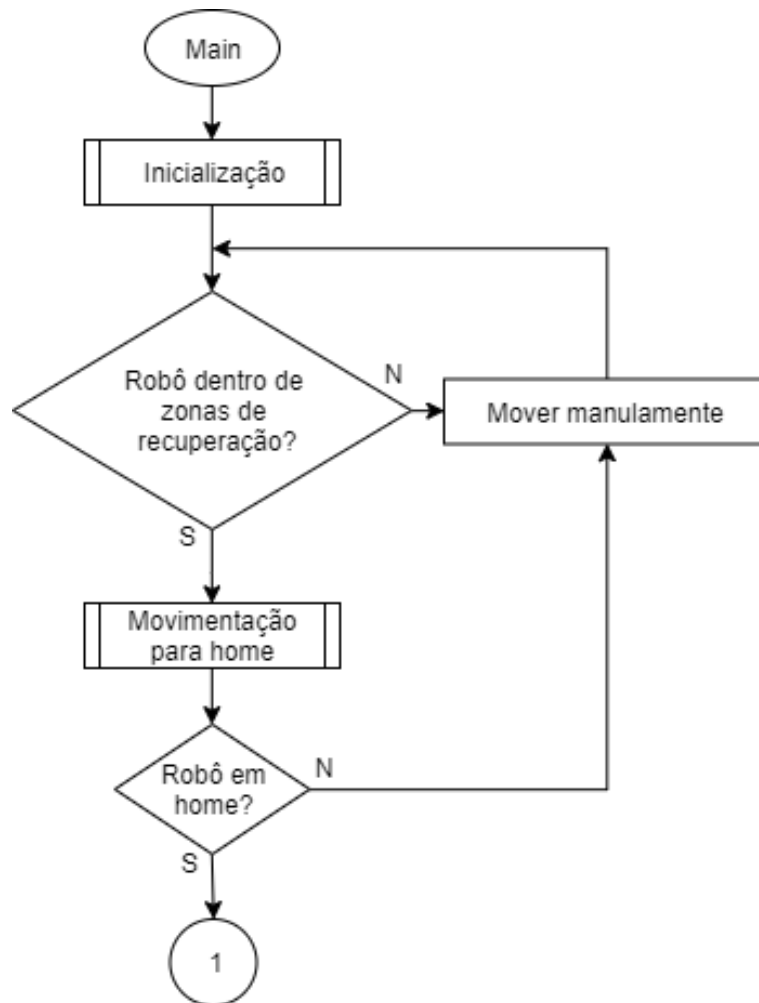
6.3.1 Rotina Principal (main)

O programa principal do robô lubrificador começa por inicializar com o valor lógico zero sinais de controlo, como por exemplo, sinal de avanço e recuo dos radiais do molde, sinal de acionamento da eletroválvula de fluído, sinal que indica o fim da lubrificação do robô, sinal de robô em alarme, sinal de retorno do pistão de injeção e sinal que indica que o robô se encontra pronto para iniciar o ciclo de lubrificação. Após a inicialização de sinais é verificado se o robô se encontra dentro de alguma zona de trabalho definida para as recuperações automáticas. Se nenhuma das condições for verdadeira, aparece uma mensagem de alerta na consola e torna-se necessário movimentar o robô, em modo manual, para a posição de *home* ou para dentro de uma zona de trabalho previamente definida. Como já foi referido, o robô pode ser colocado em *home* executando o programa em modo manual, uma vez que é feita a distinção dos modos de funcionamento com um sinal de sistema criado para o efeito.

De notar que, mesmo com a execução manual da instrução de movimento de *home*, é necessário observar o percurso do manipulador para garantir que este não colide com outros objetos da célula. Se alguma das condições de verificação das zonas for verdadeira é executada uma rotina que movimenta o robô na posição de *home* e ativa os sinais de robô em posição de *home*, robô fora da área da injetora e robô fora da zona de colisão.

Após as verificações iniciais, o programa entra numa sequência de execução cíclica que permite o decorrer das operações de lubrificação e sopro ao longo dos ciclos da máquina injetora. Este ciclo começa pela inicialização dos sinais de controlo do processo. Com o manipulador na posição de *home* são verificados os seguintes sinais: injetora em automático, molde aberto, robô extrator fora da zona de colisão, pressão de ar de atomização, pressão de ar de sopro, pressão de ar das pilotagens e sinal de requisição do robô lubrificador. Caso algum destes sinais falhe é apresentada uma mensagem de alerta na consola do robô. De seguida o programa espera o sinal de preparação do ciclo e o robô executa uma

instrução de movimento de aproximação à injetora, colocando com nível lógico 1 o sinal de robô em posição pré-ciclo. Quando ocorre a ordem de início de ciclo, o sinal de robô em pré-ciclo é colocado a 0 lógico e são executadas as rotinas de lubrificação do molde fixo, retorno do pistão de injeção, lubrificação do molde móvel, sopro do molde fixo e sopro do molde móvel. Após a execução destas rotinas coloca-se o sinal de fim de lubrificação a 1 e o robô regressa à posição de *home* através da execução da rotina *HomeAuto*. Para garantir sincronismo entre ciclos da máquina injetora, o programa aguarda que os sinais de início de pré-ciclo e início de ciclo fiquem com o nível lógico 0. Neste momento o sinal de fim de lubrificação é colocado a 0 e o programa repete-se quando as condições iniciais se verificarem novamente. A Figura 6.8 apresenta o fluxograma da função *main* do robô lubrificador.



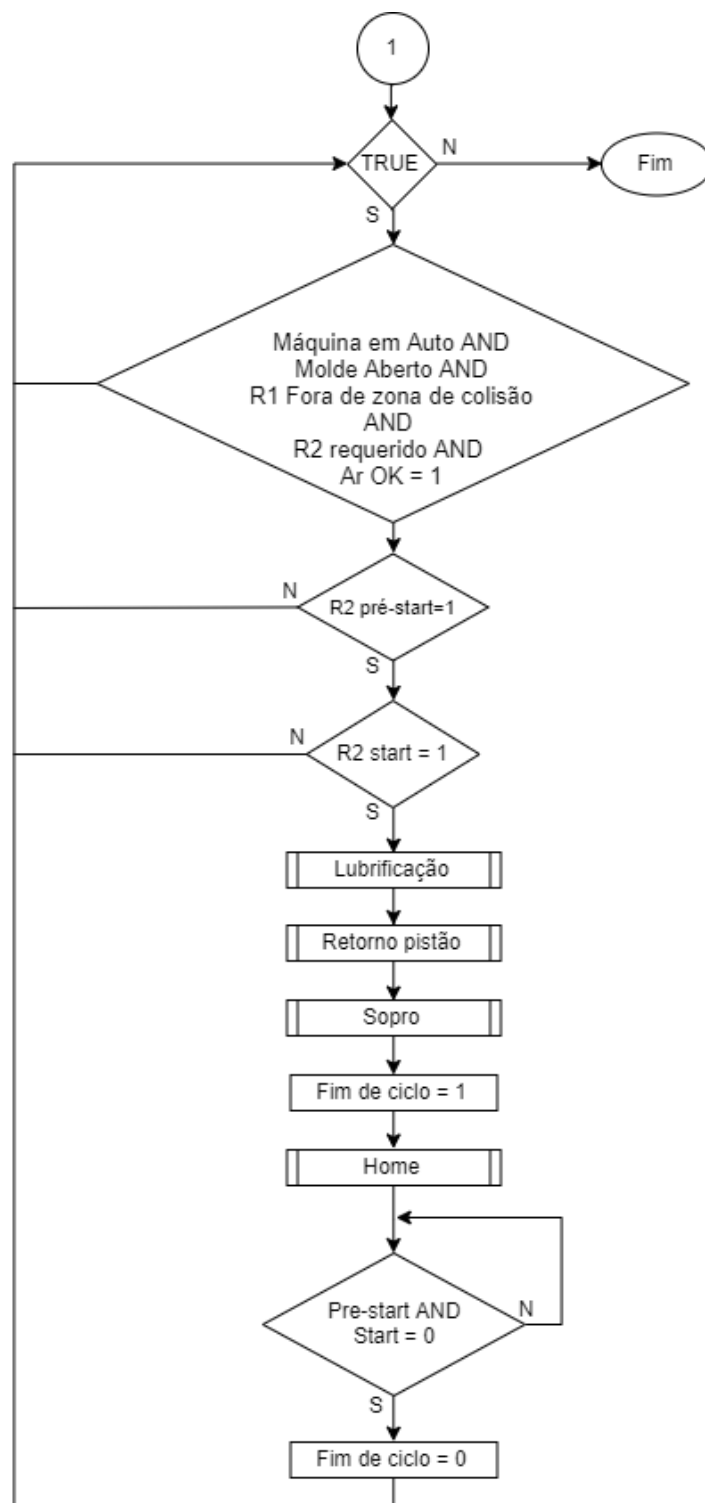


Figura 6.8: Fluxograma da função principal do robô lubrificador.

6.3.2 Lubrificação

As rotinas de lubrificação implementadas neste robô dividem-se em: lubrificação do molde fixo e lubrificação do molde móvel. A rotina de lubrificação do molde fixo começa pela desativação dos sinais: robô fora da área da injetora e robô fora da zona de colisão. Posteriormente é executada uma instrução de movimento que coloca o robô na primeira posição de lubrificação e são ativados os sinais de atomização e pilotagens dos bicos de lubrificação do molde fixo. Com a atomização de desmoldante ativada, o robô percorre a área do molde fixo numa sucessão de movimentos lineares. Após o último ponto de lubrificação do molde fixo os sinais de atomização são desligados e é executada a rotina de lubrificação da parte móvel do molde. À semelhança do molde fixo, após a execução da primeira instrução de movimento são ativados os sinais de atomização e pilotagens, do lado do molde móvel, da ferramenta de lubrificação e são executadas uma série de instruções de movimentos lineares que percorrem o molde móvel. Após a última posição os sinais de atomização e pilotagens são desativados. Após a lubrificação das duas partes do molde inicia-se o sopro deste. A Figura 6.9 apresenta o fluxograma da sequência de lubrificação do molde.

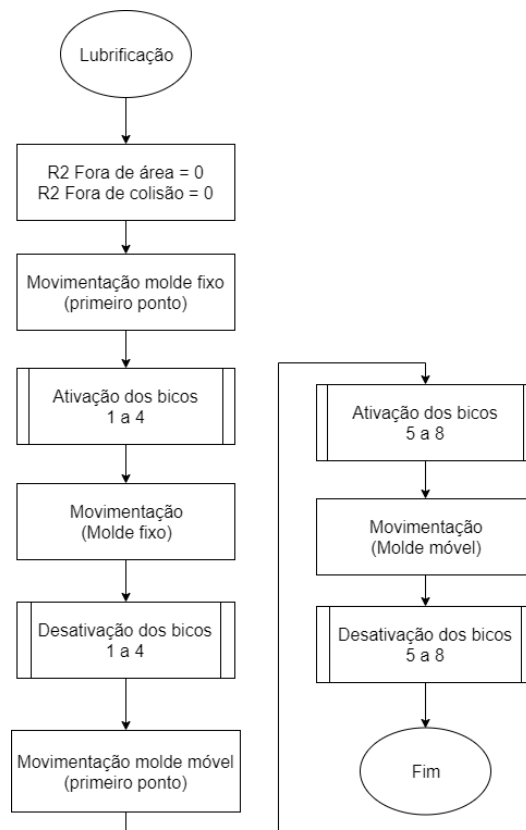


Figura 6.9: Fluxograma da sequência de lubrificação do robô lubrificador.

6.3.3 Sopro

Tal como as rotinas de lubrificação, as rotinas de sopro do molde também se dividem em: sopro do molde fixo e sopro do molde móvel. Estas rotinas seguem os mesmos pontos das rotinas de lubrificação deslocados verticalmente de 80 mm. A rotina de sopro do molde fixo começa com a ativação do sinal dos bicos de sopro, seguido da execução de instruções de movimento lineares que percorrem a parte fixa do molde. Na última posição de sopro, este sinal é desativado e o manipulador passa para a rotina de sopro da parte móvel do molde. Nesta rotina começa-se por ativar o sinal dos bicos de sopro da parte móvel, seguido da execução de instruções de movimento linear que limpam toda a superfície do molde. No final o sinal de sopro é desativado. A Figura 6.10 apresenta o fluxograma da sequência de sopro do molde da injetora.

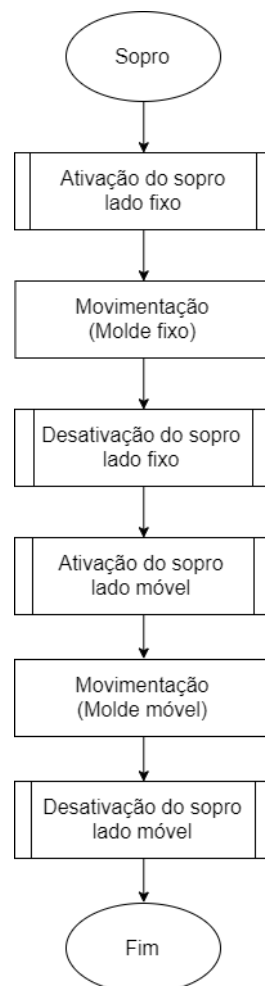


Figura 6.10: Fluxograma da sequência de sopro do robô lubrificador.

6.4 Zonas de Trabalho

A implementação das zonas de trabalho permite a utilização de recuperações automáticas para a posição de *home*. Sempre que se inicia um ciclo de produção é necessário garantir que todas as condições de segurança da célula se encontram verificadas e que os robôs se encontram na posição de *home*. Só assim é possível assegurar que o arranque da célula decorre sem problemas de colisão entre os robôs, ou entre robôs e os periféricos do sistema.

A implementação deste tipo de zonas de trabalho é realizada através de um adicional de *software*, *World Zones*, que integra o robô. Este adicional permite criar volumes dentro do espaço de trabalho do robô associando a essas zonas um sinal que indica se o robô se encontra no interior ou exterior do volume definido. A implementação destas zonas começa pela criação de sinais que serão alocados ao estado retornado pela função da zona.

A função de definição das zonas requer uma saída digital para indicar o estado da zona. Assim, foram criados sinais digitais virtuais alocados a uma carta de sinais simulada para permitir a implementação das zonas de trabalho. Seguidamente é necessário criar 3 variáveis para definir o volume da zona de trabalho. A primeira variável é do tipo *shapedata* e descreve o volume da zona de trabalho. As 2 variáveis seguintes correspondem aos vértices diagonais do volume rectangular e são do tipo *pos*. Nestas variáveis introduz-se as cotas de *x*, *y* e *z*, em milímetros, destes vértices. Se a zona de trabalho for esférica estas 2 últimas variáveis designam o centro da esfera e o seu raio. Após a definição do volume é necessário associar todos os elementos criados anteriormente através da função *WZBoxDef*, para as zonas de trabalhos rectangulares, ou *WZShpDef*, para as zonas de trabalho esféricas. Estas funções atribuem à variável de volume as variáveis de limite das zonas. Após a definição das zonas é necessário associar uma saída digital a um volume através da função *WZDOSet*.

Cada função de área contém a definição da zona e a associação dessa zona a um sinal digital, no entanto, sendo funções, apenas serão executadas com declaração no programa principal ou num ficheiro de sistema que permite a execução destas funções quando o controlador é ligado. Assim, é necessário ir ao ficheiro de sistema *SYS.cfg* e enunciar na secção "*CAB_EXEC_HOOKS*" o nome das funções criadas associadas ao "*POWER_ON*" do controlador. Sempre que o controlador estiver ligado estas funções de monitorização da área serão executadas, indicando a presença do robô numa dada zona de trabalho.

6.5 Interface com o Operador

Além da consola de cada robô, que apresenta mensagens de alerta e erro, Anexo B, cada célula possui uma interface com o operador que é realizada através

de uma botoneira de emergência e uma botoneira de 4 botões alocados a diversas funções.

As botoneiras de emergência estão ligadas ao circuito de emergência da injetora e da prensa. Se alguma destas botoneiras for pressionada os robôs param na posição onde estão, a garra do robô extrator fecha automaticamente e a alimentação das eletroválulas da ferramenta do robô lubrificador é cortada, interrompendo a atomização ou sopro.

As botoneiras de 4 botões, colocadas por baixo da botoneira de emergência, possuem um botão verde, um vermelho, um azul e um botão âmbar. O botão verde utiliza-se quando se pretende arrancar com o sistema, dando ordem de execução do programa aos robôs. O botão vermelho utiliza-se quando se pretende mover o apontador do programa para a primeira instrução de código, reiniciando os robôs. O botão azul é utilizado para abrir o trinco eletrónico da porta da célula e o botão âmbar utiliza-se para rearmar a segurança da porta da célula e para rearmar os controladores dos robôs. A Figura 6.11 apresenta a botoneira de emergência e a botoneira de 4 botões que constituem a interface do sistema com o operador.



Figura 6.11: Interface do sistema com o operador.

O arranque ou re arranque da célula pode ser realizado de duas maneiras diferentes. O arranque do sistema é realizado quando há mudança de referência da peça na máquina injetora ou quando a máquina é ligada. Em ambas as situações é necessário garantir que o sistema se encontra com as condições de arranque todas

reunidas e que os robôs se encontram na posição de *home* ou dentro de uma zona de trabalho. Neste caso, para garantir que o código é devidamente executado, os operadores devem carregar no botão vermelho, para reiniciar o apontador do programa para a primeira linha de código e, só depois, é que devem pressionar o botão verde para dar ordem de execução ao sistema.

Quando a segurança de portas é quebrada ou uma botoneira de emergência é pressionada o sistema pode ser re-arrancado, sem a necessidade de iniciar o ciclo do zero. Após a verificação de todas as condições de segurança, o operador deve fechar a porta da célula, carregar no botão âmbar para rearmar a segurança de portas e pressionar o botão verde para continuar o ciclo. Esta funcionalidade atribui mais responsabilidade aos operadores da célula, no entanto, evita o reinício desnecessário do ciclo na injetora.

6.6 Suma do Capítulo

Ao longo deste capítulo foi apresentada a programação dos robôs com recurso a fluxogramas que descrevem a metodologia do código implementado. Antes de iniciar a programação, propriamente dita, foi necessário estabelecer a arquitetura de comunicações do sistema, para configurar os protocolos. Nesta aplicação, a configuração destas redes de comunicação foi realizada no RobotStudio onde é possível criar instâncias para cada protocolo, atribuindo apenas um nome à rede, no caso do PROFINET, ou um nome e um IP, no caso do Ethernet/IP. Após a configuração das redes foram declarados todos os sinais que permitem a troca de informação entre os vários sistemas que integram a célula. Esta declaração de sinais foi realizada diretamente no ficheiro de configuração para permitir a agilização do processo, que seria significativamente mais demorado através do *software* de programação da ABB, RobotStudio. Após a declaração de todos os sinais desenvolveu-se o código com base nas trajetórias criadas em ambiente de simulação. Para finalizar, o código desenvolvido foi testado no simulador da ABB, através do acionamento manual dos sinais de entrada de cada robô.

Capítulo 7

Implementação e Resultados

A fase de implementação deste projeto engloba a fase de testes, instalação e arranque e acompanhamento, definidas nas metodologias de implementação de célula robotizadas. Apesar de a programação dos robôs pertencer à fase de testes esta já foi abordada no capítulo anterior, no entanto, os testes de código realizados nos robôs reais serão abordados neste capítulo. A implementação deste projeto foi dividida em duas fases distintas: testes internos nas instalações da RobotSol e implementação final em cliente, que implica a instalação da célula, arranque e acompanhamento de produção.

Neste capítulo será apresentado o processo de transferência dos parâmetros e código desenvolvidos no *software* de programação *offline* para o controlador do robô real. Seguidamente serão apresentados os métodos de teste dos robôs e periféricos da célula. De notar que devido ao *layout* e dimensão dos componentes os testes internos não possibilitaram a recriação das condições da aplicação real. De seguida será apresentado o processo de implementação das células em cliente, juntamente com o primeiro arranque da célula e acompanhamento de produção. Para concluir será realizada uma análise comparativa entre os tempos de ciclo de simulação da célula B e a mesma célula na realidade. O processo de implementação das outras células é muito semelhante ao da célula B.

7.1 Testes Internos

Após a programação e testes do código no *software* de simulação e programação *offline* da ABB, é necessário descarregar o código para o controlador real para testar o máximo possível dentro das condições que se conseguem recriar nas instalações da RobotSol. Uma vez que a criação de um *backup* do controlador virtual e posterior carregamento no controlador real iria alterar dados de calibração dos robôs, todo o código e parametrização foi descarregada para o controlador real de forma faseada e controlada. Assim, a passagem dos sinais para o controlador real foi realizada copiando as declarações dos mesmos presentes no ficheiro

EIO.cfg que se pode encontrar no diretório para o qual se realizou o *backup* do sistema. De seguida, todos os ficheiros de sistema e de programas criados para a aplicação foram transferidos, ligando diretamente o controlador ao *software* de programação da ABB, através de um computador. No fim da transferência de todos os ficheiros e verificação da inexistência de erros é realizado um *backup* que será a base sobre o qual decorrerá a implementação em cliente.

Após a transferência de todos os parâmetros e programas procedeu-se ao teste dos atuadores finais de cada robô. Tal como já foi referido, o robô extrator possui uma garra de aperto mecânico que é responsável pelo aperto da bolacha da peça de fundição, permitindo a sua manipulação ao longo do processo da célula. A atuação da eletroválvula é realizada através de uma saída digital que está mapeada no nono endereço da carta de sinais digitais. O saída da carta de sinais é ligada a uma cablagem interna do robô que termina numa tomada de pinos localizada no terceiro eixo do manipulador. A ligação do conector da eletroválvula a esta tomada de pinos é realizada através de um ficha fornecida pela ABB. A eletroválvula que atua a garra localizada-se na parte inferior do eixo 3 do manipulador. A Figura 7.1 apresenta a eletroválvula de acionamento da garra de aperto mecânico e a ficha ABB, lado esquerdo.

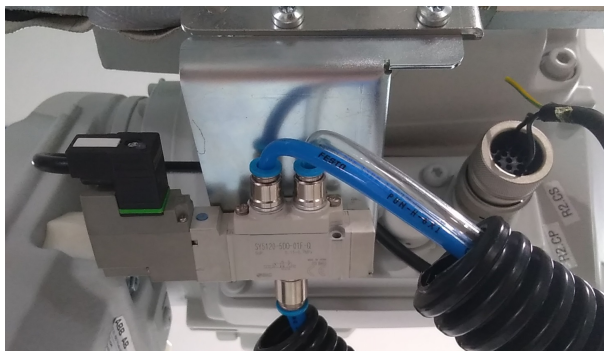


Figura 7.1: Eletroválvula de atuação da garra de aperto mecânico.

Depois da verificação do funcionamento da garra do robô extrator iniciam-se os testes à ferramenta do robô lubrificador. A atuação desta ferramenta é realizada com vários sinais que atuam as eletroválvulas do quadro de fluídos e o bloco de eletroválvulas. A atomização de desmoldante é realizada através da ativação da eletroválvula de ar para a atomização, eletroválvula do líquido de lubrificação, eletroválvula geral das pilotagens e eletroválvulas das pilotagens de cada bico de atomização. Estas últimas encontram-se instaladas dentro de uma caixa estanque no eixo 3 do robô, num bloco de 8 eletroválvulas do fabricante de componentes pneumáticos SMC. As saídas digitais da carta de sinais para o controlo destas eletroválvulas são ligadas ao bloco através da cablagem interna do robô, que é interligada numa ficha DB25 que é conectada no bloco. A Figura

7.2 apresenta o bloco de eletroválvulas instalado na "mochila" dos manipuladores de lubrificação.

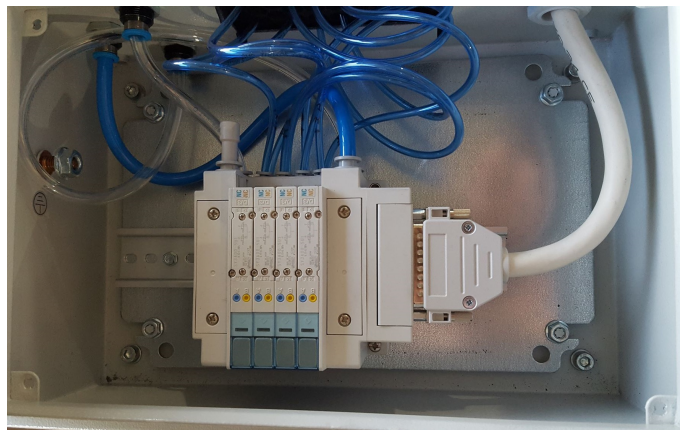


Figura 7.2: Eletroválvula de atuação da ferramenta de lubrificação.

Os bicos de sopro da ferramenta de lubrificação são atuados através de duas eletroválvulas no quadro de fluídos que correspondem ao sopro do lado do molde fixo e sopro do lado móvel. Devido à falta de condições para a realização de testes em condições reais, a verificação do funcionamento da ferramenta de lubrificação foi realizada apenas com ar comprimido. Aquando da atuação das eletroválvulas das pilotagens e das eletroválvulas de atomização verificou-se a presença de ar comprimido nos bicos de lubrificação, validando o sistema. A Figura 7.3 apresenta o robô lubrificador e ferramenta da célula B, sobre os quais foram realizados os testes descritos.

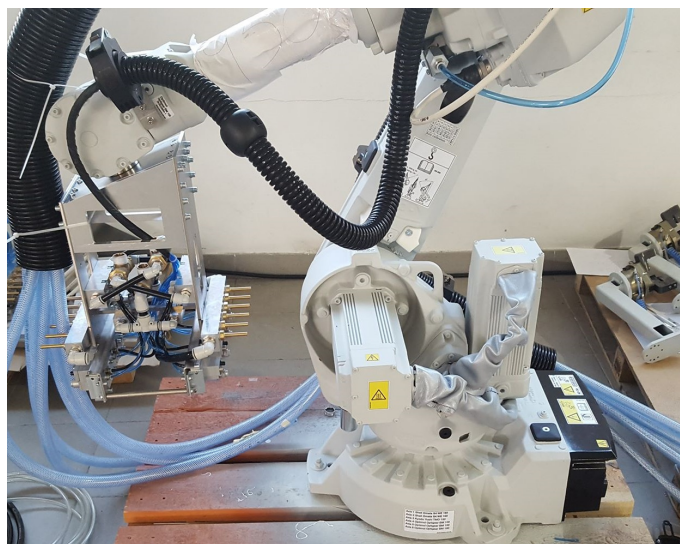


Figura 7.3: Teste do atuador final do robô lubrificador da célula B.

Com a verificação do correto funcionamento dos atuadores finais é realizado um *I/O check* parcial que consiste na verificação das ligações eléctricas nos controladores. Devido à dificuldade de recriação do *layout* final da célula, a interação entre a injetora e os controladores foi simulada manualmente no *software* de simulação da ABB. A referência do modelo de simulação, denominado de zero do mundo de simulação, é o ponto sobre o qual todos os objetos importados são localizados. A definição das cotas de posição e orientação são sempre referentes a este ponto de referência. No entanto, a referência do zero do mundo real para cada robô é a sua base. A posição e orientação de todos os pontos de trajetória ou pontos de referência são caracterizados a partir do centro da base do robô. Esta distinção na definição dos zeros dos mundos invalidam os testes do funcionamento das zonas de trabalho no simulador, uma vez que as cotas de posição para a definição dos volumes não corresponde à realidade. Assim, após a obtenção dos pontos que caracterizam uma zona de trabalho no simulador, considerando a base do robô como referência, e respetiva implementação no controlador real, as zonas de trabalho do robô lubrificador são testadas deslocando manualmente o manipulador. Quando o atuador final entra dentro de um dos volumes definidos o sinal de saída correspondente é ativado.

7.2 Implementação em Cliente

A implementação das células de injeção em cliente iniciam-se com a montagem e interligação de todos os sistemas e componentes que constituem a célula. Após a montagem da célula é necessário realizar um novo *I/O check* para verificar se todas as ligações eléctricas encontram-se de acordo com o esquema eléctrico, permitindo a atuação e monitorização de todos os dispositivos que integram a célula. Antes de se iniciar a verificação das entradas e saídas das cartas de sinais digitais instaladas nos controladores, é realizado um teste de comunicação com a injetora confirmando o mapeamento e ativação dos sinais em ambos os sistemas. Durante este *I/O check* as saídas dos robôs são atuadas manualmente no menu de saídas digitais disponível na consola dos robôs. Após a verificação do mapeamento dos sinais de saída procede-se à verificação dos sinais de entrada que são atuados manualmente do lado da injetora. Com a garantia que todos os sinais da rede de comunicação PROFINET estão devidamente mapeados, é realizado o *I/O check* das cartas de sinais digitais. No robô extrator são verificados os sinais que indicam o estado do circuito de emergências, segurança de portas, sinal de colisão entre robôs, arranque do sistema, rearme do controlador, sinais dos sensores foto-elétricos da matriz de sensores, sinal de ar comprimido e sinal de atuação da garra do robô. A verificação dos sinais do robô lubrificador realiza-se com a monitorização do sinal de colisão, sinais de ar comprimido das várias unidades de tratamento de ar, sinal de arranque do sistema e sinal de rearme do

controlador, e com a atuação do sinal de colisão e a atuação das eletroválvulas do quadro de fluidos e da "mochila" do robô.

Após a verificação de sinais é necessário testar o trinco eletrônico da porta da célula e as emergências, com o espoletar sucessivo de eventos de emergência na célula que são rearmados do lado da injetora do cliente e no botão âmbar, do conjunto de 4 botões colocados na porta de cada célula. A Figura 7.4 apresenta a porta da célula B onde é possível observar o trinco eletrônico da célula, a botoneira de emergência e o conjunto de 4 botões de interface com o operador.



Figura 7.4: Porta e botoneiras da célula B.

Com todos os periféricos da célula operacionais, a próxima fase da implementação é a remarcação dos pontos de trajetórias dos robôs. Apesar de o modelo de simulação da célula B possuir características dimensionais muito próximas à realidade, é necessário remarcar os pontos das trajetórias de movimento do robô, sendo que há pontos onde é necessário mover o manipulador com precisão em espaços confinados, como o interior da injetora ou prensa. Uma vez que a marcação de pontos com precisão no robô extrator está dependente da operacionalidade da máquina injetora, que tem um tempo de preparação elevado, inicialmente foram considerados pontos do espaço de trabalho do robô próximos dos pontos finais.

Esta marcação parcial dos pontos, foi realizada devido à rapidez e precisão necessárias aquando da operação de extração. Após a solidificação do alumínio e abertura do molde para a extração, a peça de fundição pode ficar agarrada ao molde, podendo provocar danos no mesmo. A marcação destes pontos parciais permite reduzir o tempo de afinação desta rotina, uma vez que a trajetória do robô já foi marcada de acordo com a perspectiva real do espaço, evitando colisões. Este processo de marcação dos pontos do robô por aproximação é realizado para todas as rotinas do robô extrator. No final da remarcação dos pontos de acordo com a sequência definida no *software* de simulação, a posição de *home* foi remarcada para garantir que o eixo 3 do manipulador não colide com a porta da injetora aquando da execução das rotinas da prensa, rampa de inspeção e rampa *Nok*. A Figura 7.5 apresenta a posição de *home* definida para o robô extrator na célula B.



Figura 7.5: Robô extrator da célula B em posição de *home*.

As marcações finais dos pontos das trajetórias de movimento do robô lubrificador foram realizadas de acordo com o planeamento efetuado na simulação. Este robô parte da posição de *home* para uma posição de preparação de ciclo por cima do molde da injetora. Aquando da ordem de início de ciclo o robô aproxima a ferramenta de lubrificação do molde e efetua um ciclo de atomização e sopro. Este processo de marcação de pontos não depende da operacionalidade da injetora, no entanto, só foi realizada após a fixação da cota de abertura do molde, para evitar colisões entre a ferramenta e o molde. A Figura 7.6 apresenta o robô lubrificador na posição *home* na célula B.



Figura 7.6: Robô lubrificador da célula B em posição de *home*.

Com os pontos das rotinas de movimento do robô lubrificador remarcados foi realizado um ciclo em vazio, para ajustar as distâncias e velocidades de lubrificação de acordo com a especificação do cliente. Este teste foi efetuado com o robô em modo manual para garantir, se necessário, a paragem do ciclo através da libertação do botão de homem morto.

Após a marcação parcial dos pontos no robô extrator e da marcação final dos pontos no robô lubrificador, foram realizados testes às zonas de trabalho de cada robô. A verificação do funcionamento das zonas de trabalho inicia-se com a movi-

mentação manual do manipulador no seu espaço de trabalho, registrando as cotas dos pontos que definem uma dada zona através do menu de movimentação na consola do robô. A medição destas cotas é realizada desde a base do manipulador até ao TCP de cada robô. Este ajustes de valores foram necessários devido aos desvios existentes entre o ambiente de simulação e a célula real. Após a retificação dos volumes das zonas de trabalho em ambos os robôs, foram realizados testes parciais em modo automático com o intuito de testar as rotinas de recuperação.

Os testes das rotinas de recuperação automáticas no robô extrator consistiram na colocação da garra de aperto mecânico nos pontos com proximidade aos periféricos da célula em modo manual, através da execução das rotinas de extração, inspeção, arrefecimento, prensa, rampa de inspeção e rampa *Nok*. Seguidamente o controlador foi comutado para modo automático e os botões verde e vermelho da célula foram pressionados. Neste momento o robô desloca-se para a posição de *home* através da rotina de recuperação de cada área. Para testar a fiabilidade e robustez dos volumes definidos e das rotinas de recuperação, a segunda fase deste teste consistiu na colocação do robô em situações de quase colisão com os objetos da célula, nos limites das zonas de trabalho. Após a passagem do controlador para modo automático e do arranque da célula o manipulador desloca-se para a posição de *home*. Esta segunda fase permitiu ajustar algumas rotinas, nomeadamente da matriz de sensores e rampas, para garantir que se o atuador final estiver dentro de uma das zonas de trabalho definidas, o robô nunca colide com nenhum objeto aquando da recuperação, se a posição dos componentes da célula não se alterar. A Figura 7.7 demonstra a recuperação automática do robô extrator quando este se encontra quase em colisão com a rede na zona da rampa *Nok*, Figura 7.7a, e posição de *home*, Figura 7.7b.



Figura 7.7: Teste de recuperação automática da rampa *Nok*.

O teste das rotinas das recuperação automática para o robô lubrificador seguiu a mesma metodologia do robô extrator, sendo que, neste manipulador foi necessário marcar pontos com a mesma orientação entre eixos que as posições

de *home*. Este cuidado adicional deve-se ao facto de o robô possuir um pacote energético por onde passam as tubagens que alimentam a ferramenta de lubrificação com líquido desmoldante e ar comprimido. Se durante uma recuperação automática o robô torce um dos seus eixos em demasia, a fixação dos pacotes energéticos poderá danificar-se e provocar danos materiais elevados.

Para a marcação dos pontos finais do robô extrator foi iniciado um ciclo de injeção na máquina injetora. Com o robô em modo manual foram executados os pontos da rotina de extração até ao ponto de aproximação da bolacha do jito. O facto de os pontos já se encontrarem próximos do local final possibilitaram a execução mais rápida da rotina de extração. O método de remarcação do ponto de pega da peça consiste num processo iterativo de movimentação manual e atuação da garra de aperto, através da consola do robô. O ponto final foi marcado quando o fecho da garra não provocava nenhum tipo de movimento de esforço ou oscilação visível no manipulador. Após a marcação deste ponto, o manipulador foi deslocado linearmente para o ponto de aproximação mantendo o alinhamento do ponto de pega. A extração da peça em modo manual foi realizada através da execução da rotina de extração, a partir do ponto de aproximação. Depois da ordem de fecho da garra o robô ativa o *Soft Servo* e o manipulador cede à força exercida pelos pinos extratores, na peça. Após o avanço dos pinos extratores o robô recua para a posição de aproximação e sai da injetora. Uma vez que o atuador final do robô extrator possui uma peça, os pontos da matriz de sensores, tina de água, prensa e rampas foram ajustados para a sua posição final.

Uma vez que todos os componentes da célula foram testados e os robôs já possuem os pontos de trajetórias finais nos seus programas, são realizados os primeiros testes da célula em modo automático. Os primeiros ciclos de produção foram realizados com uma velocidade mais baixa para permitir a reação de intervenção na paragem do sistema, na eventualidade de ocorrerem erros de código ou parametrização. O primeiro ciclo da célula foi interrompido por erro de colisão no eixo 1 aquando da extração da peça do molde. O facto de o robô estar muito perto do seu alcance máximo, na posição de extração da peça, origina um binário elevado quando os pinos extratores avançam e obrigam o manipulador a ceder a uma força externa. Este excesso de binário foi considerado pelo sistema com uma colisão quando, na verdade, faz parte do movimento que o manipulador tem que realizar nesta operação. A solução deste problema passou pelo ajuste do grau de suavidade de cada eixo após a ativação do *Soft Servo*, sendo que o eixo 1 possui um grau de suavidade de 100% e o eixo 2 permanece estático, sem a ativação desta funcionalidade. Para a célula B os eixos 3 e 4 foram ajustados para uma suavidade de 10% e os eixos 5 e 6 para 70%. Estes valores variam entre células. Após a correção deste parâmetro foram realizados mais ciclos de produção com o sistema em modo automático. Os ciclos seguintes do sistema decorreram sem problemas validando a sua implementação.

7.3 Tempo de Ciclo

Os tempos de ciclo das células de injeção foram determinados, primeiramente, através do *software* de simulação e programação *offline*, RobotStudio. A parte de simulação deste *software* permite a animação de objetos e cálculo do tempo de execução do código. Neste projeto a avaliação do tempo de ciclo foi dividida em: ambiente de simulação e implementação real. O tempo de ciclo das células é constituído pelo tempo de movimentação do robô e pelos tempos de paragem associados às operações que cada manipulador tem que realizar, como por exemplo, tempo de espera associado a sinais, tempo de escorrimento das peças após o arrefecimento na tina de água, tempo de espera após a abertura e fecho da garra, entre outros.

Tal como já foi referido, a sequência de operações do robô extrator começa pela extração da peça de fundição, seguido da inspeção na matriz de sensores e arrefecimento na tina de água. Após o arrefecimento a peça pode ser colocada na prensa de corte, rampa de inspeção ou na rampa de produto não conforme. Durante a fase de inspeção da peça o segundo robô efetua um ciclo de lubrificação e sopro do molde. O tempo da extração da peça de fundição e a especificação do cliente relativamente às velocidades e tempos de lubrificação do segundo robô são os fatores que mais influenciam o tempo de ciclo da célula, uma vez que é necessário manter o molde aberto para a realização destas operações. Após o fecho do molde a máquina injetora prepara o próximo ciclo de injeção. O tempo de preparação da máquina injetora varia consoante a peça em produção e uma parte significativa deste tempo é adicionado ao tempo de ciclo, uma vez que os robôs param nas posições de *home* e esperam nova ordem de início. A Tabela 7.1 apresenta o tempo (em segundos) das operações do robô extrator, de acordo com a sequência de operações definida, obtido no *software* de simulação. A análise de tempo de ciclo não considera o tempo de preparação da máquina injetora. No entanto, foi considerado que o avanço dos pinos extratores demora 1 segundo e o escorrimento da peça demora 5 segundos. Como a operação do robô lubrificador termina antes do robô extrator regressar à posição de *home* o seu tempo de ciclo não influenciará a simulação.

Tabela 7.1: Tabela de tempos de ciclo do robô extrator em simulação.

Operação	Prensa	Rampa de Inspeção	Rampa <i>Nok</i>
Extração	5 s	5 s	5 s
Inspeção	3 s	3 s	3 s
Arrefecimento	12 s	12 s	12 s
<i>Place</i> da peça	5 s	5 s	6 s
Retorno a <i>Home</i>	4 s	5 s	5 s
Tempo total	29 s	30 s	31 s

A análise de tempo de ciclo real é realizada após o ajuste das velocidades das instruções de movimento de ambos os robôs. A velocidade do robô varia consoante a operação em execução, no entanto, as trajetórias de movimentação entre operações, como por exemplo, posição *home* até à posição de aproximação da injetora, aproximação injetora até à posição de aproximação da matriz, posição de escurrimto até à posição de aproximação das rampas, entre outros, são realizados com uma velocidade de 2m/s. A Figura 7.8 apresenta o diagrama do tempo de ciclo da célula de injeção B, em funcionamento normal, ou seja, as peças extraídas da máquina injetora são conformes e a prensa encontra-se operacional. Na parte superior do diagrama é possível observar o tempo de ciclo do robô extrator e na parte inferior o tempo do robô lubrificador. Após o fim das operações do R2 a injetora prepara o próximo ciclo de injeção, adicionando 21 s ao tempo de ciclo geral da célula.

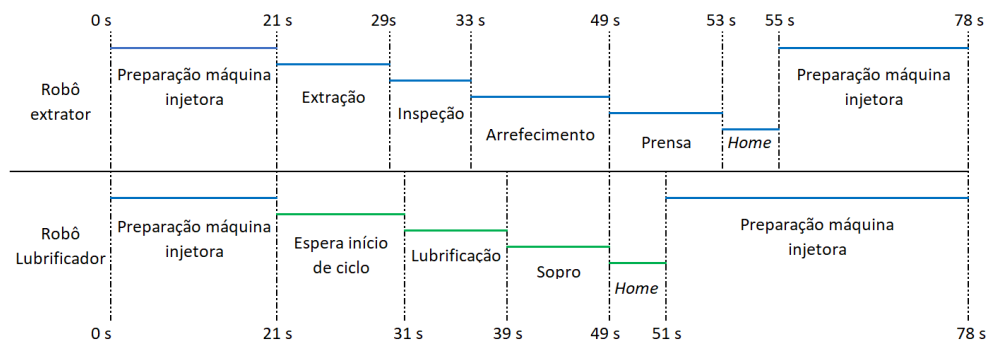


Figura 7.8: Tempo de ciclo da célula B.

7.4 Suma do Capítulo

Ao longo deste capítulo foi apresentada a metodologia de implementação da célula B. A implementação começou pela configuração e programação dos robôs nas instalações da RobotSol. Aquando da chegada dos robôs, foi necessário efetuar as ligações eléctricas que permitem a atuação e monitorização de dispositivos externos ao controlador, como por exemplo, sensores ou eletroválvulas para o atuador final dos robôs. Seguidamente os robôs foram alimentados eletricamente e ligados para se realizarem as primeiras configurações, nomeadamente a atribuição de um nome e IP à carta de sinais digitais, e após a preparação de ficheiros de sistema e descarga do código para o controlador, é efetuado um *I/O check* para verificar que todas as ligações elétricas se encontram de acordo com o esquema elétrico. Após a correção de eventuais problemas, os robôs foram colocados na sua posição de transporte, definida pelo fabricante, e seguiram para as instalações do cliente.

Após a montagem dos robôs e todos os periféricos da célula foi realizado um novo *I/O check* para verificação das ligações eléctricas dos dispositivos que não foram testados nas instalações da RobotSol, como por exemplo, circuito de emergências, atuação do quadro de fluídos, entre outros, e verificação da comunicação com a injetora da célula.

Nesta fase do projeto inicia-se a verificação de código e trajetórias, sendo que, a grande maioria dos pontos foram remarcados de acordo com as necessidades reais. Após a verificação das rotinas do programa, os volumes das zonas de trabalho foram verificados e ajustados e as rotinas de recuperação foram remarcadas e testadas extensivamente para garantir que os robôs nunca colidem quando efetuam uma rotina de recuperação. A fase seguinte da implementação é o arranque em automático e acompanhamento de produção. Nesta fase ocorreram alguns problemas, nomeadamente com o *Soft Servo*, que necessitaram de ajuste para evitar erros de colisão no manipulador. Após a primeira produção de peças a célula foi validada pelo cliente.

Capítulo 8

Conclusão

Ao longo desta dissertação foram sendo apresentadas conclusões que sustentam as opções de desenvolvimento efetuadas ao longo do projeto. Neste último capítulo é realizada uma síntese das conclusões anteriormente enunciadas e são apresentadas possíveis melhorias a realizar futuramente.

8.1 Síntese do Trabalho Desenvolvido

Este projeto de implementação de 7 células robotizadas para extração de peças de alumínio e lubrificação de moldes para a indústria da fundição injetada começou pela pesquisa e reunião de dados relativos aos processos implementados. Após a obtenção dos desenhos técnicos das máquinas injetoras, prensas de corte e tina de água das células de injeção, foi criado um primeiro *layout* para posicionar cada componente de cada célula, para determinar a melhor posição dos manipuladores tendo em conta o seu alcance. Com a definição da posição e orientação de cada manipulador, foi possível determinar a altura dos pedestais das garras de aperto mecânico e das ferramentas de lubrificação. O processo de criação do *layout* final é iterativo e pode requerer reconstruções completas de alguns componentes, para facilitar e melhorar a dinâmica dos manipuladores, como é o caso da matriz de sensores. Inicialmente esta seria fixa numa estrutura estilo pórtico, localizada por cima da tina de água. No entanto, devido à limitação de movimento dos eixos 5 e 6 do robô extrator, e devido à ineficiência do movimento de transição entre a extração e a inspeção, a matriz de sensores foi reestruturada para permitir maior fluidez no movimento e facilidade na montagem desta em cliente. A rampa de inspeção também foi reposicionada, uma vez que existe uma porta de manutenção na prensa que colidia com o primeiro esboço desta. Com a versão final do *layout* de cada célula é iniciada a criação de trajetórias.

O planeamento de trajetórias é realizado através da marcação de uma sequência de pontos no *software* de simulação e programação *offline* da ABB. Numa primeira fase, a execução individual das rotinas de movimentos criadas permite

obter uma percepção espacial de alguns espaços confinados, como o interior da injetora, tina de água, interior da prensa e rampa de inspeção. A interligação entre rotinas permite suavizar a movimentação do robô e obter o melhor tempo de ciclo. Relativamente ao robô lubrificador foram criadas as trajetórias para a lubrificação e sopro de dois tipos de moldes: centrado e descentrado. A simulação do *layout* da célula para os dois tipos de moldes permitiu obter o melhor balanço estrutural para permitir flexibilidade de produção da célula de injeção.

Após a definição das trajetórias é desenvolvido o código que controla os manipuladores e interage com os outros componentes da célula. A fase de programação de cada robô começa pela introdução e configuração da rede de comunicação PROFINET e da carta de entradas e saídas digitais DSQC1030 instaladas nas portas dos armários dos controladores dos robôs. A programação dos robôs é realizada no ambiente de programação *offline*, de acordo com a sequência do processo anteriormente definida.

Em suma, o robô extrator extrai a peça de alumínio da máquina injetora e movimenta-a até à matriz de sensores para inspecioná-la. Se a peça for conforme é dada a ordem de fecho da porta da injetora e início de ciclo ao robô lubrificador. Enquanto decorre a lubrificação e sopro, o robô extrator arrefece a peça na tina de água e leva-a para a prensa, rampa de inspeção ou rampa de produto não conforme. O escoamento da peça depende da conformidade da mesma e das condições de operacionalidade da prensa. Após o fim dos processos de extração e lubrificação, os robôs retornam à posição de *home* e ficam a aguarda nova ordem de início de ciclo. Os testes ao código desenvolvido foram realizados através do *software* de simulação e programação *offline*, acionando manualmente os sinais de entrada de cada robô. Além da programação inerente ao processo, foram implementadas rotinas de recuperação automática para facilitar o processo de início ou rearranque da célula de injeção. Sempre que o operador reinicia a célula, se o atuador final estiver dentro de uma das zonas definidas o, robô desloca-se para a posição de *home* sem colidir com os componentes da célula.

A fase de montagem e testes do sistema começa nas instalações da RobotSol. Aquando da chegada dos robôs, a equipa de montagem efetua as ligações eléctricas no controlador, instala as eletroválvulas de atuação e instala a garra de aperto mecânico e ferramenta de lubrificação. Além dos 14 robôs, foram montados 7 quadros de fluídos com eletroválvulas para controlo de ar e fluído de lubrificação para o segundo robô de cada célula. Cada célula possui ainda um painel perfurado com 8 sensores foto-eléctricos. A impossibilidade de testar a célula na íntegra dentro das instalações da RobotSol deve-se à impossibilidade de recriar dimensionalmente as máquinas injetoras e prensas de corte, que já se encontravam em cliente.

Após os testes parciais nas instalações da RobotSol, todos os componentes de

cada célula foram enviados para cliente. As intervenções em cliente começaram com um *I/O check* para verificação da rede de comunicação, ligações elétricas e verificação da atuação das eletroválvulas das garras e ferramentas de lubrificação. Durante esta fase foram encontrados alguns problemas elétricos ou de montagem que foram identificados e solucionados.

A correção das trajetórias dos robôs e remarcação dos pontos das rotinas inicia-se após a verificação do correto funcionamento de todos os sistemas individualmente. A remarcação dos pontos do robô extrator dividiu-se em duas fases. Primeiramente foram marcados pontos de aproximação às posições reais e numa segunda fase foram marcados os pontos finais. Esta repartição de trabalho deve-se ao facto de a injetora necessitar de um tempo de preparação elevado e após a solidificação da peça de alumínio no molde é necessário retirá-la rapidamente para que esta não fique agarrada ao molde podendo danificá-lo. Como tal, foi necessário preparar as rotinas para que o tempo de remarcação do ponto de *pick* fosse o mais curto possível. A correção dos pontos do robô lubrificador foi realizada quando os pratos da injetora foram colocados na sua posição final. Após a remarcação final dos pontos do robô extrator iniciam-se os testes de arranque da célula e início de produção. Durante esta fase foram detetados alguns problemas com o *Soft Servo* que espoletava uma colisão no eixo 1 do robô extrator. Este problema foi resolvido com o ajuste das percentagens de suavidade de cada eixo. O estado final das células de injeção foi validado pelo cliente, após a produção de uma série pequena de peças, sem nenhuma ocorrência de erros.

Os objetivos deste projeto foram todos atingidos e foi possível adquirir vários conhecimentos em áreas inerentes ao desenvolvimento e implementação de aplicações robotizadas no âmbito industrial. Além do planeamento de *layout*, parametrização e programação dos robôs, foram adquiridos conhecimentos de pneumática, mecânica e competências pessoais que tornaram possível a realização deste projeto.

8.2 Melhorias e Futuros Desenvolvimentos

Todos os objetivos propostos para a realização deste projeto de robótica industrial foram cumpridos, no entanto, estes estão limitados à proposta comercial apresentada ao cliente e aprovada pelo mesmo. Apesar de o cliente ter demonstrado satisfação no serviço prestado e na implementação das 7 células de injeção, há sempre espaço para melhorar, tornando estas aplicações mais utilitárias e flexíveis.

A mudança de referências de produção requer um tempo de preparação grande por parte do cliente, uma vez que a troca do molde da injetora é um processo que tem que ser realizado de forma vagarosa e cuidada. A troca do molde altera a posição do ponto de pega da peça de fundição e, como tal, este tem que ser

remarcado para que não ocorram colisões entre a garra de aperto mecânico e a peça/molde. Uma vez que os moldes de injeção têm uma posição relativamente fixa, podendo variar alguns milímetros, poderia ser implementado um sistema onde o operador introduz as cotas do centro do molde na consola do robô e uma garra de aperto com um mecanismo de mola nos dedos, capaz de absorver pequenos erros de posicionamento do molde. Esta alteração diminuiria o tempo de *set-up* do lado dos robôs, uma vez que, em vez de se remarcar o ponto de *pick*, apenas seria necessário introduzir na consola as cotas da localização do centro da bolacha.

Além desta alteração, poderia ser implementada uma interface humano máquina, sob a forma de aplicação gráfica, na consola de cada um dos controladores. Esta interface permitiria o controlo e monitorização da garra de aperto mecânico e controlo individual de cada bico da ferramenta de lubrificação. Poderia ser implementada uma janela com dados estatísticos de produção apresentando um histórico da produção de uma dada referência. Ainda nesta interface poderia ser implementado um histórico de mensagens de erro ou alarmes.

Bibliografia

- [1] International Federation of Robotics, “Global industrial robot sales doubled over the past five years,” Maio 2019. IFR Press Releases. Disponível em <https://ifr.org/ifr-press-releases/news/global-industrial-robot-sales-doubled-over-the-past-five-years>. [cited on p. 1]
- [2] G. Mythology, “Talos,” Maio 2019. Disponível em <https://www.greekmythology.com/Myths/Creatures/Talos/talos.html>. [cited on p. 8]
- [3] Bruno Siciliano, Oussama Khatib, *HandBook of Robotics*. Heidelberg, Berlin: Springer-Verlag, 2008. [cited on p. 8, 9, 17, 18, 19, 22, 24, 26, 27]
- [4] D. R. Hill, *The Book of Knowledge of Ingenious Mechanical Devices*. Dordrecht, Holland: D. Reidel Publishing Company, 1974. [cited on p. 8]
- [5] M. Rosheim, “In the footsteps of leonardo,” *IEEE*, vol. 4, pp. 12–14, 1997. [cited on p. 8]
- [6] Leonardo da Vinci Robot Society, “The robot,” Maio 2019. Leonardo da Vinci Robot Societys. Disponível em <https://www.leonardorobotsociety.org/the-robots.html>. [cited on p. 8]
- [7] Musicologie.org, “Jacques de vaucanson 1709 - 1782,” Maio 2019. Musicologie.org 2017. Disponível em <https://www.musicologie.org/Biographies/v/vaucanson.html>. [cited on p. 8]
- [8] HistoryComputer, “Henri maillardet,” Maio 2019. History Computer. Disponível em <https://history-computer.com/Dreamers/Maillardet.html>. [cited on p. 8]
- [9] J. Norberto Pires, *INDUSTRIAL ROBOTS PROGRAMMING: BUILDING APPLICATIONS FOR THE FACTORIES OF THE FUTURE*. New York, United States of America: Springer, 2007. [cited on p. 9]
- [10] S. Y. Nof, *HANDBOOK OF INDUSTRIAL ROBOTICS*. New York, Chichester, Weinheim, Brisbane, Singapore, Toronto: John Wiley & Sons, Inc., 1999. [cited on p. 9, 16, 17, 23, 24, 25, 29]

- [11] A. Gasparetto, L. Scalerà, “A brief history of industrial robotics in the 20th century,” *Advances in Historical Studies*, no. 8, pp. 24–35, 2019. [cited on p. 10, 11, 12, 13]
- [12] Robotic Industries Association, “Unimate the first industrial robot,” Maio 2019. Robotic Industries Association 2019. Disponível em <https://www.robotics.org/joseph-engelberger/unimate.cfm>. [cited on p. 10]
- [13] Kawasaki Robotics, “A project to make japan’s first domestically manufactured industrial robot begins,” Maio 2019. Robotic Industries Association 2019. Disponível em https://robotics.kawasaki.com/en1/anniversary/history/history_02.html. [cited on p. 10, 12]
- [14] A. Gasparetto, L. Scalerà, “From the unimate to the delta robot: The early decades of industrial robotics,” *Springer Nature Switzerland*, no. 37, pp. 284–295, 2019. [cited on p. 11, 13, 14]
- [15] ABB Robotics, “Abb robotics historical milestones,” Maio 2019. ABB Robotics 2019. Disponível em <https://new.abb.com/products/robotics/home/about-us/historical-milestones>. [cited on p. 12]
- [16] ABB, “Technical data irb 14000 yumi,” Maio 2019. ABB. Disponível em <https://new.abb.com/products/robotics/industrial-robots/irb-14000-yumi/irb-14000-yumi-data>. [cited on p. 14, 15]
- [17] International Organization for Standardization, “Robots and robotic devices – safety requirements for industrial robots – part 1: Robots,” Maio 2019. ISO 10218-1:2011. Disponível em <https://www.iso.org/standard/51330.html>. [cited on p. 15]
- [18] ABB, “Irc5- controlador de robô da 5ª geração da abb,” Maio 2019. ABB Robótica. Disponível em <https://new.abb.com/products/robotics/pt/controladores/irc5>. [cited on p. 16]
- [19] ABB, “Product specification - irb 6700,” Maio 2019. ABB Robótica. Disponível em <https://library.e.abb.com/public/964c40324ab44fb08264ab99e289e2d5/3HAC044265%20PS%20IRB%206700-en.pdf?x-sign=c9h54PaFH0P9LzIy0dGvq9KwkpoySpWVQwqdXs6ZnbnKoFwHhRpdobwV17uwZM3q>. [cited on p. 17]
- [20] M. Silva, “Robótica industrial - noções básicas de robótica,” Maio 2019. Manuel Silva 2012. [cited on p. 18, 19, 22, 23, 24, 26, 27, 28]
- [21] S. Gibilisco, *Concise Encyclopedia of Robotics*. New York, USA: McGraw-Hill, 2003. [cited on p. 19]

- [22] M. Silva, “Robótica industrial - actuadores finais para robôs,” Maio 2019. Manuel Silva 2012. [cited on p. 20, 21]
- [23] Z. Group, “Technologies/components and systems - 3-jaw concentric grippers series gpd5000,” Maio 2019. Zimmer Group. Disponível em <https://www.zimmer-group.de/en/structure/%24mg5-15505356/series+gpd5000>. [cited on p. 20]
- [24] M. P. Groover, *Automation, Production Systems, and Computer-Integrated Manufacturing 3rd*. NJ, USA: Prentice Hall Press Upper Saddle River, 2007. [cited on p. 25, 26]
- [25] Serdar Kucuk and Zafer Bingul, *Industrial Robotics Theory, Modelling and Control*. Mammendorf, Germany: Advanced Robotic Systems International, 2007. [cited on p. 28]
- [26] Serdar Kucuk and Zafer Bingul, *Industrial Robotics Theory, Modelling and Control*. Mammendorf, Germany: Advanced Robotic Systems International, 2007. [cited on p. 29]
- [27] ABB Robotics, “Technical reference manual rapid overview robotware 6.03 document id: 3hac050947,” Maio 2019. ABB Robotics 2016. [cited on p. 29]
- [28] M. Silva, “Robótica industrial - métodos de programação de robôs,” Maio 2019. Manuel Silva 2012. [cited on p. 29, 30]
- [29] A. Owen-Hill, “What are the different programming methods for robots?,” Maio 2019. Robotiq 2019. Disponível em <https://blog.robotiq.com/what-are-the-different-programming-methods-for-robots>. [cited on p. 30]
- [30] IFR, “Industrial robot sales increase worldwide by 31 percent,” Junho 2018. International Federation of Robotics. Disponível em <https://ifr.org/ifr-press-releases/news/industrial-robot-sales-increase-worldwide-by-29-percent>. [cited on p. 33]
- [31] M. Silva, “Robótica industrial - aplicações industriais da robótica,” Maio 2019. Manuel Silva 2012. [cited on p. 33, 34]
- [32] Mercury Marine, “Mercury marine’s new high-pressure die casting machine is now the largest in north america,” Maio 2019. Mercury Marine. Disponível em <https://www.mercurymarine.com/en/us/news/mercury-marines-new-high-pressure-die-casting-machine-is-now/-the-largest-in-north-america>. [cited on p. 35]

- [33] ABB, “Case study: Yumi® manufacturing sockets at abb’s plant in the czech republic,” Maio 2019. ABB 2019. Disponível em <https://new.abb.com/products/robotics/case-studies/abb-elektro-praga-czech-republic>. [cited on p. 36]
- [34] ABB, “Welding robot sparks production increase,” Maio 2019. ABB 2019. Disponível em <https://search-ext.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK104295D1796&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>. [cited on p. 36]
- [35] ABB, “Case study: A strategy of innovation, ogihara america howell, united states of america,” Maio 2019. ABB 2019. Disponível em <http://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK104295D4229&LanguageCode=en&DocumentPartId=&DocumentRevisionId=&Action=Launch>. [cited on p. 37]
- [36] ABB, “Antegrated force control - adaptive motion technology,” Maio 2019. ABB 2019. Disponível em <https://new.abb.com/products/robotics/application-equipment-and-accessories/integrated-force-control>. [cited on p. 37]
- [37] Robotic Industries Association, “How does the accident in germany affect industrial robot safety?,” Maio 2019. Robotic Industries Association 2019. Disponível em https://www.robotics.org/content-detail.cfm/Industrial-Robotics-News/How-Does-the-Accident-in-Germany-Affect-Industrial-Robot-Safety/content_id/5555. [cited on p. 38]
- [38] Association for Advancing Automation, “Get the facts on robot safety,” Maio 2019. Association for Advancing Automation 2019. Disponível em <https://www.a3automate.org/get-the-facts-on-robot-safety/>. [cited on p. 38]
- [39] David R. Clark, Mark R. Lehto, *RELIABILITY, MAINTENANCE, AND SAFETY OF ROBOTS - Chap36, in Handbook of Insutrial Robotics*. New York, Chichester, Weinheim, Brisbane, Singapore, Toronto: John Wiley & Sons, Inc., 1999. [cited on p. 38]
- [40] M. Silva, “Róbotica industrial - segurança na programação e operação de robôs industriais,” Maio 2019. Manuel Silva 2012. [cited on p. 38, 39]
- [41] L. Figueiredo, “Sistemas flexíveis de fabrico - redes industriais,” Maio 2019. Lino Figueiredo 2017. [cited on p. 40]
- [42] T. Sauter, *Industrial Communication Technology Handbook, Second Edition*. Broken Sound Parkway NW: Taylor & Francis Group, LLC, 2014. [cited on p. 40, 41]

- [43] HMS Networks, “Industrial network market shares 2019 according to hms,” Maio 2019. HMS Networks 2019. Disponível em <https://www.hms-networks.com/news-and-insights/news-from-hms/2019/05/07/industrial-network-market-shares-2019-according-to-hms>. [cited on p. 40]
- [44] Open DeviceNet Vendors Association, “Ethernet/ip,” Maio 2019. ODVA 2019. Disponível em <https://www.odva.org/Technology-Standards/EtherNet-IP/Overview>. [cited on p. 41]
- [45] John J. Mills, G. T. Stevens, Brian Huff, Adrien Presley, *JUSTIFICATION OF ROBOTICS SYSTEMS in Handbook of Industrial Robotics - Chapter 34*. Nova Jersey, EUA: John Wiley & Sons, Inc., 1999. [cited on p. 42]
- [46] M. Silva, “Róbotica industrial - metodologia para a implementação de aplicações robotizadas,” Maio 2019. Manuel Silva 2012. [cited on p. 42, 43, 44]
- [47] Shimon Y. Nof Venkat N. Rajan, *Handbook of Design, Manufacturing and Automation - Chapter 15:Robotics*. Nova Jersey, EUA: John Wiley & Sons, Inc., 1994. [cited on p. 45]
- [48] Mikell P. Groover, *FUNDAMENTALS OF MODERN MANUFACTURING - Materials, Processes, and Systems*. Nova Jersey, EUA: John Wiley & Sons, Inc., 2010. [cited on p. 46]
- [49] CustomPartNet, “Permanent mold casting,” Julho 2019. CustomPartNet 2019. Disponível em <https://www.custompartnet.com/wu/permanent-mold-casting>. [cited on p. 46, 47]
- [50] CustomPartNet, “Die casting,” Julho 2019. CustomPartNet 2019. Disponível em <https://www.custompartnet.com/wu/die-casting>. [cited on p. 47, 48, 49]
- [51] Dynacast, “Hot chamber die casting,” Julho 2019. Dynacast 2019. Disponível em <https://www.dynacast.com/hot-chamber-die-casting>. [cited on p. 47, 48]
- [52] Dynacast, “Cold chamber die casting,” Julho 2019. Dynacast 2019. Disponível em <https://www.dynacast.com/cold-chamber-die-casting>. [cited on p. 49, 50]
- [53] Claudia Flisi, “Why form follows function,” Julho 2019. ABB Robotics 2006. Disponível em <https://search-ext.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=Case%20study%20at%20Form%20-%20Safety%20comes%20first%20where%20robots%20handle%20tough%20tasks&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>. [cited on p. 51, 52]

- [54] Claudia Flisi, “Mp filtri - let robots take the heat,” Julho 2019. ABB Robotics 2006. Disponível em <https://search-ext.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK101130D7078&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>. [cited on p. 53]
- [55] ABB Robotics, “An innovative die-casting line from artimpianti using abb robotics,” Julho 2019. ABB Robotics 2015. Disponível em <https://search-ext.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK10103A0965&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>. [cited on p. 54, 55]
- [56] KUKA AG, “New die-casting cell for greater availability and performance,” Julho 2019. Kuka 2015. Disponível em <https://www.kuka.com/en-us/industries/solutions-database/2016/09/solution-industries-auto-heinen>. [cited on p. 56, 57]
- [57] ABB Robotics, “An irb 4600 industrial robot,” Agosto 2019. ABB Robotics 2019. Disponível em http://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=ROB0109EN_G&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch. [cited on p. 65, 66]
- [58] ABB Robotics, “An irb 2600 industrial robot,” Agosto 2019. ABB Robotics 2019. Disponível em https://search-ext.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=ROB0142EN_B&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch. [cited on p. 69, 70]
- [59] ABB Robotics, “Technical reference manual - rapid overview - pág.129,” Setembro 2019. ABB Robotics 2019. RobotWare 6.07 3HAC050947-001 - Revision: G. [cited on p. 89]

Anexo A

Sinais

Neste anexo encontram-se tabelados os sinais usados para controlar ou monitorizar todos os dispositivos. Em cada secção são apresentados os sinais de entrada, seguidos dos sinais de saída, de um dispositivo.

A.1 Robô extrator

A.1.1 Rede PROFINET

Nome do sinal	Tipo	Dispositivo	Mapeamento	Permissão
di_RoboInserido	DI	PN_Internal_Device	0	ALL
di_MaqAuto	DI	PN_Internal_Device	1	ALL
di_PortaAberta	DI	PN_Internal_Device	2	ALL
di_R1_START	DI	PN_Internal_Device	3	ALL
di_ExtractFrente	DI	PN_Internal_Device	4	ALL
di_PieceNok	DI	PN_Internal_Device	6	ALL
di_PieceQuality	DI	PN_Internal_Device	7	ALL
di_AbortCiclo	DI	PN_Internal_Device	8	ALL
di_PrensaAuto	DI	PN_Internal_Device	16	ALL
di_PrensaAlarme	DI	PN_Internal_Device	17	ALL
di_PrensaOKCarga	DI	PN_Internal_Device	18	ALL
di_VerifPresencaPeca	DI	PN_Internal_Device	20	ALL
di_PrensaPortaOpFechada	DI	PN_Internal_Device	21	ALL
di_PrensaPortaRobotAberta	DI	PN_Internal_Device	22	ALL

Nome do sinal	Tipo	Dispositivo	Mapeamento	Permissão
do_R1CmdExtractorFrente	DO	PN_Internal_Device	0	ALL
do_R1ForaMaqInj	DO	PN_Internal_Device	1	ALL
do_PieceNok	DO	PN_Internal_Device	2	ALL
do_R1Alarme	DO	PN_Internal_Device	3	ALL
do_FechoAutorizado	DO	PN_Internal_Device	4	ALL
do_OrdemFechoPorta	DO	PN_Internal_Device	5	ALL
do_R1HomePosition	DO	PN_Internal_Device	6	ALL
do_R1InAuto	DO	PN_Internal_Device	7	ALL
do_R1OutPrensa	DO	PN_Internal_Device	17	ALL
do_StartCycle	DO	PN_Internal_Device	18	ALL
do_R1Emergency	DO	PN_Internal_Device	22	ALL

A.1.2 Carta de Sinais Digitais

Nome do sinal	Tipo	Dispositivo	Mapeamento	Permissão
di_SEG_GERAL_OK	DI	Carta_IO1	0	ALL
di_SEG_PORTAS_OK	DI	Carta_IO1	1	ALL
di_PORTA_OK	DI	Carta_IO1	2	ALL
di_ColReady_R2_OUT	DI	Carta_IO1	3	ALL
di_ARRANCAR_SISTEMA	DI	Carta_IO1	4	ALL
di_FIM_CICLO	DI	Carta_IO1	5	ALL
di_ArOkR1	DI	Carta_IO1	6	ALL
di_Reset_Emg	DI	Carta_IO1	7	ALL
di_MATRIZ_POS1	DI	Carta_IO1	8	ALL
di_MATRIZ_POS2	DI	Carta_IO1	9	ALL
di_MATRIZ_POS3	DI	Carta_IO1	10	ALL
di_MATRIZ_POS4	DI	Carta_IO1	11	ALL
di_MATRIZ_POS5	DI	Carta_IO1	12	ALL
di_MATRIZ_POS6	DI	Carta_IO1	13	ALL
di_MATRIZ_POS7	DI	Carta_IO1	14	ALL
di_MATRIZ_POS8	DI	Carta_IO1	15	ALL

Nome do sinal	Tipo	Dispositivo	Mapeamento	Permissão
do_ColReady_R1_OUT	DO	Carta_IO1	0	ALL
do_LED_START	DO	Carta_IO1	1	ALL
do_LED_STOP	DO	Carta_IO1	2	ALL
do_MotOnStateR1	DO	Carta_IO1	3	ALL
do_PincaR1	DO	Carta_IO1	8	ALL

A.1.3 Sinais Simulados

Nome do sinal	Tipo	Dispositivo	Mapeamento	Permissão
do_AutoOn	DO	BOARDSIM	4	ReadOnly
doInR1Recupera_1	DO	BOARDSIM	5	ReadOnly
doInR1Recupera_2	DO	BOARDSIM	6	ReadOnly
doInR1Recupera_3	DO	BOARDSIM	7	ReadOnly
doInR1Recupera_4	DO	BOARDSIM	8	ReadOnly
doInR1Recupera_5	DO	BOARDSIM	9	ReadOnly
doInR1Recupera_6	DO	BOARDSIM	10	ReadOnly
doInR1Recupera_7	DO	BOARDSIM	11	ReadOnly
doInR1Recupera_8	DO	BOARDSIM	12	ReadOnly
doInR1Recupera_9	DO	BOARDSIM	13	ReadOnly
doInR1Recupera_10	DO	BOARDSIM	14	ReadOnly
doInR1Recupera_11	DO	BOARDSIM	15	ReadOnly

A.2 Robô lubrificador

A.2.1 Rede PROFINET

Nome do sinal	Tipo	Dispositivo	Mapeamento	Permissão
di_MachineAuto	DI	PN_Internal_Device	0	ALL
di_MoldOpen	DI	PN_Internal_Device	1	ALL
di_R2Start	DI	PN_Internal_Device	2	ALL
di_R2PreStart	DI	PN_Internal_Device	3	ALL
di_R2Inserted	DI	PN_Internal_Device	4	ALL

Nome do sinal	Tipo	Dispositivo	Mapeamento	Permissão
do_R2ForaArea	DO	PN_Internal_Device	0	ALL
do_R2EndOfLubrication	DO	PN_Internal_Device	1	ALL
do_R2PreStartPos	DO	PN_Internal_Device	2	ALL
do_ReturnInjPiston	DO	PN_Internal_Device	3	ALL
do_Cmd_Av_Radiais	DO	PN_Internal_Device	4	ALL
do_R2InAlarm	DO	PN_Internal_Device	5	ALL
do_Cmd_Rt_Radiais	DO	PN_Internal_Device	6	ALL
do_R2_Home	DO	PN_Internal_Device	7	ALL

A.2.2 Carta de Sinais Digitais

Nome do sinal	Tipo	Dispositivo	Mapeamento	Permissão
di_ColReady_R1_OUT	DI	Carta_IO1	0	ALL
di_NivelDesmoldante	DI	Carta_IO1	1	ALL
di_PressAirPilotOk	DI	Carta_IO1	2	ALL
di_PressAirBlowOk	DI	Carta_IO1	3	ALL
di_PressAirAtmOk	DI	Carta_IO1	4	ALL
di_FIM_CICLO	DI	Carta_IO1	5	ALL
di_ARRANCAR_SISTEMA	DI	Carta_IO1	6	ALL

Nome do sinal	Tipo	Dispositivo	Mapeamento	Permissão
do_ColReady_R2_OUT	DO	Carta_IO1	0	ALL
do_Ev1Blow	DO	Carta_IO1	1	ALL
do_Ev2Blow	DO	Carta_IO1	2	ALL
do_Ev3Atm	DO	Carta_IO1	3	ALL
do_Ev4Atm	DO	Carta_IO1	4	ALL
do_Ev5Lubrication	DO	Carta_IO1	5	ALL
do_EV13_BC1	DO	Carta_IO1	6	ALL
do_EV12_BC2	DO	Carta_IO1	7	ALL
do_EV11_BC3	DO	Carta_IO1	8	ALL
do_EV10_BC4	DO	Carta_IO1	9	ALL
do_EV9_BC5	DO	Carta_IO1	10	ALL
do_EV8_BC6	DO	Carta_IO1	11	ALL
do_EV7_BC7	DO	Carta_IO1	12	ALL
do_EV6_BC8	DO	Carta_IO1	13	ALL
do_EV21_BC9	DO	Carta_IO1	14	ALL
do_EV20_BC10	DO	Carta_IO1	15	ALL
do_EV19_BC11	DO	Carta_IO1	16	ALL
do_EV18_BC12	DO	Carta_IO1	17	ALL
do_EV17_BC13	DO	Carta_IO1	18	ALL
do_EV16_BC14	DO	Carta_IO1	19	ALL
do_EV15_BC15	DO	Carta_IO1	20	ALL
do_EV14_BC16	DO	Carta_IO1	21	ALL
do_Ato_Start	DO	Carta_IO1	22	ALL

A.2.3 Sinais Simulados

Nome do sinal	Tipo	Dispositivo	Mapeamento	Permissão
do_AutoOn	DO	BOARDSIM	4	ReadOnly
doInR2Recupera_1	DO	BOARDSIM	5	ReadOnly
doInR2Recupera_2	DO	BOARDSIM	6	ReadOnly
doInR2Recupera_3	DO	BOARDSIM	7	ReadOnly
doInR2Recupera_4	DO	BOARDSIM	8	ReadOnly
doInR2Recupera_5	DO	BOARDSIM	9	ReadOnly
doInR2Recupera_6	DO	BOARDSIM	10	ReadOnly
doInR2Recupera_7	DO	BOARDSIM	11	ReadOnly
doInR2Recupera_8	DO	BOARDSIM	12	ReadOnly
doInR2Recupera_9	DO	BOARDSIM	13	ReadOnly
doInR2Recupera_10	DO	BOARDSIM	14	ReadOnly
doInR2Recupera_11	DO	BOARDSIM	15	ReadOnly

Anexo B

Mensagens da consola

Neste anexo são apresentadas as mensagens de alerta associadas aos sinais de cada robô.

B.1 Robô extrator

Sinal digital	Mensagem
di_MaqAuto	Falta sinal de máquina em automático.
di_ArOk	Falta presença de ar comprimido.
di_RoboInserido	O robô 1 não foi requerido.
do_ColReady_R2_OUT	Falta sinal de R2 fora da máquina.
di_R1_Start	Falta sinal de arranque da máquina.
di_PortaAberta	Falta sinal de porta da injetora aberta.
di_PrensaPortaOpFechada	Falta sinal de porta operador fechada.
di_PrensaPortaRobotAberta	Falta sinal de porta robô aberta.
di_VerifPresencaPeca	Falta sinal de ferramenta sem peça.
PecaOk	Peça em conformidade.
di_PrensaOKCarga	Falta sinal de carga da prensa Ok.
do_R1HomePosition	O robô não está na posição de <i>Home</i> .
do_R1CmdExtractorFrente	Espera extração do jito.
do_PieceNok	Peça não conforme.

B.2 Robô lubrificador

Sinal digital	Mensagem
di_MachineAuto	Falta sinal de máquina em automático.
di_MoldOpen	Falta sinal de molde aberto.
di_ColReady_R1	Falta sinal de robô extrator fora da injetora.
di_PressAirBlowOk	Falta sinal de ar de sopro Ok.
di_PressAirAtmOk	Falta sinal de ar de atomização Ok.
di_PressAirPilotOk	Falta sinal de ar de pilotagens Ok.
di_R2Inserted	Falta sinal de requisição do robô lubrificador.
di_R2Start	Falta sinal de <i>start</i> lubrificação/sopro.
di_PreStart	Falta sinal de <i>pre-start</i> lubrificação/sopro.
do_R2_Home	O robô não está na posição de <i>Home</i> .