Universidade Politécnica de Viseu
Tecnologia e Gestão Viseu

Simulação, integração e controlo de Células Flexíveis de Fabrico

Luís Filipe Santos Silva

Dissertação

Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Energia e Automação Industrial

Trabalhoefetuadosob a orientaçãode
Professor Doutor António Manuel Pereira Ferrolho

Outubro de 2023

Universidade Politécnica de Viseu

Tecnologia e Gestão Viseu

Simulação, integração e controlo de Células Flexíveis de Fabrico

Luís Filipe Santos Silva

Dissertação

Mestrado em Eng.ª Eletrotécnica – Energia e Automação Industrial

Trabalho efetuado sob a orientação de

Professor Doutor António Manuel Pereira Ferrolho

Outubro de 2023

"*A persistência é o menor caminhodo êxito.* "

Charles Chaplin

AGRADECIMENTOS

Alcançar esta etapa no meu percurso académico é um enorme motivo de orgulho, e por esse motivo, aqui expresso a minha profunda gratidão a todos os que contribuíram para a realização desta Dissertação de Mestrado, nomeadamente:

Ao orientador, Professor Doutor António Manuel Pereira Ferrolho, pelo apoio incansável durante a realização desta Dissertação, bem como toda a colaboração, sem esquecer as suas palavras de incentivo. Um agradecimento sincero por todo o apoio, não só na realização deste trabalho, mas por todo o apoio durante este percurso pela Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu.

Ao Mestre, João Vítor Ôlas, por todo o auxílio prestado, disponibilidade e atenção durante a realização desta Dissertação, assim como pela partilha de conhecimento.

A todos os professores e colegas com quem tive um gosto enorme de partilhar novas experiências ao longo da minha formação.

A todos vós, um sincero Muito Obrigado!

RESUMO

Atualmente, a competitividade de uma empresa é o fator-chave para que esta tenha sucesso no mercado em que opera, e para tal, esta deve encontrar-se equipada de processos produtivos otimizados, inovadores, autónomos, e com tecnologia do mais alto nível.

O presente trabalho tem como principal objetivo a integração e controlo dos equipamentos disponíveis na Célula Flexível de Fabrico (CFF) instalada no Laboratório de Automação e Robótica do Departamento de Engenharia Eletrotécnica da Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu. De forma a alcançar os objetivos pretendidos, foi desenhada a Célula Flexível de Fabrico no programa *RobotStudio 2022* e realizada a respetiva simulação em software e no laboratório.

As CFF são uma das grandes potencialidades no processo produtivo de uma empresa e apresentam inúmeras vantagens, tais como: poderem executar trabalhos repetitivos 24/24 horas, flexibilidade e capacidade de ajuste de fabrico de produtos diversos consoante as necessidades do mercado, diminuição do número de peças defeituosas produzidas, redução do desperdício de matéria-prima, entre outras. Uma CFF pode ser constituída por diversos equipamentos, tais como: robôs, autómatos, Máquinas de Controlo Numérico (CNC), Veículos Guiados Automaticamente (VGA), tapetes rolantes, diversos tipos de sensores, entre outros.

Ao longo desta dissertação foram utilizados alguns dos equipamentos mencionados anteriormente, de forma a colocar a CFF do laboratório a funcionar autonomamente. Numa fase inicial, a célula do laboratório foi criada através de um software de desenho para que fosse possível iniciar alguns testes e simulações no *RobotStudio*. Posteriormente, começou-se a desenvolver código de programação em linguagem *RAPID*, através do qual o robô executava rotinas individualmente.

Mais tarde, iniciaram-se os testes no laboratório, onde se começou também a programar o autómato S7 1200, gestor da CFF, bem como o sistema de visão artificial que se encontra nas ferramentas de trabalho de ambos os robôs, que permitem identificar o tipo de palete e as peças que nela se encontram.

Por fim, foram realizados os ensaios finais, onde se registaram um conjunto de filmagens que serão apresentadas na defesa desta Dissertação de Mestrado.

PALAVRAS-CHAVE:

Robótica e Automação Industrial; Células Flexíveis de Fabrico; Sistema Flexível de Fabrico; Máquinas CNC; Robô Industrial; Visão computacional;

ABSTRACT

Currently, a company's competitiveness is the key factor for it to be successful in the market in which it operates, and to achieve this, it must be equipped with optimized, innovative, autonomous production processes and the highest level of technology.

The main objective of this work is to integrate and control the equipment available in the CFF Flexible Manufacturing Cell installed in the Robotics Laboratory of the Department of Electrical Engineering of the Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu. In order to achieve the desired objectives, the Flexible Manufacturing Cell was designed in the *RobotStudio* 2022 program, and the respective simulation was carried out in software and in the laboratory.

CFFs are one of the greatest potentialities in a company's production process and present numerous advantages, such as: being able to perform repetitive work 24/24 hours, flexibility and ability to adjust the manufacturing of different products according to market needs, reducing the number of defective parts produced, reduction of raw material waste, among others. A CFF can consist of various equipment, such as: robots, automatons, Numerical Control Machines (CNC), Automatically Guided Vehicles (AGV), conveyor belts, various types of sensors, among others.

Throughout this dissertation, some of the equipment mentioned previously was used, in order to make the laboratory's CFF work autonomously. Initially, the laboratory cell was created using design software so that it was possible to start some tests and simulations in RobotStudio. Subsequently, programming code began to be developed in RAPID language, through which the robot executed routines individually.

Later, tests began in the laboratory, where they also began programming the S7-1200 automaton, the CFF manager, as well as the artificial vision cameras found in the work tools of both robots, which allowed identifying the type of pallet and the parts found on them.

Finally, the final rehearsals were carried out, where a set of footage was recorded that will be presented in the defense of this master's thesis.

KEYWORDS

Robotics and Industrial Automation; Flexible Manufacturing Cells; Flexible Manufacturing System; CNC machines; Industrial Robot; Computer Vision.

ÍNDICE GERAL

ÍNDICE DE TABELAS x

ÍNDICE DE FIGURAS xii

LISTA DE SIGLAS / ABREVIATURAS xvi

1. Introdução 1

1.1 Motivação 1

1.2 Enquadramento 1

1.3 Objetivos 2

1.4 Estrutura da dissertação 2

2. Revisão histórica 4

2.1. Evolução tecnológica 4

2.2. Automação Industrial 5

2.2.1. Tipos de Automação 6

2.2.2. Vantagens e Inconvenientes da Automação Industrial 7

2.3. Robótica Industrial 7

2.3.1. Evolução da Robótica Industrial 7

2.3.2. Vantagens na aplicação de robôs na indústria 8

2.3.3. Áreas de aplicação dos Robôs 9

2.3.4. Tipos de Robôs 10

2.3.4.1. Robôs Móveis 10

2.3.4.2. Robôs Humanóides 11

2.3.4.3. Robôs Industriais 12

2.4 Características de Robôs Industriais 13

2.4.1 Robô industrial - características dinâmicas 13

2.4.2 Carga e Volume de trabalho 14

2.4.3 Graus de Liberdade 15

2.5 Células Flexíveis de Fabrico 16

2.6 Sistemas Flexíveis de Fabrico 17

2.6.1 Tipos de SFF 18

2.7 Máquinas de Controlo Numérico 18

2.7.1 Vantagens e desvantagens das máquinas CNC 19

3 Configuração da CFF 21

3.1 Hardware utilizado 21

3.2 Setor de Armazenamento 22

3.2.1 Robô IRB 1400 23

3.2.2 Ferramenta de trabalho do robô IRB 1400 24
3.3 Setor de fabrico 25
3.3.1 Robô IRB 140 25
3.3.1.1 Ferramenta de trabalho do robô IRB 140 26
3.3.2 *Buffer* de peças 27
3.3.3 Fresadora CNC 27
3.3.4 Torno CNC 29
3.4 Sistema transportador 31
3.4.1 *Stoppers* 31
3.4.2 Paletes de MP e PA 32
3.5 Sistema de segurança da CFF 33
3.5.1 Controlo e segurança da CFF 33
3.5.2 Sistema de sinalização 36
3.6 Gestão da CFF 37
3.7 Interface Robótica 39
4 Trabalho desenvolvido - elaboração da CFF 41
4.1 Introdução 41
4.2 Software de desenho - *SolidWorks* 42
4.3 Introdução ao software *RobotStudio* 46
4.3.1 Interface do software 47
4.3.1.1 "*Home*" 47
4.3.1.2 "*Modeling*" 47
4.3.1.3 "*Simulation*" 51
4.3.1.4 "*Controller*" 52
4.4 Programação 54
4.4.1 Setor de armazenamento 54
4.4.1.1 Carregamento da palete de MP no armazém 55
4.4.1.2 Descarregamento da palete de PA 58
4.4.2 Setor de fabrico 60
4.4.2.1 Descarregamento da palete de MP para os *buffers* 60
4.4.2.2 Carregamento das máquinas CNC 60
4.4.2.3 Rotina de maquinação das peças 63
4.4.2.4 Descarregamento das máquinas CNC 66
4.4.2.5 Carregamento da palete de PA 67
4.5 Sistema de visão computacional 69
4.5.1 Sistema de visão da CFF .....

4.5.2 Integração entre as câmaras e o PLC 70
4.5.3 Parametrização do sistema de visão FQ2 72
4.5.4 Troca de dados entre as câmaras e o PLC 73
4.5.5 Tratamento dos dados da câmara 74
4.5.6 Identificação das paletes 78
4.5.7 Inspeção da câmara no SA e no SF 80
4.5.8 Problemas com as câmaras de visão 81
4.6 Interface com o utilizador 83
5 Conclusões e propostas para trabalhos futuros 84
5.1 Conclusões 84
5.2 Propostas para trabalhos futuros 85
6 Referências 86
ANEXOS 89
Anexo A – Interface Robótica 89
Anexo B – Endereços de memória da câmara FQ2 Séries 93
Anexo C – Inspeções no setor Armazém 94

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Características dos robôs IRB 1400 e IRB 140. 15
Tabela 2 - Combinação do estado logico dos sensores indutivos. 25
Tabela 3 - Saídas do PLC correspondentes aos stoppers de cada setor 32
Tabela A-1: Interface robótica torno CNC 89
Tabela A-2: Interface robótica com a fresadora CNC 90
Tabela A-3: Interface de comunicação entre o PLC e o sistema de visão do setor de armazém 90
Tabela A-4: Interface de comunicação entre o PLC e o sistema de visão do setor de fabrico. .. 90
Tabela A-5: Interface de comunicação entre o PLC e o Controlador do robô IRB 1400. 91
Tabela A-6: Interface de comunicação entre o PLC e o Controlador do robô IRB 140. 91
Tabela A-7: Configuração das saídas do PLC e entradas do controlador do robô ABB IRB 1400. 92

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Evolução tecnológica [2] 5
Figura 2: Tipos de automação - volume de produção versus variedade de produto [4] 6
Figura 3: Primeiro robô do mundo - Unimate. 8
Figura 4: Robôs móveis - AGV vs AMR 11
Figura 5: Robô humanóide ASIMO..... 11
Figura 6: End effector do robô IRB 1400 do laboratório de robótica [19] 12
Figura 7: Exatidão versus repetibilidade [15] 13
Figura 8: Volume de trabalho de um robô [22] 14
Figura 9: Juntas de um robô. 15
Figura 10: Robô colaborativo e industrial 17
Figura 11: Primeira fresadora NC [25] 19
Figura 12: Layout da CFF do laboratório [15] 21
Figura 13: Célula Flexível de Fabrico. 22
Figura 14: Vista geral do armazém 22
Figura 15: Robô ABB IRB 1400. 23
Figura 16: Gripper do robô IRB 1400. 24
Figura 17: Posições do gripper 24
Figura 18: Robô ABB IRB 140. 25
Figura 19: Ferramenta de trabalho IRB 140. 26
Figura 20: Buffer de peças do setor de fabrico. 27
Figura 21: Fresadora EMCO Concept MILL 155. 28
Figura 22: Sistema de troca automática de ferramenta da fresadora. 28
Figura 23: Funcionamento CAD/CAM/CNC [15] 29
Figura 24: Torno CNC 30
Figura 25: Ferramentas do Torno CNC 30
Figura 26: Sistema transportador da CFF. 31
Figura 27: Stoppers. 31
Figura 28: Palete matéria-prima torno. 32
Figura 29: Botoneira do setor de fabrico. 33
Figura 30: Botoneira do setor de armazenamento. 34
Figura 31: Sensores óticos de intrusão..... 34
Figura 32: Diagrama de blocos da multitask. 35
Figura 33: Mensagem do alarme direcionado ao operador 36

Figura 34: Baliza de sinalização luminosa e sonora. 36
Figura 35: Esquema ilustrativo do gestor da CFF. 37
Figura 36: Gestor da CFF - PLC S7 1200. 37
Figura 37: Módulos de expansão SM1223 no TIA Portal 38
Figura 38: Endereços de memória do PLC e respetivos módulos de expansão. 38
Figura 39: Código de programação da rotina “rCarrega_PMPT;”. 39
Figura 40: Código de programação no TIA Portal 39
Figura 41: Menu SolidWorks. 42
Figura 42: Menu principal do Software SoliWorks. 43
Figura 43: Elementos desenvolvidos no software de desenho. 43
Figura 44: Representação da fresadora e buffers de peças no setor de fabrico. 44
Figura 45: Representação do torno CNC da CFF. 44
Figura 46: Representação do setor de armazém no RobotStudio. 45
Figura 47: Visão geral da CFF no RobotStudio. 45
Figura 48: Definição de pontos de referência na linguagem RAPID 46
Figura 49: Menu "Home" do SolidWorks. 47
Figura 50: Menu "Modeling" do SolidWorks. 47
Figura 51: Plane Sensors instalados nas paletes 48
Figura 52: Desenvolvimento de Smart Components 48
Figura 53: Sistema transportador 49
Figura 54: Conjunto de deslocamentos que permitem deslocar a palete do SA ao SF. 50
Figura 55: Simulação manual do Smart Component 50
Figura 56: Simulação de abertura e fecho da porta do torno. 51
Figura 57: Menu "Simulation" 51
Figura 58: Station Logic no RobotStudio. 52
Figura 59: Menu "Controller" 52
Figura 60: Menu "Controller" 53
Figura 61: Visão da Teach Pendent no RobotStudio. 53
Figura 62: Definição de inputs e outputs. 54
Figura 63: Carregamento da PMPT. 55
Figura 64: Ausência de peça na coluna dois do armazém 56
Figura 65: Inspeção da palete no tapete transportador 57
Figura 66: Inspeções às paletes....57
Figura 67: Correção do posicionamento das peças na palete. 58
Figura 68: Inspeção a PPAT. 59

Figura 69: Descarregamento de produtos acabados. 59
Figura 70: Rotina de carregamento do torno. 60
Figura 71: Rotina de carregamento da Fresadora. 61
Figura 72: Rotina de carregamento do Torno CNC 61
Figura 73: Carregamento do torno. 62
Figura 74: Ponto de carregamento da máquina CNC 63
Figura 75: Mensagem de torno em alarme para o utilizador..... 64
Figura 76: Mensagem de torno em funcionamento. 64
Figura 77: Definição das rotinas TRAP. 66
Figura 78: Descarregamento da fresadora CNC 67
Figura 79: Inspeção ao buffer BPAF. 68
Figura 80: Câmara de visão FQ2 instalada na CFF. 70
Figura 81: Comunicação entre PLC e Câmaras no TIA Portal 70
Figura 82: Adicionar a biblioteca da câmara FQ2 no TIA Portal 71
Figura 83: Definição do endereço IP e do nome da câmara. 71
Figura 84: Identificação da sigla PMPT com correlação OK 73
Figura 85: Identificação da sigla PMPT com correlação NOK 73
Figura 86: Endereços de memória da câmara fq21. 74
Figura 87: Bits específicos da câmara fq21. 74
Figura 88: Function Block do tratamento de dados da câmara fq21 75
Figura 89: Tratamento de dados e identificação do tipo de palete. 75
Figura 90: Identificação de três peças cilíndricas. 76
Figura 91: Variáveis associadas a cada inspeção do setor armazém..... 77
Figura 92: Identificação da palete no SA 77
Figura 93: Rotina de carregamento de Palete MPT 78
Figura 94: Network do setor armazém..... 78
Figura 95: Network responsável pela inspeção à palete no SA 79
Figura 96: Ativação da saída Q43.5 do autómato. 79
Figura 97: Definição das formas geométricas no software TouchFinder 80
Figura 98: Pontos de inspeção no sistema transportador 81
Figura 99: Peças com faces pintadas. 82
Figura 100: Mensagem direcionada ao operador na *Teach Pendent* 83
Figura B-1: Endereços de memória do sistema de visão FQ2. 93
Figura C-2: Identificação de peças na palete PMPF. 94
Figura C-3: Identificação de peças numa PMPT. 95

Figura C-4: Identificação de peças em palete de produtos acabados. 96

LISTA DE SIGLAS / ABREVIATURAS

ESTGV – Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu

IPV – Instituto Politécnico de Viseu

DEE – Departamento de Engenharia Eletrotécnica

ABB - *Asea Brown Boveri*

RAPID - Linguagem de Programação de Robôs ABB

SFF – Sistema Flexível de Fabrico

CFF – Célula Flexível de Fabrico

FMS – *Flexible Manufacturing System*

CNC – *Computer Numerical Control*

CAD - *Computer Aided Design*

CAM - *Computer Aided Machining*

PLC - *Programmable Logic Controller*

NC – *Numerical Control*

VPN – *Virtual Private Network*

IP (endereço IP) – *Internet Protocol*

MP – Matéria-prima

PA – Produtos acabados

SA – Setor de Armazenamento

SF – Setor de Fabrico

PMPT/PMPF - Palete Matéria-Prima (Torno / Fresadora)

BPAT/BPAF - *Buffer* Produtos Acabados (Torno / Fresadora)

BMPT/BMPF - *Buffer* Matéria-Prima (Torno / Fresadora)

PPAT/PPAF - Palete Produtos Acabados (Torno / Fresadora)

PAF – Produtos Acabados Fresadora

PAT – Produtos Acabados Torno

TCP - *Tool Center Point*

ATC - *Automatic Tool Changer*

AGV - Veículos Guiados Automaticamente

DI - *DigitalInput*

DO - *Digital Output*

I/O - *Input/Output*

AMR – *Autonomous Mobile Robots*

NG – *Not Good*

MIT - *Massachusetts Institute of Technology*

FIFO – *First In First Out*

1. Introdução

Neste primeiro capítulo encontram-se apresentados os motivos que levaram à realização da Dissertação de Mestrado no âmbito da Robótica e Automação Industrial, um breve enquadramento do trabalho realizado bem como os seus principais objetivos.

1.1 Motivação

Nos dias que correm, a grande maioria das empresas possui sistemas robotizados nos seus processos produtivos, de forma a otimizá-los, maximizando a sua capacidade produtiva. Este tipo de tecnologia, que cresce a um ritmo exponencial, deve ter como característica fundamental: a flexibilidade.

De forma a responder às necessidades dos clientes e otimizar o desempenho das empresas, surgiram os sistemas de automação e robótica industrial, nomeadamente os Sistemas Flexíveis de Fabrico (SFF). Os equipamentos que compõem este tipo de sistemas, devidamente integrados, possuem autonomia para realizar um dado conjunto de tarefas sem necessidade de intervenção do ser humano.

Uma vez que as áreas da robótica e da automação industrial são uma das componentes em que o Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Energia e Automação Industrial se destaca, optei pela realização da Dissertação no âmbito da "Simulação, integração e controlo de Células Flexíveis de Fabrico".

1.2 Enquadramento

Foi interligada a Célula Flexível de Fabrico (CFF), que se encontra no Laboratório de Automação e Robótica, para desenvolver todo o trabalho prático laboratorial inerente a esta dissertação. A seguir é feita uma breve descrição da CFF.

A CFF é constituída essencialmente por três setores:

- Setor de armazenamento: local onde é armazenada a matéria-prima, e onde se encontra o robô IRB 1400 da ABB, que carrega as paletes localizadas no tapete rolante.

- Setor de transporte: permite realizar o transporte das peças, em paletes, sobre um tapete rolante.

- Setor de fabrico: neste setor encontra-se o robô IRB 140 da ABB que realiza a descarga da palete para um *buffer*, e posteriormente a matéria-prima segue para as máquinas CNC.

1.3 Objetivos

No desenvolvimento do trabalho prático laboratorial foi utilizada a CFF do Laboratório de Automação e Robótica, e os principais objetivos foram:

- Estudo dos Sistemas Flexíveis de Fabrico, bem como o seu estado da arte;
- Simulação do funcionamento da CFF no software *RobotStudio*;
- Implementação em laboratório de algumas das simulações realizadas em *RobotStudio*.

O principal desafio deste trabalho foi o desenvolvimento de software que permitisse a interligação e coordenação dos vários equipamentos que compõem a CFF do laboratório, tais como: dois robôs industriais (robô IRB 140 e IRB 1400), duas máquinas CNC, um PLC, dois sistemas de visão, entre outros equipamentos.

1.4 Estrutura da dissertação

Esta dissertação é composta por 6 capítulos, onde são apresentados todos os desenvolvimentos realizados aos longo da Dissertação.

O primeiro capítulo referente à "Introdução" faz uma breve contextualização do tema abordado, quais os objetivos pretendidos e além disso, o interesse e os motivos pela escolha deste projeto.

Ao longo do capítulo dois, é apresentado o resultado de uma pesquisa intensiva, onde é abordada a revisão histórica sobre o tema em causa. Aqui, são abordados essencialmente três temas fundamentais: Automação Industrial, Robótica Industrial e Sistemas Flexíveis de Fabrico, uma vez que estes conceitos se encontram na base do trabalho desenvolvido.

No que diz respeito ao capítulo três, é apresentada e descrita a Célula Flexível de Fabrico do Laboratório de Automação e Robótica do Instituto Politécnico de Viseu, onde

se encontra explícito o funcionamento dos equipamentos que a constituem, bem como a ilustração dos mesmos. Ao longo deste capítulo, são ainda descritos os vários setores que compõem a célula, de forma que fique percetível todo o seu funcionamento, desde a matéria-prima ao produto acabado.

O capítulo quatro começa por fazer uma introdução aos softwares que foram utilizados ao longo deste trabalho, entre os quais, o *RobotStudio, SolidWorks,* e TIA Portal. O primeiro programa foi dedicado à programação e simulação da CFF em computador, o segundo serviu para representar o mais próximo da realidade todos os dispositivos que constituem a célula. Por fim, o TIA Portal permitiu que todos os equipamentos da célula comuniquem entre si, funcionando assim de forma autónoma. Ainda neste capítulo, é apresentado todo o trabalho desenvolvido, explicando sucintamente a programação elaborada.

No capítulo cinco são apresentadas as conclusões que se julguem pertinentes após todo o trabalho desenvolvido, bem como algumas propostas para trabalhos futuros.

Por último, no capítulo seis são apresentadas todas as fontes de informação consultadas ao longo da realização da Dissertação.

2. Revisão histórica

2.1. Evolução tecnológica

A evolução da tecnologia tem vindo a sofrer constantes evoluções e transformações, marcadas pelas quatro Revoluções Industriais.

A primeira Revolução Industrial teve origem na Inglaterra, algures entre 1760 e 1840, e marcou o início da evolução da tecnologia existente na época, onde se substituiram os processos manuais por máquinas e ferramentas, procurando desenvolver energias alternativas aos biocombustíveis, tal como a exploração de carvão. Destacar que foi nesta altura que apareceu e se desenvolveu a máquina a vapor.

Na segunda metade do século XIX, surgiu a segunda Revolução Industrial onde se verificaram evoluções significativas no que diz respeito à indústria química, elétrica e do aço. Nesta fase, os principais desenvolvimentos foram a eletricidade e o motor a combustão interna, que permitiu o aparecimento do automóvel e dos aviões.

Nas décadas de 1950 e 1970, teve origem a terceira Revolução Industrial, aquela que viria a ser a revolução digital, que ficou marcada pelo uso de semicondutores, desenvolvimentos no que diz respeito à automação, à robótica e a sistemas de comunicações. Foi nesta época que ocorreu a descoberta do transístor, do computador, da internet e do telemóvel.

No início do seculo XXI, teve início uma nova transformação na indústria com o desenvolvimento da internet, com a massificação da tecnologia que permitiu que esta se apresentasse no mercado com preços mais acessíveis, e com o auxílio de software e hardware cada vez mais sofisticado. Esta nova transformação teve um grande impacto na competitividade entre empresas, na sociedade e na economia, e ficou apelidada como Indústria 4.0 [1].

A Figura 1 faz uma breve ilustração da evolução tecnológica ao longo das quatros revoluções industriais, desde a mecanização até à Internet das Coisas, conceito que está muito em voga nos dias que correm.



Figura 1: Evolução tecnológica [2].

2.2. Automação Industrial

Até à invenção da máquina a vapor, o processo de fabrico de um dado produto caracterizava-se pela atividade humana e pelo uso da sua própria força. Com o desenvolvimento da tecnologia, as condições de trabalho tiveram melhorias significativas, no entanto, a diminuição de efetivo humano era evidente. O Homem que inicialmente realizava todas as funções de um dado processo produtivo, passa agora a desempenhar apenas as funções de controlo e supervisão, carga e descarga de materiais, entre outras tarefas.

Mais tarde, o desenvolvimento da tecnologia, nomeadamente de sofisticadas máquinas de controlo numérico e dos computadores, as unidades de produção apresentavam cada vez mais autonomia, permitindo processar maior quantidade de informação. Desta forma, a participação do homem nos processos produtivos passa de operador de máquinas a supervisor de produção, passando a ter uma responsabilidade acrescida [3].

Nos dias que correm, nos sistemas de produção mais sofisticados, todo o trabalho é realizado por equipamentos de Automação Industrial, no entanto, a intervenção humana é imprescindível em várias tarefas tais como manutenção, reparação de equipamentos, coordenação de operações de produção, transporte de matérias-primas, entre outras.

A Automação Industrial consiste no processo de controlo e monitorização de tarefas de forma autónoma, onde se procura substituir a função humana no controlo e operação do processo produtivo. O conceito de Automação não se refere única e exclusivamente a

robôs, pois este também integra sistemas de supervisão inteligentes, controlo de qualidade, entre muitos outros.

2.2.1. Tipos de Automação

Um sistema de produção automatizado pode ser classificado, quanto ao grau de flexibilidade, em três tipos: automação fixa / rígida, automação programável e automação flexível. A Figura 2 apresenta os três tipos de automação.

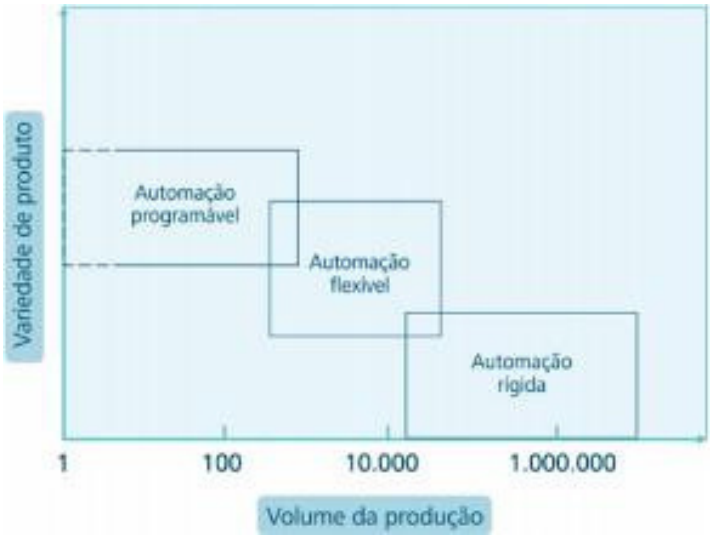


Figura 2: Tipos de automação - volume de produção versus variedade de produto [4].

A automação programável, tal como o próprio nome indica, os equipamentos que a constituem são reprogramáveis pelo que permitem fabricar uma elevada variedade de produtos. No entanto, a reprogramação destes equipamentos demora um certo tempo, no qual não existe produção, o que faz diminuir o volume de produtos. Uma máquina CNC por exemplo, é um dispositivo de automação programável onde se cria um ficheiro de programação distinto para cada tipo de produto que se pretenda fabricar.

No que diz respeito à automação flexível, ambas as variáveis, volume de produção e variedade de produtos, encontram-se limitadas de forma que a transição do tipo de produto possa ser realizada rapidamente. A simulação da produção do novo produto pode ser realizada em software, sem necessidade de estar junto ao equipamento e evitando perdas de tempo.

Num sistema de automação fixa ou rígida, a configuração dos equipamentos limita a sequência das operações realizadas, no entanto, esta apresenta um elevado volume de produção. Em relação à variedade de produtos, uma vez que o hardware não é facilmente reconfigurável, a sua adaptação a novos produtos é difícil [3], [4] e [5].

2.2.2. Vantagens e Inconvenientes da Automação Industrial

A aposta em tecnologia inovadora por parte das empresas, nomeadamente na área da automação, permite que estas se mantenham competitivas e que a sua economia cresça. A principal vantagem da automação é a diminuição do tempo de produção e dos tempos mortos, uma vez que as máquinas apresentam um elevado grau de repetibilidade, diminuindo o risco de falhas. No entanto, esta tecnologia inovadora, requer mão de obra qualificada e um investimento considerável.

2.3. Robótica Industrial

2.3.1. Evolução da Robótica Industrial

Desde os seus antepassados que o Homem tenta criar formas ou mecanismos de conseguir reproduzir as suas capacidades através de máquinas.

O termo "robótica" tem origem na palavra robô e é a ciência que estuda o desenvolvimento e as aplicações do mesmo. Em 1941, Issac Asimov, escritor e bioquímico norte-americano, usou pela primeira vez a palavra "robótica" para descrever a tecnologia dos robôs, ou seja, para se referir à conceção e construção dos mesmos. Um ano depois, em 1942, Issac escreveu as três leis da robótica [5] e [6]:

- Primeira Lei: um robô não pode ferir ou magoar um ser humano ou, por inação, permitir que um ser humano sofra algum mal.

- Segunda Lei: um robô deve obedecer sempre às ordens do ser humano, exceto em situações em que estas entrem em conflito com a "primeira lei" da robótica.

- Terceira Lei: um robô deve proteger a sua própria existência, desde que sejam respeitadas a primeira e a segunda lei da robótica.

A Robótica Industrial teve início em 1954, quando Geroge Charles Devol, também considerado como um dos pais da robótica, patenteou o primeiro robô programável intitulado de "*Unimate*". Pouco tempo depois, Joe Engelberger, físico e engenheiro americano, associa-se à empresa *Devol* como cofundador do *Unimate*, de forma a alavancar a comercialização deste novo protótipo. Assim surgiu a primeira empresa de robótica do mundo, a *Unimation*, e a série de robôs *Unimate* 1900 surgindo assim o primeiro braço robótico utilizado em fábrica de produção de veículos [5].

A *General Motors*, com recurso ao *Unimate*, tornou-se a fábrica mais automatizada do mundo, conseguindo duplicar o número de veículos produzidos por hora comparativamente aos seus concorrentes. Na Figura 3 é possível observar aquele que foi o primeiro braço robótico do mundo [10] e [11].



Figura 3: Primeiro robô do mundo - *Unimate*.

2.3.2. Vantagens na aplicação de robôs na indústria

Os robôs são essencialmente mecanismos utilizados para realizar atividades ou movimentos humanos. A sua aplicação na indústria apresenta as seguintes vantagens [8], [9] e [12]:

- Flexibilidade: os robôs podem ser reconfigurados e por isso asseguram um elevado grau de flexibilidade no processo produtivo, pois, uma mesma máquina, pode realizar atividades diferentes sendo apenas necessária a sua reprogramação;

- Aumento da produção: os robôs são máquinas que podem trabalhar 24/24 horas, o que permite aumentar a produção, e visto que apresentam um elevado grau de

repetibilidade, diminuem o número de peças defeituosas, aumentando a qualidade do produto final;

- Melhor qualidade de trabalho para os colaboradores: uma vez que os robôs vêm realizar as tarefas perigosas, repetitivas e cansativas que o ser humano tinha de realizar, os colaboradores passam a ter uma melhor qualidade no trabalho, executando assim tarefas menos exigentes. Além disso, destaca-se ainda que, o uso de robôs na indústria aumenta a segurança no trabalho, visto que probabilidade de ocorrência de acidentes causados pelo contacto com as máquinas diminui. Por fim, notar que, em aplicações críticas como manuseamento de materiais radioativos por exemplo, o robô realiza esta tarefa sem qualquer problema, ao passo que a mesma realizada pelo homem podia trazer-lhe consequências graves para a sua saúde.

2.3.3. Áreas de aplicação dos Robôs

As principais áreas da ciência envolvidas na conceção e aplicação da robótica são essencialmente a mecânica, eletrónica, pneumática, física e matemática. Os robôs apresentam uma ampla aplicação, nomeadamente:

- Na produção: as principais aplicações dos robôs na produção são essencialmente na realização de processos de fundição, soldadura, pintura, operações de montagem, carregamento de máquinas com materiais, processos de embalagem, etc. No caso do Laboratório de Automação e Robótica do DEE, um robô IRB 140 é responsável por efetuar a carga e a descarga de materiais de uma máquina CNC.

- Na exploração: existem vários exemplos no que diz respeito à aplicação de robôs na exploração tais como soluções desenvolvidas para conhecer locais em que o homem tem dificuldade ou impossibilidade em aceder como o interior de vulcões devido às elevadas temperaturas que se fazem sentir, locais com elevado índice de radioatividade para inspeção do interior de um reator atómico, entre outros. Outro exemplo é a exploração de outros planetas, onde são utilizadas sondas robóticas que permitem a análise da atmosfera, clima, geologia, composição dos solos, entre outras coisas, sem a necessidade de um tripulante. A *Mars Pathfinder* é uma sonda robótica construída pela NASA que foi numa missão de exploração do planeta Marte, em

1997, com um peso aproximado de 10,6 quilogramas, e tornou-se o primeiro protótipo operado fora do sistema Terra-Lua [13].

- Auxílio a pessoas com deficiência: o desenvolvimento de próteses biónicas que funcionam através de sensores conectados aos músculos do paciente e que captam os pulsos elétricos, permitindo assim realizar o movimento do membro amputado. Outro exemplo, é o desenvolvimento de robôs para pessoas invisuais, que permitem que estas se desloquem, garantindo a sua segurança. Estes equipamentos são equipados de recursos de inteligência artificial, sistemas de visão, sensores, entre outros [14].

- Militar: por fim, destacam-se ainda aplicações militares onde são desenvolvidos robôs para realizar o reconhecimento de terreno e vigilância, operações de deteção e desativação de minas, transporte de equipamentos, entre outras [15].

2.3.4. Tipos de Robôs

A seguir apresenta-se uma breve descrição dos vários tipos de robôs existentes no mercado, com principal destaque para o robô industrial, uma vez que foi o tipo de robô utilizado nesta Dissertação.

2.3.4.1. Robôs Móveis

Os robôs móveis são aqueles que têm a capacidade de se mover ou deslocar para realizar as tarefas ou atividades para as quais são destinados. Inicialmente, na indústria, começaram por surgir os *Automated Guided Vehicle* (AGV), que apresentavam essencialmente a função de transporte de materiais entre pontos diferentes de uma instalação. Estes podiam ser guiados de várias formas, por exemplo através de um sinal de radiofrequência transmitido por um fio condutor embutido numa cavidade no solo. O sensor do AGV deteta o sinal e ajusta a posição do veículo de forma a mantê-lo na trajetória pretendida.

Mais tarde, surgiram os *Autonomous Mobile Robots* (AMR), que foram uma evolução dos tradicionais AGV's, mas agora equipados com um sistema de navegação inteligente, onde apenas é necessário definir o ponto de origem e o ponto de destino, e

este seguirá mapas criados em software para realizar a trajetória pretendida [16]. Na Figura 4 é possível observar a diferença entre o robô móvel AMR e o AGV [17].

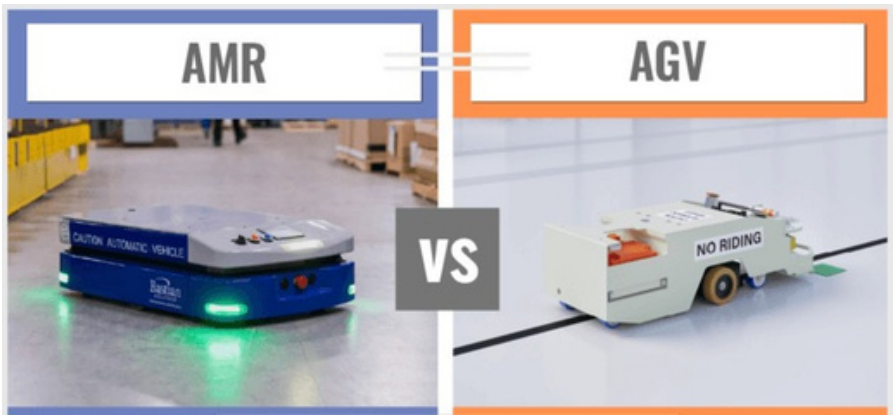


Figura 4: Robôs móveis - AGV *vs* AMR.

2.3.4.2. Robôs Humanóides

Um robô humanóide, é um robô cuja aparência se assemelha à estrutura do corpo humano, podendo estes ser aplicados em diversas áreas. Estes são dotados de inteligência artificial e realizam essencialmente trabalhos repetitivos e cansativos com um elevado nível de precisão e repetibilidade, diminuindo assim os erros, e permitindo que os colaboradores executem tarefas menos desgastantes. A Figura 5 mostra o robô humanoide ASIMO desenvolvido pela Honda [18].



Figura 5: Robô humanóide ASIMO.

2.3.4.3. Robôs Industriais

Por fim, no que diz respeito ao tipo de robôs, incluem-se os mais comuns na indústria que tal como o próprio nome indica são os robôs industriais. O conceito de robô industrial foi patenteado nos Estados Unidos da América, em 1954, por George Devol. Um robô industrial é uma estrutura antropomórfica, devido à semelhança com o braço do ser humano, e é capaz de realizar diversas atividades consoante o *end effector* que possuir, conceito que irá ser abordado seguidamente.

A anatomia do robô, divide-se essencialmente em três partes:

- Base: a base é o elemento do robô responsável pela sua sustentação e fixação ao solo ou plataforma que permita o seu deslocamento, consoante a tarefa a desempenhar pelo mesmo.

- Corpo e braço: o corpo está ligado à base e é composto por elementos móveis de vários tipos, e na sua extremidade apresenta uma ferramenta de trabalho.

- *End effector*: ferramenta de trabalho do robô que permite ao robô agarrar uma peça, por exemplo. No caso do robô IRB 1400 do Laboratório de Automação e Robótica, a ferramenta de trabalho é um *gripper* ou pinça, tal como podemos observar na Figura 6 [15] e [20].

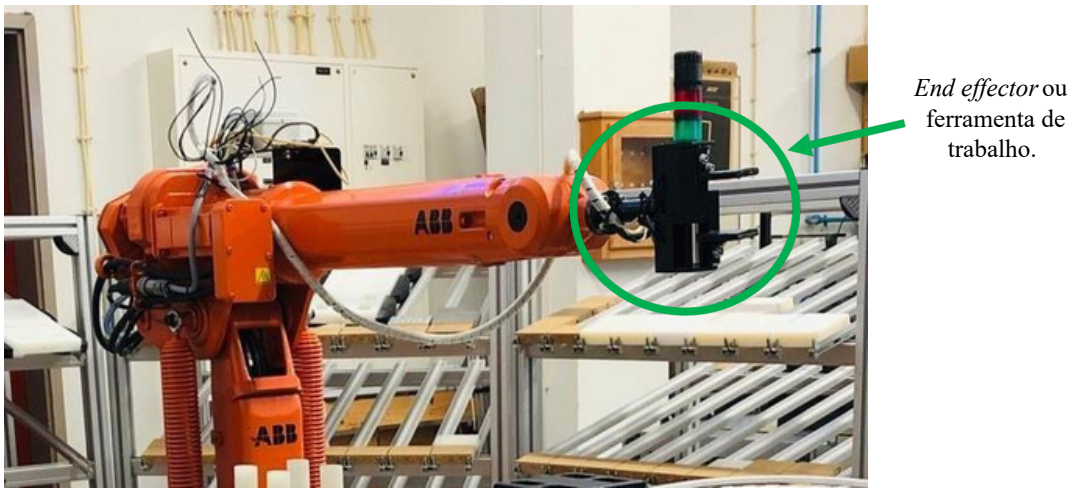


Figura 6: *End effector* do robô IRB 1400 do Laboratório de Automação e Robótica [19].

2.4 Características de Robôs Industriais

Durante os subcapítulos que se seguem, são apresentados alguns conceitos importantes relacionados com os robôs industriais.

Robô industrial - características dinâmicas

As características dinâmicas do robô descrevem essencialmente a performance em termos de rapidez com que o manipulador se movimenta, a sua capacidade de paragem, e também do seu posicionamento num determinado ponto. As principais características dos robôs industriais que se devem ter em conta para alcançar o correto funcionamento da máquina são:

- Exatidão: é a capacidade que o robô tem em atingir um determinado ponto pelas suas coordenadas, ou seja, quão próximo se obtém a posição-orientação real da ferramenta de trabalho do valor pretendido.

- Repetibilidade: pode ser definida como a capacidade do *end effector* regressar a uma posição-orientação que já tinha sido alcançada, repetidas vezes.

- Resolução: aplicado à Robótica Industrial, este conceito define o menor incremento da variável que o sistema de medição consegue perceber [15], [20], [21].

De forma a distinguir melhor os conceitos de repetibilidade e exatidão que podem ser facilmente confundidos, apresenta-se a Figura 7.

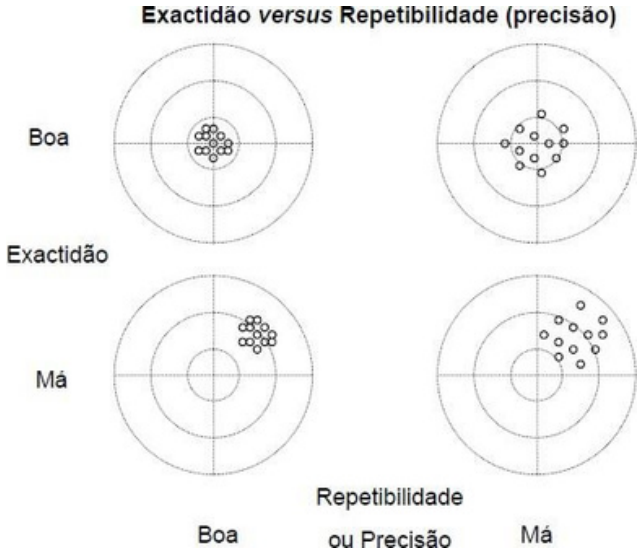


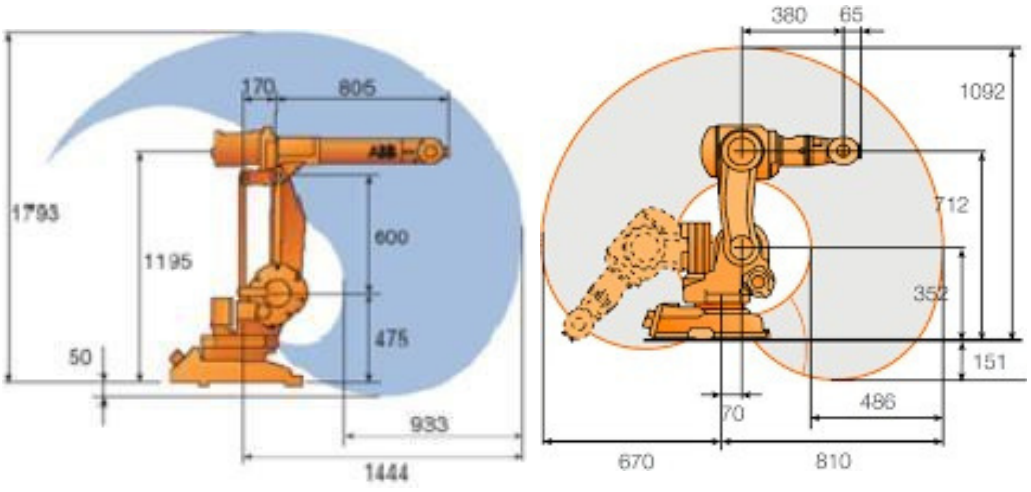
Figura 7: Exatidão versus repetibilidade [15].

Os robôs industriais, para conseguirem conhecer o meio que os envolve, encontram-se equipado de vários tipos de sensores. Estes dispositivos detetam e geram informação sobre o equipamento e sobre o meio onde este se encontra instalado, e podem ser de dois tipos. Os sensores externos são da responsabilidade do operador do robô e pode ser por exemplo, sensores táteis, sensores de proximidade, sensores fotoelétricos, entre outros. Os sensores internos são da responsabilidade do fabricante e podem ser *resolvers* – usados por exemplo nos robôs da ABB, *encoders* ou codificadores, entre outros [5] e [20].

2.4.2 Carga e Volume de trabalho

O volume de trabalho e a carga do robô são dois conceitos relevantes a ter em conta na escolha de um robô, para uma determinada aplicação. No que diz respeito à carga, esta é a massa que o robô é capaz de transportar sem prejuízo das suas características físicas, estáticas ou da sua fiabilidade. A variável carga depende da velocidade e da distância ao eixo do punho do robô.

O volume de trabalho do robô é toda a região espacial onde é possível o robô posicionar o seu punho, através do seu braço. No caso dos robôs IRB 1400 e IRB 140 do laboratório, os seus volumes de trabalho encontram-se ilustrados na Figura 8.



a) b)

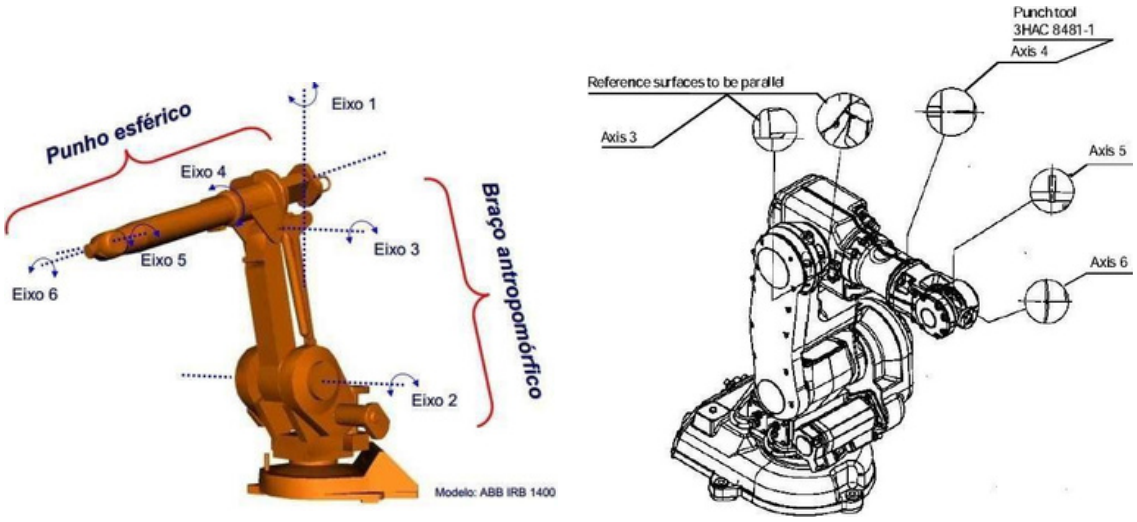
Figura 8: Volume de trabalho de um robô [22].

a) Volume de trabalho do robô IRB 1400. b) Volume de trabalho do robô IRB 140.

2.4.3 Graus de Liberdade

O número de graus de liberdade de um robô é um parâmetro característico do robô e representa o número de movimentos independentes que o robô é capaz de executar, em relação a um sistema de eixos coordenados. De um modo geral, podemos dizer que o número de graus de liberdade de um robô é igual ao número de juntas do mesmo.

No caso do IRB 1400, este apresenta 6 juntas de rotação, o que nos leva a concluir que possui 6 graus de liberdade, tal como podemos ver na Figura 9 [27].



a) b)

Figura 9: Juntas de um robô.

a) Juntas do robô IRB 1400. b) Juntas do robô IRB 140.

Os robôs IRB 1400 e IRB 140, apesar de parecerem diferentes, apresentam algumas características semelhantes, apresentadas na Tabela 1 [27].

	ABB IRB 1400	**ABB IRB 140**
Graus de liberdade	6	6
Punho esférico	θ_4=*roll,* θ5=*pitch,* θ_6=*roll*	θ_4=*roll,* θ5=*pitch,* θ_6=*roll*
Alcance máximo	1.44 m	0.81 m
Capacidade de carga Máxima	5 kg	6 kg
Repetibilidade	±0,05 mm	± 0,03mm

Tabela 1: Características dos robôs IRB 1400 e IRB 140.

2.5 Células Flexíveis de Fabrico

Com a evolução dos robôs anteriormente apresentados entre muitos outros, começaram a desenvolver-se as Células Flexíveis de Fabricos (CFF), onde se cria uma sequência de tarefas de forma a alcançar um dado objetivo, por exemplo, uma linha de montagem automóvel. A crescente popularidade dos robôs na indústria deve-se ao facto de estes poderem trabalhar 24 horas por dia, 7 dias por semana, sem necessidade de fazer pausas para descansar, e além disso possuem a capacidade de trabalhar em ambientes hostis e ruidosos, sem afetar o seu rendimento, além de que possuem um elevado grau de repetibilidade [5] e [7].

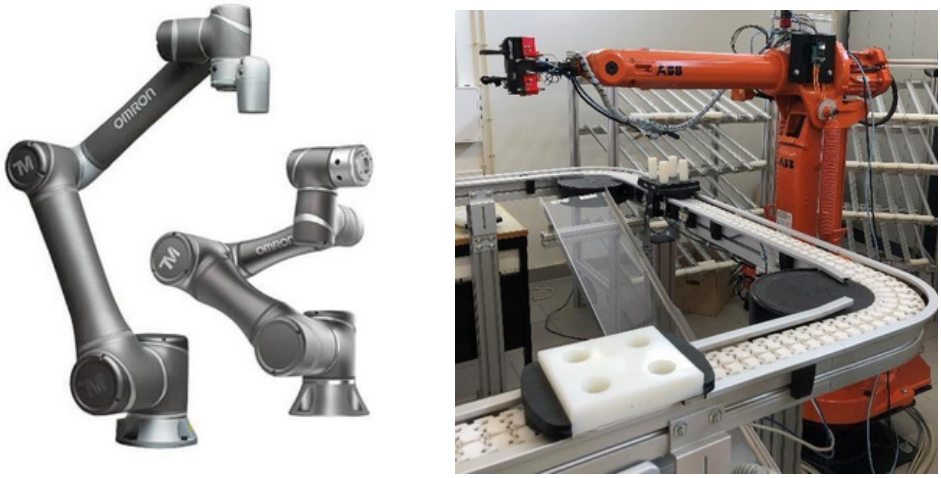
Tal como já foi referido anteriormente, os robôs encontram-se equipados de uma vasta gama de sensores que lhe permitem conhecer os seus movimentos, e o ambiente que os rodeia. Desta forma, permitem alcançar uma maior segurança para os equipamentos, mas fundamentalmente para os colaboradores que se encontrem próximos destes.

O critério segurança, levou ao desenvolvimento do conceito de robôs colaborativos, equipados de sensores e inteligência artificial, que permitem a deteção da presença humana. O robô colaborativo executa qualquer tipo de tarefa ao lado do ser humano, e apresenta inúmeras vantagens tais como versatilidade, ser leve, fácil de transportar e instalar, para além do fator-chave em qualquer tecnologia - a segurança.

A principal limitação deste tipo de robôs prende-se com a baixa capacidade de carga e a sua baixa velocidade, vistos que são robôs construídos para a realização de tarefas "leves". Por exemplo, o robô colaborativo TM 5 – 700 da *OMRON*, tem uma velocidade máxima de 1.1 m/s, ao passo que o robô industrial IRB 1400 do laboratório apresenta uma velocidade máxima de 2.1 m/s, sendo sensivelmente o dobro.

Desta forma, cada tipo de máquina deve ser adequado às funções que irá desempenhar para conseguirmos alcançar o melhor rendimento do sistema em questão [22], [24] e [26].

A Figura 10 mostra um robô colaborativo e um robô industrial, onde são evidentes as diferenças entre si.



a) b)

Figura 10: Robô colaborativo e industrial.

a) Robô TM 5 – 700 da *OMRON* b) Robô industrial IRB 1400.

2.6 Sistemas Flexíveis de Fabrico

Um Sistema Flexível de Fabrico (SFF) ou *Flexible Manufacturing System* (FMS) é uma configuração integrada e controlada por computador de máquina-ferramenta de controlo numérico, equipamento auxiliar de produção e um sistema de manuseamento de materiais, concebida para produzir simultaneamente pequenas a médias séries de uma vasta gama de produtos, de elevada qualidade, a baixo custo, de forma a responder ao crescente aumento da exigência dos mercados, bem como a quantidade e qualidade dos produtos fabricados.

Um SFF é um conjunto de duas ou mais células flexíveis de fabrico, cuja grande vantagem é a sua flexibilidade, ou seja, a sua adaptabilidade a fabrico de produtos com diferentes características, ou até mesmo, o fabrico de um novo produto. Esta flexibilidade é alcançada pelo facto de serem constituídos por sistemas programáveis e facilmente reconfiguráveis, tais como robôs manipuladores, máquinas de controlo numérico, entre outras [15].

Os sistemas flexíveis de fabrico também possuem algumas desvantagens, sendo que a principal é o facto da implementação deste tipo de sistemas requer um investimento inicial bastante significativo, bem como a necessidade de mão de obra qualificada para poder programar as máquinas e realizar a sua manutenção.

2.6.1 Tipos de SFF

Os Sistemas Flexíveis de Fabrico podem assumir diferentes tipos de configurações na indústria, consoante o objetivo a que se destinam.

Função do número de máquinas

Os SFF dependentes do número de máquinas, podem ser caracterizados em três grandes tipos [7]:

- Uma célula máquina: constituída apenas por uma máquina CNC, projetada para processão uma variedade de peças, individualmente, visto que o processo é sequencial;

- Célula Flexível de Fabrico: constituída por duas ou mais estações de trabalho, de forma a produzir simultaneamente vários tipos de produtos;

- Sistema Flexível de Fabrico: este sistema é consideravelmente mais sofisticado que os anteriormente apresentados, constituído por várias CFF, que pode ainda conter sistemas de transporte entra as células, sistemas de monitorização e controlo de qualidade, como por exemplo, sistema de visão.

Função do nível de flexibilidade

No que diz respeito aos SFF que depende do nível de flexibilidade dos mesmos, estes podem ser divididos em dois grandes grupos: SFF dedicado e SFF de ordem aleatória, sendo que o primeiro é um sistema que visa uma elevada produtividade, ao passo que o segundo, tem como objetivo a produção de uma vasta gama de produtos [32].

2.7 Máquinas de Controlo Numérico

Em 1949, nos Estados Unidos, John Thoren Parsons, em colaboração com um projeto de investigação, desenvolveu no *Massachusetts Institute of Technology* (MIT), aquela que seria a primeira fresadora com controlo numérico (NC) [26]. A Figura 11 mostra a primeira fresadora NC desenvolvida no MIT.



Figura 11: Primeira fresadora NC [25].

As máquinas CNC são eficientes na maquinação em diferentes materiais tais como: aço inox, alumínio, ferro, entre outros. A sua aceitação na indústria permitiu que fossem desenvolvidos diferentes tipos de máquinas de controlo numérico, no entanto, as mais importantes para o âmbito desta Dissertação são: torno CNC e fresadora CNC.

2.7.1 Vantagens e desvantagens das máquinas CNC

A indústria é um fator importante na economia de um país, pois permite gerar valor através da sua produção. Com a introdução das máquinas CNC, o processo produtivo teve alguns aspetos que melhoraram tais como [28], [29] e [15]:

- Maior segurança para os operadores;

- Maior flexibilidade e versatilidade do processo de produção;

- Elevada precisão e repetibilidade, que se traduz numa melhor qualidade dos produtos, independentemente da sua complexidade;

- Facilidade no ajuste e correção dos programas desenvolvidos;

- Troca de ferramenta automática, o que permite minimizar os tempos mortos.

As máquinas CNC também apresentam as suas desvantagens, no entanto, estas não se encontram relacionadas com o processo produtivo das mesmas, mas sim com características externas ao seu funcionamento, tais como [15]:

- Elevado investimento inicial;

- Necessidade de mão de obra qualificada para funcionar com as máquinas, bem como realizar a sua manutenção;
- Manutenções mais difíceis e de custo elevado;
- Não elimina todos os erros humanos definitivamente.

3 Configuração da CFF

Tal como já foi referido anteriormente, o presente trabalho tem como principal objetivo o estudo da Célula Flexível de Fabrico do Laboratório de Automação e Robótica. Para melhor compreender o funcionamento da CFF, apresenta-se a seguir uma descrição pormenorizada da mesma.

Na Figura 12, é possível ver o *layout* da célula que se encontra no laboratório [15].

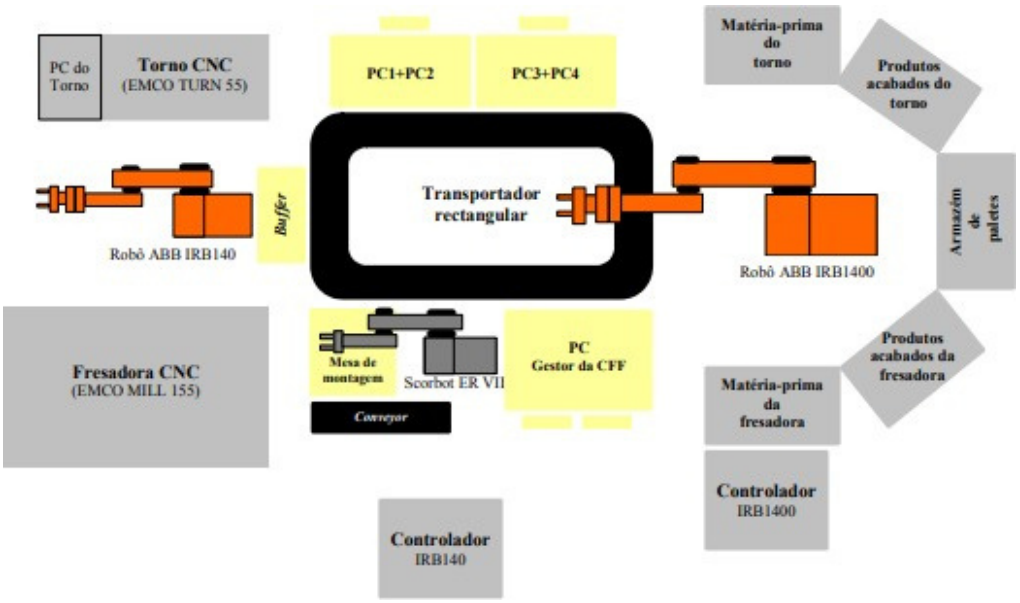


Figura 12: *Layout* da CFF do laboratório [15].

3.1 Hardware utilizado

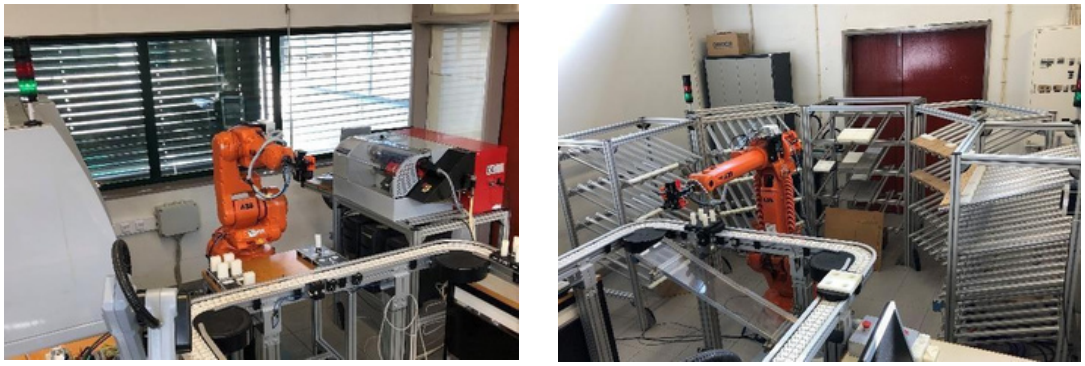
De uma forma geral, o hardware utilizado no desenvolvimento deste projeto, já instalado no laboratório é o seguinte:

- 1 robô IRB 1400 (ABB) + controlador;
- 1 robô IRB 140 (ABB) + controlador;
- 2 sistemas de visão por computador;
- 1 computador HP;
- PLC S7 1200 + 2 módulos de expansão;
- 2 botoneira;

- 2 sensores óticos de intrusão;

- 2 balizas de sinalização luminosa e sonora.

Na Figura 13, apresenta-se uma visão geral da célula flexível de fabrico do Laboratório de Automação e Robótica, utilizada na realização do trabalho prático laboratorial desta Dissertação.



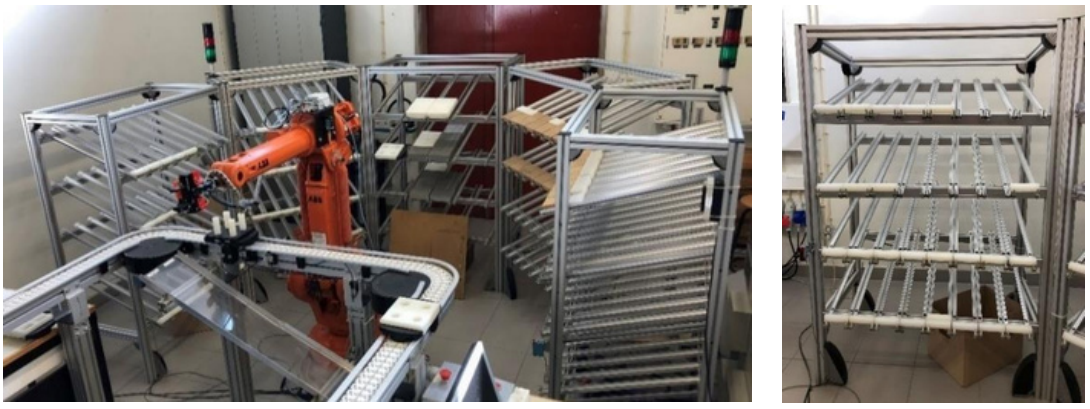
a) b)

Figura 13: Célula Flexível de Fabrico.

a) Setor fabrico. b) Setor de armazenamento.

3.2 Setor de Armazenamento

O setor de armazenamento é constituído pelos armazéns onde se encontra a matéria-prima (MP), tal como podemos ver na Figura 14, o robô IRB 1400 da ABB, e o respetivo controlador. Cada linha do armazém é constituída por 8 células, onde é alojada a MP quer do torno, quer da fresadora.



a) b)

Figura 14: Vista geral do armazém.

a) Setor de armazenamento. b) Armazém de peças do torno.

Robô IRB 1400

A Figura 15 apresenta o robô IRB 1400 instalado no Laboratório de Automação e Robótica. No âmbito da CFF, a principal função deste robô é efetuar a carga e descarga das paletes que circulam no transportador. O respetivo controlador encontra-se ilustrado na Figura 15 b) sobre o qual se encontra a *Teach Pendant*, que é uma interface homem-máquina, onde podem ser mostradas mensagens dirigidas ao operador durante um dado processo de fabrico, e através da qual se pode posicionar e movimentar o robô com recurso a um *joystick*.

No funcionamento do robô em modo manual, a *Teach Pendant* possui um botão lateral chamado "homem morto", com três estados. Para que o robô funcione neste modo, o operador deve pressionar esse botão até à posição 1 e o robô fica limitado a uma velocidade máxima de 250 mm/s. No estado normal, posição 0, e no estado mais avançado, posição 2, o robô não funciona e caso se encontre em movimento, este para imediatamente, funcionando como um sistema de segurança para o operador.

O motivo de existirem duas posições que fazem parar o robô, deve-se ao facto de, em caso de acidente, os músculos do operador poderem distender ou contrair, assegurando assim a paragem instantânea do manipulador, evitando possíveis danos para a pessoa e para o equipamento.



a) b)

Figura 15: Robô ABB IRB 1400.

a) Manipulador IRB 1400. b) Controlador do robô IRB 1400.

Ferramenta de trabalho do robô IRB 1400

O *end effector* do IRB 1400, representado na Figura 16, é um *gripper* pneumático paralelo, modelo GH 90, para que o robô possa agarrar as peças existentes no armazém e colocá-las na palete situada no setor de transporte. O *gripper* é equipado com quatro sensores, dos quais dois são sensores indutivos e dois são sensores óticos, identificados na Figura 16.

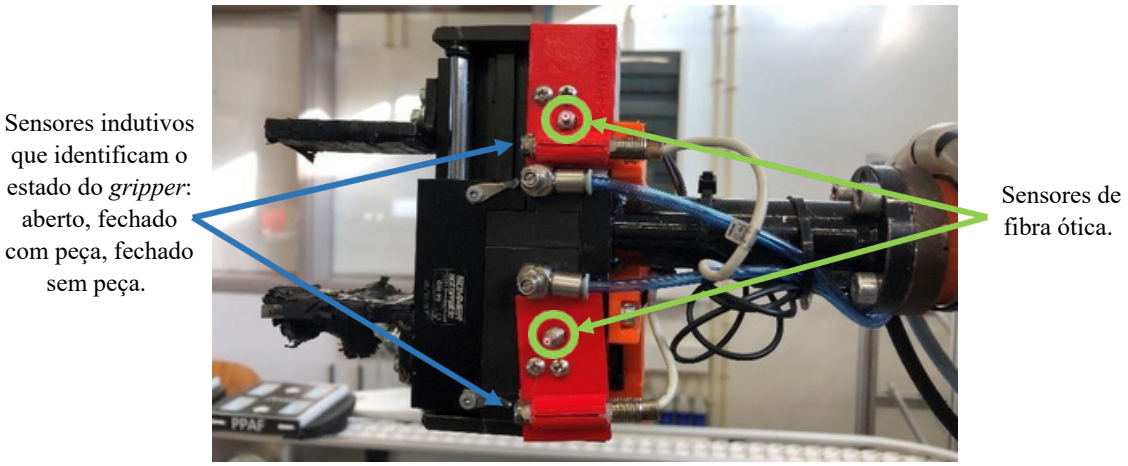
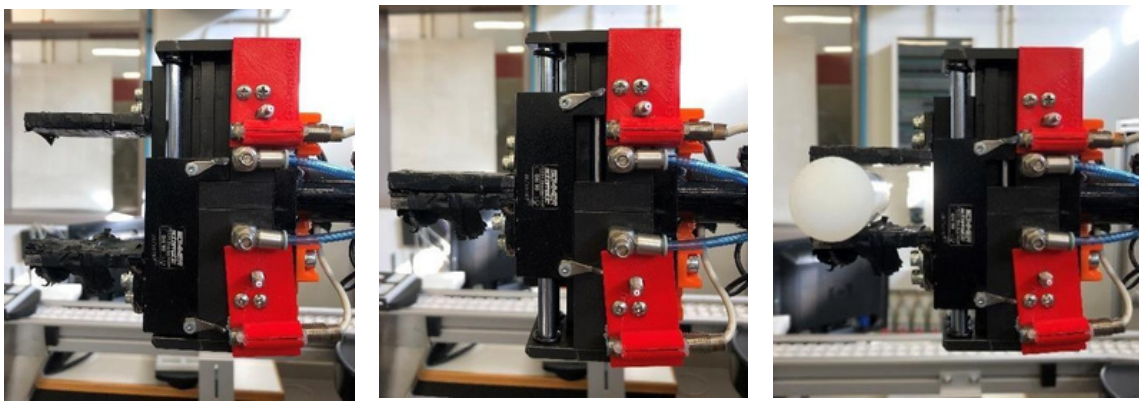


Figura 16: *Gripper* do robô IRB 1400.

A Figura 17 a) mostra o *gripper* aberto, a Figura 17 b) mostra o *gripper* fechado sem peça e a Figura 17 c) mostra o *gripper* fechado com peça, onde através da combinação dos sinais dos dois sensores indutivos, é possível distinguir as três posições do *gripper*.



a) b) c)

Figura 17: Posições do *gripper*.

a) *Gripper* aberto. b) *Gripper* fechado sem peça. c) *Gripper* fechado com peça.

A Tabela 2 apresentada as combinações dos estados lógicos dos sensores referidos anteriormente, onde se distinguem as posições do *gripper*.

Estado do *gripper*	Sensor indutivo 1	Sensor indutivo 2
Aberto	1	0
Fechado sem peça	0	0
Fechado com peça	0	1

Tabela 2: Combinação do estado logico dos sensores indutivos.

3.3 Setor de fabrico

O setor de fabrico da CFF é constituído por uma máquina fresadora, um torno, um robô IRB 140 e quatro *buffers*. Nos subcapítulos que se seguem, apresenta-se uma síntese dos equipamentos mencionados anteriormente.

3.3.1 Robô IRB 140

A Figura 18 mostra o robô IRB 140 da ABB, responsável pela carga e descarga das paletes que circulam no tapete no setor de fabrico e também pela carga e descarga das peças do torno e da fresadora. Na Figura 18 b), é possível observar o controlador do manipulador IRB 140, o qual é equipado também de uma *Teach Pendant*, através da qual o operador pode observar mensagens ao longo do processo produtivo, entre outras coisas.



a) b)

Figura 18: Robô ABB IRB 140.

a) Robô IRB 140. b) Controlador do robô.

3.3.1.1 Ferramenta de trabalho do robô IRB 140

A ferramenta de trabalho do robô IRB 140 apresentada na Figura 19 é um *gripper* pneumático, igual ao do robô IRB 1400, constituído por duas garras paralelas que se adequam a vários tipos de peças.

O peso da ferramenta de trabalho deve ser um aspeto a ter em conta, visto que o seu peso juntamente com o peso das peças transportadas não pode ultrapassar a capacidade de carga admitida pelo manipulador.

O *gripper* do robô IRB 140 apresenta também um sistema de deteção de peças através de dois sensores indutivos e de duas peças metálicas, idêntico ao do robô IRB 1400.

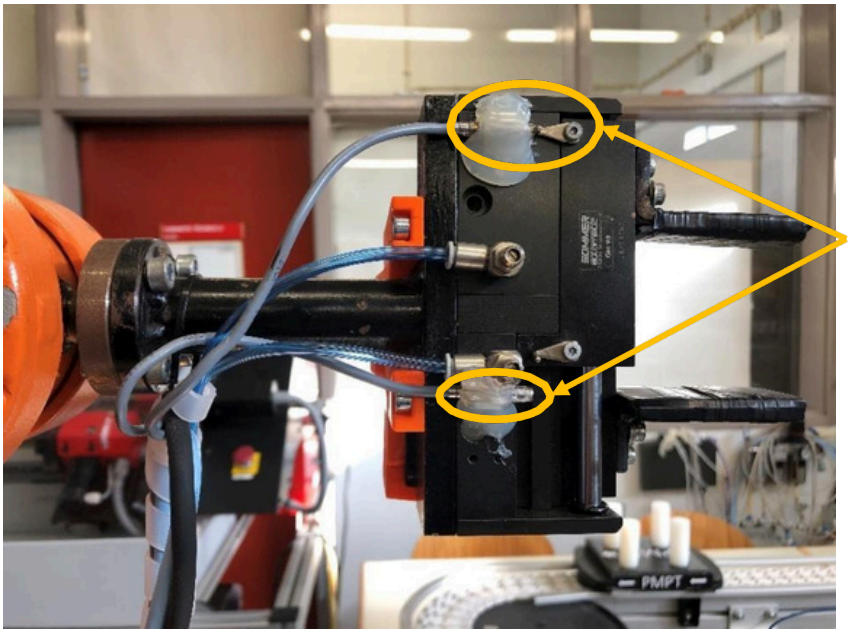


Figura 19: Ferramenta de trabalho IRB 140.

A combinação dos estados dos sensores para identificar o *gripper* aberto, fechado sem peça ou fechado com peça é igual à combinação apresentada na Tabela 2, visto que os *grippers* são do mesmo modelo.

3.3.2 *Buffer* de peças

O *buffer* de peças, ilustrado na Figura 20, encontra-se localizado no setor de fabrico, junto às máquinas onde a matéria-prima irá ser trabalhada, de forma a obter uma maior rentabilidade do sistema, existindo um "*stock*" de matéria-prima para ambas as máquinas.

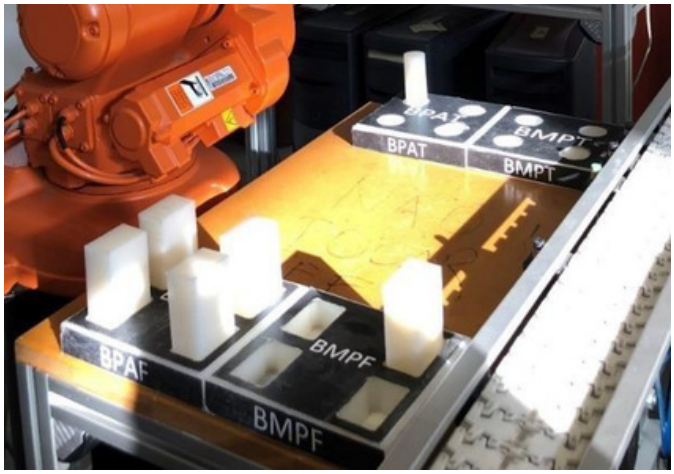
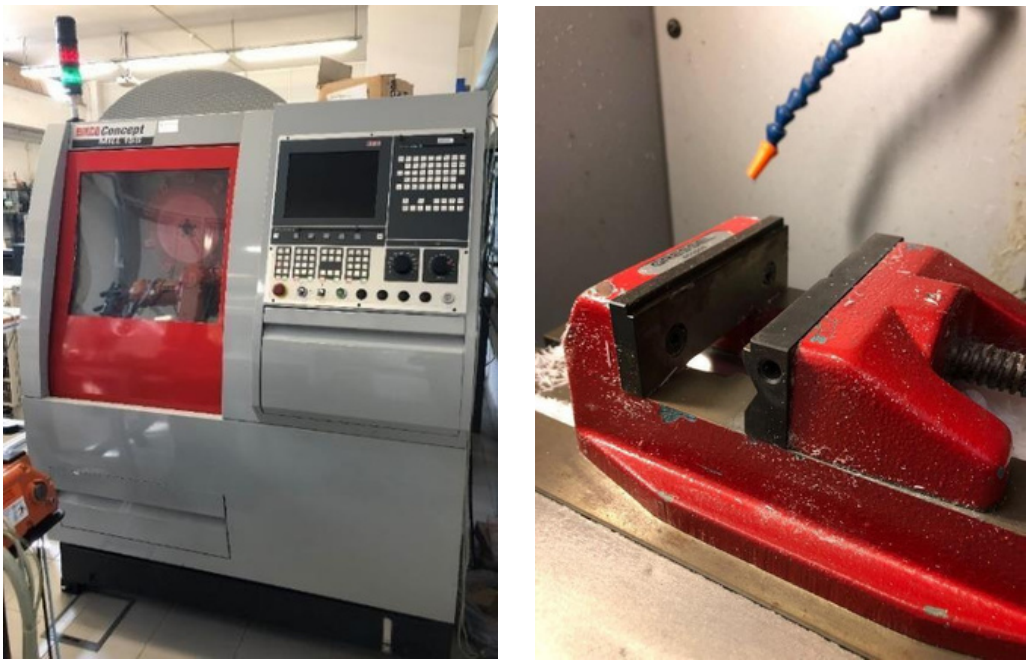


Figura 20: *Buffer* de peças do setor de fabrico.

Existe um *buffer* para a matéria-prima do torno onde serão colocadas temporariamente as peças cilíndricas para posterior maquinação, e um *buffer* para as peças paralelepipédicas que serão maquinadas na fresadora.

3.3.3 Fresadora CNC

O setor de fabrico possui duas máquina-ferramenta CNC que são utilizadas no processamento da matéria-prima proveniente do setor armazém. Cada uma destas tem propósitos diferentes, sendo que a fresadora EMCO PC MILL 155 destinada à produção de peças prismáticas, ao passo que o torno é destinado à produção de peças cilíndricas.
A fresadora CNC, apresentada na Figura 21, tem a capacidade de executar operações em três eixos: x, y e z [30].



a) b)

Figura 21: Fresadora *EMCO Concept MILL155* .

a) Fresadora. b) *Vice* pneumático.

A Figura 22 mostra o sistema de troca automático de ferramenta (*Automatic Tool Changer* - ATC *System*) da fresadora, com uma capacidade para dez ferramentas, e um *vice* pneumático onde são colocadas e fixadas as peças para a maquinação das mesmas.

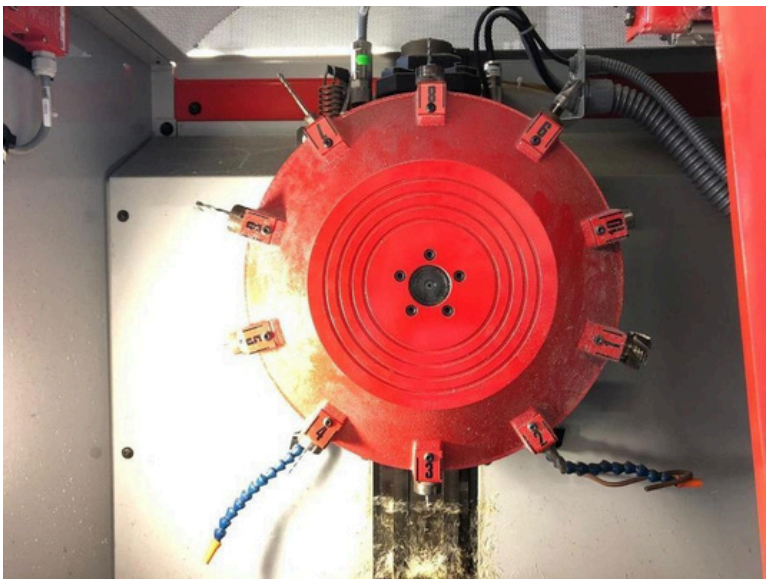


Figura 22: Sistema de troca automática de ferramenta da fresadora.

Antes da maquinação de uma peça, é necessário realizar o desenho da mesma num software CAD/CAM – *Computer Aided Design* e *Computer Aided Manufacturing*. Na ferramenta de desenho, por exemplo o *MasterCam,* é possível fazer uma simulação da peça final que se pretende, estabelecer parâmetros de corte, definir as ferramentas utilizadas no processo de maquinação – ferramentas de furo, de fresar, de desbaste, entre outras. Existe uma variedade enorme de parâmetros a ter em conta para que não ocorram acidentes ou danos nos equipamentos.

Após este processo, geramos o ficheiro NC (*Numerical Control*) da peça, para que possamos transferi-lo para a fresadora, e desta forma, maquinar a peça. Na Figura 23 é possível visualizarmos todo o processo descrito anteriormente, desde a idealização da peça até à sua maquinação.

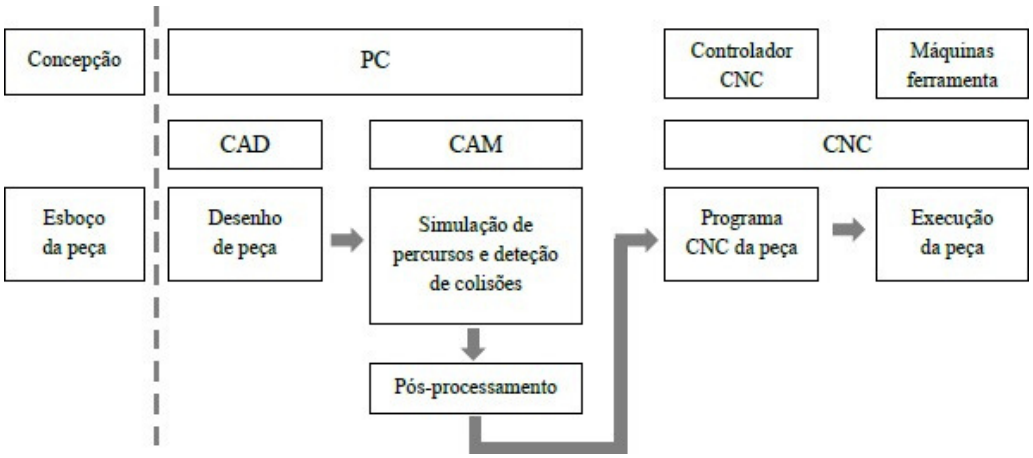
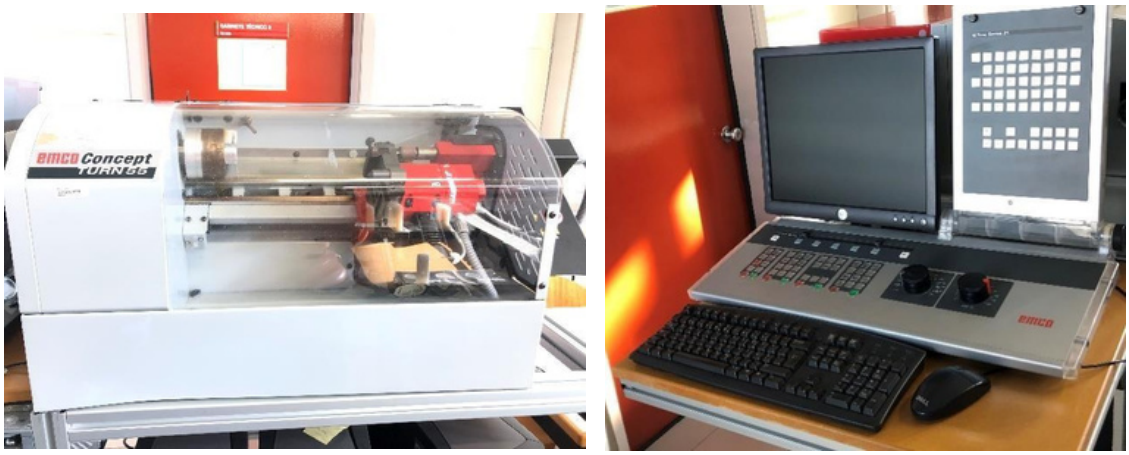


Figura 23: Funcionamento CAD/CAM/CNC [15].

3.3.4 Torno CNC

O Torno CNC existente na CFF é o torno EMCO MILL 55 representado na Figura 24, e permite efetuar operações a dois eixos – eixo x e eixo z. Este possui uma interface constituída por um computador e um teclado onde é possível executar várias operações, como por exemplo: a abertura e fecho da porta, abertura e fecho do *chuck*, entre outras funcionalidades [30].

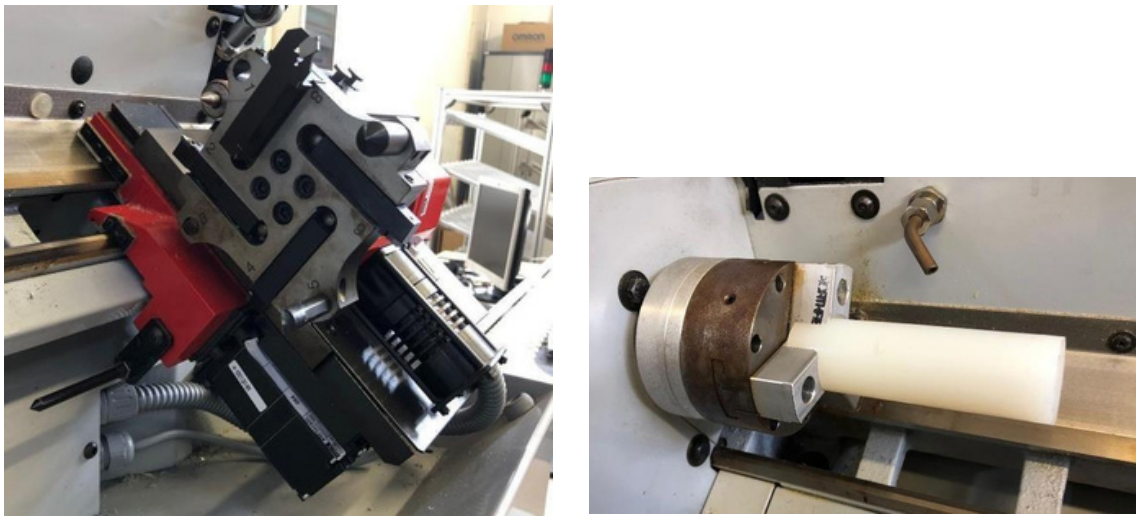


a) b)

Figura 24: Torno CNC.

a) Torno EMCO MILL 55. b) Interface do torno.

O torno CNC, apresenta também um *Automatic Tool Changer* apresentado na Figura 25 a) que pode conter até um máximo de oito ferramentas, bem como um *chuck* pneumático ilustrado na Figura 25 b, que permite fixar as peças durante a maquinação das mesmas.



a) b)

Figura 25: Ferramentas do Torno CNC.

a) *ATC* do torno CNC. b) *Chuck* do torno CNC.

3.4 Sistema transportador

A Figura 26 mostra uma visão geral do sistema transportador, que tem como função transportar as paletes entre o setor de armazenamento e o setor de fabrico, tendo o tapete 2,7 metros de comprimento e 1,7 metros de largura. Este é movido por um motor trifásico de 250 W.

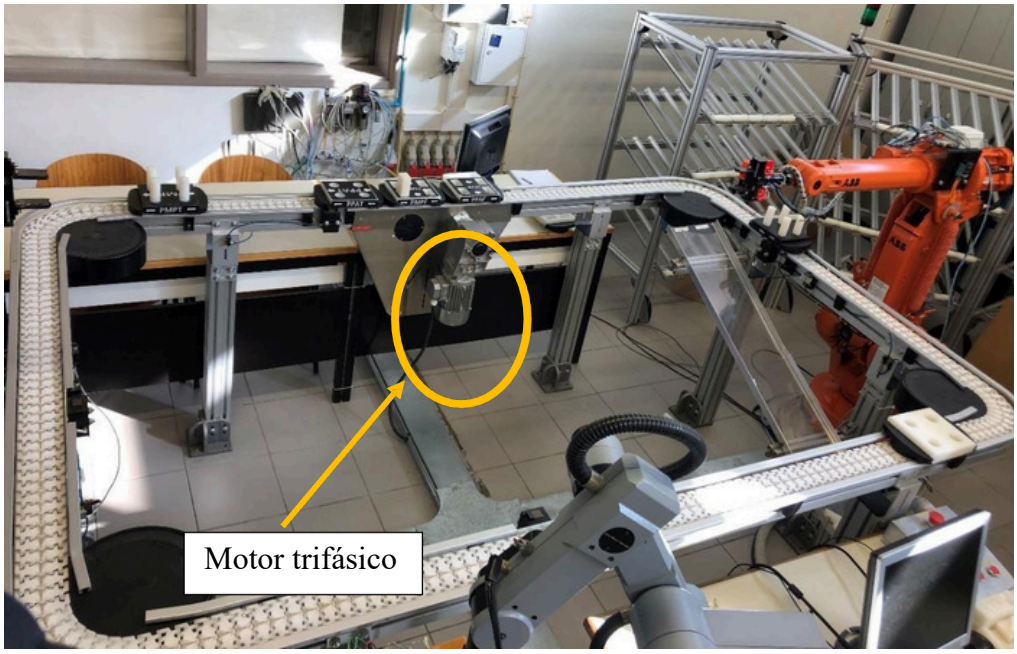
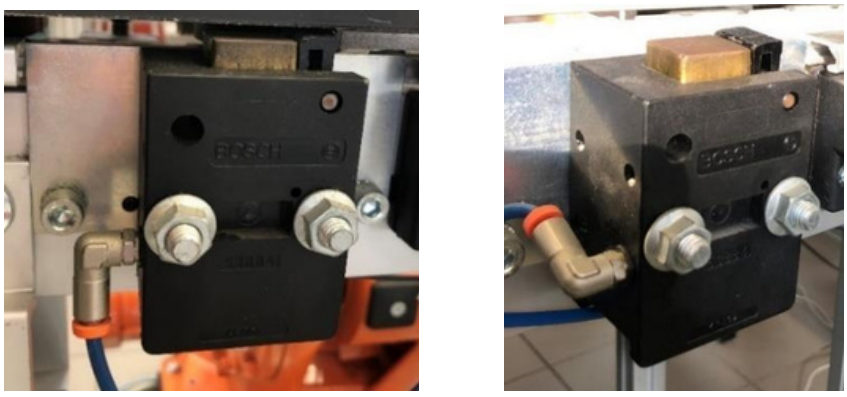


Figura 26: Sistema transportador da CFF.

3.4.1 *Stoppers*

Os *stoppers* ilustrados na Figura 27, são os dispositivos responsáveis pela paragem das paletes no setor de fabrico e no setor de transporte, e são controlados pelo PLC.



a) b)

Figura 27: *Stoppers.*

a) *Stopper* do setor de fabrico. b) *Stopper* do setor de armazenamento.

A Tabela 3 apresenta as saídas do PLC S7 1200 associadas a cada *stopper*.

PLC S7 1200	**Transportador - *Stoppers***
Q0.0	*Stopper* no setor de fabrico
Q0.1	*Stopper* no setor armazém
Q0.2	*Stopper* no setor auxiliar
Q0.3	*Stopper* no setor de montagem

Tabela 3: Saídas do PLC correspondentes ao *stopper* de cada setor.

3.4.2 Paletes de MP e PA

A Figura 28 ilustra uma das paletes que circula no tapete transportador e que tem como função realizar o transporte da matéria-prima do setor armazém para o setor de fabrico. Quando a palete é parada pelo *stopper* e inspecionada, o robô recebe a informação relativamente ao tipo de palete que tem sobre o tapete, bem como a quantidade de peças que nela se encontram, de forma a carregar ou descarregar a palete corretamente.

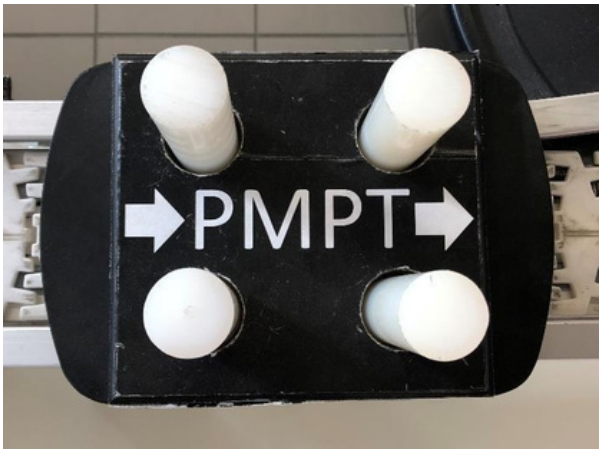


Figura 28: Palete matéria-prima torno.

Assim que o sensor 4 do setor armazém, correspondente à entrada I0.3 do PLC for ativado, o PLC dá ordem para o *stopper* do armazém subir, parando a palete que ativou o sensor. Neste momento, com a palete em repouso, o robô irá executar a inspeção à mesma, tema abordado mais à frente nesta Dissertação.

3.5 Sistema de segurança da CFF

Nos subcapítulos que se seguem, apresenta-se algumas considerações a ter em atenção quando nos encontramos em laboratório, pois esta informação pode ser-nos muito útil em caso de emergência, podendo assim evitarmos danos e acidentes.

3.5.1 Controlo e segurança da CFF

Uma vez que, na CFF do laboratório, estamos perante máquinas que podem colocar a nossa integridade física em causa, a segurança é um fator crucial no funcionamento do sistema. A célula do laboratório é constituída por vários dispositivos que permitem implementar a segurança não só do operador, mas também prevenir eventuais danos dos equipamentos.

No setor de fabrico existe uma botoneira, ilustrada na Figura 29, que permite ao utilizador parar o robô através do botão preto no caso de desejar parar a produção da célula. Tem também um botão de emergência, que quando pressionado, o robô imobiliza- se imediatamente, e por fim o botão "OK do operador".

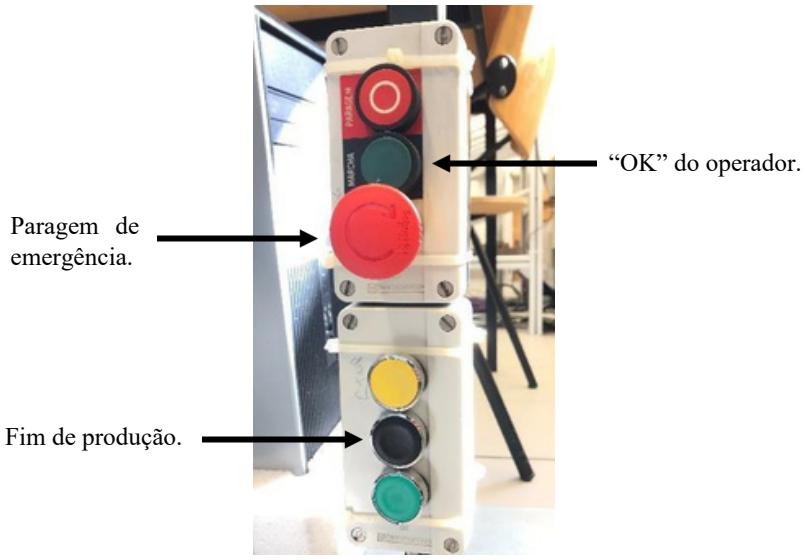


Figura 29: Botoneira do setor de fabrico.

No setor de armazenamento, também existe a botoneira, apresentada na Figura 30, com as mesmas duas funções do setor de fabrico, em que o botão verde representa o "OK" do operador, e o botão vermelho significa a paragem da produção do robô IRB 1400.

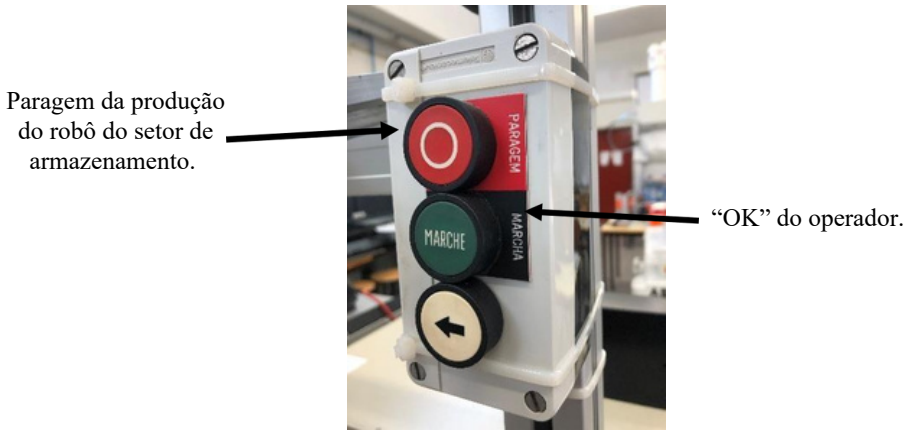


Figura 30: Botoneira do setor de armazenamento.

De forma a garantir a segurança dos operadores e dos equipamentos da CFF e utilizando os sensores já instalados, desenvolveu-se um programa que irá correr paralelamente ao programa principal, sendo definido como uma *multitask* no controlador do robô. A *multitask* tem prioridade sobre quaisquer outros programas a correr no controlador. Por exemplo, a ativação de um sensor ótico na CFF significa que alguém entrou no volume de trabalho do robô. Se o robô estiver em funcionamento, este pode colocar em perigo o operador que esteja naquela área a trabalhar.
Assim que as entradas DI10_1 e DI10_2, correspondentes às entradas dos sensores óticos 1 e 2 no controlador, forem ativadas, o manipulador deve parar imediatamente. Caso o programa que define os alarmes não fosse definido como *multitask,* só no fim da execução do programa principal é que o robô iria receber a informação da ativação dos sensores óticos, e só neste momento iria parar.

Na Figura 31, é possível observar os sensores óticos que detetam quando alguém entra no espaço de trabalho do robô, imobilizando o manipulador de forma a garantir a segurança das pessoas.

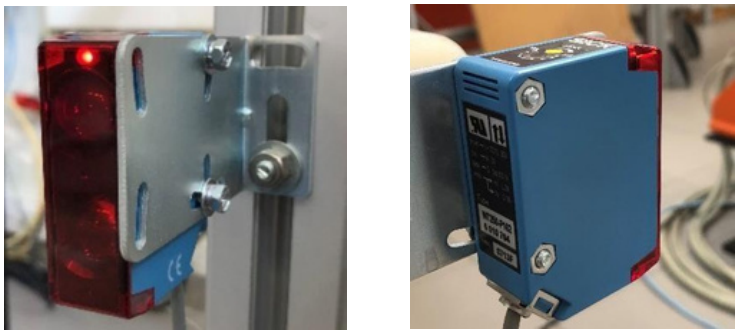


Figura 31: Sensores óticos de intrusão.

A verificação dos sensores é feita de duzentos em duzentos milissegundos. No caso de existência de algum alarme, é mostrado um aviso na *Teach pendant,* alertando o operador para a causa do alarme. Após verificadas todas as condições de funcionamento do robô, o operador pode dar ordem para que o equipamento prossiga o seu trabalho através do botão "OK", correspondente à entrada DI10_3.

O diagrama de blocos da Figura 32, representa o funcionamento da *multitask* desenvolvida correspondendo ao programa "Alarmes".

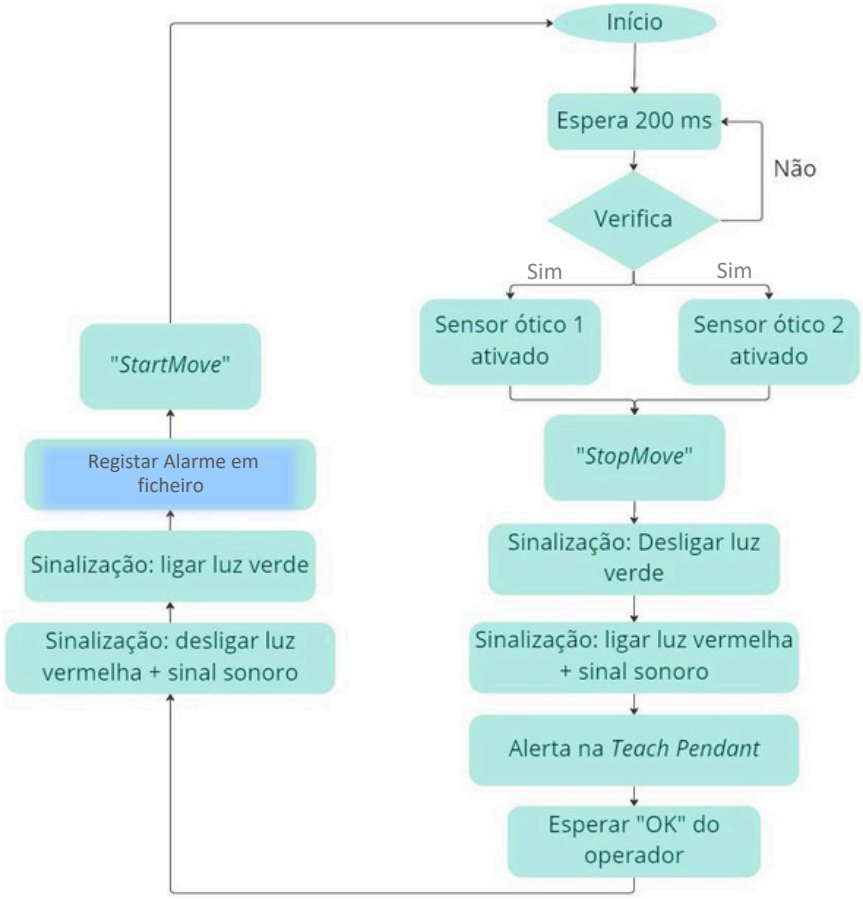


Figura 32: Diagrama de blocos da *multitask*.

Sempre que ocorre um alarme é registado num ficheiro a seguinte informação: número do alarme, a data e hora em que este ocorreu, qual dos sensores foi ativado e por fim, o tempo morto do robô, ou seja, o intervalo de tempo em que o robô se encontrou em repouso devido ao alarme. Na Figura 33, é possível observar a mensagem do alarme direcionado ao operador através da *Teach Pendant*.

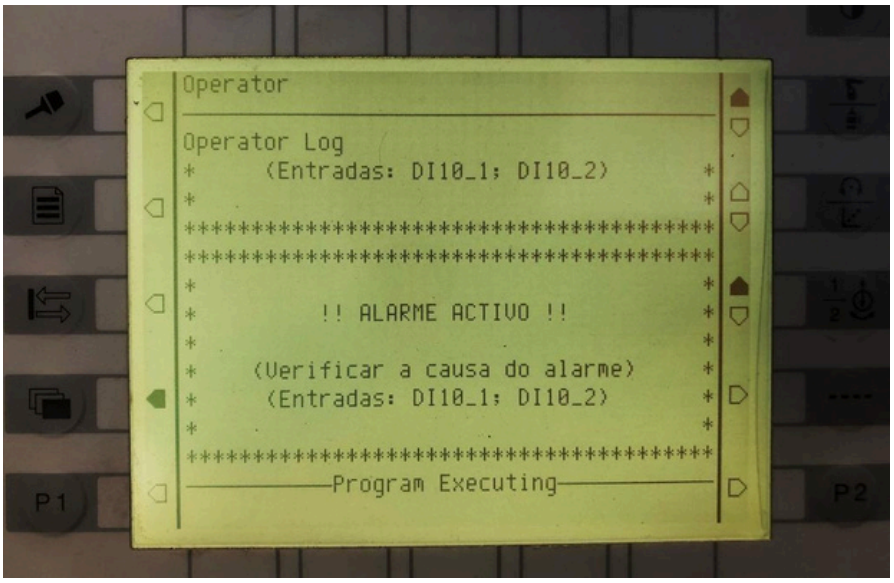


Figura 33: Mensagem do alarme direcionado ao operador.

3.5.2 Sistema de sinalização

A CFF está equipada com sinalização sonora e luminosa, tal como se encontra ilustrado na Figura 34. No laboratório de robótica encontra-se instalada uma baliza de sinalização com duas indicações luminosas: vermelho significa que o processo de fabrico está parado por algum motivo e o verde significa que a CFF se encontra a funcionar corretamente.



Figura 34: Baliza de sinalização luminosa e sonora.

3.6 Gestão da CFF

A função de gestor da CFF é desempenhada por um PLC S7 1200 modelo 1215C, que é responsável pela troca de informação entre o setor de fabrico, o setor de transporte e o setor de armazenamento, permitindo que todos os dispositivos do sistema comuniquem entre si. A Figura 35 apresenta o esquema do gestor da CFF utilizada neste projeto.

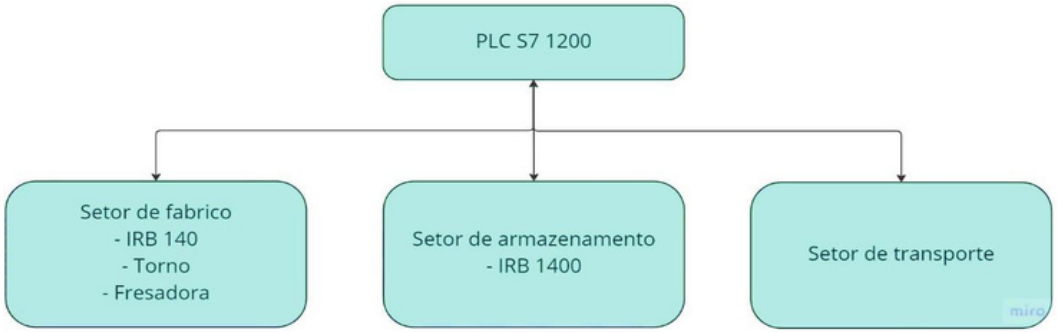


Figura 35: Esquema ilustrativo do gestor da CFF.

Ao PLC S7 1200 responsável pela CFF, ilustrado na Figura 36, encontram-se adicionados dois módulos I/O SM1223 da *Siemens*, de forma a conseguir expandir o número de entradas e saídas do PLC, uma vez que estas já se encontravam praticamente todas ocupadas.

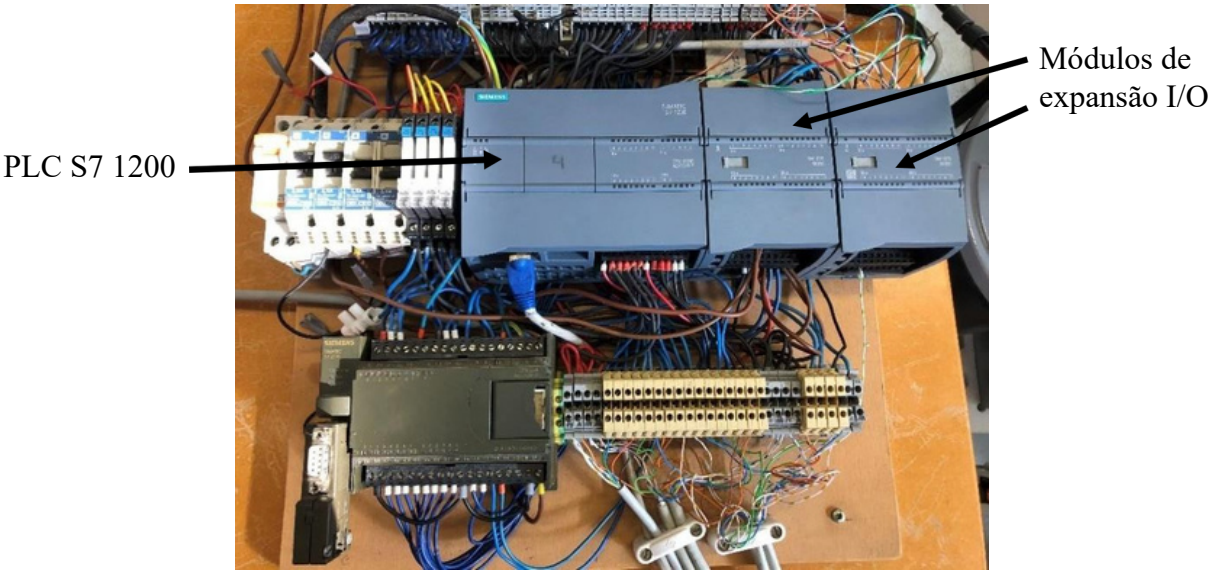


Figura 36: Gestor da CFF - PLC S7 1200.

Estes módulos de expansão, oferecem uma maior flexibilidade e versatilidade no que diz respeito à configuração e ligações físicas das portas. Além disso, permitem adaptar-se ao crescimento e mudança dos processos na CFF.

O software TIA Portal disponibiliza os módulos SM1223, apresentados na Figura 37. Para estes poderem ser utilizados basta procurá-los na secção de módulos de entrada/saídas DI/DQ.



Figura 37: Módulos de expansão SM1223 no TIA Portal.

Para as entradas são utilizados os *bytes* 0 e 1, correspondentes ao conjunto de entradas I0.0 a I0.7 e I1.0 a I1.7. Em relação às saídas do PLC, também são utilizados os *bytes* 0 e 1, para as saídas Q0.0 a Q0.7 e Q1.0 a Q1.7, respetivamente.

No módulo de expansão 1 foram utilizados os *bytes* 8 e 9 para as entradas e os *bytes* 42 e 43 para as saídas.

No módulo de expansão 2 foram utilizados os *bytes* 12 e 13 para as entradas do módulo e os *bytes* 44 e 45 para as saídas do mesmo.

É através destes endereços que é possível estabelecer a comunicação entre as entradas e saídas do autómato e do controlador do robô.

A Figura 38 apresenta a configuração das entradas e saídas do autómato, bem como dos módulos de expansão.

Module	Slot	I address	Q address
PLC_1	1		
DI 14/DQ 10_1	1 1	0...1	0...1
PROFINET interface_1	1 X1		
DI 16/DQ 16x24VDC_1	2	8...9	42...43
DI 16/DQ 16x24VDC_2	3	12...13	44...45

Figura 38: Endereços de memória do PLC e respetivos módulos de expansão.

3.7 Interface Robótica

A comunicação entre todos os dispositivos da CFF é possível devido à interface robótica apresentada no Anexo A, onde através das saídas do PLC conseguimos ativar as entradas do controlador dos robôs e vice-versa. Para o robô executar uma dada tarefa, temos de ativar as saídas do autómato, como por exemplo: o carregamento da Palete de MP da Fresadora é executado ativando a saída Q0.4 do autómato, que se encontra ligada à entrada DI10_12 do controlador, executando assim a rotina "rCarrega_PMPT". Após o robô executar o carregamento da palete, deve informar o autómato que já executou a tarefa, ativando a saída DO10_9 que se encontra ligada à entrada I1.0 do autómato.
Nas figuras que se seguem, é ilustrado o exemplo referido anteriormente, onde podemos ver o excerto do código de programação desenvolvido em linguagem *RAPID* - Figura 39, bem como a programação desenvolvida no TIA Portal, ilustrada na Figura 40.

```
!Materia-prima:
IF (DI10_12=1 AND bRobotLivre=TRUE AND bInspecao=TRUE) THEN
    bRobotLivre:=FALSE;
    rCarrega_PMPT;
    SetDO DO10_9,1; !Informa ao PLC (I1.0): PMPT carregada
    WaitTime 1;
    SetDO DO10_9,0;
    bRobotLivre:=TRUE;
    bInspecao:=FALSE;
    GOTO Inicio;
ENDIF
```

Figura 39: Código de programação da rotina "rCarrega_PMPT;".

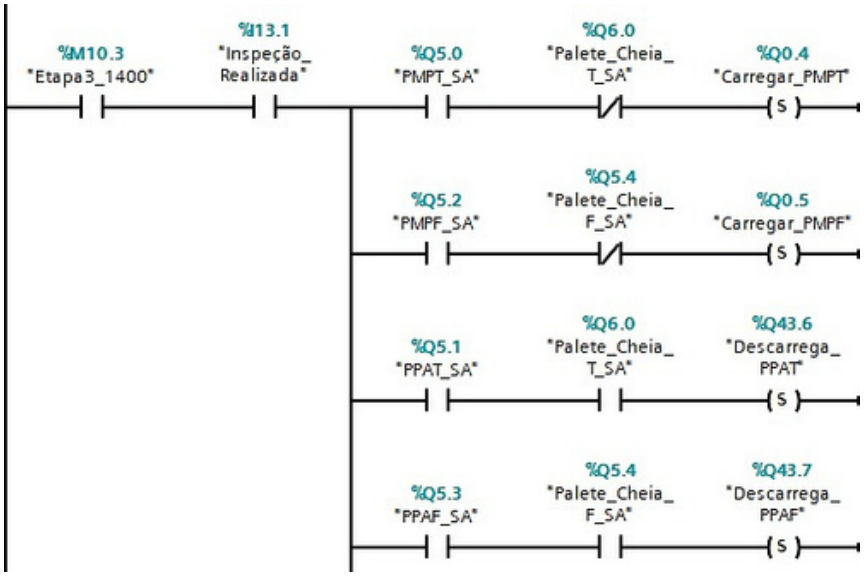


Figura 40: Código de programação no TIA Portal.

Tal como podemos ver na Figura 39, foram ainda criadas algumas variáveis booleanas:

- “bRobotLivre*”* / “bInspecao” – robô está livre / inspeção ao tapete transportador;

- “bInspecao_Pal” - Inspeção à palete (IRB 140);

“bInspecao_Buffer” – Inspeção ao *buffer* (IRB 140).

No robô IRB 1400 este problema não existe visto que o número de rotinas a executar não é consideravelmente elevado e o número de saídas do controlador é suficiente, mas no robô IRB 140 essa questão já se coloca.

4 Trabalho desenvolvido - elaboração da CFF

Ao longo deste capítulo é apresentado o trabalho desenvolvido, de forma a alcançar os objetivos propostos para esta Dissertação, que se concentra essencialmente na simulação da Célula Flexível de Fabrico (CFF).

4.1 Introdução

Inicialmente, começou-se por representar em desenho 3D a CFF do laboratório, de forma a poder iniciar algumas simulações, tal como é descrito nos capítulos 4.1 e 4.2. Ao mesmo tempo, foi sendo elaborado o código de programação *RAPID*, para o robô IRB 1400, que realiza o carregamento da Palete Matéria-Prima Torno (PMPT) e da Palete Matéria-Prima Fresadora (PMPF), o descarregamento da Palete Produtos Acabados Torno (PPAT) e da Palete Produtos Acabados Fresadora (PPAF), entre outras funções.

Ainda no que diz respeito ao setor de armazém, foi criado um ficheiro de produção que contabiliza o número e o tipo de paletes carregadas ou descarregadas, a data e hora em que ocorreram, bem como o tempo de cada palete. Indica ainda se a palete foi carregada com sucesso ou se faltou alguma peça, e qual. Estes ficheiros são importantes para perceber se existem erros na produção e se estes ocorrem repetidamente ou se são erros ocasionais.

Posteriormente, foi programado o robô IRB 140 localizado no setor de fabrico, que realiza a transferência das peças do transportador para os respetivos *buffers*, carregamento das máquinas – torno e fresadora, e por fim, transfere os produtos acabados novamente para as paletes PAT e PAF.

Para garantir a segurança das pessoas que circulam junto à CFF, ou que por motivos de distração entrem no volume de trabalho dos robôs e estes em funcionamento, foi desenvolvido um ficheiro "Alarmes", que funciona como *multitask*. Este programa encontra-se a ser executado simultaneamente com o programa principal, e no caso de os sensores óticos detetarem que alguém entrou na CFF, os robôs devem parar imediatamente e os sinais luminosos devem ficar encarnados. O colaborador tem à sua disposição uma botoneira onde existe o botão "OK do operador", que deve ser pressionado para que os robôs continuem o seu processo, caso se verifiquem as condições

de segurança. Além disso, o operador também pode pressionar o botão de emergência, caso identifique alguma situação anómala, corrigindo-a caso seja possível.

A integração e sincronização de todos os equipamentos que compõem a CFF é garantido pelo PLC S7 1200, que desempenha uma função de *master*, ao passo que os restantes dispositivos funcionam como *slaves*. Nesse sentido, procedeu-se à programação do PLC em linguagem *ladder*, com recurso a vários *grafcets*. Aqui, também se começou a equacionar a introdução do sistema de visão, disponíveis na ferramenta de trabalho de ambos os robôs, de forma a introduzir o conceito de visão artificial nesta Dissertação, tal como é apresentado ao longo do capítulo 4.5 [31] e [33].

4.2 Software de desenho - *SolidWorks*

O *SolidWorks*, desenvolvido pela *SolidWorks Corporation* e lançado no ano de 1995, é um software Desenho Assistido por Computador (CAD), que permite o desenho de objetos em 3D. É com recurso ao *SolidWorks* que são desenvolvidos partes dos elementos da CFF, tais como: armazém de peças, tapete transportador, bases dos robôs, entre outros.

Essencialmente, o funcionamento deste software baseia-se no *sketch* da peça em duas dimensões, num plano a definir, sendo que por defeito, o *SolidWorks*, fornece três planos: "*Top Plane*", "*Front Plane*" e "*Right Plane*". Além destes, podemos criar referenciais e definir novos planos de desenho da peça. A Figura 41 ilustra o menu do software de desenho utilizado neste projeto.

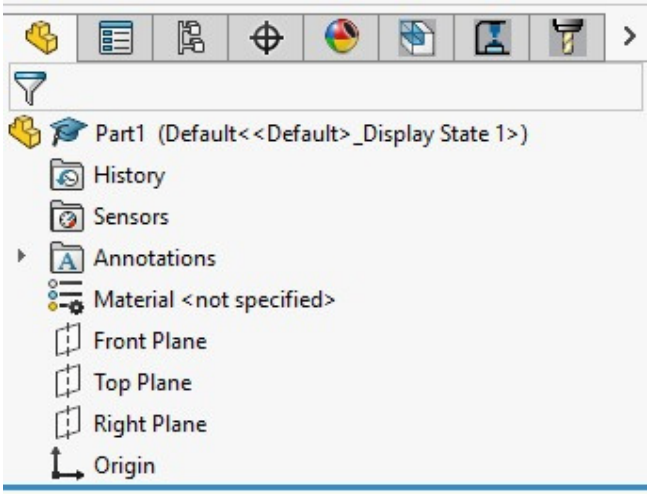


Figura 41: Menu *SolidWorks*.

Após o esboço da peça ou parte dela, a duas dimensões, através da instrução "*Features*" > "*Extruded Boss/Base*", é possível fazer a expansão do *sketch* para 3D, com as dimensões pretendidas, dando assim origem ao "*Boss-Extrude*" do esboço realizado anteriormente. Desta forma, é possível construir uma peça mais elaborada através da criação de planos e esboços. A Figura 42 mostra o menu principal do *SolidWorks*.

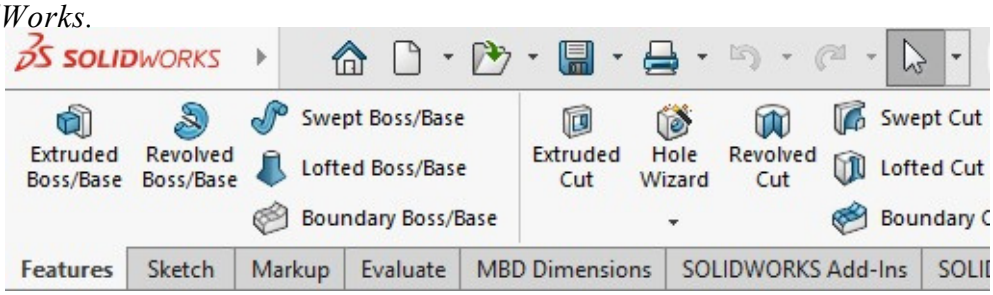
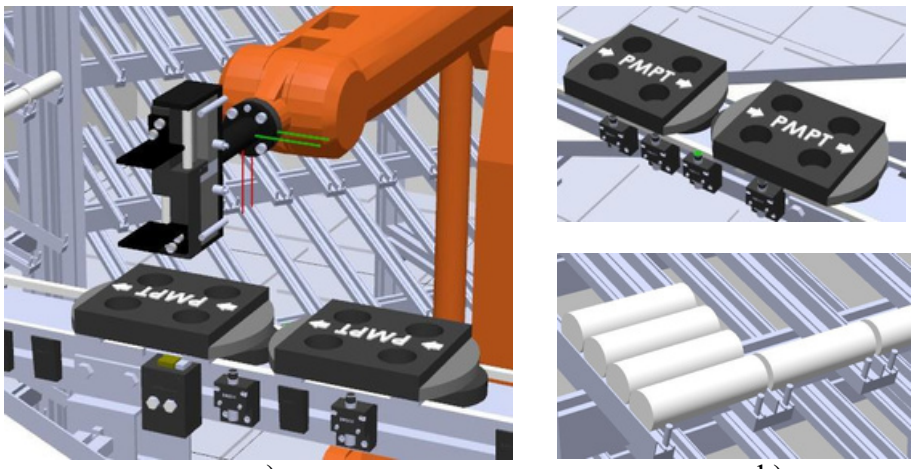


Figura 42: Menu principal do *Software SoliWorks*.

Concluída a peça ou objeto, o *SolidWorks* disponibiliza um mecanismo que permite exportar o ficheiro da mesma numa extensão que é compatível com o *RobotStudio* – extensão .SAT. Para que seja possível importar o objeto desenhado no software da ABB, basta ir à localização do ficheiro de simulação do *RobotStudio*, entrar na pasta "*Geometry*" e colocar aqui o ficheiro de extensão .SAT.

Com o objetivo de representar a CFF do laboratório, foram sendo desenhados os elementos que a constituem. Numa fase inicial, foram desenhados os elementos fundamentais para poder iniciar o processo de simulação da célula, apresentados na Figura 43, tais como o *gripper* dos robôs, matéria-prima e paletes, entre outros.



a) b)

Figura 43: Elementos desenvolvidos no software de desenho.

a) *Gripper* do robô IRB 1400. b) Paletes e matéria-prima do torno.

Posteriormente, foram elaborados os restantes elementos ilustrados na Figura 44, de forma que a representação da CFF seja o mais próximo possível da realidade. Na Figura 44 encontra-se representado em desenho 3D a máquina fresadora que existe na CFF do laboratório, bem como o robô IRB 140 e os *buffers* de Matéria-Prima (MP) e de Produtos Acabados (PA) onde se encontram as peças que são alvo do processo de maquinação, quer pelo torno, quer pela fresadora.

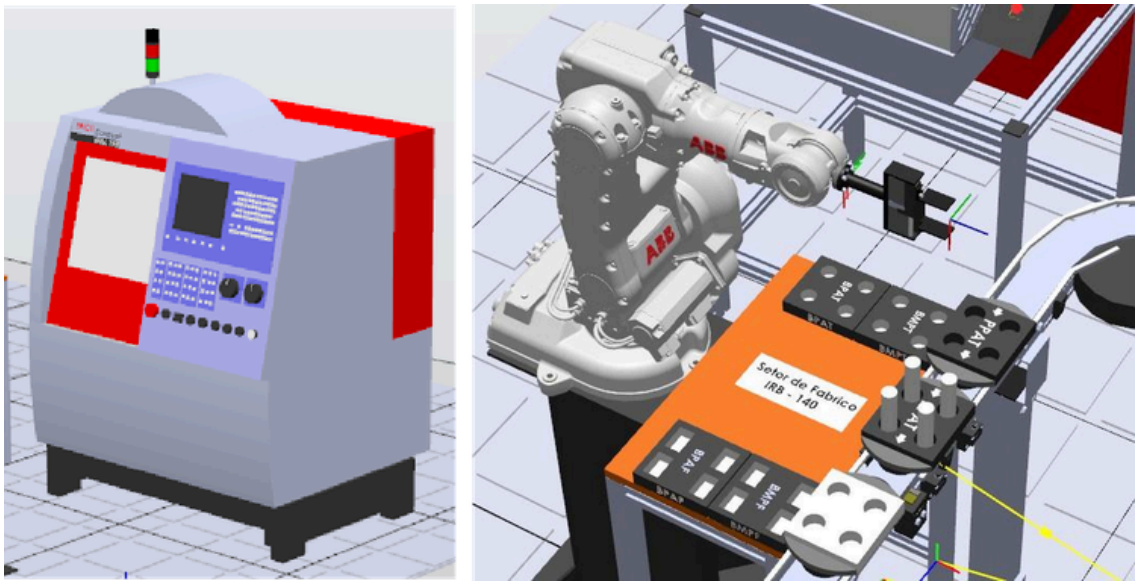


Figura 44: Representação da fresadora e *buffers* de peças no setor de fabrico.

Ainda no que diz respeito ao setor de fabrico, temos a representação do torno, que se encontra ilustrada na Figura 45.

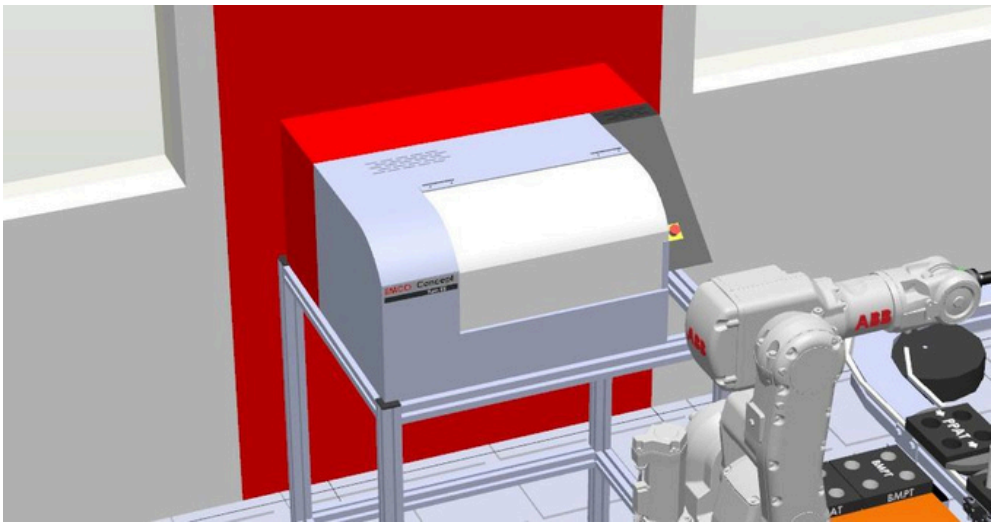


Figura 45: Representação do torno CNC da CFF.

Seguidamente, apresenta-se ilustrado na Figura 46, o setor de armazém, onde se situa o robô IRB 1400, que vai carregar as paletes existentes no transportador, com matéria-prima proveniente dos armazéns, e ainda realiza o descarregamento dos produtos acabados na rampa que se encontra situada à sua frente.

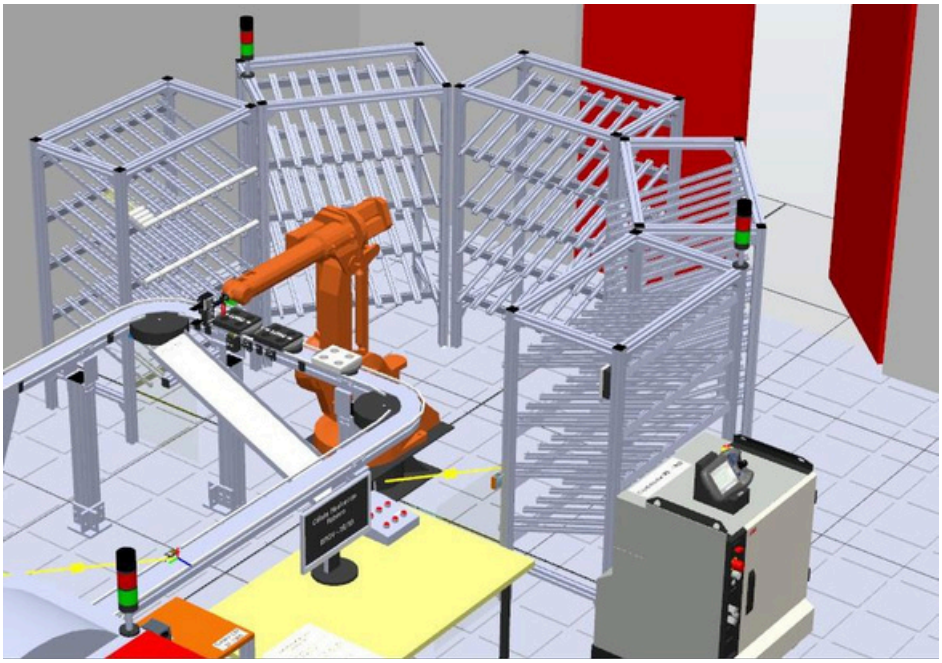


Figura 46: Representação do setor de armazém no *RobotStudio*.

Por fim, a Figura 47 mostra uma visão geral da CFF onde foram realizados testes de simulação e ensaios.

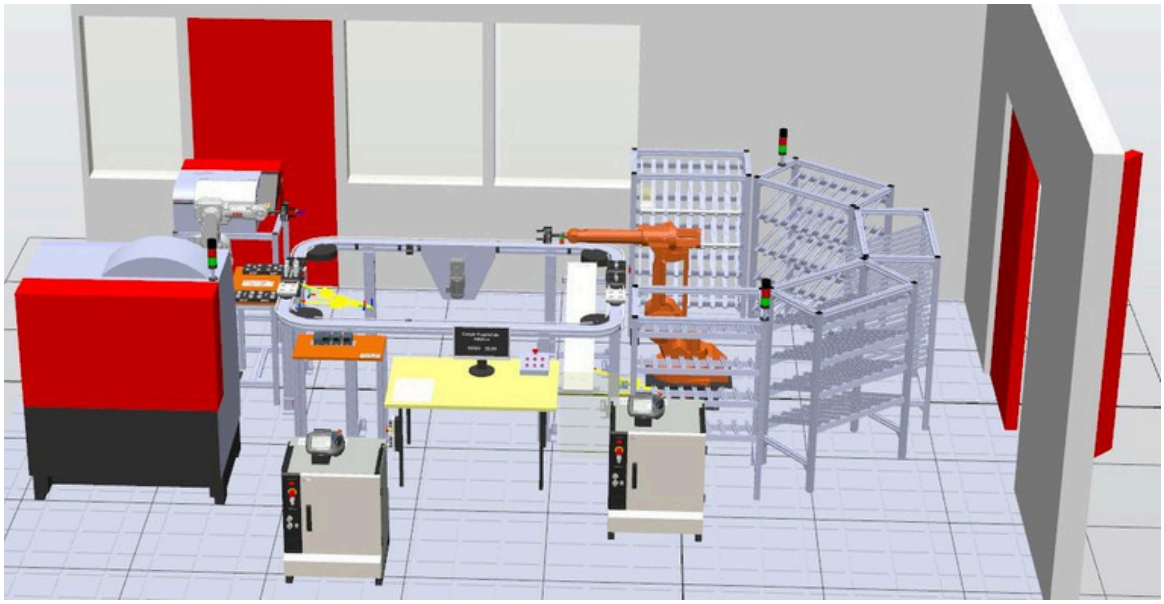


Figura 47: Visão geral da CFF no *RobotStudio*.

4.3 Introdução ao software *RobotStudio*

O *RobotStudio* é uma ferramenta de simulação e programação *off-line*, utilizado frequentemente no âmbito de aplicações em Robótica. Este software, permite a implementação de controladores virtuais que se tornam uma grande vantagem na Automação e Robótica, visto que é possível fazer uma simulação prévia do funcionamento de uma CFF, reduzindo assim tempos desperdiçado em testes e ensaios, sem prejudicar a produção [22].

O software da ABB, é disponibilizado pela Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu (ESTGV), através das licenças que se encontram instaladas no servidor cujo endereço IP é 192.168.0.4. Através da *Virtual Private Network* (VPN) da ESTGV, é possível realizar testes de simulação e trabalhar no *RobotStudio* a partir de casa.

Nesse sentido, começou a desenvolver-se código de programação que era simulado no *RobotStudio*, e posteriormente testado no laboratório, onde eram efetuados os ajustes necessários. A linguagem de programação utilizada é o *RAPID*, linguagem de alto nível, desenvolvida pelos fabricantes dos robôs da ABB, que se caracteriza por funções e instruções predefinidas.

A linguagem *RAPID* tem a grande vantagem de ser facilmente compreendida e a deteção de erros no código de programação ser mais rápida, visto que a linguagem é caracterizada por expressões intuitivas, tais como: *MoveJ*, *MoveL*, *MoveAbsJ*, *GoTo*, entre outras. A trajetória e o posicionamento do robô, no seu volume de trabalho, é definido pela posição do *Tool Center Point* (TCP), em função do sistema de eixos coordenados do robô. Além disso, os movimentos podem ser definidos como linear, não linear e absoluto e ainda é possível parametrizar a sua velocidade, em mm/s. Na Figura 48, apresenta-se um breve excerto, em linguagem *RAPID,* de algumas instruções devidamente comentadas, que serão fundamentais na programação dos robôs.

```
!Definição do Ponto de Repouso:
CONST jointtarget phome:=[[0,0,0,0,0,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];

!Definição de um ponto do tipo robtarget:
VAR robtarget pPontoExpriencia;

!Definição de um offset:
pPontoExpriencia:=Offs(phome,0,0,25);

!Executar movimento para pPontoExpriencia
MoveJ pPontoExpriencia,v200,z10,toolCFF;
```

Figura 48: Definição de pontos de referência na linguagem *RAPID*.

4.3.1 Interface do software

Numa fase inicial do contacto com o *RobotStudio,* foi necessário consultar o manual disponibilizado pela ABB, para perceber quais as finalidades dos menus do software. Desta forma, apresenta-se seguidamente uma breve explicação dos mesmos, onde se descreve a sua utilização ao longo deste trabalho [35].

4.3.1.1 "*Home*"

O Menu "*Home*", ilustrado na Figura 49, permite importar e instalar bibliotecas que não se encontrem no software, por defeito. No ícone "*Virtual Controller*", é possível adicionar um novo controlador ou um controlador já existente ao projeto.

Através da opção "*Import Geometry*", foram importados os componentes desenhados no software *SolidWorks,* de forma a tentar representar a CFF no *RobotStudio.* Nas restantes opções, podem ser criados conjuntos de trajetórias que definem um movimento, bem como a criação de ferramentas de trabalho e definição das suas características.

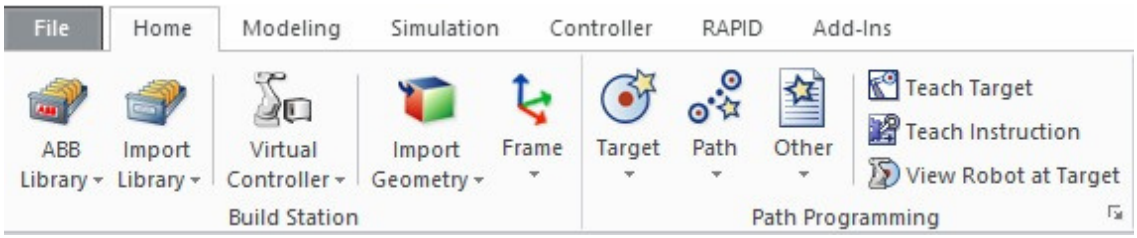


Figura 49: Menu "*Home*" do *SolidWorks*.

4.3.1.2 "*Modeling*"

No separador " *Modeling"* ilustrado na Figura 50*,* é possível criar os *Smart Components* que são "objetos *RobotStudio"* , através dos quais são definidos movimentos de objetos, por exemplo.

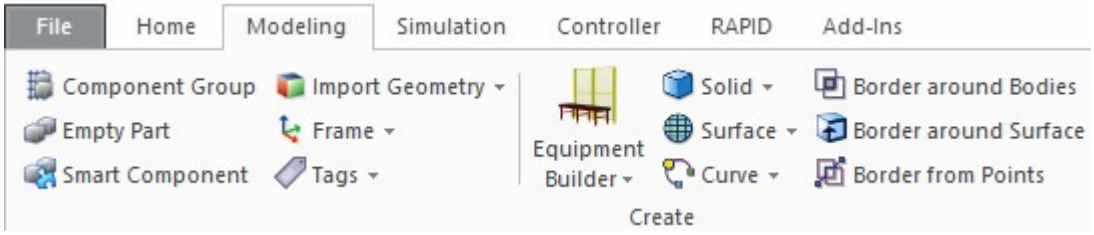


Figura 50: Menu "*Modeling*" do *SolidWorks*.

Foram criados vários *smart components* para a simulação da CFF, como por exemplo: a abertura e fecho das portas do torno e da fresadora, a movimentação das paletes sobre o tapete transportador, o movimento de rotação do *chuck* do torno, o deslizamento das peças sobre a rampa de produtos acabados, entre outros. Alguns dos exemplos mencionados anteriormente, serão descritos seguidamente.

O exemplo apresentado na Figura 51 diz respeito ao deslocamento de uma palete de matéria-prima com quatro peças desde o setor de armazenamento até ao setor de fabrico. Sobre cada uma das paletes que circulam sobre o tapete transportador, foram implementados quatro *Plane Sensors*, estrategicamente posicionados no local onde as peças são colocadas, de forma a conseguir detetar a sua presença na palete.

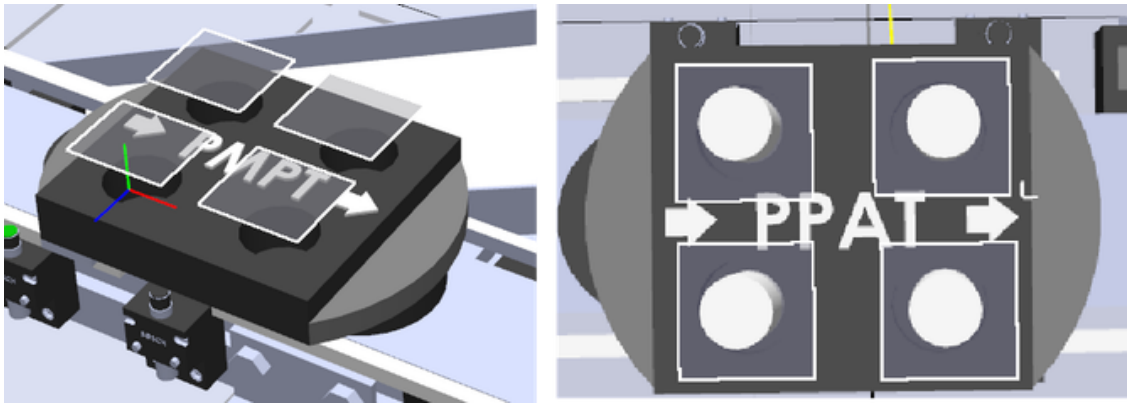


Figura 51: *Plane Sensors* instalados nas paletes.

Para definir um *Plane Sensor,* marcou-se a origem do mesmo no ambiente de simulação, bem como as dimensões nos respetivos eixos, de forma a criar a superfície que representa o sensor, tal como mostra a Figura 52. Quando o robô coloca cada uma das peças na palete, o *Plane Sensor* deteta a presença da peça e ativa a saída "*SensorOut*".

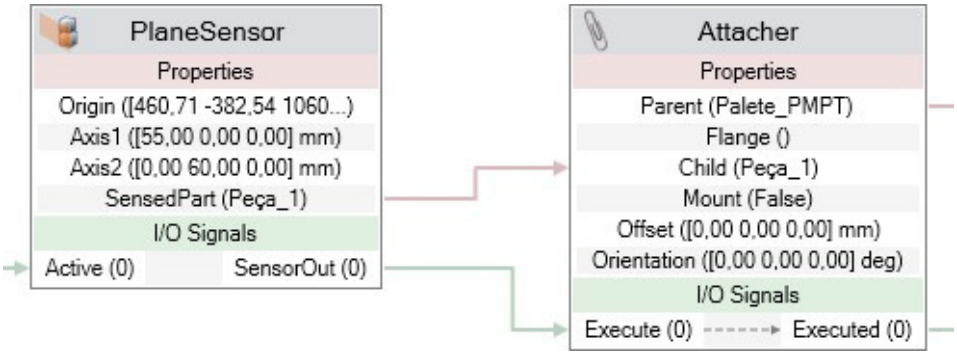


Figura 52: Desenvolvimento de *Smart Components*.

A razão pela qual não é utilizado apenas um sensor que abranja toda a superfície da palete é que cada *Plane Sensor* permite apenas detetar um único elemento, sendo que neste caso, apenas iria ser detetada a primeira peça a intersetar a superfície do sensor.

A mudança do estado logico de 0 para 1 da saída do *plane sensor,* ativa a entrada do componente seguinte que é um "*Attacher"*. Este tem como principal objetivo, a anexação entre dois elementos, o elemento "*Parent*" e o elemento "*Child*". No exemplo em concreto, o elemento *Parent* será a "Palete_PMPT" e o elemento *child* será as peças de matéria-prima. O processo de anexação das peças é igual para as quatro peças que irão ser transferidas para a palete e que posteriormente irão até ao setor de fabrico.

O passo seguinte consiste no deslocamento da palete do SA até ao SF, onde a palete será descarregada. Assim, para realizar esta deslocação, foram definidos cinco movimentos, dos quais três são lineares (1, 3 e 5) e dois são rotacionais (2 e 4), tal como mostra a Figura 53.

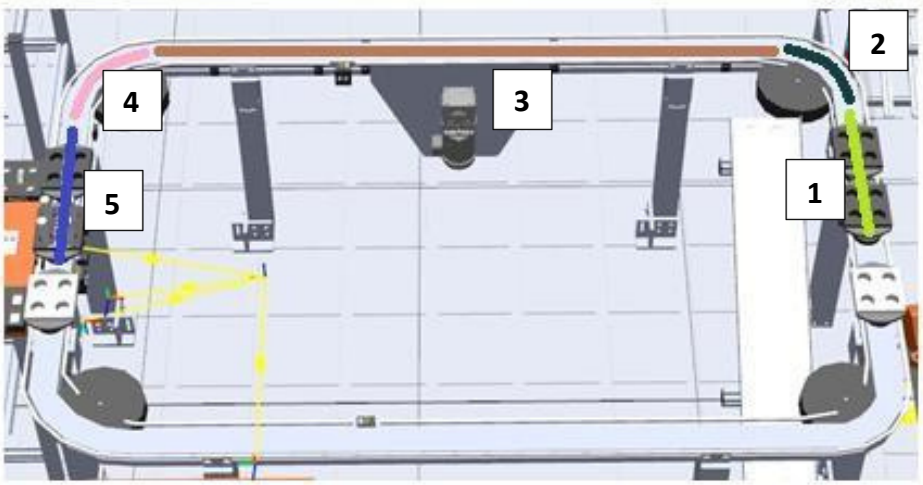


Figura 53: Sistema transportador.

Nos movimentos lineares é necessário definir o objeto ou conjunto de objetos que se devem movimentar – palete e matéria-prima -, a direção do movimento através dos eixos coordenados, a distância do movimento em milímetros, bem como a duração da respetiva deslocação. Nos movimentos rotacionais, é necessário indicar o elemento que se irá movimentar, bem como o centro de rotação e o eixo sobre os quais irá ocorrer a rotação, o ângulo do movimento, e ainda o tempo que este deve durar, em segundos. A Figura 54 mostra o conjunto de movimentos necessários para a deslocação da palete.

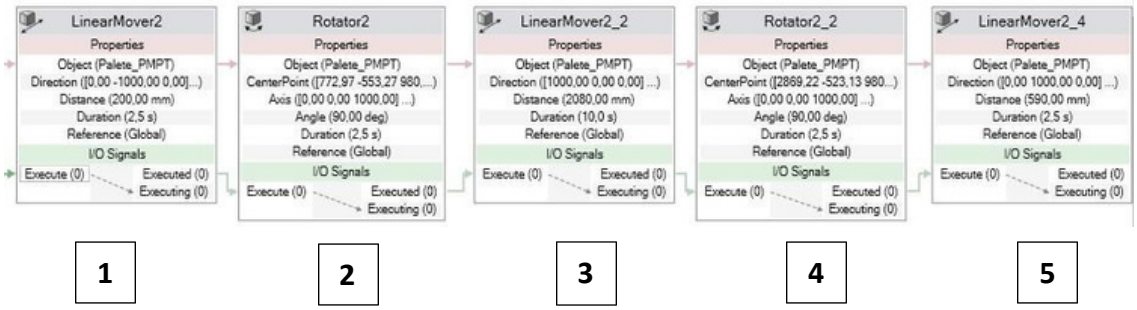


Figura 54: Conjunto de deslocamentos que permitem deslocar a palete do SA ao SF.

Os movimentos apresentados anteriormente, numerados de 1 a 5, ocorrem sequencialmente, de forma a simular o movimento da palete sobre o tapete. A simulação do *smart component* pode ser testada manualmente, tal como ilustra a Figura 55, sendo esta funcionalidade bastante útil no momento da programação, pois não é necessário estar a executar o programa no controlador para que ocorra a movimentação da palete, poupando-se bastante tempo.



Figura 55: Simulação manual do *Smart Component*.

Outro exemplo da utilização dos *smat components* neste trabalho é a abertura e fecho da porta do torno. Sempre que a saída do controlador DO10_4 for a 1, a entrada "Abrir_Porta_Torno" é ativada, sendo executado o movimento de rotação, que realiza a abertura da porta. Da mesma forma, o fecho da porta da máquina é ativado pela entrada "Fechar_Porta_Torno", sempre que a saída do controlador DO10_3 for a 1.

A Figura 56 demostra como é executada a abertura e fecho da porta do torno, no software *RobotStudio*.

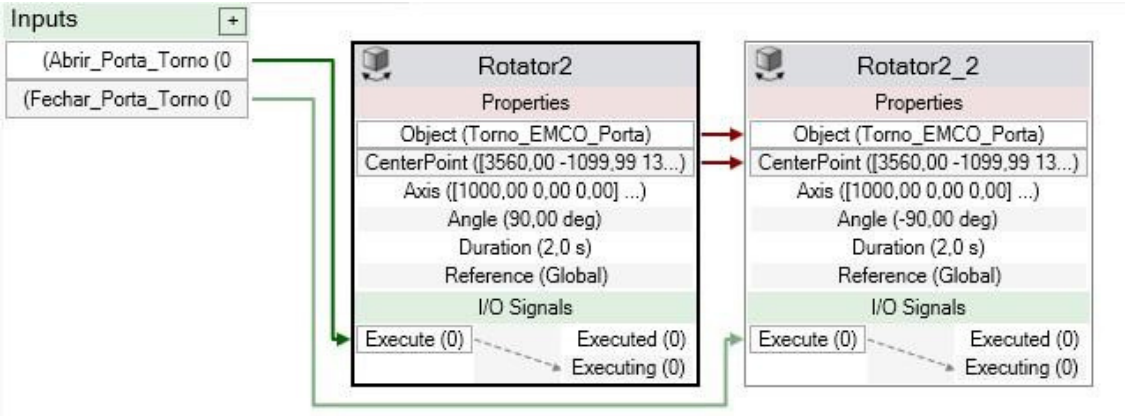


Figura 56: Simulação de abertura e fecho da porta do torno.

4.3.1.3 "*Simulation*"

O separador "*Simulation"* apresentado na Figura 57, tal como o próprio nome indica, permite realizar a simulação da programação elaborada na estação em que nos encontramos a trabalhar.

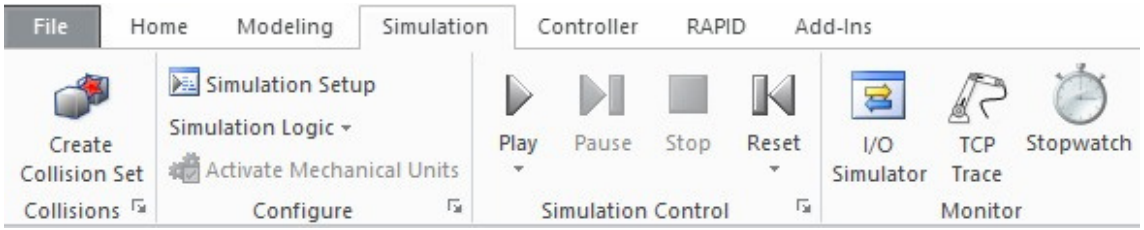


Figura 57: Menu "*Simulation*".

Na opção "*Simulation Logic*" indicada a verde na Figura 57, temos acesso à "*Station Logic*" que é basicamente onde as saídas do controlador permitem ativar ou desativar o funcionamento dos *smart components* criados.

A Figura 58 representa um pequeno excerto da *station logic* elaborada neste trabalho, no qual temos o controlador do robô IRB 140 e quatro *smart components*: abertura da porta do torno e da fresadora, sensor do *gripper* do robô e a simulação da maquinação da peça no torno CNC.

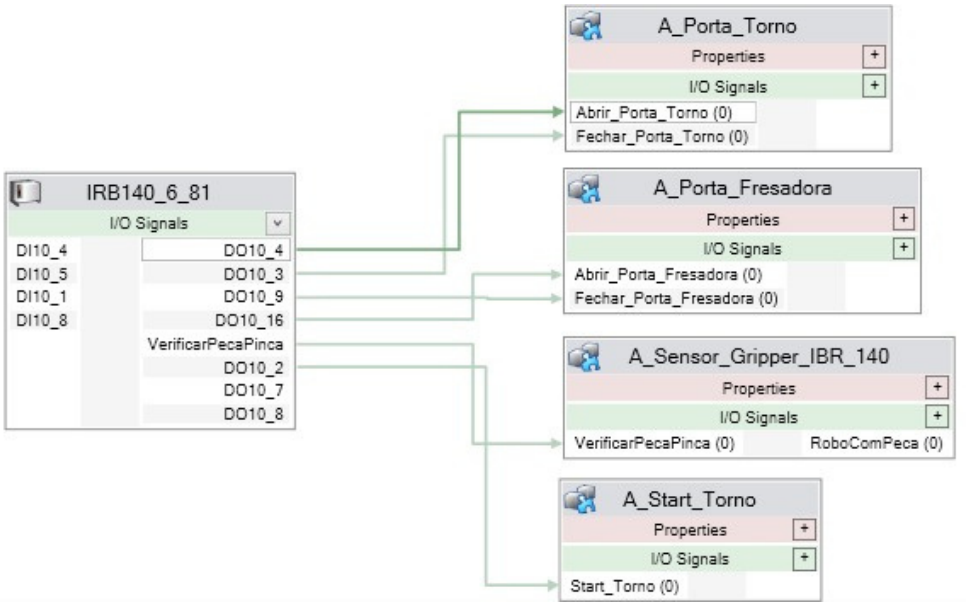


Figura 58: *Station Logic* no *RobotStudio*.

Destacar ainda o ícone "*I/O Simulator"* que permite criar uma lista personalizada de entradas e saídas que nos auxilia na fase da simulação, permitindo perceber se o programa está a funcionar ou não corretamente.

4.3.1.4 "*Controller*"

O separador "*Controller*" apresentado na Figura 59 já não diz respeito à programação e simulação dos robôs, mas sim ao controlador, tal como sugere o próprio nome.

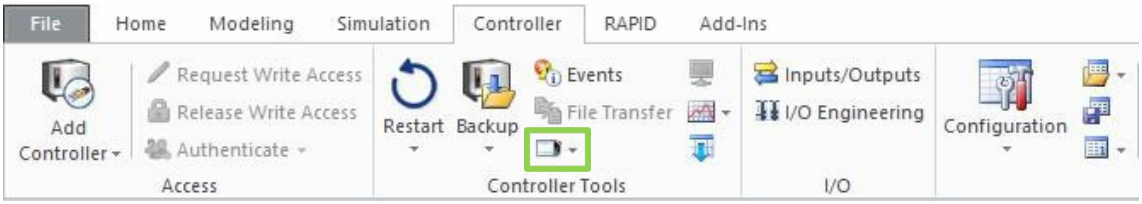


Figura 59: Menu "*Controller*".

Neste menu é possível adicionar um novo controlador à estação onde nos encontramos a trabalhar. Neste caso, foram apenas utilizados dois controladores: o do robô IRB 140 e o do IRB 1400. Aqui, devem ser criadas as mesmas pastas com os

mesmos nomes que no controlador real, de forma que não existam erros. A Figura 60 mostra o menu "*Controller"* no *RobotStudio.*

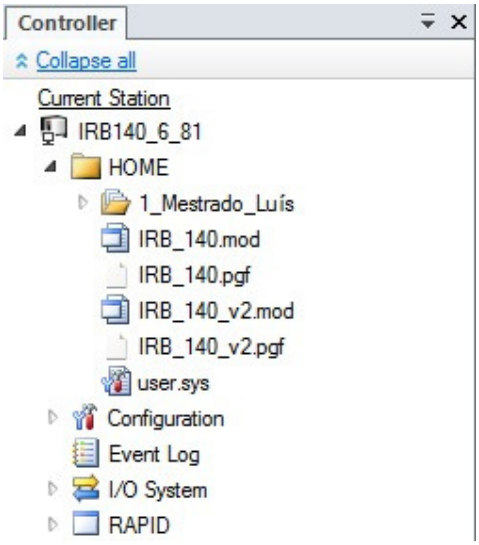


Figura 60: Menu "Controller".

O ícone indicado a traço verde na Figura 59, permite abrir a *TeachPendent* ilustrada na Figura 61, através da qual podemos executar vários tarefas entre as quais:

- Funcionamento do robô em modo manual através do *joystick*;

- Abertura dos programas a executar;

- Definição de *inputs* e *outputs;*

- *Buckup* e *Restore.*

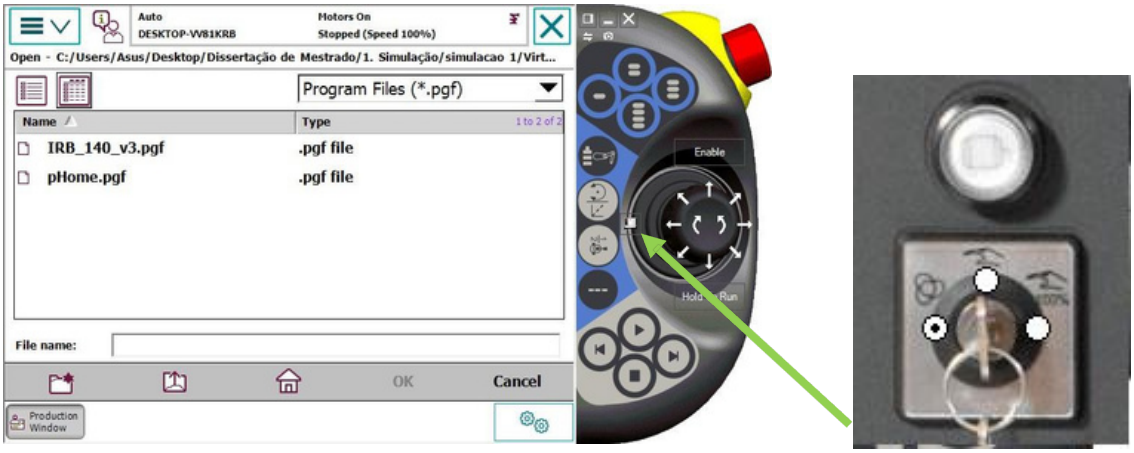


Figura 61: Visão da *Teach Pendent* no *RobotStudio*.

A *Teach Pendent* tem um ícone onde se pode colocar o robô em modo manual, e em modo automático. Possui também um botão que fornece potência aos motores, sendo que esta interface é idêntica à do controlador real.

Em "*Configuration > I/O System > Signal"*, é possível definir os *inputs* e *outputs* do controlador. No caso de serem realizadas alterações neste campo, deve ser feito um *restart* ao controlador, de forma que essas mudanças sejam efetivamente aplicadas. A Figura 62 mostra o menu através do qual foi possível configurar as entradas e saídas do controlador

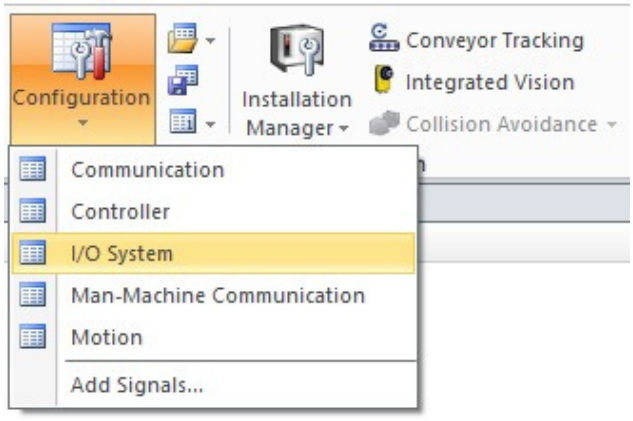


Figura 62: Definição de *inputs* e *outputs*.

4.4 Programação

Nos subcapítulos que se seguem, irá ser apresentada a programação desenvolvida em cada setor da CFF.

4.4.1 Setor de armazenamento

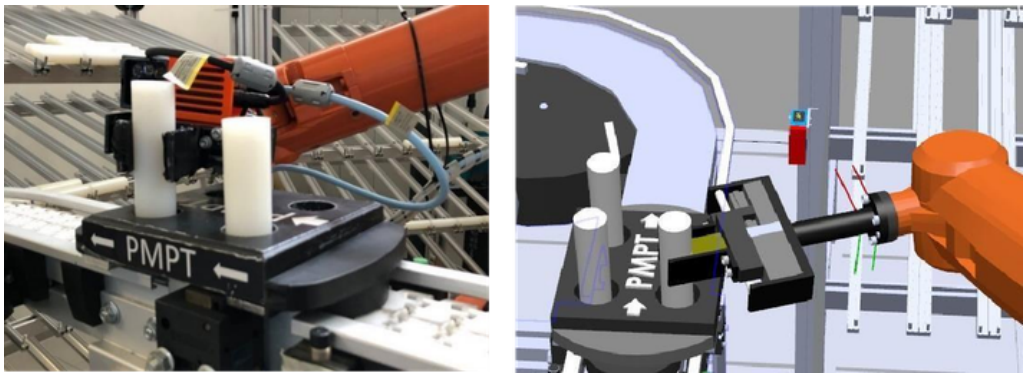
Nesta fase do trabalho, com o auxílio da simulação em *RobotStudio*, já se encontram programadas as rotinas que executam o carregamento e descarregamento das paletes que circulam no transportador. As rotinas são denominadas pelas seguintes designações:

- "rCarrega_PMPT" – Carregamento da PMPT;
- "rCarrega_PMPF" – Carregamento da PMPF;
- "rDesc_PPAT" – Descarregamento da PPAT;
- "rDesc_PPAF" – Descarregamento da PPAF.

Para que seja possível estabelecer a comunicação entre o robô e o PLC, é necessário conhecer a interface robótica disponibilizada no Anexo A. Esta comunicação é possível, uma vez que as entradas do PLC se encontram ligadas às saídas do controlador, e as saídas do autómato encontram-se ligadas às entradas do controlador.

4.4.1.1 Carregamento da palete de MP no armazém

Após identificado o tipo de palete, pode verificar-se se esta se encontra em condições para ser carregada. Por exemplo, uma palete matéria-prima do torno está carregada e chega ao setor armazém, se for identificado apenas o tipo de palete, é efetuado o seu carregamento, e em consequência as peças irão cair, visto que a palete está completa. Por esse motivo, foi necessário identificar o tipo de palete e quais as peças que nela se encontram. Na Figura 63 pode observar-se o carregamento da palete de MP no setor de armazenamento, e a respetiva simulação no *RobotStudio*.



a) b)

Figura 63: Carregamento da PMPT.

a) Carregamento da PMPT na CFF. b) Simulação do carregamento da PMPT.

No caso do robô se dirigir ao armazém de peças e na coluna à qual se dirigiu não existir matéria-prima, o robô percorre as oito colunas do armazém. Caso não encontre nenhuma peça, é enviada uma mensagem ao operador através da *Teach Pendent,* para avisar sobre tal ocorrência. O operador terá a possibilidade de tomar a decisão se deseja continuar e o robô irá percorrer novamente o armazém, ou em alternativa, o operador pode decidir que não deseja continuar e o robô regressa à posição de repouso.

A deteção de peça no *gripper* do robô foi feita através da combinação dos estados lógicos dos sensores indutivos, apresentados na Tabela 2. No caso de o robô ter detetado matéria-prima, tal como se encontra apresentado na Figura 17 c), o estado lógico do sensor indutivo 1 é 0 e do sensor indutivo 2 é 1.

Na Figura 64, é possível verificar que o robô se dirigiu ao armazém e nas duas primeiras colunas não encontrou matéria-prima para o carregamento da palete. No entanto, nas colunas que se seguem à posição onde o *gripper* do robô se encontra, já existe matéria-prima disponível.

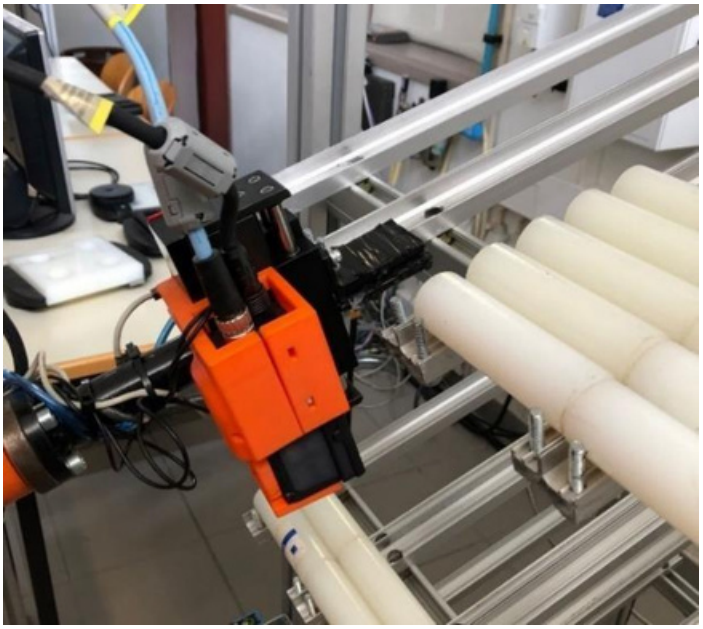
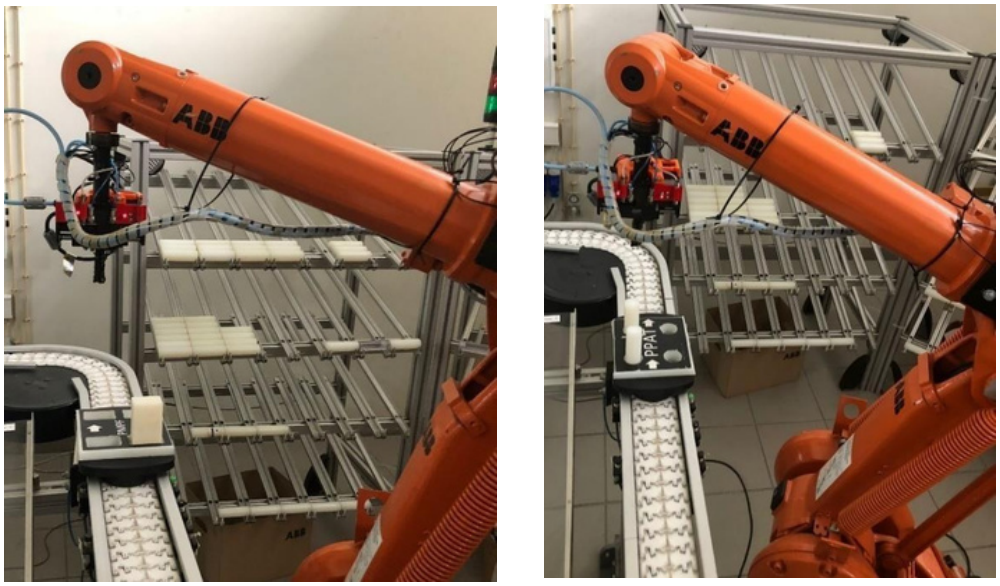


Figura 64: Ausência de peça na coluna dois do armazém.

O processo de carregamento de paletes de matéria-prima é precedido de uma inspeção à palete detetada pelo sensor 4 do sistema transportador, e parada pelo *stopper* do setor armazém. O sistema de visão instalado no *gripper* do robô recebe a indicação de efetuar o "*Trigger*", assim que este se encontra no ponto de inspeção "pCamara_SA". Após a inspeção do sistema de visão, este vai efetuar a corelação entre os dados adquiridos no momento do disparo, e as inspeções previamente definidas que se encontram disponíveis no Anexo C. A cada inspeção do sistema de visão encontra-se associada uma variável, sendo estas atualizadas a cada disparo da câmara. Caso o valor da correlação de uma ou mais inspeções seja próxima de 100, é feito um "*Set*" às respetivas variáveis, ao passo que se correlação for próxima de 0 é-lhes feito um "*Reset"*.

A Figura 65 mostra o momento de inspeção da palete, onde se identificam quais as peças que nela se encontram, e caso alguma peça esteja em falta, o robô completa a palete.

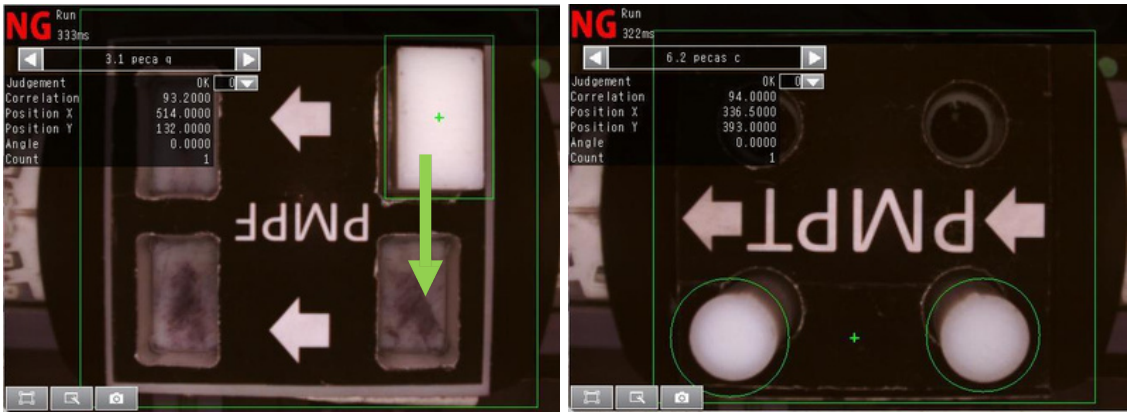


a) b)

Figura 65: Inspeção da palete no tapete transportador.

a) Inspeção PMPF com 1 peça. b) Inspeção PMPT com 2 peças.

As inspeções das paletes realizadas no exemplo da Figura 65, encontram-se ilustradas na Figura 66. Estas imagens foram obtidas pelo sistema de visão instalado no *gripper* do robô



a) b)

Figura 66: Inspeções às paletes.

a) Inspeção da PMPF. b) Inspeção da PMPT.

No exemplo da Figura 65 a) onde foi identificada uma PMPF com uma peça, o robô executa a correção do posicionamento das peças na palete, transferindo a peça para a posição da frente, tal como indica a seta representada na Figura 66 a). Sem este reposicionamento da peça, o robô iria ter dificuldades em colocar a peça em falta localizada à frente da peça que se encontra na palete. A Figura 67 mostra o robô a fazer a correção do posicionamento da peça na palete PMPF.

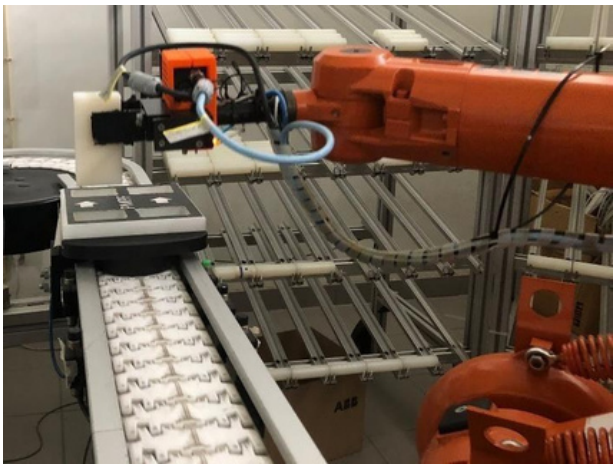


Figura 67: Correção do posicionamento das peças na palete.

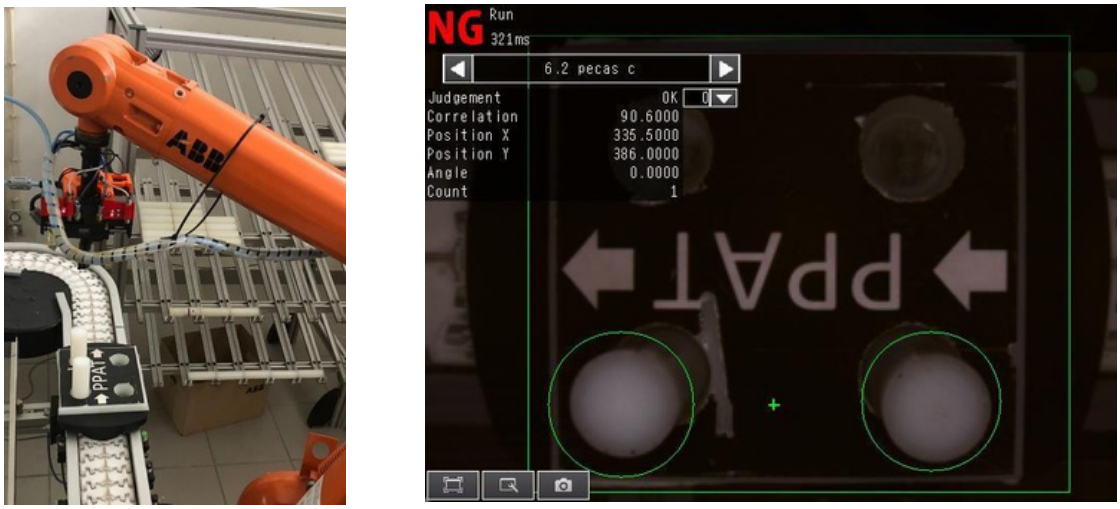
No exemplo da Figura 65 b), foi identificada uma PMPT com 2 peças tal como mostra a inspeção realizada na Figura 66 b), sendo que o robô efetua apenas o carregamento das duas peças em falta, completando assim a palete de matéria-prima.

4.4.1.2 Descarregamento da palete de PA

Após maquinadas as peças no setor de fabrico, estas regressam ao setor de armazém para serem colocadas na rampa de PA. O sistema de visão efetua a inspeção à palete de forma a identificá-la, e a verificar as peças que nela se encontram. Assim, o robô procede à transferência das peças da palete para a rampa, através da execução das rotinas "rDesc_PPAT" ou "rDesc_PPAF", e com o recurso aos pontos onde a peça será largada "pLargaPecaRampaT", "pLargaPecaRampaF", respetivamente.

Caso, por algum motivo, as paletes PPAT e PPAF se encontrem vazias, o autómato informa o transportador para descer o *stopper*, deixando a palete seguir.

O sistema de visão instalado no *gripper* do robô também é utilizado para identificar as peças nas paletes de produtos acabados, tal como mostra a Figura 68.

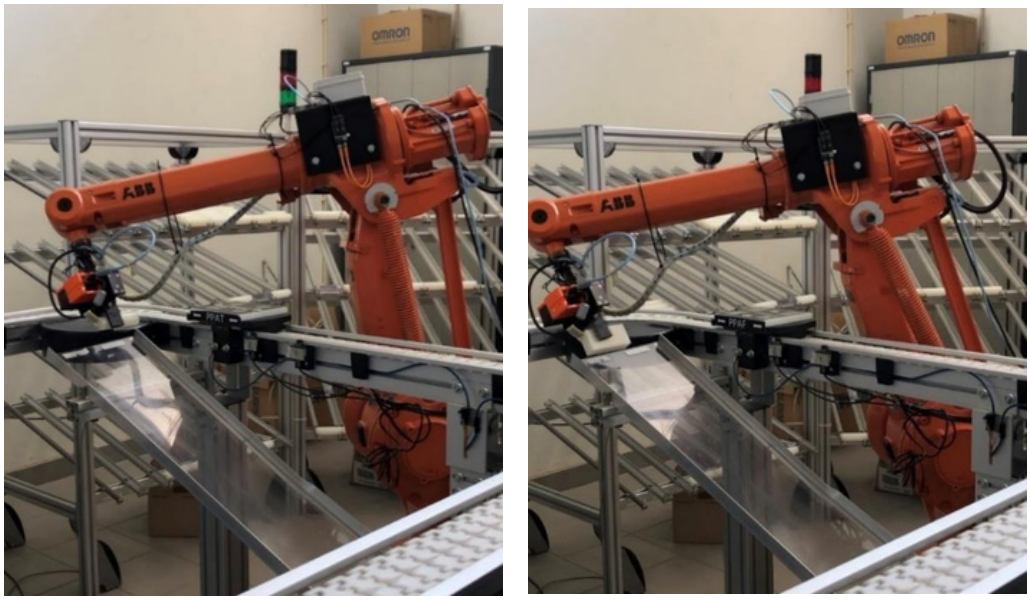


a) b)

Figura 68: Inspeção a PPAT.

a) Inspeção à palete PPAT. b) Identificação das peças existentes na palete.

Na Figura 69 encontra-se ilustrada a transferência de PA do transportador para a rampa, bem como os pontos onde as peças são largadas, para o torno e para a fresadora.



a) b)

Figura 69: Descarregamento de produtos acabados.

a) Descarregamento de PA Torno. b) Descarregamento de PA Fresadora.

4.4.2 Setor de fabrico

Nos subcapítulos que se seguem, apresentamos as várias etapas do funcionamento do setor de fabrico.

4.4.2.1 Descarregamento da palete de MP para os *buffers*

No setor de fabrico, à semelhança do setor de armazenamento, é necessário identificar o tipo de palete, bem como se esta se encontra ou não carregada. Essa verificação irá ser feita pelo sistema de visão que se encontra instalada no robô IRB 140.

Qualquer palete que circule no tapete transportador, é detetada e parada pelo *stopper* para que seja inspecionada. Após identificado o tipo de palete, MPT ou MPF, caso estas se encontrem carregadas, o robô executa a verificação dos *buffers*, e se estes estiverem vazios, segue-se a transferência da matéria-prima para os respetivos *buffers*. Caso estes se encontrem cheios, a palete deve prosseguir no tapete transportador. O carregamento dos *buffers*, é realizado com recurso às rotinas "rPMPF_Desc" e "rPMPT_Desc".

4.4.2.2 Carregamento das máquinas CNC

O carregamento das máquinas CNC é efetuado quando os respetivos *buffers* de matéria-prima se encontram cheios: "bBMPT = *True*" ou "bBMPF = *True*". Além disso foi ainda criada uma variável de controlo para cada uma das máquinas, de forma que seja possível saber se estas se encontram livres: "bTornoLivre" e "bFresaLivre". A Figura 70 apresenta parte do código da rotina de carregamento do torno.

```
!*****************************************************************************
!**********************   Carregamento do TORNO   ********************************
!*****************************************************************************
IF (bTornoLivre=TRUE AND nPecaMaqTorno<=3 AND bBMPT=TRUE AND bRobotLivre=TRUE) THEN
  SetDO DO12_11,1;
  rAtualizaBuffer;                !Atualiza estado dos buffers
  nPecaMaqTorno:=nPecaMaqTorno+1; !Incrementa variavel nPecaMaqTorno
  WaitTime 1;
  rCarregaTorno;                  !Executa o carregamento do torno
  SetDO DO12_11,0;
ENDIF
```

Figura 70: Rotina de carregamento do torno.

No que diz respeito à fresadora, o seu carregamento processa-se da mesma forma que o torno, sendo que apenas mudam os nomes das variáveis utilizadas, tal como apresentado na Figura 71.

```
!*****************************************************************************************
!*********************   Carregamento da FRESADORA   *************************************
!*****************************************************************************************
IF (bFresaLivre=TRUE AND nPecaMaqFresa<=3 AND bBMPF=TRUE AND bRobotLivre=TRUE) THEN
  SetDO DO12_11,1;
  rAtualizaBuffer;                  !Atualiza estado dos buffers
  nPecaMaqFresa:=nPecaMaqFresa+1;   !Incrementa variavel nPecaMaqFresa
  WaitTime 1;
  rCarregaF;                        !Executa o carregamento da fresadora
  SetDO DO12_11,0;
ENDIF
```

Figura 71: Rotina de carregamento da Fresadora.

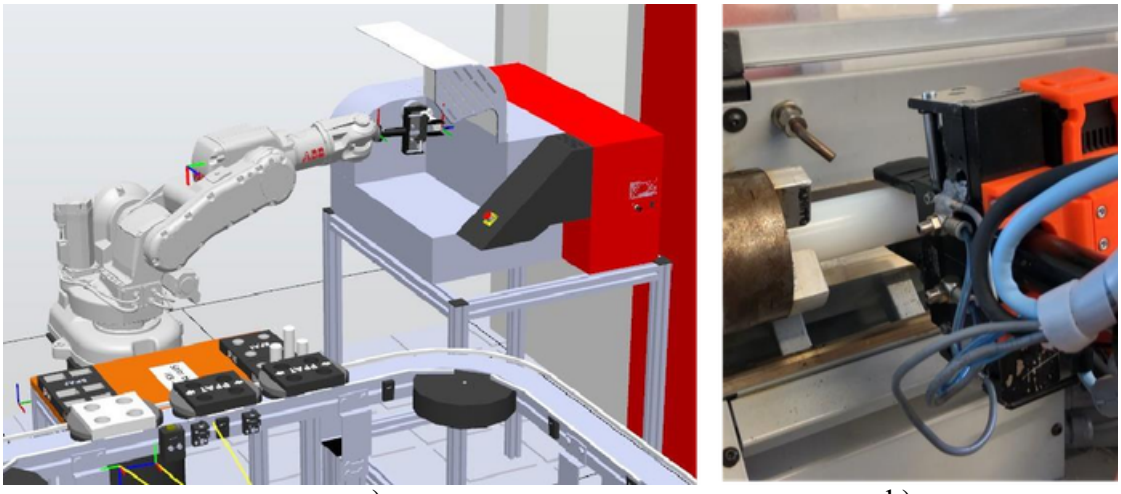
O processo de carregamento e descarregamento do torno, devido às dimensões do *gripper* do robô no qual ainda se encontra instalado o sistema de visão, deve ser rigorosamente programado, de forma a não danificar nenhum dos equipamentos envolvidos neste processo. Para isso, foi gravado com o auxílio da *Teach Pendant*, o ponto onde o robô coloca a peça no *Chuck* do torno - "pColPecaTorno" -, e foram ainda criados dois *offsets* deste ponto, de forma a auxiliar o movimento do robô na colocação da peça. Na Figura 72 podemos observar parte do código desenvolvido para a rotina de carregamento do torno CNC.

```
pInterTorno:=Offs(pColPecaTorno,25,-400,0);
pAproxTorno:=Offs(pColPecaTorno,25,0,0);
MoveJ pInterTorno,v500,z20,toolCFF;
MoveL pAproxTorno,v200,z10,toolCFF;
MoveL pColPecaTorno,v50,fine,toolCFF;
rFechaChuck;
WaitTime 0.5;
rAbrePinca;
MoveL pAproxTorno,v50,fine,toolCFF;
MoveL pInterTorno,v500,z20,toolCFF;
MoveAbsJ phome\NoEOffs,v1000,fine,toolCFF;
rFechaPorta;
rStartTorno;
MoveAbsJ phome\NoEOffs,v1000,fine,toolCFF;
```

Figura 72: Rotina de carregamento do Torno CNC.

Quando o robô alcança o ponto de colocação da peça, é dada a ordem para que o torno feche o *Chuck* através da rotina "rFechaChuck", onde a saída DO10_7 é colocada a 1. Passados 2,5 segundos, o robô abre o *gripper*, e sai do interior do torno, para que a peça seja maquinada, através da execução da rotina "rStartTorno".

Na Figura 73, encontra-se ilustrada a simulação do processo de carregamento do torno pelo robô no software *RobotStudio* e na Figura 73 b), o ponto gravado na CFF, onde o robô coloca a peça no *Chuck* – "pColPecaTorno".



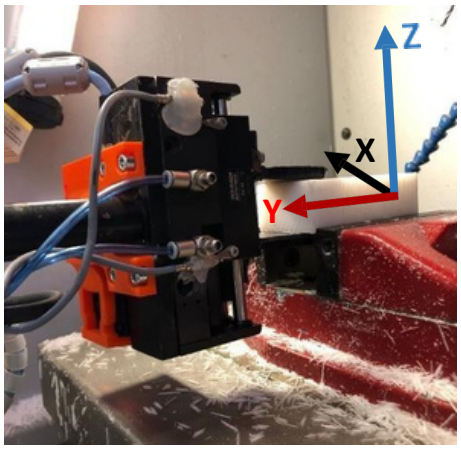
a) b)

Figura 73: Carregamento do torno.

a) Simulação do carregamento do torno no *RobotStudio.* b) Carregamento do torno CNC.

No que diz respeito à fresadora, também foi gravado com recurso à *Teach Pendent* o ponto onde o robô coloca a peça – "pColPecaFresa". Os restantes pontos necessários para o carregamento e descarregamento da máquina CNC, são *offsets* do ponto gravado, sendo o "pInterFresa" um ponto intermédio de aproximação à máquina, o "pAproxFresa" é um *offset* do "pColPecaFresa" que dista 50 milímetros no eixo do yy's, e por fim, o "pSobeFresa" que é um *offset* no eixo dos zz's de 50 milímetros.

Na Figura 74 encontra-se ilustrado um sistema de eixo coordenados para ser mais percetível o posicionamento dos pontos anteriormente referidos.




```
pAproxFresa:=Offs(pColPecaFresa,0,50,0);
pSobeFresa:=Offs(pColPecaFresa,0,0,50);
pInterFresa:=Offs(pColPecaFresa,0,400,100);
```

a) b)

Figura 74: Ponto de carregamento da máquina CNC.

a) Ponto de colocação da peça na fresadora. b) *Offsets* do ponto "pColPecaFresa".

4.4.2.3 Rotina de maquinação das peças

A maquinação da matéria-prima que ocorre nas duas máquinas CNC do laboratório é a parte mais crítica do funcionamento da célula, uma vez que temos três equipamentos a funcionar entre si: robô IRB 140, torno e fresadora.

De forma a evitar danos nos equipamentos e diminuir a probabilidade de ocorrência de acidentes entre os mesmos, foram criados alguns mecanismos de segurança, os quais são chamados de "condições iniciais". Estas, são um conjunto de condições que devem ser verificadas, garantindo o correto funcionamento e comunicação entre os dispositivos, tais como: verificar se o torno ou fresadora estão em alarme, e verificar a abertura e fecho da porta do torno e da fresadora;

O exemplo ilustrado na Figura 75 diz respeito à verificação do estado do torno, e caso o estado lógico da entrada DI10_8 seja 1, significa que a máquina está em modo de alarme, sendo que o operador deve verificar a causa que lhe deu origem.

```
!Torno em Alarme, nao pode maquinar!
IF (DI10_8=1) THEN
  TPErase;
  TPWrite "****************************************";
  TPWrite "*                                      *";
  TPWrite "*        !!TORNO EM ALARME!!           *";
  TPWrite "*                                      *";
  TPWrite "*   !!Verificar causa do alarme!!      *";
  TPWrite "*                                      *";
  TPWrite "****************************************";
  TPReadFK nEsc,"CONTINUAR?","SIM",stEmpty,stEmpty,stEmpty,"NAO";
  IF nEsc=1 GOTO verifica1;
  IF nEsc=5 EXIT;
ENDIF
```

Figura 75: Mensagem de torno em alarme para o utilizador.

O processo de maquinação da matéria-prima nas máquinas CNC, ocorre quando o robô se encontra livre e um ou ambos os *buffers* de matéria-prima se encontram cheios. Após a colocação da peça no torno e na fresadora, o robô executa as rotinas "rStartTorno" e "rStartFresa", respetivamente. Desta forma, as máquinas iniciam o processo de maquinação das peças.

O torno inicia o processo de maquinação, quando o *output* DO10_2 atinge o estado lógico 1, executando o programa 003 que se encontra na máquina CNC da CFF. O mesmo acontece na fresadora, onde se inicia a maquinação da peça, através do *output* DO10_13.

Na Figura 76 encontra-se o código da rotina "rStartTorno", e quando executada esta rotina, o operador recebe a informação de que o torno se encontra em funcionamento.

```
PROC rStartTorno()
  SetDO DO10_2,1;
  WaitTime 1;
  SetDO DO10_2,0;
  TPErase;
  TPWrite "****************************************";
  TPWrite "*                                      *";
  TPWrite "*                TORNO                 *";
  TPWrite "*                                      *";
  TPWrite "*         !! Em funcionamento !!       *";
  TPWrite "*                                      *";
  TPWrite "****************************************";
  TPErase;
ENDPROC
```

Figura 76: Mensagem de torno em funcionamento.

Após o carregamento da máquina CNC, é dada a indicação para ser iniciado o processo de maquinação das peças. O programa executado por cada uma das máquinas, é desenvolvido previamente, com o objetivo de efetuar uma ou mais operações sobre a matéria-prima.

Os programas de maquinação foram desenvolvidos com o recurso ao software MasterCam e posteriormente transferidos para as respetivas máquinas CNC. No desenvolvimento dos programas para as máquinas CNC, foram utilizados os conhecimentos adquiridos na Unidade Curricular de Sistemas Flexíveis de Fabrico.

No processo de maquinação das máquinas CNC, é necessário considerar os seguintes aspetos [15]:

- Material da peça: a dureza do material a maquinar é um fator importante no momento da maquinação da matéria-prima;

- Material da ferramenta: as velocidades de corte geralmente são dadas às ferramentas de forma a facilitar a maquinação;

- Tipo de operação (desbaste /acabamento): um acabamento de alta qualidade é conseguido através de avanços pequenos, com elevadas velocidades de corte;

- Vida do cortador: Os cortes mais profundos nas peças geram maior quantidade de calor, pelo que têm de ser feitos mais lentamente do que os cortes superficiais.

A velocidade de corte é dada pela seguinte equação:

$$VC = \frac{\pi * D * S}{1000}$$

onde:

- VC: Velocidade de corte em m/min (metros/minuto);

- D: Diâmetro da ferramenta;

- S: Velocidade de rotação (rotações por minuto).

4.4.2.4 Descarregamento das máquinas CNC

O processo de descarregamento das máquinas CNC, é efetuado com recurso a rotinas do tipo TRAP. Neste caso, foram criadas duas rotinas TRAP: "rTrapDescTorno" e "rTrapDescarregaF" para efetuar o descarregamento do torno e da fresadora, respetivamente. Estas são executadas através dos *interrupts* "int_DescTorno" e "int_DescFresa" que geram automaticamente uma fila FIFO, que é executada pela ordem que os *interrupts* foram gerados. A Figura 77 apresenta a definição das rotinas TRAP, bem como os *interrupts* correspondentes.

```
!***************************************************************************
!*******************  Definição das Rotinas TRAP   ***********************
!
!*************************   Torno  ************************************
IDelete int_DescTorno;  !Apagar a variavel de interrupcao "int_DescTorno"
CONNECT int_DescTorno WITH rTrapDescTorno;           !Chama a rotina TRAP
ISignalDI DI10_1,1,int_DescTorno;        !Ativa a variavel de interrupcao

!***********************   Fresadora  ************************************
IDelete int_DescFresa;  !Apagar a variavel de interrupcao "int_DescFresa"
CONNECT int_DescFresa WITH rTrapDescarregaF;         !Chama a rotina TRAP
ISignalDI DI10_12,1,int_DescFresa;       !Ativa a variavel de interrupcao
```

Figura 77: Definição das rotinas TRAP.

As rotinas TRAP são executadas assim que o respetivo *interrupt* seja ativado, o que podia dar origem a alguns problemas, como por exemplo: se o robô estiver a carregar o torno, e neste momento, a fresadora gerar um *interrupt* para ser descarregada. O que acontecia nesta situação, era que o robô não terminava o carregamento do torno e iria efetuar o descarregamento da fresadora imediatamente, adotando uma trajetória aleatória, podendo danificar algum dos equipamentos do setor de fabrico. Para resolver este problema, foram utilizadas as seguintes instruções *RAPID*: *IDisable* e *IEnable*.

No início de todas as rotinas do setor de fabrico é colocada a instrução "*IDisable"* que desabilita temporariamente as interrupções geradas. Após as rotinas serem executadas, voltamos a habilitar as interrupções através da instrução *"IEnable"*. Este sistema, garante que caso o robô se encontra a efetuar a inspeção a uma palete por exemplo, e sejam gerados *interrupts*, o robô termina o processo de inspeção e só posteriormente executa a fila FIFO.

O descarregamento quer do torno, quer da fresadora, é semelhante ao processo de carregamento, uma vez que os movimento a executar são os mesmos. A única diferença é na fresadora, uma vez que no carregamento, o ponto de aproximação ao ponto onde a peça é colocada é um *offset* no eixo do ZZ's (z = 50 mm), ao passo que no descarregamento o ponto de aproximação é um *offset* no eixo dos YY's (y =50 mm), pois se assim não fosse, o *gripper* do robô iria bater na peça que se encontra posicionada no *vice* da fresadora. A Figura 78 mostra o momento que antecede o descarregamento da fresadora.

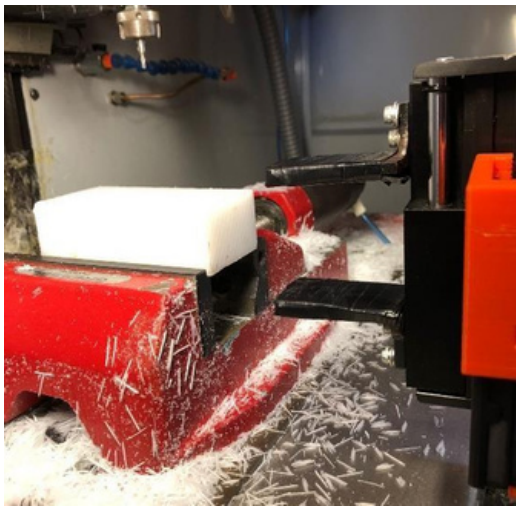


Figura 78: Descarregamento da fresadora CNC.

4.4.2.5 Carregamento da palete de PA

Após finalizado o processo de maquinação, o robô transfere os produtos acabados do *buffer* de PA, para a palete correspondente, para que estes sigam para o setor de armazém e sejam colocados na rampa. O carregamento das paletes de produtos acabados é executado através das rotinas "rCarrega_PAT" e "rCarrega_PAF".

Cada palete que passa no sistema transportador, junto ao setor de fabrico, é identificada e caso seja uma palete que este setor necessite, a palete será utilizada, caso contrário, segue o seu caminho ao longo do tapete.

Chegada uma palete de produtos acabados, PPAT ou PPAF, o robô identifica-a e caso esta se encontre vazia, é executada a inspeção aos *buffers* de produtos acabados correspondente, tal como mostra a Figura 79. Se algum destes se encontrar cheio, o robô executa o carregamento da palete, ficando assim o *buffer* vazio.

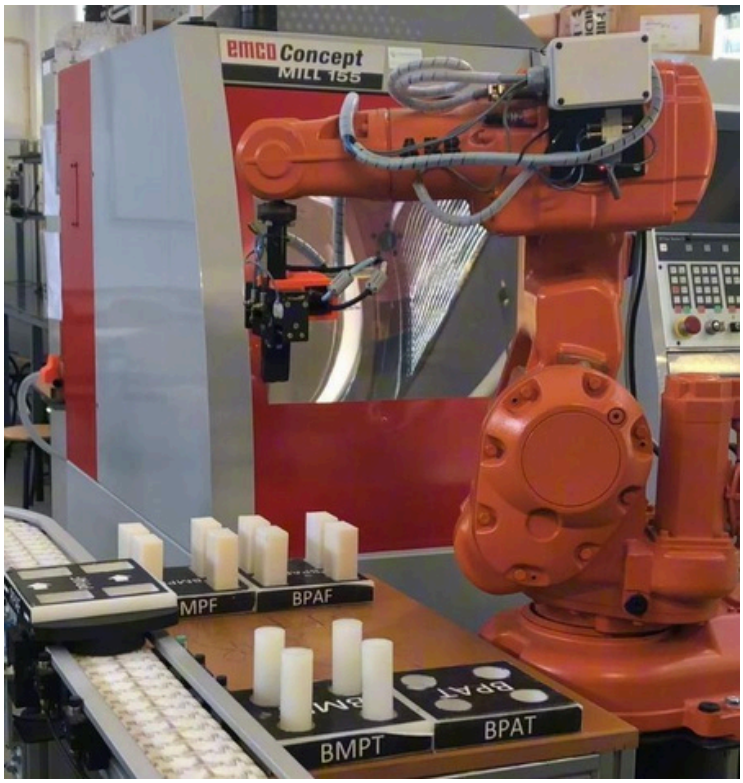


Figura 79: Inspeção ao *buffer* BPAF.

Antes de introduzir o sistema de visão artificial no âmbito deste trabalho, o controlo dos *buffers* – *buffer* cheio ou *buffer* vazio -, quer na matéria-prima, quer nos produtos acabados, era feito com recurso a uma variável booleana. Este método onde *buffer* cheio correspondia ao estado "*True"* da variável e *buffer* vazio correspondia ao estado "*False"*, tinha de ser cuidadosamente estudado, pois uma incorreta atualização das variáveis podia originar alguns problemas, como por exemplo, ser executado o descarregamento da palete de matéria-prima encontrando-se o respetivo *buffer* cheio. Com o sistema de visão, eliminamos definitivamente este problema, pois o robô ao realizar a inspeção ao *buffer*, sabe o seu estado naquele momento.

4.5 Sistema de visão computacional

Na indústria, um dos maiores desafios, é garantir a qualidade dos produtos, otimizar o processo de fabrico, e acima de tudo garantir a segurança de todos os colaboradores, bem como dos equipamentos.

A visão computacional é uma área científica cujo objetivo é conseguir com que os computadores tenham a capacidade de visão do ser humano, de forma a tomar decisões, consoante as situações com que se depara. Este tipo de sistemas possibilita que as máquinas, por exemplo um robô, conheça o meio que o rodeia, permite também realizar verificações de qualidade dos produtos, bem como tantas outras utilidades.

A visão computacional é utilizada em várias áreas tais como:

- Saúde: algumas empresas no ramo da saúde utilizam a visão computacional como uma ferramenta de trabalho, para processamento de imagens de exames como radiografias, tomografias, entre outros.

- Uso militar: os sistemas de defesa utilizam este tipo de tecnologia no reconhecimento de terreno, identificação de alvos inimigos, entre outras situações. - Indústria: a visão computacional é utilizada na indústria de forma a melhorar e otimizar os processos produtivos, reduzindo a necessidade de operadores perto das máquinas e diminuindo assim a probabilidade de ocorrência de acidentes. Estes sistemas conferem a um Sistema Flexível de Fabrico uma maior autonomia e otimização do processo de produção.

4.5.1 Sistema de visão da CFF

De forma a introduzir o conceito de visão computacional neste trabalho, e uma vez que nos robôs do laboratório já se encontram instaladas duas *smart* câmaras *OMRON* FQ2-S45100N, ilustradas na Figura 80, optou-se pela sua utilização. Estas foram utilizadas com o objetivo principal de identificar as paletes que circulam no transportador, de forma a diferenciá-las e consoante o seu tipo, executar o respetivo carregamento ou descarregamento. O sistema de visão também foi utilizado para verificar o número de peças existentes na palete e onde estas se encontram posicionadas.

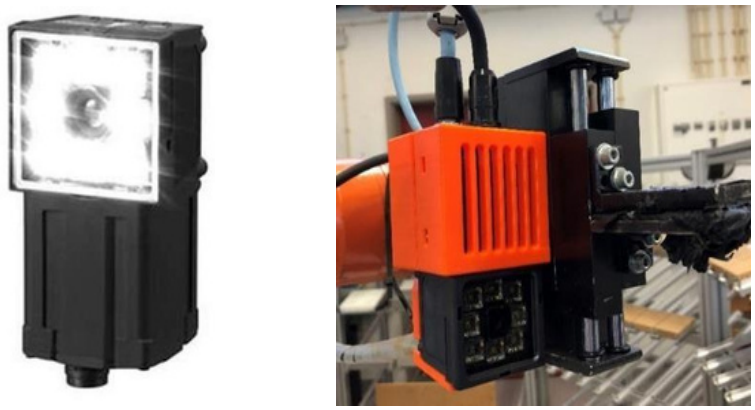


Figura 80: Câmara de visão FQ2 instalada na CFF.

A camara FQ2 da *OMRON*, suporta vários protocolos de comunicação, entre os quais: *EtherNet/IP*, *PLC Link* ou *Profinet*, sendo este último o meio de comunicação utilizado para estabelecer a comunicação entre o PLC, os robôs e as câmaras [33].

4.5.2 Integração entre as câmaras e o PLC

O sistema de visão estabelece comunicação com o autómato que gere a CFF, através da programação desenvolvida no TIA Portal. Neste software, foi necessário adicionar o autómato gestor da CFF – S7 1200 1215C AC/DC/Rly -, bem como os dois módulos de entradas/saídas (I/O) - SM 1223 DC/DC.

A *OMRON*, disponibiliza uma biblioteca da câmara FQ2 – arquivo GSD-, que foi instalada no TIA Portal, para que esta possa ser utilizada [25]. Tal como é possível observar na Figura 81, temos o autómato à esquerda, e os módulos que dizem respeito ao sistema de visão à direita, e o protocolo de comunicação *Profinet* ilustrado a traço verde.

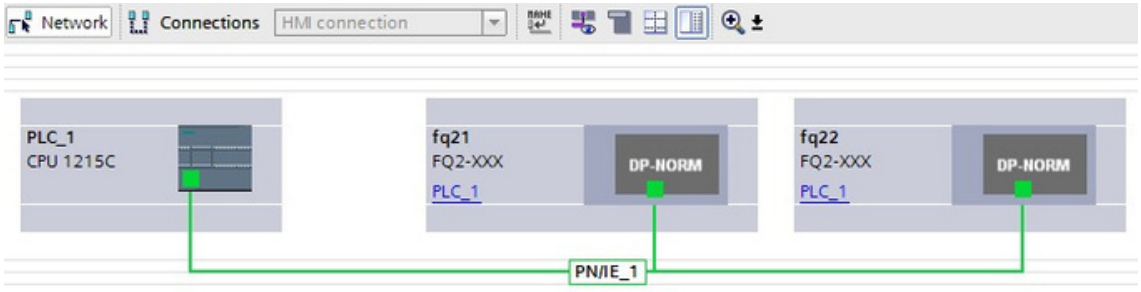


Figura 81: Comunicação entre PLC e Câmaras no TIA Portal.

Para adicionar o módulo do sistema de visão, é necessário ir ao separador "*Hardware catalog*", e no tópico "*Other field devices*", procurar "*Sensors*", onde aparece a biblioteca anteriormente referida, tal como ilustra a Figura 82.

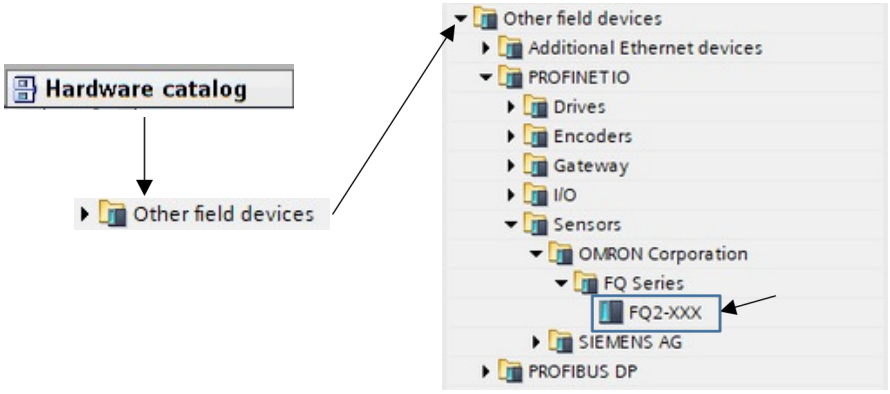


Figura 82: Adicionar a biblioteca da câmara FQ2 no TIA Portal.

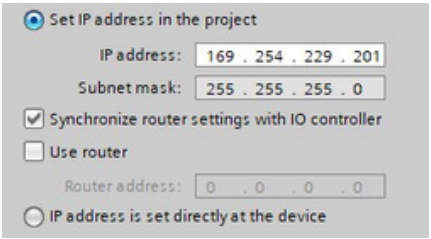
Alguns aspetos tidos em conta, relacionados com as configurações dos dispositivos são os seus nomes e respetivos endereços IP. Em laboratório, foram atribuídos os seguintes endereços IP:

- PLC S7 1200: endereço 169.254.229.200;

-Câmara FQ2 (SA): endereço 169.254.229.201;

- Câmara FQ2 (SF): endereço 169.254.229.202.

Os endereços IP foram definidos de forma manual para não originar erros de comunicação, tal como ilustra a Figura 83.



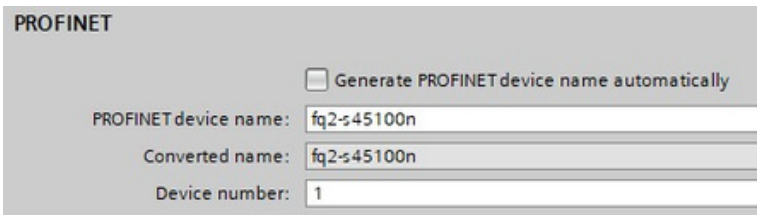


Figura 83: Definição do endereço IP e do nome da câmara.

4.5.3 Parametrização do sistema de visão FQ2

A *OMRON*, fabricante do sistema de visão existente nos *grippers* robôs da CFF, disponibiliza o software *TouchFinder*, através do qual é possível realizar várias funções / parametrizações apresentadas a seguir [33]:

- Permite aceder às definições do sistema de visão, tais como: definir o tipo de comunicação pretendido, definir o seu endereço IP, ter acesso ao seu histórico de erros, entre outras opções;

- O sistema de visão, ligado a um computador através de um cabo de rede, fornece ao utilizador a imagem em tempo real, o que nos permite ajustar a zona de inspeção pretendida, bem como posteriormente, ensinar a câmara – "*Teach*";

- Na secção de inspeção, é possível definir o tipo de inspeção, a área de inspeção na qual estará o elemento a identificar, o formato desse elemento, o valor da correlação bem como o respetivo ajuste.

Os tipos de inspeção do sistema de visão são vários, tais como: *Search*, *Shape Search*, *Color Data*, *Edge Width*, *AreaI*, entre outros. No âmbito deste trabalho, o tipo de inspeção utilizado foi o "*Search"*, uma vez que é necessário identificar as diferentes siglas das paletes, tornando-se assim este o tipo de inspeção mais adequado.

A Figura 84 exemplifica alguns conceitos referidos anteriormente. Um deles é o conceito de zona de inspeção, a traço verde, que faz o contorno da superfície da palete que se encontra no tapete transportador.

O elemento a detetar na imagem através do tipo de inspeção "*Search*", é a sigla PMPT, também contornada a traço verde. Nos dados que o sistema de visão disponibiliza ao operador, é possível verificar que o *Judgement*, ou Julgamento, é "OK", e que o valor da correlação é muito próximo de 100. Além disso, disponibiliza ainda informação da posição (x, y), bem como o valor do ângulo.

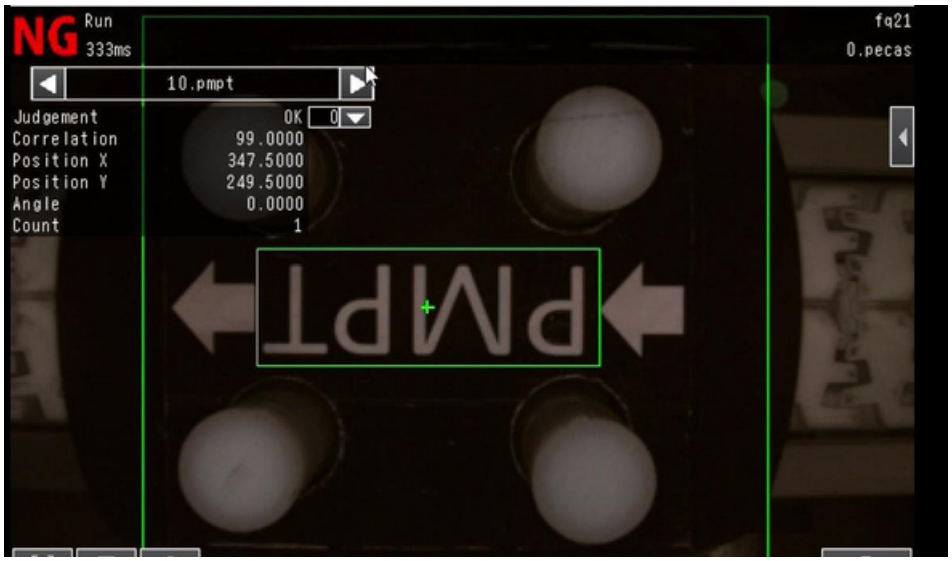


Figura 84: Identificação da sigla PMPT com correlação OK.

Na Figura 85, o objetivo é identificar a sigla PPAT, no entanto, como esta não é correspondente, o *judgement* é *Not Good* (NG), sendo o valor da correlação muito baixo, na ordem dos 18.

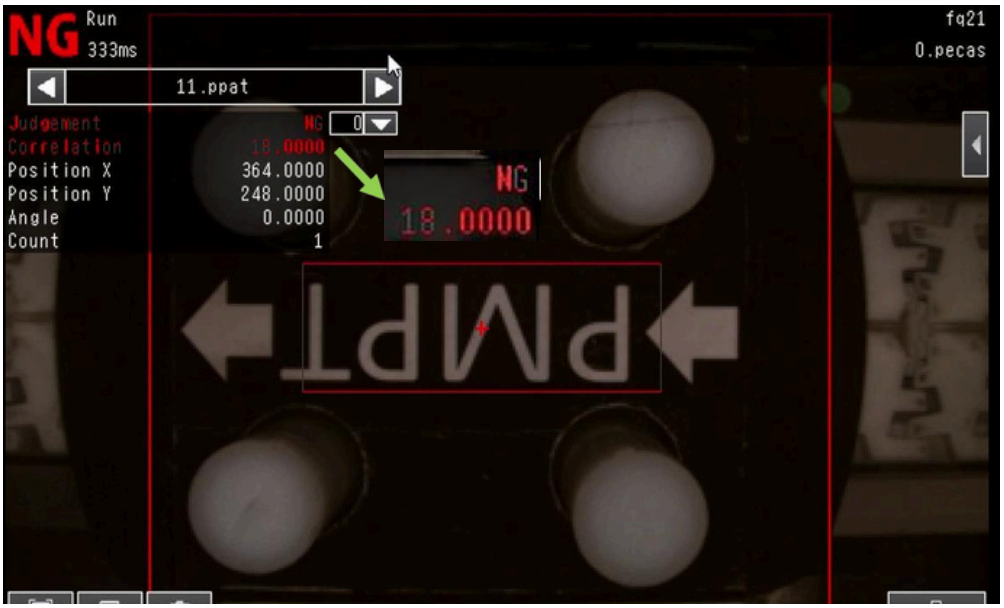


Figura 85: Identificação da sigla PMPT com correlação NOK.

4.5.4 Troca de dados entre as câmaras e o PLC

A troca de dados entre o sistema de visão e o PLC só é possível conhecendo os endereços de memória que se encontram disponibilizados no Anexo B. A Figura 86 apresenta os endereços de memória utilizados para a câmara do setor de armazenamento,

sendo que "*I address*" diz respeito ao envio de dados da câmara para o PLC e "*Q Address*" no sentido oposto, do PLC para a câmara [34].

Para o sistema de visão do setor de fabrico, fq22, o processo de troca de dados é exatamente igual, sendo que a única diferença são os endereços de memória.

Module	Rack	Slot	I address	Q address
fq21	0	0		
Interface	0	0 X1		
Output Data_1	0	1		2...21
Results Data - 32 items_1	0	2	68...211	

Figura 86: Endereços de memória da câmara fq21.

Tal como é possível observar na Figura 87, são utilizados bits específicos que possuem funções diferentes tais como: "*Ready*", "*Run*", "*Error*", "*Gate*" e o bit responsável pelo disparo da câmara "*Trigger*".

"TRIGGER(SA)"	%Q2.1	Bool
"READY(SA)"	%I68.2	Bool
"RUN(SA)"	%I68.4	Bool
"ERROR(SA)"	%I68.7	Bool
"GATE(SA)"	%I70.0	Bool

Figura 87: Bits específicos da câmara fq21.

Os endereços de memória que contém a informação relativa ao tipo de palete e se esta possui peças, iniciam-se 16 *bytes* após o primeiro endereço de memoria do "*I address"*, ou seja, o primeiro endereço de memória é o ID84 (68+16).

4.5.5 Tratamento dos dados da câmara

Os dados provenientes do sistema de visão, enviados para o PLC, são alvo de um tratamento prévio para que possam ser utilizados de forma a desencadear ações. Este tratamento é realizado através da *Function Block* "Trat. de dados fq21", onde se verifica o valor do *judgement* da inspeção realizada, devolvido pela câmara ao PLC. Na Figura 88 é apresentada a função do sistema de visão do setor armazém, sendo que para o setor de fabrico foi adotado o mesmo método.

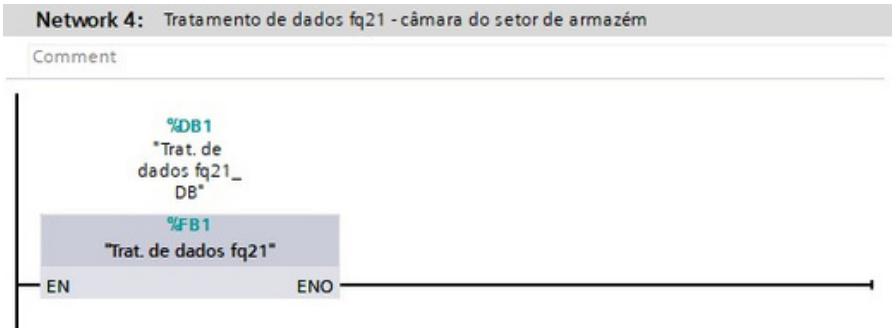


Figura 88: *Function Block* do tratamento de dados da câmara fq21.

Este tratamento dos dados é necessário, uma vez que, os dados devolvidos ao PLC vêm em formato *float.* Caso o valor seja igual a 0 significa que o *judgement* da inspeção é "OK", ao passo que se este valor for -1, significa que não há correlação ou que o seu valor é baixo. Em suma, o valor da correlação pode variar entre 0 e 100 e o valor das variáveis devolvidas ao PLC pode ser 0 ou -1.

Assim sendo, caso o valor do julgamento seja igual a 0, existe uma correlação entre a região inspecionada pela câmara no momento da inspeção e a região que foi previamente ensinada ao dispositivo FQ2. Caso o valor da correlação seja próximo de 100, é feito o *Set* a uma saída que permite ao PLC tomar a decisão de carregamento / descarregamento da palete, tal como se encontra apresentado na Figura 89. No caso de não existir correlação, as variáveis cujo valor devolvido pela câmara seja -1, é-lhes feito um *Reset*.

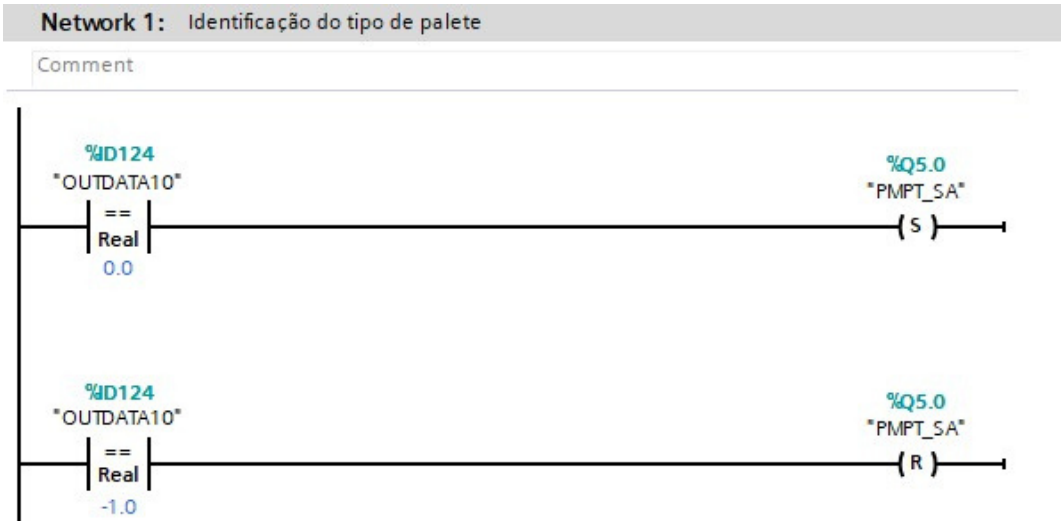


Figura 89: Tratamento de dados e identificação do tipo de palete.

A identificação da quantidade de peças nas paletes é feita através deste método, sendo que para cada uma das quatro situações possíveis: 4 peças, 3 peças, 2 peças ou 1 peça, foi elaborada uma inspeção independente.

A Figura 90 mostra como é identificada uma palete com três peças cilíndricas, encontrando-se estas seja nas paletes de matéria-prima, seja nas paletes de produtos acabados. A cada inspeção definida no sistema de visão, corresponde uma variável, tal como mostra a Figura 91. No exemplo da Figura 90, a variável correspondente a esta inspeção é a variável "OUTDATA5", que se assumir o valor 0, significa que existe correlação entre esta inspeção e a inspeção realizada. No caso de não existir correlação, a variável "OUTDATA5" toma o valor de -1. Este foi o método utilizado para a identificação do número de peças nas paletes, para o torno e para a fresadora.

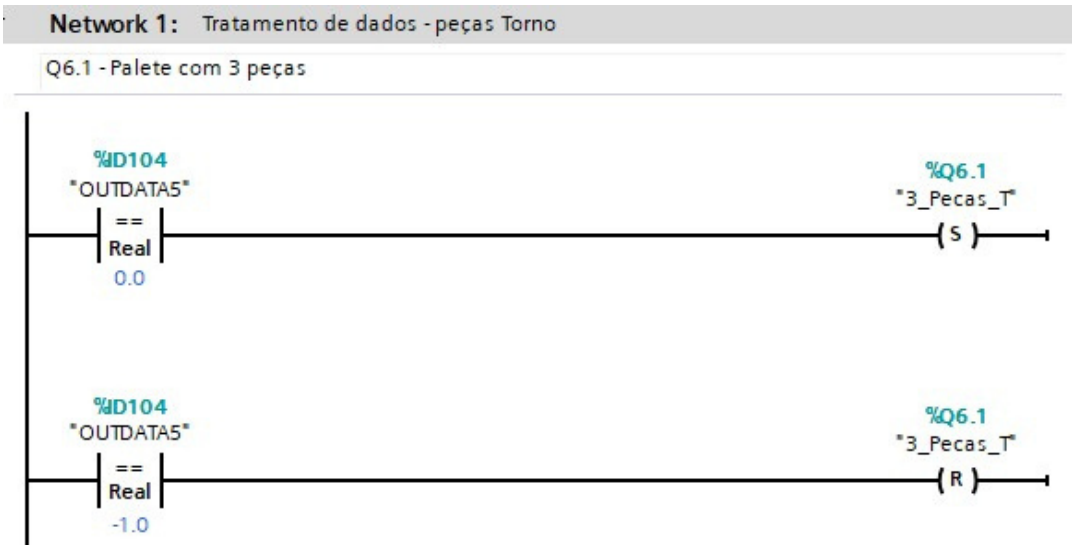


Figura 90: Identificação de três peças cilíndricas.

A Figura 91 apresenta as variáveis definidas para o setor de armazém que permitem a identificação da quantidade de peças existentes na palete, bem como o seu tipo.

Name	Address	Display format	Comment
"OUTDATA0"	%ID84	Floating-point	Fresadora - 4 Peças
"OUTDATA1"	%ID88	Floating-point	Fresadora - 3 Peças
"OUTDATA2"	%ID92	Floating-point	Fresadora - 2 Peças
"OUTDATA3"	%ID96	Floating-point	Fresadora - 1 Peças
"OUTDATA4"	%ID100	Floating-point	Torno - 4 Peças
"OUTDATA5"	%ID104	Floating-point	Torno - 3 Peças
"OUTDATA6"	%ID108	Floating-point	Torno - 2 Peças
"OUTDATA7"	%ID112	Floating-point	Torno - 1 Peças
"OUTDATA8"	%ID116	Floating-point	PMPF
"OUTDATA9"	%ID120	Floating-point	PPAF
"OUTDATA10"	%ID124	Floating-point	PMPT
"OUTDATA11"	%ID128	Floating-point	PPAT

Quantidade de peças na PMPT.

Tipo de palete.

Figura 91: Variáveis associadas a cada inspeção do setor armazém.

O tratamento dos dados é importante para que em função destes, seja ativado os *outputs* corretos, para que o robô execute a rotina correta. O excerto de código apresentado na Figura 92, diz respeito à identificação das paletes no setor armazém. Por exemplo: identificada uma palete MPT e se esta estiver vazia, é ativada a saída Q0.4 do autómato, e assim a palete de matéria-prima é carregada, uma vez que esta saída se encontra ligada à entrada DI10_12 do controlador do robô IRB 1400.

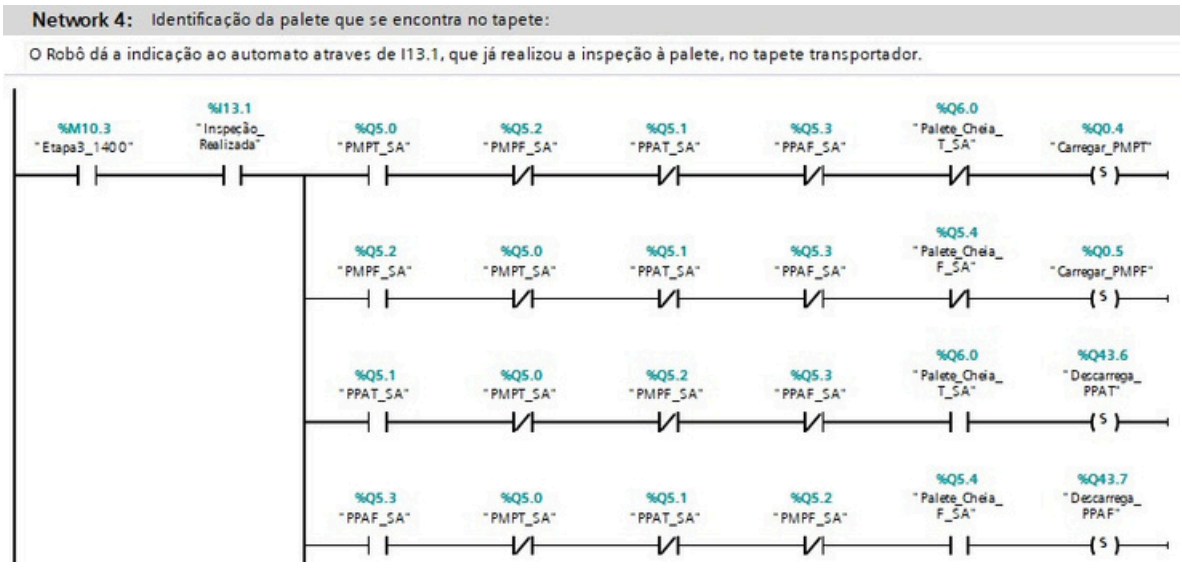


Figura 92: Identificação da palete no SA.

O programa que se encontra a correr no controlador do robô IRB 1400, ao verificar que a entrada DI10_12 vai a 1, e as restantes condições "bRobotLivre" e "bInspecao" se

encontram verificadas, entra dentro do ciclo *if*, apresentado na Figura 93, executando assim o carregamento da Palete MPT.

```
!************************ Produtos TORNO *********************************

!Materia-prima:
IF (DI10_12=1 AND bRobotLivre=TRUE AND bInspecao=TRUE) THEN
    TPErase;
    rMens_PMPT;
    bRobotLivre:=FALSE;
    rCarrega_PMPT;
    SetDO DO10_9,1; !Informa ao PLC (I1.0): PMPT carregada
    WaitTime 1.5;
    SetDO DO10_9,0;
    bRobotLivre:=TRUE;
    bInspecao:=FALSE;
    GOTO Inicio;
    TPErase;
ENDIF
```

Figura 93: Rotina de carregamento de Palete MPT.

4.5.6 Identificação das paletes

Tal como já foi referido anteriormente, é importante identificar o tipo de palete e as peças que nela se encontram, para que o robô possa executar a tarefa correta consoante a palete que se apresenta no tapete. As paletes ao passarem por cada um dos setores, são detetadas pelos sensores e paradas através da ativação do *stopper,* para que possam ser identificadas pelo sistema de visão que se encontra no *gripper* do robô. Na Figura 94 apresenta-se a função "Setor armazém", a qual é executada sempre que é feito um "*Set"* à memória M10.0.

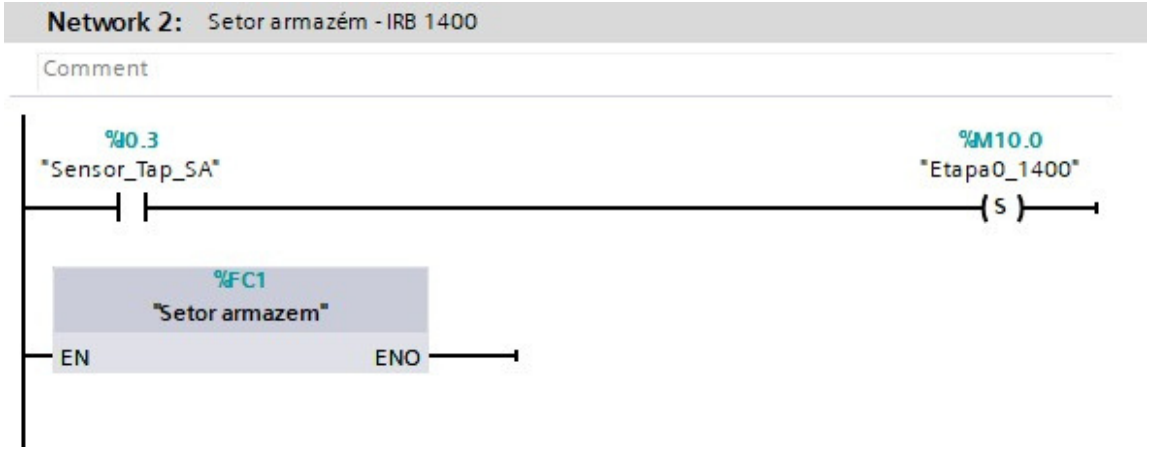


Figura 94: *Network* do setor armazém.

Após a palete ser detetada pelos sensores e atuado o *stopper* é ativada a memória M203.0 que por sua vez ativa a saída Q43.5 do autómato. A ativação desta saída, faz variar o estado lógico do *input* DI12_2 de 0 para 1, sendo assim executada a rotina de inspeção à palete, tal como demonstram a Figura 95 e Figura 96.

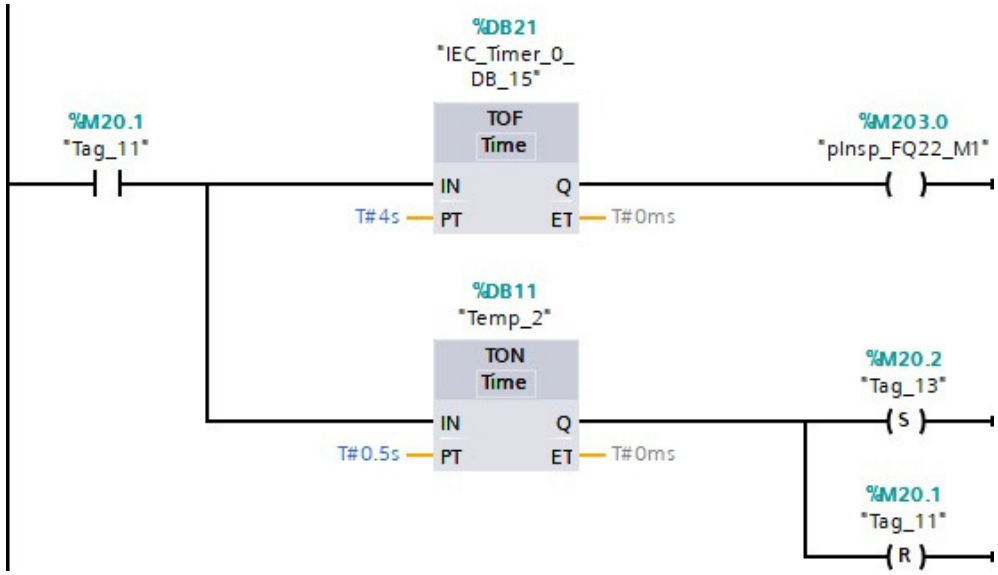


Figura 95: Network responsável pela inspeção à palete no SA.

A ativação das saídas do autómato foi feita através de memórias, pelo facto de estas serem ativadas em diferentes *Networks*, evitando assim conflitos do estado lógico das saídas. Tal como podemos observar na Figura 96, três memórias diferentes ativam a saída Q43.5, uma vez que esta é utilizada em três *Networks* diferentes.

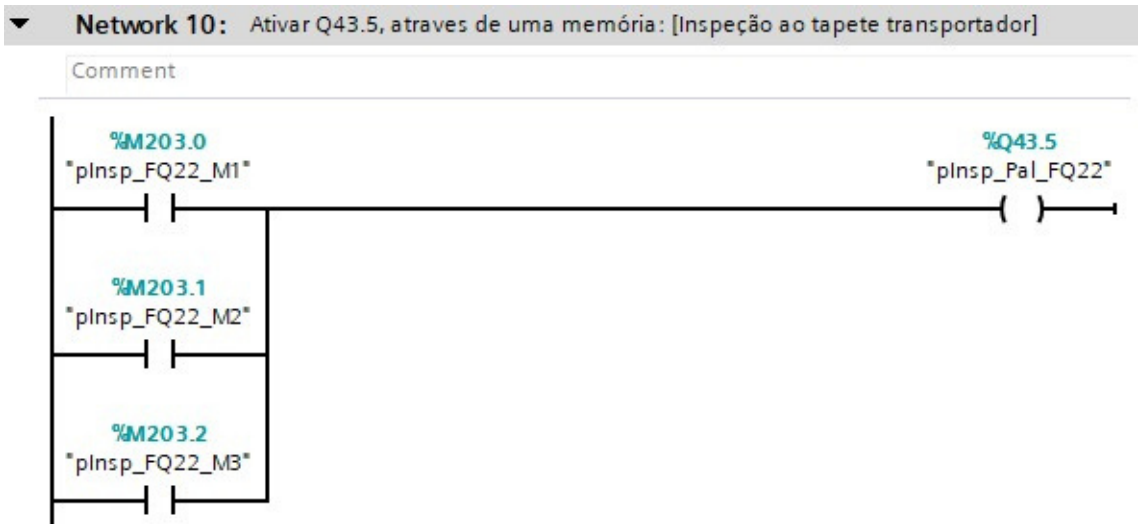


Figura 96: Ativação da saída Q43.5 do autómato.

A Figura 97 apresenta as formas geométricas localizadas na região onde as peças se devem encontrar. Parte das inspeções desenvolvidas nesta Dissertação para o setor de armazenamento encontram-se disponibilizadas no Anexo C.

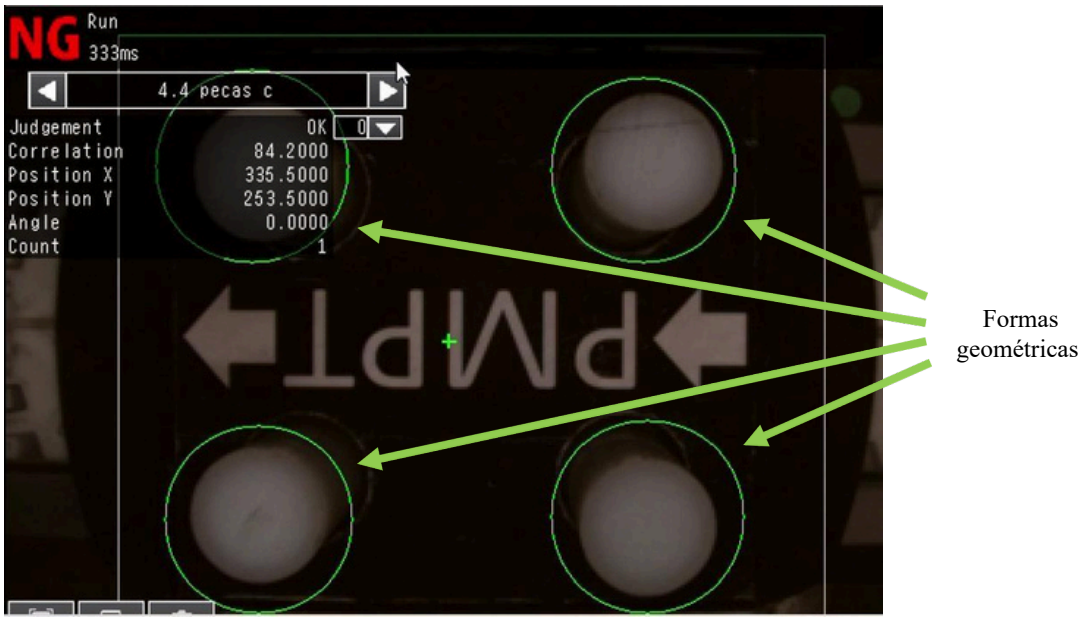
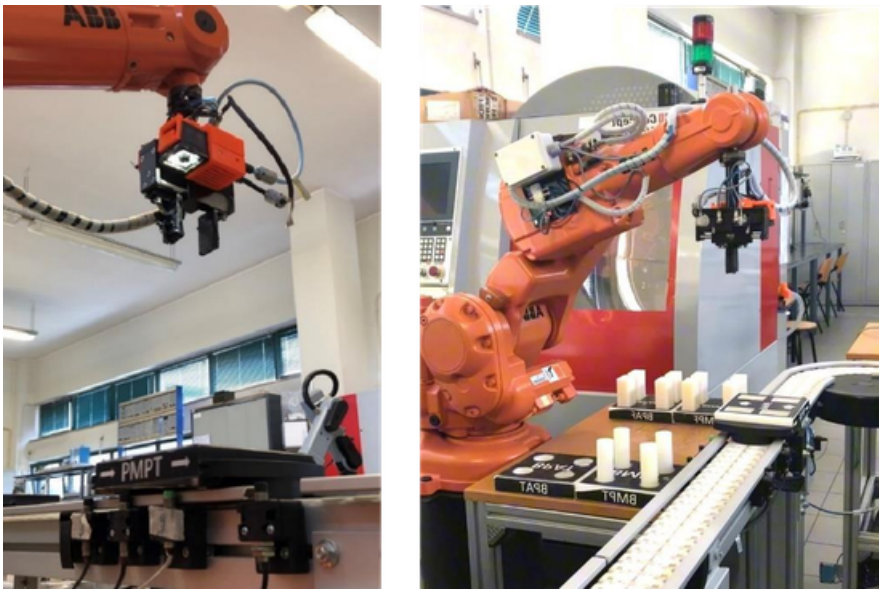


Figura 97: Definição das formas geométricas no software *TouchFinder*.

4.5.7 Inspeção da câmara no SA e no SF

Independentemente do tipo de palete que entre em cada um dos setores da CFF, o PLC atua o respetivo *stopper* do transportador, parando-a para que esta seja inspecionada pelo sistema de visão. Só no caso de ambos os *buffers* de matéria-prima do setor de fabrico se encontrarem cheios, as paletes que ali passam não são alvo de inspeção.

Na Figura 98 é possível observar as posições de ambos os robôs no momento da inspeção no tapete transportador, sendo que na Figura 98 a), é possível observar o disparo da câmara. Após ser realizado o *trigger,* o sistema de visão já possui a informação necessária para saber qual a rotina a executar.



a) b)

Figura 98: Pontos de inspeção no sistema transportador.

a) Ponto de inspeção robô ABB IRB 1400. b) Ponto de inspeção robô ABB IRB 140.

4.5.8 Problemas com as câmaras de visão

A visão artificial na indústria, apresenta grandes vantagens uma vez que é possível saber o que acontece em tempo real no ambiente onde as máquinas se encontram a trabalhar. No entanto, é necessário ter alguns cuidados com os dispositivos de imagem, uma vez que estes podem fornecer-nos informação que pode estar incorreta, devido a fatores externos como por exemplo a variação da luminosidade, falta de visibilidade, entre outros.

Ao longo dos ensaios em laboratório, constatou-se que, pela manhã, a radiação solar exterior, incidia sobre a região de inspeção do setor armazém, e desta forma, o sistema de visão não conseguia identifica corretamente as peças na palete. Nestas condições excecionais, a câmara identificava que as paletes de MP, quer de PA, se encontravam sempre com peças, o que não correspondia à realidade. Tal situação, impede o correto funcionamento da CFF, visto que as paletes de matéria-prima são enviadas vazias para o setor de fabrico, o que leva à paragem da produção por falta de matéria-prima.

De forma a atenuar o problema causado pela luminosidade exterior, foram ajustados os limites do valor da correlação, o que melhorou significativamente os resultados devolvidos pelo sistema de visão. No entanto, por vezes, o sistema de visão ainda

identificava a palete e a presença das peças incorretamente. Uma solução definitiva para este problema, seria o isolamento da região de inspeção, ou então, a instalação de projetores luminosos, de forma a manter contante a luminosidade nos locais de inspeção.

A presença de peças com faces defeituosas ou pintadas, tais como as apresentadas na Figura 99, também representa um problema para o sistema de visão, pois apesar da peça se encontrar na palete, como o valor da correlação não é suficientemente alto para que o *judgement* seja favorável, o sistema de visão não identifica corretamente a presença da peça. Para evitar estes problemas, as peças utilizadas no funcionamento da CFF devem encontrar-se em boas condições.

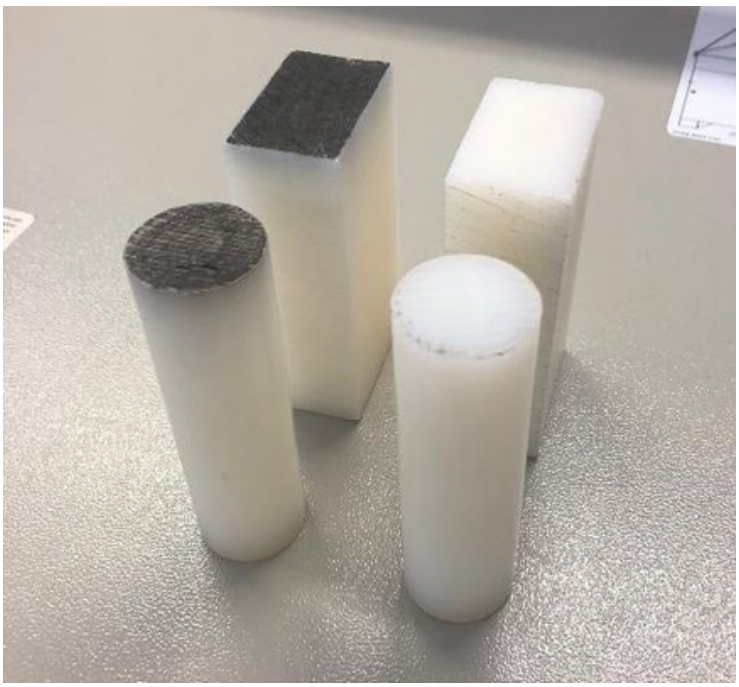


Figura 99: Peças com faces pintadas.

4.6 Interface com o utilizador

Num sistema flexível de fabrico, a coexistência entre os colaboradores e os robôs deve ser um aspeto fundamental para evitar a ocorrência de acidentes. Nesse sentido, optou-se pelo desenvolvimento de um conjunto de mensagens que são dirigidas ao operador através da *Teach Pendent*, de forma que este saiba o que o robô se encontra a fazer em cada instante. Além disso, através destas mensagens, o operador pode tomar decisões, como a paragem de emergência, no caso de detetar algum erro no processo.

A Figura 100 mostra um exemplo do tipo de mensagens enviadas ao operador ao longo do funcionamento do robô.

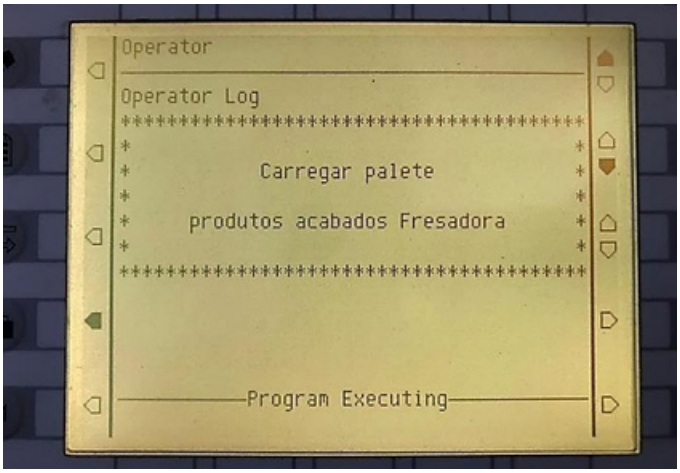


Figura 100: Mensagem direcionada ao operador na *Teach Pendent*.

No caso de ocorrer uma intrusão no volume de trabalho do robô, é devolvida uma mensagem ao operador, indicando as entradas dos sensores da CFF. Tal informação permite poupar tempo na resolução do problema, pois qualquer operador que não se encontre familiarizado com a célula do laboratório do IPV, consegue verificar se tudo se encontra a funcionar corretamente, em função dos dados apresentados no *display* da *Teach Pendent.*

5 Conclusões e propostas para trabalhos futuros

De acordo com o trabalho desenvolvido ao longo da dissertação, apresentam-se a seguir algumas considerações sobre o trabalho desenvolvido.

5.1 Conclusões

O principal objetivo deste trabalho, consistia essencialmente, no desenvolvimento da programação, de forma que a célula funcione correta e autonomamente. Quer isto dizer que, o setor de fabrico deve enviar matéria-prima através do setor de transporte para o setor de fabrico, e deve colocar os produtos acabados na rampa de descarga, ao passo que o setor de fabrico é responsável pela maquinação das peças, e posteriormente deve enviá-las para o setor de armazém. Toda a comunicação entre os diferentes equipamentos da célula, é possível devido ao gestor da CFF – PLC S7 1200.

Ao longo da realização deste trabalho, foram surgindo alguns obstáculos que nos levaram a adotar medidas alternativas. Inicialmente, estava pensado adquirir dois leitores de *QR Code* para a identificação das paletes, instalados um em cada setor. Após realizada uma pesquisa detalhada das várias soluções existentes no mercado, com os requisitos de que necessitávamos, comunicação via *Profinet*, foi escolhido o leitor de *QR Code* CLV630 – 0120, da SICK. Após bastante tempo de espera pelo orçamento dos mesmos, e do custo considerável que nos foi apresentado, optou-se pela utilização do sistema de visão já instaladas na CFF. Desta forma, despendeu-se algum tempo que seria útil para um estudo mais aprofundado do sistema de visão, bem como a introdução de novas verificações tais como: verificação do *stock* de peças no setor de armazém, verificação do correto posicionamento da matéria-prima no torno e na fresadora, entre outras.

No decorrer deste projeto, foram aprofundados os conhecimentos no que diz respeito aos softwares utilizados tais como o *RobotStudio,* o TIA Portal e o *SolidWorks*, e verificou-se que estes apresentam potencialidades que até então nunca tinha experienciado.

Os softwares de simulação, mais concretamente o *RobotStudio* da ABB, são uma ferramenta de trabalho muito útil, que nos permite verificar previamente o correto funcionamento da programação elaborada. No entanto, existem sempre detalhes que devem ser tidos em conta com os quais me deparei na realização deste trabalho, como por exemplo, o ajuste de certos pontos necessários para efetuar o descarregamento. O que

acontece é que na CFF do laboratório, a peça é colocada na palete e, embora ela tenha uma ligeira inclinação, devido ao seu centro de gravidade, a peça irá ficar corretamente posicionada na palete, ao passo que no *RobotStudio*, isso não acontece. Outro exemplo, quando o robô coloca as peças na palete, onde em simulação de computador, é necessário definir a anexação das peças à palete até ao destino final, e a posterior desanexação, enquanto na realidade não necessitamos destes conceitos, pois eles acontecem por si só.

Por fim, conclui-se que, o trabalho realizado ao longo da Dissertação de Mestrado em Engenharia Eletrotécnica cumpre os objetivos que foram propostos, tendo a noção de que pode estar sujeito a algumas melhorias, apresentadas seguidamente.

5.2 Propostas para trabalhos futuros

O projeto apresentado ao longo desta dissertação, pode ser alvo de algumas propostas para trabalhos futuros, de forma a melhor o trabalho desenvolvido. No que diz respeito à simulação da Célula Flexível de Fabrico no software *RobotStudio*, identificam- se essencialmente duas grandes melhorias.

Uma das melhorias que também seria pertinente implementar, e que nos iria permitir a obtenção de melhores resultados do funcionamento da célula, seria o isolamento da mesma de forma a manter o nível de luminosidade ao longo do dia. Em alternativa, e adotando medidas que se aplicam em ambientes industriais, a solução passaria pela instalação de projetores de iluminação, diminuindo assim a probabilidade de ocorrências de erros de leitura, pelo sistema de visão.

Por fim, poderiam ser implementados novos *buffers* no setor de fabrico, de forma a conseguir armazenar uma maior quantidade de matéria-prima, desenvolver novas paletes para colocar em circulação no tapete transportador, bem como um melhoramento na interface da CFF, de forma a facilitar a alteração e identificação das ligações elétricas.

6 Referências

[1] Coelho, P. (2016). *Rumo à Indústria 4.0*. (Dissertação de Mestrado). Obtido de https://hdl.handle.net/10316/36992

[2] Silveira, C. (2016). *Indústria 4.0: O que é, e como ela vai impactar o mundo.* Obtido de https://www.citisystems.com.br/industria-4-0/

[3] Teixeira, M. (2013). *Automatização e Integração de uma Linha de Produção Industrial* (Dissertação de Mestrado). Obtido de https://repositorioaberto.up.pt/bitstream/10216/66949/2/27428.pdf

[4] Maximiliano, N. (2021, Fevereiro 22). *Principais tipos de automação.* Blog da Engenharia. https://blogdaengenharia.com/secoes/colunistas-blog-da engenharia/principais-tipos-de-automacao/

[5] M. P. Groover, "Automation, Production Systems, and Computer Integrated Manufacturing", Prentice-Hall, Inc., 1987, consultado em 28/01/2023.

[6] Carreira, D. (2012). *Sistema de Paletização Robotizado no setor de Pesagem/Etiquetagem do queijo.* (Dissertação de Mestrado). Obtido de https://repositorio.ipv.pt/bitstream/10400.19/1612/1/Disserta%C3%A7%C3%A3o%20Daniel%20Loureiro%20Carreira.pdf

[7] Almeida, F. (2021). *Visão artificial no controlo da Célula Flexível de Fabrico da ESTGV.* (Dissertação de Mestrado). Obtido de https://repositorio.ipv.pt/bitstream/10400.19/7224/1/F%c3%a1bio%20David%20Martins%20Almeida%20Disserta%c3%a7%c3%a3o%20MEE-EAI.pdf

[8] J. J. Craig, "Introduction to Robotics Mechanics & Control", Addison Wesley, 1986.

[9] P. J. Mckerrow, "Introduction to Robotics", Addison Wesley, Singapore, 1991.

[10] Campos, F. (2019,Setembro 3). *A Robótica e a Indústria.* Linked in. https://pt.linkedin.com/pulse/rob%C3%B3tica-e-ind%C3%BAstria-fatima-saint-clair- campos--1e

[11] KUCHER, D. "*Film-like story of the first real robot Unimate in history*". Disponível em: https://www.somagnews.com/film-like-story-first-real-robot-unimate-history/ consultado em 29/01/2023.

[12] Arv Systems. (2021, Agosto 16). *Dez boas razões para investir em Robôs*.Obtido de https://arvsystems.com.br/blog/10-boas-razoes-para-investir-em- robos/

[13] Mars Pathfinder. (2020). In Wikipedia. https://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Mars_Pathfinder&oldid=58021188

[14] Disponível em: https://www.caoguiarobo.com.br/ consultado em 29/01/2023.

[15] A. Ferrolho, Apontamentos das aulas de Robótica Industrial, Viseu: DEE-ESTGV IPV, consultado em 29/01/2023.

[16] Neves, J. (2003). *Robótica* [PowerPoint Slides]. Obtido de http://orion.ipt.pt/~cferreir/robotica/Robotica-ALL(PB).pdf

[17] Conger. (2024). *AMRs vs. AGVs: The Differences Explained*. Obtido de https://www.conger.com/amr-vs-agv/

[18] Magno, S. (2010). *Robô Humanóide chega à Lua em 2015. Obtido de* https://visao.sapo.pt/exameinformatica/noticias-ei/ciencia-ei/2010-04-29-robo-humanoide-chega-a-lua-em-2015/

[19] Fotografia tirada no laboratório de robótica do DEE.

[20] Tronco, M. (2017). *Robôs Industriais- conceitos, classificação, aplicação e programação* [PowerPoint Slides]. Obtido de https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/3265250/mod_resource/content/1/Aula_Rob%C3%B3tica_2017.pdf

[21] Weidlich, G. (2016). *Desenvolvimento e Aplicação de um dispositivo para análise de exatidão e receptividade em robôs industriais* (Dissertação de Mestrado). Obtido de https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/10616/000599802.pdf?sequence=1&isAllowed=y

[22] Ôlas, J. (2012). *Desenvolvimento de um sistema robótico flexível para utilização em farmácias* (Dissertação de Mestrado). Obtido de https://repositorio.ipv.pt/bitstream/10400.19/1624/1/Desenvolvimento%20de%20um%20sistema%20rob%C3%B3tico%20flex%C3%ADvel%20para%20utiliza%C3%A7%C3%A3o%20em%20farm%C3%A1cias.pdf

[23] Branco, R. (2017). *Projeto e Implementação de uma Célula de Soldadura Robotizada- Estágio na Motofil Robotics S.A* (Dissertação de Mestrado). Obtido de chttps://docplayer.com.br/82818894- Projeto-e-implementacao-de-uma-celula-de-soldadura-robotizada-estagio-na-motofil- robotics-s-a.html

[24] Silveira, C. (2019). *Os seis principais tipos de Robôs Industriais. Obtido de* https://www.citisystems.com.br/tipos-de-robos/

[25] Contreras, C. (2014). Origen del Control Numérico. Obtido de http://trabajodegradouvm.blogspot.com/2014/10/nueva.html

[26] Omron.(2024). *Robôs Colaborativos*. Obtido de https://industrial.omron.pt/pt/products/collaborative-robots

[27] ABB Robotics .(2024). *Suíte RobotStudio. Obtido de* https://new.abb.com/products/robotics/robotstudio

[28] Y. Koren, "Computer Control of Manufacturing Systems", Mc Graw Hill, 1983.

[29] U. Rembold, B.O. Nnaji and A. Storr, "Computer Integrated Manufacturing and Engineering", Addison-Wesley, 1993.

[30] Pereira, O. (2018). Integração e controlo de máquinas CNC e robôs industriais em Células de Flexíveis de Fabrico (Dissertação de Mestrado). Obtido de https://repositorio.ipv.pt/bitstream/10400.19/5451/1/Oscar_Pereira_disserta%c3%a7%c3%a3o.pdf

[31] K.S. Fu, R.C. Gonzalez, and C.S.G. Lee, “Robotics: Control, Sensing, Vision, and Intelligence”, McGraw-Hill, cop.1987.

[32] Carvalho. A. (2016). Desenvolvimento e melhoramento da Célula Flexível de Fabrico da ESTGV(Dissertação de Mestrado). Obtido de https://repositorio.ipv.pt/handle/10400.19/3090

[33] *Omron.eu*. [Online]. Disponível em: https://assets.omron.eu/downloads/manual/en/v4/z337_fq2s_ch_smart_camera_users_manual_en.pdf consultado em 06/02/2023.

[34] “*Fq2-siemensplc profinet Eng 20140213*”, *Pdfcoffee.com*, [Online]. Disponível em: https://pdfcoffee.com/fq2-siemensplc-profinet-eng-20140213-pdf-free.html consultado em 10/02/2023.

[35] ABB Robotics. (2010). *Operating Manual RobotStudio*. Obtido de https://library.e.abb.com/public/244a8a5c10ef8875c1257b4b0052193c/3HAC032104-001_revD_en.pdf

[36] H. Asada and J. J. E. Slotine, “Robot Analysis and Control”, John Wiley & Sons, Inc., 1986.

[37] Jack B. Kuipers, “Quaternions: and rotation sequences”, New Jersey: Princeton University Press, 1998.

ANEXOS

Anexo A – Interface Robótica

Ao longo do Anexo A é apresentada a interface robótica dos vários equipamentos que constituem a Célula Flexível de Fabrico do Laboratório de Automação e Robótica. A Tabela A-1 apresenta a interface de comunicação entre o robô IRB 140 e o Torno CNC do setor de fabrico, permitindo que ambos os equipamentos comuniquem entre si.

Tabela A-1: Interface robótica torno CNC.

Interface de comunicação entre Torno CNC e IRB 140	
***Inputs* do controlador do robô IRB 140**	**Descrição**
DI10_1	Stop no programa
DI10_2	Mandril Aberto
DI10_3	Mandril Fechado
DI10_4 = 1 AND DI10_5 = 0	Porta aberta
DI10_4 = 0 AND DI10_5 = 1	Porta fechada
DI10_8	Alarme ativo / Emergência
***Outputs* do controlador do robô IRB 140**	
DO10_2	Start no programa
DO10_3	Fechar Porta
DO10_4	Abrir porta
DO10_7	Fechar *Chuck*
DO10_8	Abrir *Chuck*

A Tabela A-2 apresenta a interface robótica que permite a comunicação entre o robô IRB 140 e a fresadora CNC.

Tabela A-2: Interface robótica com a fresadora CNC.

Interface de comunicação entre Fresadora CNC e IRB 140	
***Inputs* do controlador do robô IRB 140**	**Descrição**
DI10_9 = 1 AND DI10_10 = 0	Alarme ativo
DI10_9 = 1 AND DI10_10 = 1	Emergência ativa
DI10_9 = 0 AND DI10_10 = 0	Condições iniciais verificadas
DI10_12	Maquinação concluída
DI10_13	*Vice* fechado
DI10_14	*Vice* aberto
DI10_15 = 0 AND DI10_16 = 1	Porta fechada
DI10_15 = 1 AND DI10_16 = 0	Porta aberta
***Outputs* do controlador do robô IRB 140**	
DO10_9	Fecho da porta
DO10_13	Iniciar maquinação
DO10_14	Fechar *Vice*
DO10_15	Abrir *Vice*
DO10_16	Abrir porta

Na Tabela A-3 e na Tabela A-4 encontram-se apresentadas as interfaces de comunicação entre o PLC e o sistema de visão de cada um dos robôs da CFF.

Tabela A-3: Interface de comunicação entre o PLC e o sistema de visão do setor de armazém.

Interface de comunicação entre o PLC e a câmara fq21 (SA)		
Variável	**Tipo**	**Endereço**
Trigger (SA)	*Bool*	Q2.1
Ready (SA)	*Bool*	I68.2
Run (SA)	*Bool*	I68.4
Error (SA)	*Bool*	I68.7
Gate (SA)	*Bool*	I70.0

Tabela A-4: Interface de comunicação entre o PLC e o sistema de visão do setor de fabrico.

Interface de comunicação entre o PLC e a câmara fq22 (SF)		
Variável	**Tipo**	**Endereço**
Trigger (SF)	*Bool*	Q12.1
Ready (SF)	*Bool*	I212.2
Run (SF)	*Bool*	I212.4
Error (SF)	*Bool*	I212.7
Gate (SF)	*Bool*	I214.0

Na Tabela A-5 é apresentada a interface de comunicação entre o PLC e o robô IRB 1400 do setor de armazenamento.

Tabela A-5: Interface de comunicação entre o PLC e o Controlador do robô IRB 1400.

Interface de comunicação entre o PLC e o controlador do robô IRB 1400			
PLC S7 1200		Controlador	
	Output	***Inputs* do controlador**	**Descrição**
Descarrega_PPAT	Q43.6	DI10_8	Descarregar PPAT
Descarrega_PPAF	Q43.7	DI10_9	Descarregar PPAF
Carrega_PMPT	Q0.4	DI10_12	Carregar PMPT
Carrega_PMPF	Q0.5	DI10_13	Carregar PMPF
rInspecao_SA	Q45.0	DI10_16	Inspeção ao tapete SA

Na Tabela A-6 é apresentada a interface que permite estabelecer a comunicação entre o PLC e o robô IRB 140 do setor de fabrico.

Tabela A-6: Interface de comunicação entre o PLC e o Controlador do robô IRB 140.

Interface de comunicação entre o PLC e o controlador do robô IRB 140			
PLC S7 1200		Controlador	
	Output	***Inputs* do controlador**	**Descrição**
Carregar_PPAT Inspecao_BPAT	Q1.1	DI10_5	Descarregar PPAT Inspeção ao *buffer* PPAT
Carregar_PPAF Inspecao_BPAF	Q1.0	DI10_11	Descarregar PPAF Inspeção ao *buffer* PPAF
Descarrega_PMPT Inspecao_BMPT	Q0.6	DI10_9	Carregar PMPT Inspeção ao *buffer* BMPT
Descarrega_PMPF Inspecao_BMPF	Q0.7	DI10_10	Carregar PMPF Inspeção ao *buffer* BMPF
rInspecao_SF	Q43.5	DI12_2	Inspeção ao tapete SA

Por fim, na Tabela A-7 apresenta-se a configuração das saídas do PLC que permitem identificar a quantidade de peças que se encontram em cada tipo de palete.

Tabela A-7: Configuração das saídas do PLC e entradas do controlador do robô ABB IRB 1400.

Palete Matéria-prima Torno					
Controlador	PLC	1 Peça	2 Peças	3 Peças	4 Peças
DI10_3	Q43.2	0	0	0	-
DI10_4	Q42.1	0	0	0	-
DI10_9	Q0.6	-	-	-	1
DI10_14	Q43.0	1	1	0	-
DI10_15	Q43.1	1	0	1	-

	Palete Matéria-prima Fresadora				
Controlador	PLC	1 Peça	2 Peças	3 Peças	4 Peças
DI10_3	Q43.2	0	0	0	-
DI10_4	Q42.1	1	1	1	-
DI10_10	Q0.7	-	-	-	1
DI10_14	Q43.0	1	1	0	-
DI10_15	Q43.1	1	0	1	-

	Palete Produtos Acabados Torno				
Controlador	PLC	1 Peça	2 Peças	3 Peças	4 Peças
DI10_3	Q43.2	1	1	1	-
DI10_4	Q42.1	0	0	0	-
DI10_5	Q1.1	-	-	-	1
DI10_14	Q43.0	1	1	0	-
DI10_15	Q43.1	1	0	1	-

	Palete Produtos Acabados Fresadora				
Controlador	PLC	1 Peça	2 Peças	3 Peças	4 Peças
DI10_3	Q43.2	1	1	1	-
DI10_4	Q42.1	1	1	1	-
DI10_11	Q1.0	-	-	-	1
DI10_14	Q43.0	1	0	0	-
DI10_15	Q43.1	0	1	0	-

Anexo B – Endereços de memória da câmara FQ2 Séries

Os endereços de memória do sistema de visão encontram-se apresentados na Figura B-1 e são fundamentais para podermos estabelecer a sua comunicação com o autómato. Para a comunicação entre o PLC e o dispositivo FQ2 estão reservados 20 *bytes* e para a comunicação no sentido inverso encontram-se reservados 272 *bytes*. Por exemplo, o *trigger* do sistema de visão do SA foi definido como Q2.1, uma vez que teria de estar compreendido entre o *byte* 0 e o *byte* 19, e ainda especificamente no *bit* 1.

3.1.2. Memory Assignments

	Output Area		Input Area	
Q 00	(PLC -> FQ2)	I 00	(FQ2 -> PLC)	
Q 19	20bytes	I 271	16 + (32, 64, 128, 256)bytes	

Trigger => bit 1

• Output Area (PLC -> FQ2)

	Bits															Description
	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0	
Q00	ERC LR														TRIG	EXE	Control flag 1-4 (32 bits)
Q02																DSA	
Q04	Command code																Command code (32 bits)
Q06																	
Q08	Command parameter 1																Command parameter (32 bits)
Q10																	
Q12	Command parameter 2																
Q14																	
Q16	Command parameter 3																
Q18																	

• Input Area (FQ2 -> PLC)

	Bits																Description
	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0	
I00	ERR											RUN	OR	READY	BUSY	FLG	Status flag 1-4 (32 bits)
I02																GATE	
I04	Command code																Command code (32 bits)
I06																	
I08	Response code																Response code

Figura B-1: Endereços de memória do sistema de visão FQ2.

Anexo C – Inspeções no setor Armazém

A Figura C-2 apresenta algumas das inspeções realizadas através do sistema de visão que se encontra no *gripper* do robô IRB 1400. Na Figura C-2 a) é possível observar a identificação de quatro peças numa PMPF, na Figura C-2 b) são detetadas apenas três peças, na Figura C-2 c) o sistema de visão identifica a presença de duas peças, e por fim, a Figura C-2 d) mostra que existe apenas uma peça na palete.

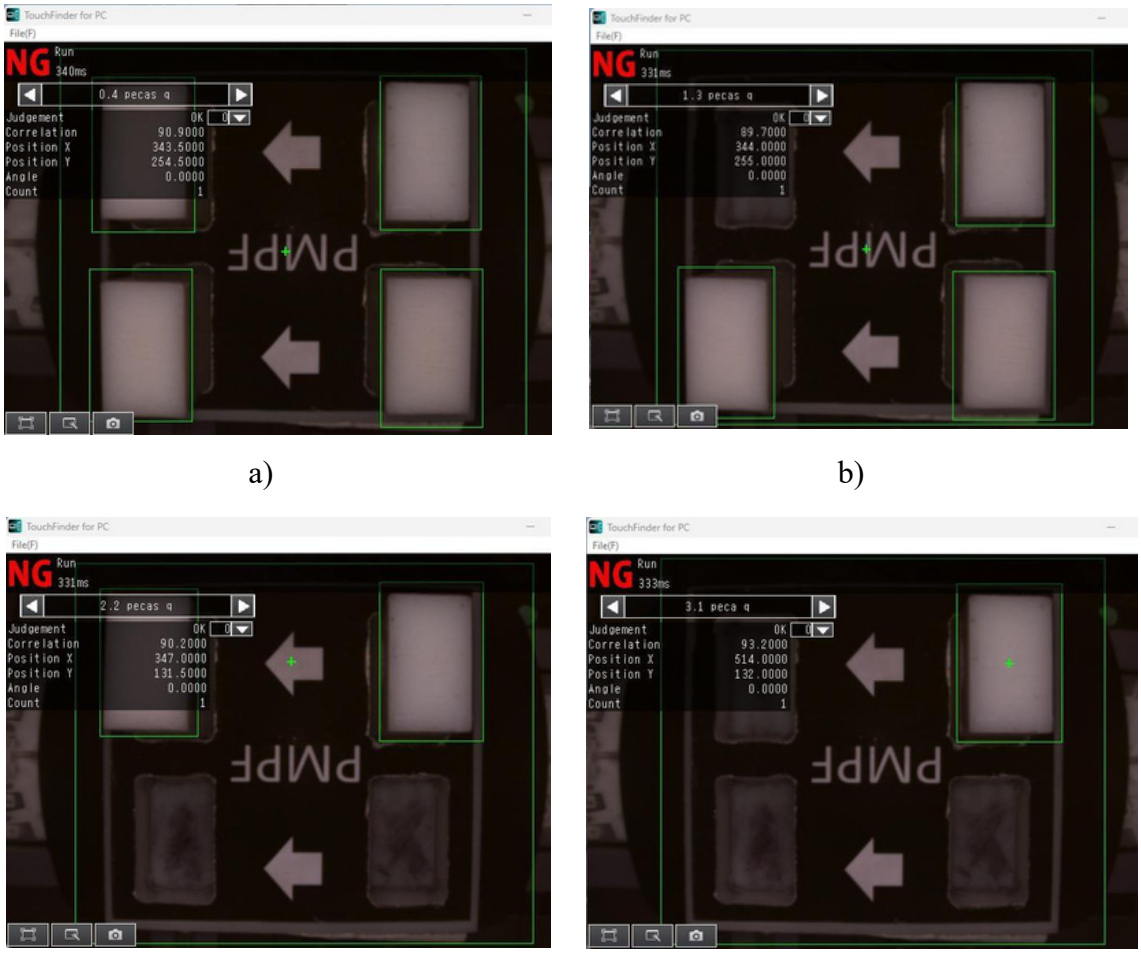


Figura C-2: Identificação de peças na palete PMPF.

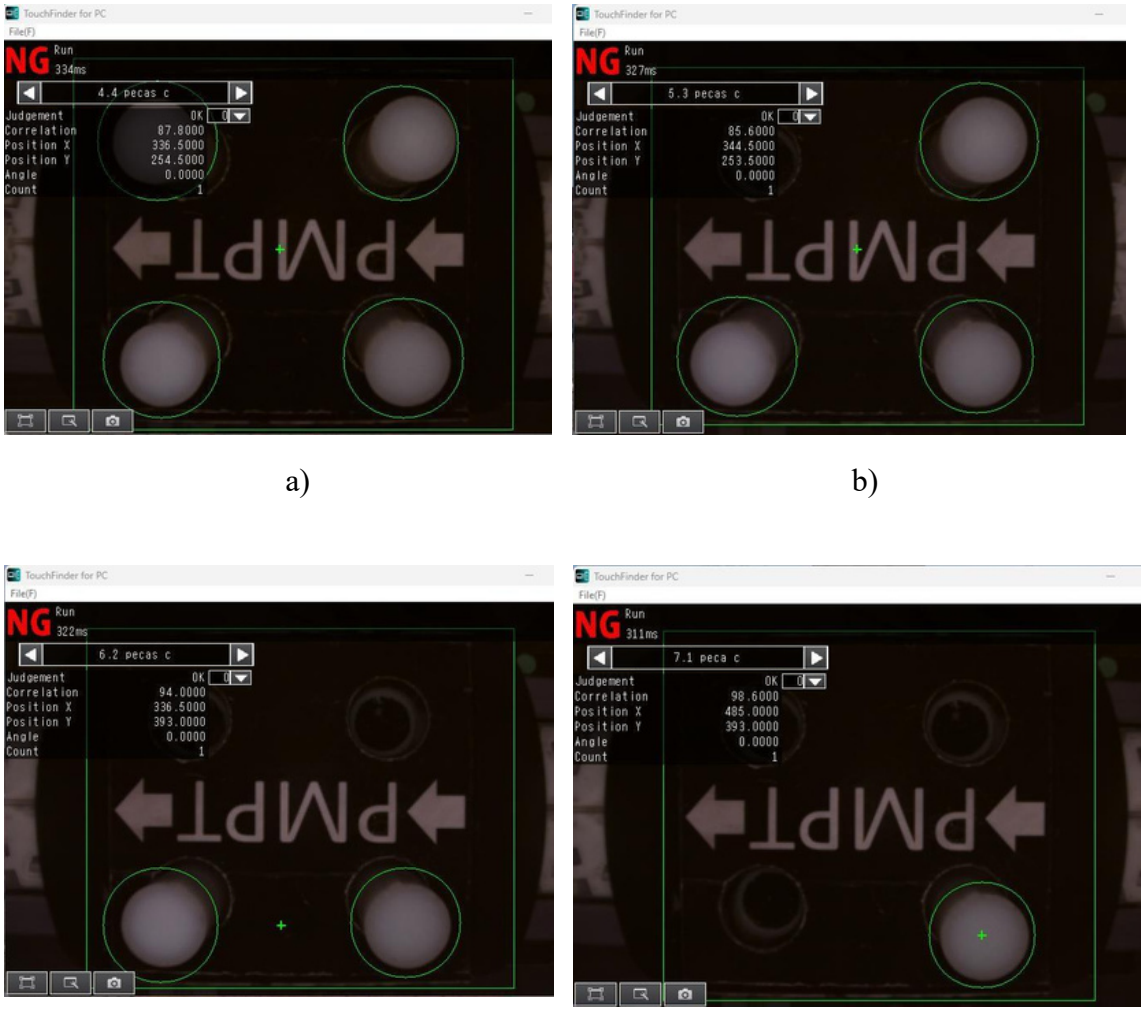
a) PMPF com 4 peças.

b) PMPF com 3 peças.

c) PMPF com 2 peças.

d) PMPF com 1 peças.

Na Figura C-3 encontram-se apresentadas as inspeções referentes às 4 peças, 3 peças, 2 peças e 1 peça, numa PMPT. No caso das paletes de produtos acabados, as inspeções são idênticas às apresentadas nas Figura C-2 e Figura C-3, visto que o posicionamento das peças é o mesmo. A única diferença entre ambos os casos é a sigla que se encontra sobre a palete, tal como ilustra a Figura C-4.



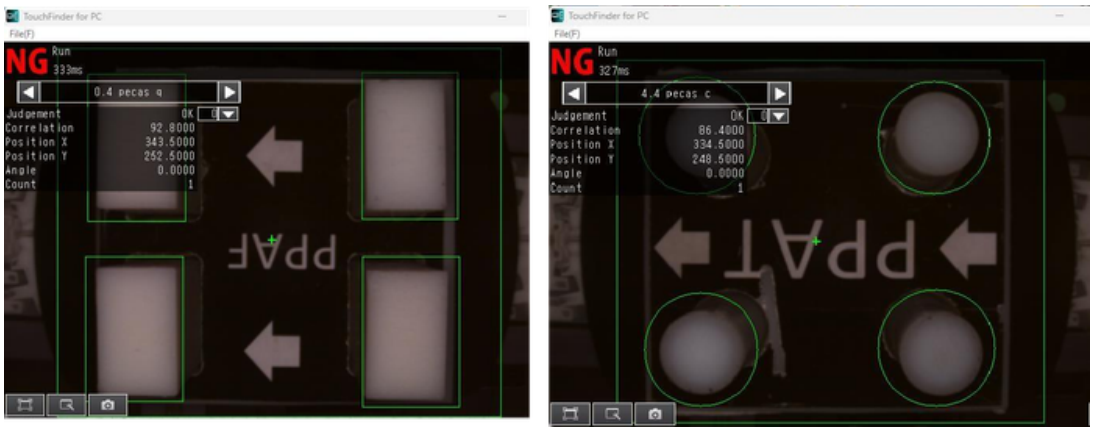
a) b)

c) d)

Figura C-3: Identificação de peças numa PMPT.

a) PMPT com 4 peças. b) PMPT com 3 peças.

c) PMPT com 2 peças. d) PMPT com 1 peças.



a) b)

Figura C-4: Identificação de peças em palete de produtos acabados.

a) Identificação de 4 peças numa PPAF. b) Identificação de 4 peças numa PPAT.