



isec
Engenharia

MESTRADO EM ENGENHARIA
ELETROTÉCNICA

**Aplicação de Sistemas Robóticos para Lixagem
de Comboios**

Autor

Bruno Miguel Pereira Nunes

Orientadores

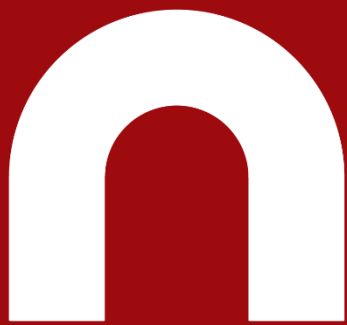
Doutor Nuno Miguel Fonseca Ferreira

Doutor João Paulo Morais Ferreira

INSTITUTO POLITÉCNICO DE
COIMBRA

INSTITUTO SUPERIOR
DE ENGENHARIA
DE COIMBRA

Coimbra, Novembro 2022



isec

Engenharia

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
ELETROTÉCNICA

Aplicação de Sistemas Robóticos para Lixagem de Comboios

Relatório de Estágio de Natureza Profissional para a obtenção do
grau de Mestre em Engenharia Eletrotécnica

Especialização em Automação e Comunicações em Sistemas
Industriais

Autor

Bruno Miguel Pereira Nunes

Orientadores

Doutor Nuno Miguel Fonseca Ferreira

Doutor João Paulo Morais Ferreira

Supervisor na empresa Robowork – Solutions and Services

Engenheiro Nuno Miguel Santos

INSTITUTO POLITÉCNICO DE
COIMBRA

INSTITUTO SUPERIOR
DE ENGENHARIA
DE COIMBRA

Coimbra, Novembro 2022

AGRADECIMENTOS

O presente documento resulta de um percurso académico e profissional nem sempre fácil, mas constantemente apoiado por elementos essenciais, aos quais devo prestar os meus agradecimentos.

Um dos contributos mais importantes senão o mais relevante vêm por parte da minha família, à qual devo um enorme obrigado por todo o apoio demonstrado ao longo destes anos de percurso académico, sempre colocando o meu futuro acima dos seus interesses pessoais.

Agradeço também ao Doutor Nuno Miguel Fonseca Ferreira por todo o apoio prestado durante o decorrer desta jornada, inicialmente como professor e mais tarde como orientador de estágio, sem o qual não seria possível a realização deste relatório. Agradeço também a sua ajuda aquando da transição do meio académico para o meio profissional através de dicas e conselhos essenciais.

À empresa Robowork e a todos os seus colaboradores devo também um enorme obrigado, por facilitarem todas as condições necessárias para o desenvolvimento deste relatório bem como por criar um ambiente de entreaajuda e partilha de conhecimento. Em especial devo agradecer aos meus colegas Rubén Almeida e Rafael Sousa por todo o apoio e paciência demonstrados ao longo deste percurso.

Por fim agradeço a todos os meus amigos que de uma forma ou de outra contribuíram para o meu sucesso.

RESUMO

Dada a constante evolução da indústria é cada vez mais importante automatizar as tarefas mais monótonas e repetitivas.

Como solução as empresas têm vindo a recorrer à implementação de sistemas robóticos, principalmente com a utilização de robôs industriais.

Desta forma, o presente relatório tem como objetivo descrever as tarefas desempenhadas no âmbito do estágio curricular do Mestrado em Engenharia Eletrotécnica, com especialização em Automação e Comunicações em Sistemas Industriais desenvolvido na empresa Robowork – Solutions and Services, que tem como principal atividade o desenvolvimento e comercialização de células industriais.

O referido estágio teve como principal objetivo aprofundar conhecimentos nas áreas de automação e robótica industrial, tendo como principal ênfase a robótica industrial, através da colaboração em diversos projetos. Nomeadamente num projeto com utilização de dois robôs ABB para manipulação de caixas de cartão e num projeto no qual foram implementados dois robôs Yaskawa Motoman para efetuar a lixagem de comboios.

Considera-se que o presente estágio curricular foi uma mais-valia, permitindo assim consolidar conhecimentos obtidos durante a formação académica bem como a obtenção de outros, nomeadamente na área da robótica. Adicionalmente, o estágio efetuado permitiu um contacto inicial com a indústria, sendo assim possível observar a clara distinção entre o ambiente de formação académica e o ambiente profissional.

Palavras-Chave: Automatizar, Sistemas Robóticos, Células Industriais

ABSTRACT

Given the constant evolution of the industry, it is increasingly important to automate the most monotonous and repetitive tasks. As a solution, companies have been resorting to the implementation of robotic systems, mainly with the use of industrial robots.

In this way, the present document aims to describe the tasks performed within the scope of the curricular internship of the Master's Degree in Electrical Engineering, specialization in Automation and Communications in Industrial Systems developed in the company Robowork – Solutions and Services, whose main activity is the development and commercialization of industrial cells.

The main goal of this internship was to deepen the knowledge in the field of automation and industrial robotics, with the main emphasis on industrial robotics, through collaboration in several projects. Namely in a project using two ABB robots to handle cardboard boxes and in a project in which two Yaskawa Motoman robots were implemented to sand trains.

It is considered that the present curricular internship was an asset, thus allowing to consolidate knowledge obtained during academic training as well as obtaining others, namely in the field of robotics. Additionally, the internship carried out allowed an initial contact with the industry, thus making it possible to observe the clear distinction between the academic training environment and the professional environment.

Palavras-Chave: Automate, Robotic Systems, Industrial Cells, Yaskawa Motoman

ÍNDICE

1.	Introdução	1
1.1.	Objetivos do relatório de estágio	1
1.2.	Empresa Robowork – Solutions and Services	1
1.3.	Estrutura do relatório.....	2
2.	Contextualização: Robótica no Mundo Industrial.....	3
2.1.	História e evolução do robô industrial.....	3
2.2.	Composição genérica do Robô Industrial.....	6
2.2.1.	Elos e juntas de manipuladores robóticos	6
2.2.2.	Sensores e atuadores de robôs industriais	7
2.2.3.	Controladores de robôs industriais.....	9
2.3.	Principais tipos de robôs industriais	10
2.3.1.	Robôs Cartesianos.....	10
2.3.2.	Robôs Cilíndricos	11
2.3.3.	Robôs Esféricos	11
2.3.4.	Robôs Articulados Horizontais (SCARA)	12
2.3.5.	Robôs Articulados Antropomórficos	13
2.4.	Segurança em Robótica Industrial	14
2.5.	Robô Colaborativo.....	15
3.	Descrição das atividades desenvolvidas	17
3.1.	User Frame e Tool Frame	17
3.1.1.	Importância e criação de User Frames.....	18
3.1.1.1.	Criação de User Frames em robôs Yaskawa Motoman.....	19
3.1.2.	Importância e criação de Sistemas de Coordenadas de Ferramenta	22
3.1.2.1.	Criação de novas ferramentas em robôs Yaskawa – Motoman.....	23
3.2.	Conceitos de cinemática em robótica Industrial.....	26
3.2.1.	Movimento Linear	28
3.2.2.	Movimento de Junta	28
3.2.3.	Movimento Circular.....	28
3.2.4.	Movimentos Elípticos	29
3.3.	Aplicação de robôs Yaskawa para Lixagem de Elementos de Elevadas Dimensões	29
3.3.1.	Estudo da melhor solução para a aplicação pretendida	30
3.3.2.	Equipamentos utilizados	31

3.3.2.1. Sistemas de lixagem e Aspiração	32
3.3.2.2. Sistema de medição de força e Amortecimento	33
3.3.2.3. Equipamentos Elétricos.....	34
3.3.3. Descrição do processo de Lixagem	35
3.3.4. Apresentação do Layout final.....	36
3.3.4.1. Elaboração de Simulação em MotoSim	39
3.3.5. Estratégias de programação utilizadas	41
3.3.5.1. Fluxograma de funcionamento da máquina	41
3.3.5.2. Programa Main Geral	42
3.3.5.3. Programa Main do Produto.....	44
3.3.5.4. Movimentação das Estruturas Linearmente (Carro do robô)	44
3.3.5.5. Programa de medição e referenciação do produto	46
3.3.5.6. Programas de Secções Individuais (Manipulação de Produto)	47
3.3.5.7. Rotinas de funcionamento especial	50
3.3.5.8. Aplicação Motoplus para compensação dinâmica da trajetória.....	53
Conclusões finais sobre o estágio efetuado.....	57
Referências.....	58

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Logotipo da empresa Robowork - Solutions and Services	2
Figura 2 - Peça Rossum's Universal Robots	3
Figura 3 - Design automatizado por Leonardo da Vinci	4
Figura 4 - George Devol e Joseph Engelberger – Unimate	5
Figura 5 - Corpo de um manipulador, evidenciando os eixos	6
Figura 6 - Tipos de Juntas	7
Figura 7 - Controladores de robôs da marca Yaskawa Motoman	9
Figura 8 - Exemplos de consolas de programação de robôs industriais	9
Figura 9 - Exemplo de Robô Cartesiano e respetivo volume de trabalho	10
Figura 10 - Exemplo de Robô Cilíndrico e respetivo volume de trabalho	11
Figura 11 - Exemplo de Robô Esférico e respetivo volume de trabalho	11
Figura 12 - Exemplo de Robô SCARA e respetivo volume de trabalho	12
Figura 13 - Robô Articulado Antropomórfico e respetivo volume de trabalho	13
Figura 14 - Exemplo de programação de um Robô colaborativo	16
Figura 15 - Distribuição de sistemas de coordenadas num robô	17
Figura 16 - Regra da mão direita para sistemas de coordenadas	18
Figura 17 - Exemplo de sistema de coordenadas de utilizador	18
Figura 18 - User Frame robôs Yaskawa, passo 1	20
Figura 19 - User Frame robôs Yaskawa, passo 2	20
Figura 20 - User Frame robôs Yaskawa, passo 3	20
Figura 21 - Identificação dos eixos segundo Yaskawa	21
Figura 22 - Alterar sistema de eixos em utilização em robôs YASKAWA	22
Figura 23 - Localização do TCP de robôs industriais por defeito	22
Figura 24 - Pontos a guardar aquando da criação de uma TOOL	23
Figura 25 - Seleção do menu ferramenta em Yaskawa.....	23
Figura 26 - Seleção e atribuição de nome à Tool em Yaskawa	24
Figura 27 - Relocalização manual do TCP em Yaskawa	24
Figura 28 - Criação de Tool's, seleção do ponto a modificar	24
Figura 29 - Opção para Cálculo do centro de gravidade	25
Figura 30 - Janela de Cálculo do centro de gravidade.....	25
Figura 31 - Robô Yaskawa com carga no eixo U	25
Figura 32 - Nível de Posição em Movimentos.....	26
Figura 33 - Tipos de instruções para movimentos em robôs industriais	27
Figura 34 - Representação dos tipos de movimentos em robótica Industrial	27
Figura 35 - Exemplo de Movimento Circular.....	28
Figura 36 - Exemplo de Movimento Elíptico	29
Figura 37 - Exemplo de Comboio	30
Figura 38 - Robô Yaskawa com Track Linear	30
Figura 39 - Robô Industrial Yaskawa GP180-120	31
Figura 40 - Exemplo de lixadora utilizada	32
Figura 41 - Exemplo de lixas utilizadas	32

Figura 42 - ACF (Active Contact Flange)	33
Figura 43 - Funcionamento de ACF (Active Contact Flange)	34
Figura 44 - Processo de Lixagem Final.....	35
Figura 45 - Layout Final da Máquina de Lixagem	36
Figura 46 - Layout final da máquina visto de topo.....	37
Figura 47 - Estrutura mecânica com robô	38
Figura 48 - Layout final presente no cliente.....	38
Figura 49 - Seleção do menu CadTree no simulador MotoSim.....	39
Figura 50 - Seleção de opção Add New Model no simulador MotoSim.....	39
Figura 51 - Atribuição de nome a um modelo 3D no simulador MotoSim	40
Figura 52 - Adição de elementos a modelos 3D no simulador MotoSim	40
Figura 53 - Adição de ficheiro 3D no software MotoSim	40
Figura 54 - Formatos de ficheiros 3D suportados no software MotoSim	41
Figura 55 - Fluxograma de funcionamento geral da máquina	42
Figura 56 - Exemplo de Rotina Main Geral.....	43
Figura 57 - Programa de movimentação da Estrutura Linearmente.....	45
Figura 58 - Programa de Medição – Busca.....	46
Figura 59 - Programação de medição - Atualização User Frame	47
Figura 60 - Divisão de Secções do produto	47
Figura 61 - Seleção da função CAM.....	48
Figura 62 - Criação de um Novo CAM JOB	49
Figura 63 - Opção de Create Path	49
Figura 64 - Selecionar o espaçamento entre pontos	50
Figura 65 - Pontos de uma trajetória ao longo de uma aresta	50
Figura 66 - System JOB para Mute das barreiras	51
Figura 67 - Interrupt Job.....	52
Figura 68 - Selecionar Menu System – Setup.....	54
Figura 69 - Selecionar Setup - Option Function	54
Figura 70 - Habilitar Opção Motoplus	54
Figura 71 - Código desenvolvido em Motoplus.....	55

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Principais sensores utilizados em robótica e respectivas aplicações	8
Tabela 2 – Principais tipos de Atuadores e respectivas características	8
Tabela 3 - Classificação de Medidas de Segurança	14

SIMBOLOGIA E ABREVIATURAS

SCARA	Selective Compliance Assembly Robot Arm
TCP	Tool Center Point
ACF	Active Contact Flange
PLC	Programmable Logic Controller
HMI	Human Machine Interface
RPM	Rotações Por Minuto
CPU	Central Process Unit
TCP	Transmission Control Protocol
UDP	User Datagram Protocol

1. Introdução

1.1. Objetivos do relatório de estágio

O presente relatório de estágio tem como principal objetivo descrever as tarefas realizadas na empresa Robowork durante o estágio curricular no âmbito do Mestrado em Engenharia Eletrotécnica - especialização em Automação e Comunicações em Sistemas Industriais.

O estágio elaborado teve a duração de cerca de oito meses e meio, tendo início a 1 de fevereiro de 2022 e fim a 16 de Outubro de 2022.

Este estágio permitiu o acompanhamento das equipas de programação e de projeto da empresa Robowork. Este acompanhamento levou a uma consolidação e aquisição de vários conhecimentos sobre o procedimento necessário para projetar com sucesso a implementação de sistemas robóticos para as mais diversas aplicações, bem como toda a programação necessária para o correto funcionamento dos mesmos.

1.2. Empresa Robowork – Solutions and Services

A Robowork-Solutions and Services tem a sua sede localizada em Cacia, no distrito de Aveiro.

Trata-se de uma empresa que tem como principal objetivo fornecer resposta aos desafios de elevado grau de exigência que os seus clientes se deparam no âmbito da robótica industrial ¹.

Dada a elevada dinâmica do mercado industrial, a entidade em questão não só elabora máquinas novas como efetua o *retrofitting* de células já existentes, permitindo assim a obtenção de máquinas atualizadas a um custo substancialmente inferior.

Aquando da conceção de uma nova máquina industrial esta passa pelas seguintes etapas:

1. Levantamento das funções da célula face ao pretendido pelo cliente;
2. Discussão e avaliação da melhor solução para os objetivos propostos;
3. Projeto Mecânico e escolha dos equipamentos adequados;
4. Projeto Elétrico e escolha dos equipamentos adequados;
5. Fabricação de todos os componentes necessários;
6. Montagem, programação e testes da célula.

É ainda importante referir que apenas quando o equipamento em questão se encontra validado e a funcionar corretamente é efetuada a sua entrega ao cliente final, existindo ainda, um processo de acompanhamento da célula para garantir o seu bom funcionamento aquando da sua instalação final, bem como a formação dos técnicos que operam com o equipamento instalado.

¹ <https://www.robowork.pt/pt/robowork-solutions-and-service>

Na Figura 1 encontra-se representado o logotipo da empresa.

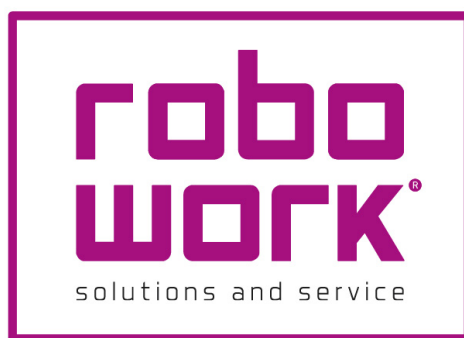


Figura 1 - Logotipo da empresa Robowork - Solutions and Services ²

1.3. Estrutura do relatório

A estrutura do presente relatório encontra-se de acordo com as tarefas desempenhadas ao longo do estágio, encontrando-se assim dividido em quatro capítulos.

No primeiro capítulo é feita uma introdução ao presente relatório, passando pelos objetivos do estágio realizado bem como uma breve descrição da empresa onde o mesmo decorreu.

Seguidamente, no segundo capítulo apresenta um enquadramento teórico - conceptual, no qual é efetuada em exposição de conceitos de robótica bem como um enquadramento da robótica em ambientes industriais. Neste capítulo é ainda efetuada uma pequena análise teórica sobre a crescente utilização dos robôs colaborativos bem como uma apresentação das suas vantagens e características.

No terceiro capítulo, encontra-se uma descrição das atividades do projeto no qual o formando participou, designada aplicação de robôs industriais para lixagem de objetos de comboios.

Por fim, num quarto capítulo são apresentadas algumas observações finais perante o estágio efetuado.

² Figura retirada de: <https://www.robowork.pt/pt>

2. Contextualização: Robótica no Mundo Industrial

2.1. História e evolução do robô industrial

Um robô industrial é um manipulador controlado automaticamente, reprogramável, multifuncional, programável em três ou mais eixos, que pode ser fixo ou móvel para uso em aplicações de automação industrial (Singh & Sellappan, 2008).

O termo “robô” foi introduzido pelo escritor Checo Karl Kapek em 1921 numa peça de teatro de sua autoria intitulada: “Rossum’s Universal Robots” (Figura 2) onde o mesmo descreve o robô como uma máquina humanoide que é capaz de trabalhar substancialmente mais que um humano, mas que não apresenta sentimentos.

O termo robô deriva da palavra Checa “Robota”, que significa trabalhos pesados repetitivos (Wallén, 2008).

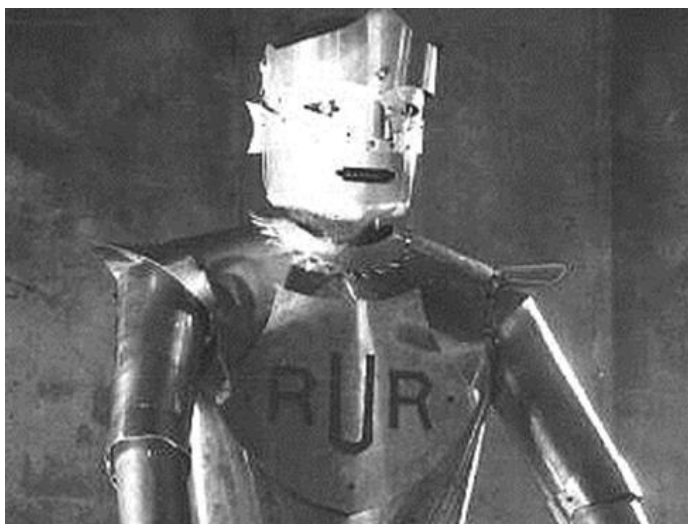


Figura 2 - Peça Rossum's Universal Robots ³

Ainda que o termo robô tenha sido utilizado inicialmente por Karel Kapek, muito antes, por volta do século 14, já Leonardo da Vinci apresentava vários designs automatizados inspirados no ser humano, como apresentado na Figura 3.

³ Figura retirada de: <http://stagevoices.com/2021/01/17/robots-turn-100-and-still-enthrall-us/>

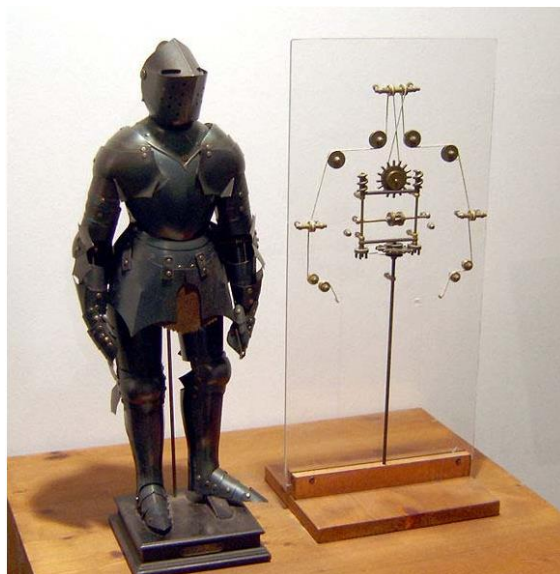


Figura 3 - Design automatizado por Leonardo da Vinci ⁴

Com o decorrer dos anos, o termo robô foi muitas vezes utilizado. Uma pessoa que largamente contribuiu para a popularização deste termo foi escritor de ficção científica Isaac Asimov (Wallén, 2008), sendo o mesmo tido como o criador das três leis fundamentais da robótica, criadas com o objetivo de garantir que os robôs não podem magoar de qualquer forma humanos e que obedecem as instruções destes. Estas leis são as seguintes:

1. Um robô não pode causar dano a um ser humano, ou, por falta de ação permitir que um ser humano entre numa situação de perigo;
2. Um robô tem de obedecer a ordens dadas por humanos, exceto em situações que estas ordens impliquem colocar humanos em perigo;
3. Um robô deve preservar a sua própria existência desde que no decorrer não quebre as primeiras duas regras.

Ainda que o conceito de robô tenha uma história que se estende até cerca de 1920, seria necessário aguardar até 1959 para que George Devol and Joseph Engelberger desenvolvessem o primeiro robô industrial para instalação numa fábrica da General Motors (como ilustrado na Figura 4). Este equipamento, controlado através de atuadores hidráulicos desempenhava as suas funções através da repetição de posições previamente guardadas.

⁴ Fonte: (Dr. Bob Williams, n.d.)



Figura 4 - George Devol e Joseph Engelberger – Unimate ⁵

Com o decorrer dos anos existiram inúmeras alterações e avanços no mundo da robótica industrial. Alguns dos momentos marcantes na história do robô industrial encontram-se enumerados de seguida:

1. 1962, primeiro robô cilíndrico, Versatron foi instalado pela AMF (American Machine and Foundry) numa fábrica da Ford no Estados Unidos (Singh & Sellappan, 2008);
2. 1969, a empresa General Motors instala nas suas fábricas os primeiros robôs destinados a efetuar soldadura por pontos (Singh & Sellappan, 2008);
3. 1973, Kuka desenvolve o seu robô “Famulus”, sendo este o primeiro robô industrial com 6 eixos controlados electromecanicamente (Singh & Sellappan, 2008);
4. 1974, Kawasaki desenvolve um robô para assistir na produção de quadros de motos nas suas fábricas (Singh & Sellappan, 2008);
5. 1978, Unimatron/Vicarn desenvolvem o robô PUMA (Programmable Universal Machine for Assembly), adaptado a especificações da General Motors, com a finalidade de manipular peças ocupando o mesmo espaço de fábrica que seria necessário para um humano desempenhar a mesma tarefa (Singh & Sellappan, 2008);
6. 1978, na Universidade de Yamanashi no Japão é desenvolvido o primeiro robô Scara;
7. 1985, Kuka introduz no mercado o primeiro robô industrial em forma de Z, à semelhança da maioria dos robôs industriais atuais (Singh & Sellappan, 2008);
8. 1998, Abb desenvolve o FlexPicker (robô Delta), sendo este o robô mais rápido, que lhe permite efetuar o picking de peças com velocidades superiores a 10 metros por segundo (Singh & Sellappan, 2008);
9. 2004, a Motoman apresenta o controlador NX100, permitindo assim o controlo de 4 robôs, até 48 eixos (Singh & Sellappan, 2008).

⁵ Figura retirada de: <https://www.automate.org/a3-content/joseph-engelberger-unimate>

2.2. Composição genérica do Robô Industrial

De um ponto de vista genérico é possível dividir a constituição de um robô industrial em 3 grandes grupos:

1. Elos e juntas de ligação;
2. Sensores e atuadores;
3. Controlador do robô.

2.2.1. Elos e juntas de manipuladores robóticos

De um ponto de vista construtivo podemos considerar os elos do robô como um dos elementos mais importantes uma vez que são estes que perfazem maior parte da estrutura do robô e que lhe conferem toda a resistência mecânica necessária.

Como elementos ligantes destes elos estão as juntas, que permitem que um robô consiga efetuar movimentos relativos entre elos. Uma junta pode assim ser definida como um elemento que permite a interligação entre dois ou mais elos e que permite que exista movimento relativo entre os mesmos num único grau de liberdade (ou dimensão).

Na Figura 5 é possível observar de que modo a interação entre os elos e as juntas é efetuada.

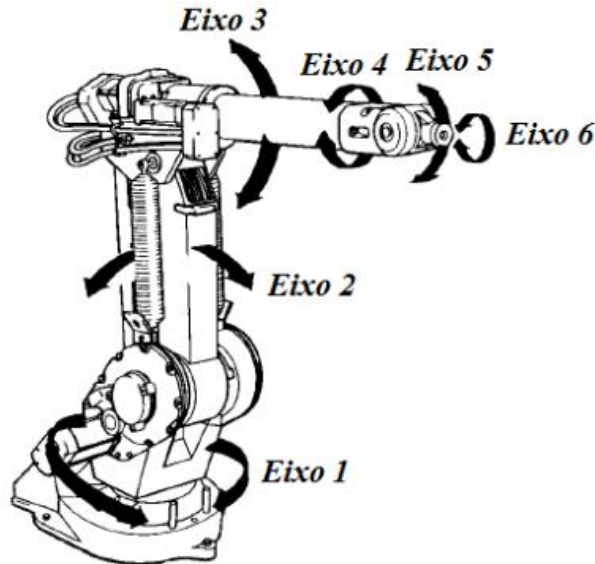


Figura 5 - Corpo de um manipulador, evidenciando os eixos ⁶

É possível classificar as juntas de duas formas:

1. Juntas de rotação, nas quais o movimento relativo entre elos dá-se de uma forma rotacional;
2. Juntas de traslação (ou juntas prismáticas), nas quais o movimento relativo entre elos dá-se de forma linear.

⁶ Fonte: (Carlos Pereira Fernandes Junior, 2014)

Na Figura 6 é possível observar os diversos tipos de juntas e o tipo de movimento entre elos que as mesmas permitem.

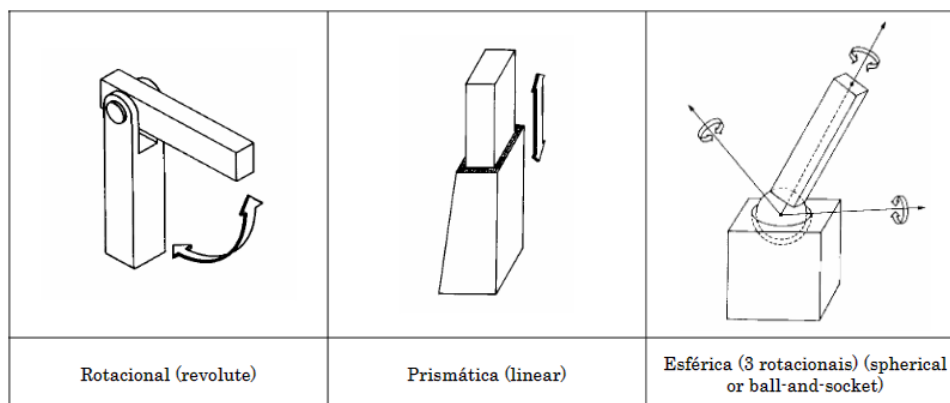


Figura 6 - Tipos de Juntas ⁷

Adicionalmente, como demonstrado na figura anterior, existem também juntas esféricas, este tipo de junta é a combinação de 3 juntas rotacionais. Atualmente, no mundo da Robótica Industrial este tipo de juntas não é muito utilizado.

2.2.2. Sensores e atuadores de robôs industriais

No que diz respeito aos sensores e atuadores é possível considerar este como o grupo responsável por aquisição de informação e movimentação robô.

Sendo o robô industrial uma máquina, é necessário que recolha informação sobre o seu meio envolvente. Desta forma, os robôs industriais são equipados de fábrica com sensores imprescindíveis ao seu funcionamento, como por exemplo Encoder's, que permitem controlar com um elevado rigor a posição do robô. Adicionalmente, além de todos os sensores equipados de fábrica nos manipuladores robóticos, dependendo da aplicação onde este será instalado poderá ser necessário a adição de mais sensores.

⁷ Fonte: (Vitor M. F. Santos, 2003)

Na Tabela 1 estão presentes alguns dos tipos de sensores mais utilizados no mundo da robótica bem como as suas principais aplicações.

Tabela 1 - Principais sensores utilizados em robótica e respetivas aplicações ⁸

Tipo de Sensor	Princípio de funcionamento	Informação obtida pelo sensor	Aplicações em Robôs Industriais
Sensores Táteis	Capacitivo, piezoelétrico, piezoresistivo, ótico.	Força de contacto, área, posição.	HRC (Colaboração Humano – Robô), monitorização de qualidade, pegar em objetos.
Sensores Visuais	Imagens CCD ou CMOS.	Imagens.	HRC, navegação, controlo de manipuladores, montagem, programação de robôs.
Sensores Laser	TOF (Tempo de voo), triangulação, interferência ótica.	Distância, deslocamento.	HRC, navegação, manipulação de controladores.
Encoder's	Fotoelétrico, magnético, indutivo, capacitivo.	Deslocamento angular.	Navegação, controlo de manipuladores.
Sensores de Proximidade	Capacitivo, indutivo, fotoelétrico.	Aproximação de objetos.	HRC, pegar em objetos.
Sensores de Inércia	DR (navegação estimada).	Aceleração, velocidade angular.	Navegação, controlo de manipuladores.
Sensores de Torque	Indutivo, tensão de resistência.	Torque.	HRC, programação de robôs.
Sensores Acústicos	Capacitivo.	Sinais sonoros.	HRC, soldadura.
Sensores Magnéticos	Efeito de Hall.	Intensidade do campo magnético.	Navegação.
Sensores Ultrassónicos	TOF.	Distância.	Evitar obstáculos.

No que diz respeito a atuadores estes são os responsáveis por fazer mover as juntas dos robôs. Atualmente existem 3 grandes grupos de atuadores utilizados em robôs industriais. Estes atuadores encontram-se brevemente descritos na Tabela 2.

Tabela 2 – Principais tipos de Atuadores e respetivas características ⁹

Característica	Tipo de Atuadores		
	Elétricos	Hidráulicos	Pneumáticos
Controlo	Fácil. Possibilidade de ser complexo.	Facilitado com a utilização de electroválvulas.	Difícil devido a questões de compressibilidade do ar.
Velocidade	Grande.	Média / Grande.	Muito Grande.
Binário a baixa velocidade	Pequeno / Médio.	Grande.	Pequeno.
Precisão	Boa. Limitada pela utilização da transmissão.	Boa.	Má, exceto em operações com posições fixas.
Funcionamento em situação estática	Mau, requer utilização de travões.	Excelente.	Bom, não existe risco de danificar o sistema.
Questões Ambientais	A presença de arcos elétricos pode ser indesejável.	Perigo de fugas de óleo.	Sistemas Limpos. Risco de poluição sonora de componentes, compressores e fugas.
Custos	Relativamente Baixos.	Altos.	Relativamente Baixos.

⁸ Fonte: (Li & Liu, 2019)

⁹ Fonte: (Vítor M. F. Santos, 2003)

2.2.3. Controladores de robôs industriais

Todo a operação do robô não seria possível sem a existência do controlador, esta unidade é responsável por gerar toda a informação que permite a movimentação do robô. Atualmente, nos controladores é possível observar todo o equipamento de controlo e de acionamento.

O modulo de controlo contem todo o equipamento de controlo do robô, tais como: o computador principal, placas eletrônicas de controlo, placas de rede...

O modulo de acionamento contem todo o equipamento eletrónico de alimentação que assegura o fornecimento de energia ao robô.

Na Figura 7 é possível observar alguns dos controladores apresentados pela marca de robôs Yaskawa Motoman.



Figura 7 - Controladores de robôs da marca Yaskawa Motoman ¹⁰

Adicionalmente, em conjunto com o controlador encontra-se a consola de programação do robô. Este elemento atua como uma «ponte» entre o robô e o seu operador, permitindo observar o que o robô se encontra a processar, efetuar programação do mesmo, consultar estado de Sinais Digitais e/ou Analógicos e verificar se existem alarmes ativos.

Na Figura 8 encontram-se representados alguns exemplos de consolas de programação de robôs industriais.



Figura 8 - Exemplos de consolas de programação de robôs industriais ¹¹

¹⁰ Figura retirada de: <https://www.motoman.com/en-us/products/controllers>

¹¹ Figura retirada de: <https://www.assemblymag.com/articles/96022-long-live-the-robot-teach-pendant>

2.3. Principais tipos de robôs industriais

Atualmente, quando se classifica os robôs industriais quanto à sua estrutura cinemática existem 5 grandes grupos de robôs:

1. Robôs Cartesianos;
2. Robôs Cilíndricos;
3. Robôs Esféricos;
4. Robôs Articulado Horizontais, conhecidos vulgarmente por robôs SCARA;
5. Robôs Articulado Antropomórfico.

2.3.1. Robôs Cartesianos

Tal como o nome sugere, estes manipuladores robóticos efetuam movimentos apenas em coordenadas cartesianas (X, Y, Z). Neste tipo de robôs, visto que não existem rotações as juntas utilizadas são juntas prismáticas, permitindo assim um volume de trabalho retangular.

Na Figura 9 está representado um exemplo do volume de trabalho deste tipo de robô.

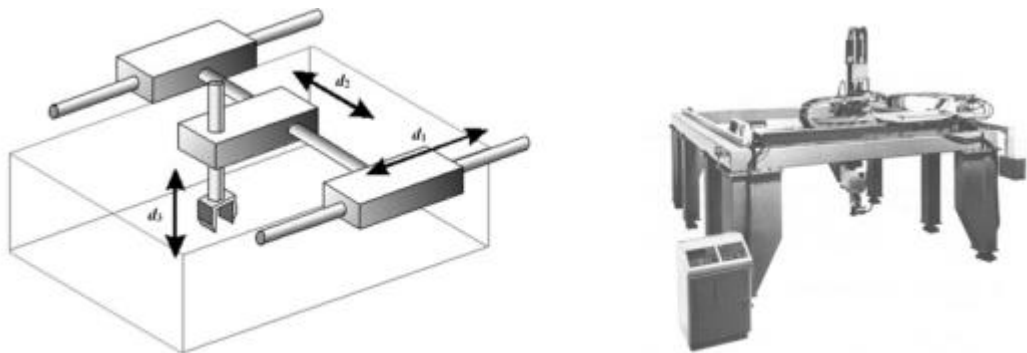


Figura 9 - Exemplo de Robô Cartesiano e respetivo volume de trabalho ¹²

Estes robôs apresentam as seguintes características:

1. Elevada precisão no controlo de posição;
2. Operação simples e fácil programação;
3. Capacidade de operar cargas elevadas;
4. Necessidade de uma elevada área para a sua operação;
5. Montagem complexa.

Devido às suas características estes robôs são habitualmente utilizados para aplicações de pick and place onde é necessário manipular objetos de elevadas dimensões e/ou massa linearmente.

¹² Fonte: (Dr. Bob Williams, n.d.)

2.3.2. Robôs Cilíndricos

Robôs cilíndricos apresentam uma junta rotativa na base que lhes confere um volume de trabalho semelhante ao representado na Figura 10.

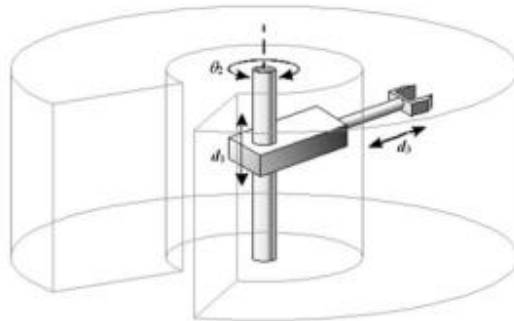


Figura 10 - Exemplo de Robô Cilíndrico e respetivo volume de trabalho ¹³

Este género de robô apresenta as seguintes características:

1. Operação relativamente simples quando comparado com outros tipos de robôs;
2. Requer pouco espaço para o seu funcionamento;
3. Permite o transporte de cargas elevadas;
4. Baixa precisão na direção do seu movimento de rotação.

2.3.3. Robôs Esféricos

Robôs esféricos à semelhança dos cilíndricos possuem uma junta rotativa na base, no entanto, além desta possuem uma outra junta rotativa que lhes conferem um volume de trabalho semelhante a uma esfera, tal como representado na Figura 11.

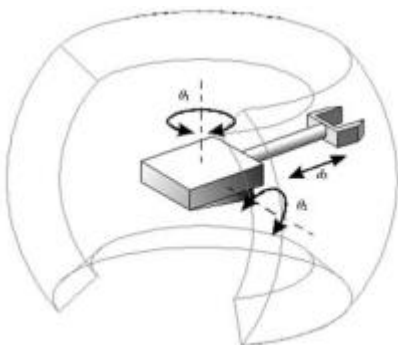


Figura 11 - Exemplo de Robô Esférico e respetivo volume de trabalho ¹⁴

¹³ Fonte: (Dr. Bob Williams, n.d.)

¹⁴ Fonte: (Dr. Bob Williams, n.d.)

Algumas das características deste género de manipulador robótico encontram-se representadas de seguida:

1. Elevado volume de trabalho;
2. Alcance vertical reduzido;
3. Necessitam de um controlo complexo;

Atualmente, este tipo de robô devido às suas características é utilizado em situações em que é necessário um elevado alcance, como por exemplo em aplicações de paletização.

2.3.4. Robôs Articulados Horizontais (SCARA)

Os robôs SCARA, apresentam duas juntas rotativas paralelas ao plano de trabalho e uma junta prismática de forma a permitir movimentos em Z.

Este género de manipulador robótico apresenta um volume de trabalho como o representado na Figura 12.

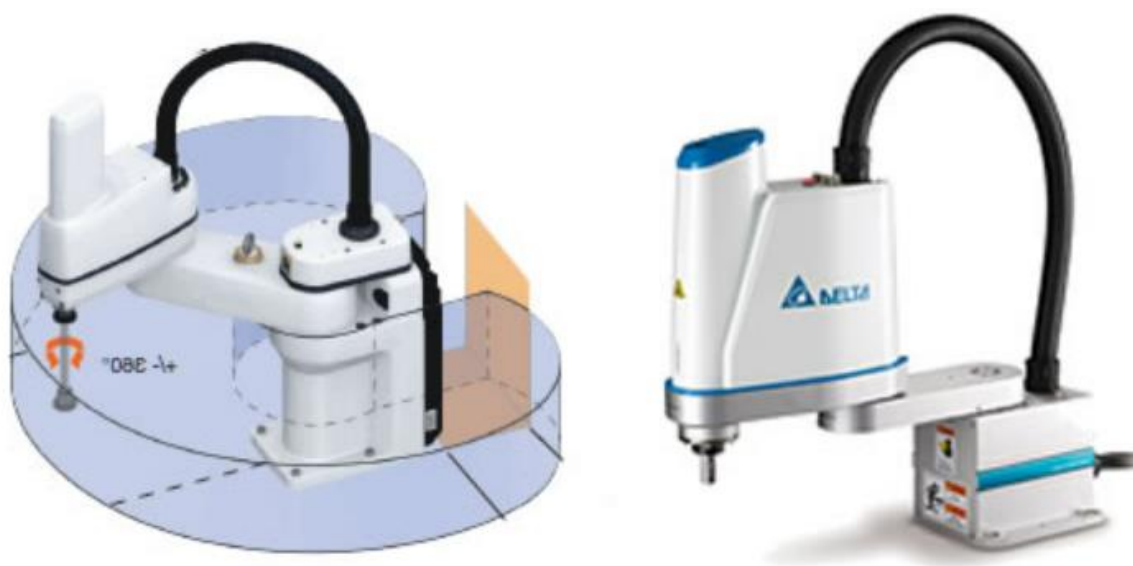


Figura 12 - Exemplo de Robô SCARA e respetivo volume de trabalho ¹⁵

Como principais características este robô apresenta o seguinte:

1. Elevada velocidade de operação;
2. Elevada repetibilidade;
3. Fácil programação;
4. Limitado a superfícies planas.

¹⁵ Figura retirada de: <https://www.citisystems.com.br/tipos-de-robos/>

Apresentando estas características, este manipulador mecânico é muito utilizado em aplicações que requerem uma elevada velocidade e precisão, como por exemplo montagem de semicondutores, indústria farmacêutica e linhas de montagem de pequenos componentes que requerem uma manipulação de elevada velocidade.

2.3.5. Robôs Articulados Antropomórficos

Comparativamente aos tipos de robôs apresentados anteriormente, este tipo de robôs apresenta pelo menos três juntas rotativas, sendo que o movimento da junta da base do robô é ortogonal em relação às outras duas juntas de rotação. Relativamente ao volume de trabalho este tipo de robôs apresenta um volume de trabalho mais complexo e mais abrangente que os demais, como representado na Figura 13.

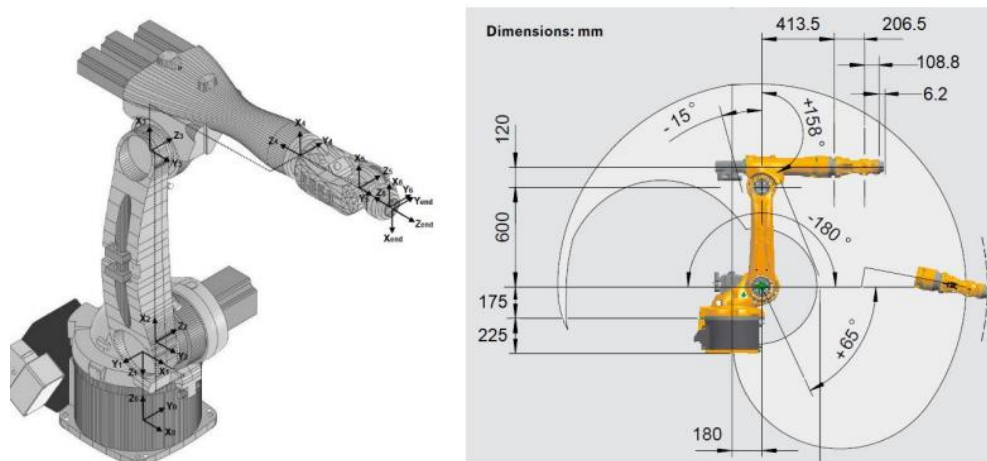


Figura 13 - Robô Articulado Antropomórfico e respetivo volume de trabalho ¹⁶

Como principais características os robôs articulados antropomórficos apresentam o seguinte:

1. Alta velocidade de funcionamento;
2. Maior flexibilidade para aplicações com restrições de espaço;
3. Facilidade em alinhar as três coordenadas fundamentais (X, Y e Z);
4. Necessidade de um controlador dedicado;
5. Programação mais complexa quando comparada com os outros tipos de robôs.

Tendo em conta as características apresentadas este tipo de manipulador é indicado para uma enorme variedade de aplicações, como por exemplo: Soldadura, Alimentação de Máquinas, Paletização, Manipulação de Materiais...

¹⁶ Fonte: (Raksiri et al., 2020)

2.4. Segurança em Robótica Industrial

Durante as últimas décadas a área da indústria tem visto cada vez mais a implementação de robôs industriais de forma a automatizar e melhorar processos. Uma das consequências da implementação de robôs prende-se num aumento dos riscos que existem para os trabalhadores (Robla-Gomez et al., 2017).

Desta forma, de modo a evitar acidentes sempre que é efetuada a instalação de um robô industrial é necessário implementar medidas de segurança de forma a evitar que as pessoas e o robô ocupem o mesmo espaço quando o robô se encontra em funcionamento, na Tabela 3 encontra-se uma classificação das principais medidas de segurança implementadas.

Tabela 3 - Classificação de Medidas de Segurança ¹⁷

Principal Objetivo	Objetivo Secundário	Tipo de Sistema Implementado		Dispositivos	Ações
		Software	Hardware		
Separar a Área de Trabalho dos Robôs e dos Humanos	Restringir Atividade Humana	Sem Algoritmos Implementados	Sinais de Aviso	Óticos, Acústicos, Sinais ...	Sem ações
			Acesso Restrito	Vedações	
	Modificar a Comportamento do Robô	Algoritmos Básicos de Controlo	Sistemas de Segurança Ativos e Passivos	Sensores Proximidade, Sensores Táteis	Paragem ou Redução da Velocidade do Robô
Partilha da Área de Trabalho entre Humanos e Robôs	Quantificar o Nível da Lesão provocada por Colisão	Sem Algoritmos Implementados	Estimativa de Tolerância de dor	Simulação do Braço Humano	Sem ações
			Avaliação do Nível de Lesão	Testes de Colisão Standard	
	Minimizar Lesão provocada por Colisões Involuntárias e / ou Voluntárias	Sem Algoritmos Implementados	Sistemas de Observância Mecânica	Sistemas de Absorção Elástica	Robô para / redução da velocidade do Robô de forma a reduzir a força de impacto
			Estruturas com massa reduzida	Fibra de carbono, Alumínio	
		Estratégias para Detecção de Colisões	Sensores Propriocetivos	Encoder's	
			Combinação de Sensores e sistemas RBG-D	Sensores de Força e dispositivos RBG-D	
	Evitar Colisões	Estratégias para prevenir Colisões	Sistemas de Detecção de Movimento	Modelos Geométricos	
			Sensores para Adquirir Informação do Meio Envolvente	Sensores Capacitivos, Ultrassónicos e Laser	
			Sistemas de Visão Artificial	Camaras	
			Sensores de Proximidade	Sensores Laser ou Camaras	

¹⁷ Tabela adaptada de: (Robla-Gomez et al., 2017)

Como demonstrado na tabela anterior, aquando da implementação de um sistema robótico é imperativo efetuar uma avaliação das seguranças necessárias para um bom funcionamento da máquina sem a possibilidade e colocar pessoas em risco.

Numa tentativa de colocar robôs e pessoas a trabalhar na mesma área de trabalho, foi desenvolvido do robô colaborativo, descrito no capítulo seguinte.

2.5. Robô Colaborativo

Atualmente, por questões de segurança a interação entre robôs e pessoas nas indústrias é reduzida ao mínimo essencial.

Sendo o robô industrial um equipamento com um conhecimento muito reduzido do seu meio envolvente é natural que para o funcionamento deste num ambiente com pessoas sejam necessárias várias medidas de segurança, tal como:

1. Utilização de vedações de segurança;
2. Utilização de Scanners e/ou barreiras de segurança;

De forma simplificada, é necessário garantir que, quando alguma pessoa entra no espaço de operação do robô este para imediatamente o seu movimento e não o retome até que as seguranças sejam rearmadas.

Desta forma, aquando da implementação de uma solução utilizando um robô industrial é necessário contar com um espaço de fábrica bastante elevado. Existem situações onde esta característica não é encarada como um problema, no entanto, existem outras situações nas quais o espaço de fábrica é bastante importante e onde é necessário fazer de tudo para conseguir condensar ao máximo as máquinas de forma a colocar mais no mesmo local.

Um outro desafio da utilização de robôs industriais prende-se na sua programação, geralmente demorada e complexa, sendo necessários técnicos especializados para o efeito.

Tendo em conta as duas características dos robôs industriais descritas anteriormente idealizou-se uma solução que não ofereça perigo a pessoas, permitindo o seu funcionamento na mesma área de trabalho, possuindo adicionalmente uma programação simples e acessível.

Desta forma surgiu o Robô Colaborativo (Sherwani et al., 2020), designado por Cobot. Tal como o nome do mesmo sugere, este tipo de robô tem como principal objetivo a sua utilização em tarefas nas quais seja necessário a interação entre pessoas e robôs, eliminando assim a necessidade de utilização de tantos sistemas de segurança como no caso do robô industrial.

Este tipo de robôs consegue operar lado a lado com pessoas devido à utilização de diversos sensores de força programáveis, nos quais é possível definir a partir de que valor de força aplicada no robô este para. Desta forma, é possível criar situações extremamente seguras nas quais o mínimo contacto no robô leva à paragem do mesmo.

Adicionalmente, estes robôs podem ser programados de forma bastante simples e intuitiva, é apenas necessário ao operador “agarrar” no robô, movê-lo até ao ponto pretendido e guardar este mesmo ponto na sua programação.

Na Figura 14 é possível observar a simplicidade de programação de um robô colaborativo.



Figura 14 - Exemplo de programação de um Robô colaborativo ¹⁸

¹⁸ Figura retirada de: <https://www.cobottrends.com/cobots-vs-industrial-robots-what-are-differences/>

3. Descrição das atividades desenvolvidas

O presente capítulo e respetivos subcapítulos descrevem as atividades realizadas no âmbito do projeto no qual foi efetuada a colaboração durante o estágio curricular efetuado.

3.1. User Frame e Tool Frame

O presente capítulo tem como objetivo fazer uma descrição de dois elementos bastante importantes e comuns a qualquer projeto que envolva robótica, a utilização de User Frames e Tool Frames.

Um dos principais pilares de uma boa programação de robótica prende-se na utilização de sistemas de coordenadas calibrados, estes sistemas definem de que modo as 3 principais coordenadas X, Y e Z se comportam.

Num robô industrial existem 4 principais tipos de Frames (Sistemas de coordenadas):

1. Sistema de coordenadas World;
2. Sistema de coordenadas Base;
3. Sistema de coordenadas Utilizador;
4. Sistema de coordenadas Ferramenta.

Na Figura 15 é possível observar de que forma se distribuem os Frames de um robô.

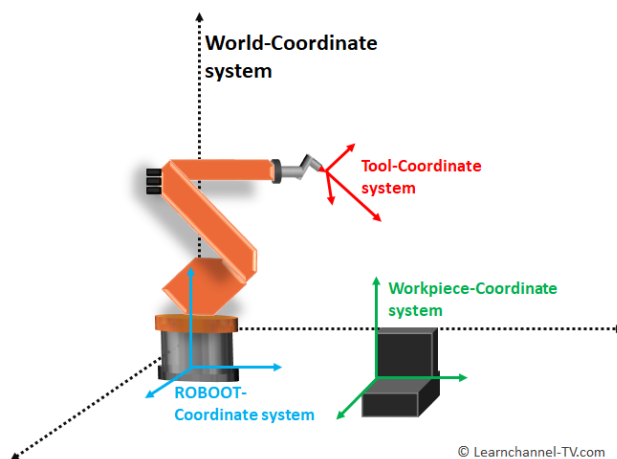


Figura 15 - Distribuição de sistemas de coordenadas num robô¹⁹

Os sistemas de coordenadas utilizados no mundo da robótica são gerados de acordo com a regra da mão direita, esta regra está representada na Figura 16.

¹⁹ Figura retirada de: <https://learnchannel-tv.com/robot/robot-coordinate-systems/>

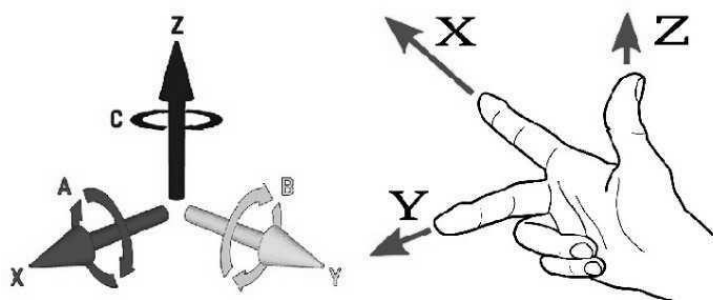


Figura 16 - Regra da mão direita para sistemas de coordenadas ²⁰

Sendo as coordenadas Base e World inalteráveis, resta a manipulação dos sistemas de coordenadas Ferramenta e Utilizador de forma a facilitar a tarefa de programação, estes dois sistemas de coordenadas e respetiva manipulação encontram-se descritos de seguida.

3.1.1. Importância e criação de User Frames

Por vezes, dependendo da aplicação torna-se interessante definir um sistema coordenadas exterior ao robô de forma a auxiliar a programação. Este sistema de coordenadas é denominado Sistema de Coordenadas de Utilizador (User Frame).

A atualização de User Frames tem dois grandes objetivos: facilitar a tarefa de programação e assegurar que o programa criado fica preparado para possíveis modificações de Layout.

Tenha-se como exemplo o Layout representado na Figura 17.

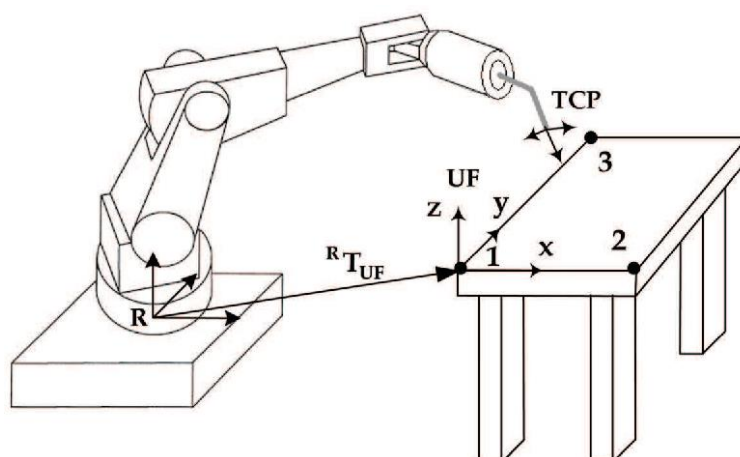


Figura 17 - Exemplo de sistema de coordenadas de utilizador ²¹

Imagine-se que é necessário efetuar uma trajetória com inúmeros pontos ao longo do segmento de reta de 1 a 3, mantendo ao longo da trajetória paralelismo com a aba da mesa. Não estando a mesa completamente alinhada com a base do robô será extremamente complicado garantir paralelismo.

²⁰ Figura retirada de: https://www.researchgate.net/figure/Cartesian-coordinate-system-a-Right-hand-rule-b-6_fig1_326500990

²¹ Fonte: (Cheng, n.d.)

Desta forma, ao efetuar um User Frame tal como o da figura anterior, basta movimentar-se o robô segundo a coordenada X do User Frame e é garantido o paralelismo com a mesa em toda a trajetória.

Quanto ao segundo objetivo da utilização de User Frames imagine-se o seguinte:

Não existindo movimentação da mesa (objeto) de trabalho em relação ao robô não existe qualquer tipo de problema em não utilizar um Sistema de Coordenadas de Utilizador (apenas uma programação mais complicada e demorada). No entanto, na possibilidade de movimento da mesa existem duas situações:

1. Não existe um Sistema de Coordenadas de Utilizador definido e todo o programa é dado como perdido, sendo que para correção do mesmo é necessário a calibração de todos os pontos guardados;
2. Existe um Sistema de Coordenadas de Utilizador definido e o programa foi guardado em relação a este Frame. Para “reaver” o programa é apenas necessário re-calibrar User Frame e todo o programa é ajustado ao movimento efetuado pela mesa.

Com este dois exemplos torna-se evidente a importância de utilização de User Frames, seja para facilitar a tarefa de programação ou como medida de segurança.

Uma outra situação na qual a utilização de User Frames é importante, prende-se na implementação de várias células iguais. Ao utilizar estes sistemas de coordenadas é apenas necessário programar uma célula e posteriormente replicar o código para as restantes, re-calibrando os User Frames para ajustar o programa a possíveis desvios mecânicos reduzindo assim o tempo de desenvolvimento.

Durante o estágio curricular efetuado foram utilizados robôs Yaskawa Motoman, sendo de seguida descrito o processo de criação de User Frames nestes robôs.

3.1.1.1. Criação de User Frames em robôs Yaskawa Motoman

Apesar de existirem diversas versões de controladores para os robôs Yaskawa Motoman, será aqui descrito o procedimento de criação de um User Frame para a versão mais recente: YRC1000.

Para efetuar a criação de um user frame é necessário, na consola do robô aceder ao menu Robot e de seguida selecionar a opção USER COORDINATE, como demonstrado na Figura 18.



Figura 18 - User Frame robôs Yaskawa, passo 1

Após seleccionar a opção User Coordinate a seguinte janela é aberta (Representado na Figura 19).

USER COORDINATE		
NO.	SET	NAME
01	☐	
02	☐	
03	☐	
04	☐	
05	☐	

Figura 19 - User Frame robôs Yaskawa, passo 2

Na janela representada na figura anterior existem três elementos importantes. Este elementos possuem as seguintes características:

1. No, corresponde ao número do User Frame, sendo possível criar 63 sistemas de coordenadas de utilizador;
2. SET, tem como finalidade indicar se o User Frame está ou não definido, sendo que, quando o mesmo está definido este campo fica a azul;
3. Name, tal como o nome do mesmo sugere corresponde ao comentário dado para o nome do User Frame criado.

De forma a dar início a criação de um sistema de coordenadas de utilizador, dar-se-ia um nome ao user frame e clicar-se-ia no número correspondente, onde a janela da Figura 20 seria aberta.

USER COORDINATE			
USER COORD NO.: 01			
R1	:S	* TOOL: 00	SET POS. ORG XX XY
L	*		< STATUS >
U	*	ORG	: ☐
R	*	XX	: ☐
B	*	XY	: ☐
T	*		

Figura 20 - User Frame robôs Yaskawa, passo 3

Aquando da abertura da janela apresentada são dispostos os seguintes elementos:

1. R1, corresponde ao número do robô utilizado, por defeito é sempre um, no entanto, caso a aplicação necessite de mais que um robô ligado no mesmo controlador pode ser necessário escolher o robô no qual se pretende criar o User Frame;
2. Tool, indica a ferramenta com a qual o presente User Frame está a ser definido;
3. Set Pos, apresenta o eixo do sistema de coordenadas que está a ser gravado onde ORG corresponde à origem do referencial, XX corresponde ao eixo X e XY corresponde ao eixo Y, o eixo Z é definido automaticamente através da regra da mão direita descrita anteriormente;
4. Status, são os elementos que indicam se o eixo já se encontra gravado, quando o eixo está gravado este elemento altera a cor e passa a ser azul.

Retornando aos pontos anteriores, no ponto que indica o robô selecionado também é possível observar os valores em pulsos de cada um dos seis eixos (S, L, U, R, B e T) aquando da criação do eixo do sistema de coordenadas selecionado, em Yaskawa os eixos são identificados segundo a nomenclatura representada na Figura 21.

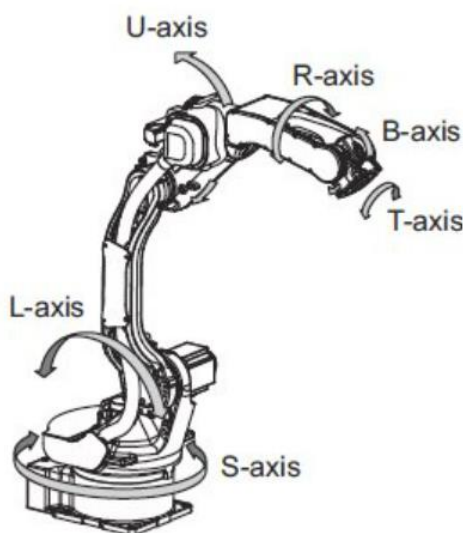


Figura 21 - Identificação dos eixos segundo Yaskawa ²²

Prosseguindo na criação do User Frame é necessário guardar os sistemas de eixos (ORG, XX e XY), para isto, é necessário efetuar o seguinte procedimento para cada um:

1. Selecionar na janela da Figura 20 qual dos elementos a adicionar (ORG, XX e XY), para alternar entre elementos basta pressionar a tecla Select presente na consola do robô;
2. Movimentar o robô até a posição no plano de trabalho onde desejamos guardar o elemento do referencial;
3. Na consola do robô premir a tecla Modify e de seguida Enter.

²² Figura retirada de: <https://www.yaskawa.eu.com/products/robots/glossary>

Após a criação do Sistema de Coordenadas basta premir a seguinte tecla Complete (Presente no fundo da janela da Figura 20) e o User Frame estará criado. Durante a movimentação do robô é possível alterar o referencial sobre o qual este está a mover premindo a tecla Cord (Figura 22).



Figura 22 - Alterar sistema de eixos em utilização em robôs YASKAWA

Para alteração do User Frame a ser utilizado basta retornar à janela representada na Figura 19 e seleccionar o User Frame pretendido.

3.1.2. Importância e criação de Sistemas de Coordenadas de Ferramenta

À semelhança dos sistemas de coordenadas de utilizador, a criação de sistemas de coordenadas de ferramenta tem como principal objetivo facilitar a tarefa de programação.

Contrariamente ao que acontece com os User Frames, na criação de novas ferramentas não é definido um novo sistema de coordenadas, mas sim uma relocação do existente.

Por defeito, os robôs industriais apresentam o TCP (Tool Center Point) no centro da flange do robô, como demonstrado na Figura 23.



Figura 23 - Localização do TCP de robôs industriais por defeito ²³

Os controladores dos robôs industriais atuais permitem guardar diversas ferramentas.

Ao guardar a nova ferramenta do robô é possível indicar ao mesmo que calcule a massa da mesma e o respetivo centro de massa, este cálculo é importante uma vez que irá influenciar algumas trajetórias e velocidades do robô de forma a colocar o mínimo esforço possível nas juntas do mesmo.

²³ Figura retirada de: <http://www.roboticmagazine.com/popular/industrial-robot-runtime-programming>

Existem duas formas distintas de calcular a relocação do TCP:

1. Introdução dos valores manualmente, possível quando existe um ficheiro 3D que permita determinar todas as cotas necessárias;
2. Guardar 5 pontos, os mais distintos possíveis, tal como demonstrado como na Figura 24.

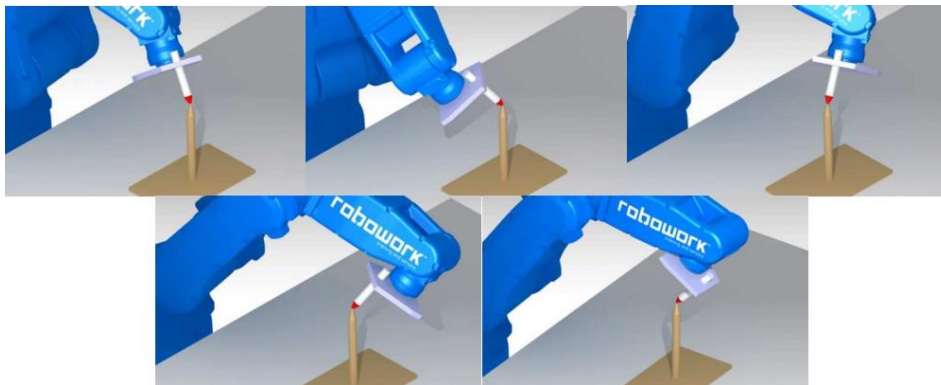


Figura 24 - Pontos a guardar aquando da criação de uma TOOL ²⁴

3.1.2.1. Criação de novas ferramentas em robôs Yaskawa – Motoman

Para criação de uma nova ferramenta em robôs Yaskawa é necessário aceder ao menu robô e à opção Tool, como representado na Figura 25.



Figura 25 - Seleção do menu ferramenta em Yaskawa

Quando seleccionada esta opção dá lugar ao menu da Figura 26, onde é necessário pressionar sobre o número da ferramenta onde pretendemos criar uma nova, após a atribuição de um nome à mesma.

²⁴ Figura da autoria da empresa Robowork – Solutions and Services

TOOL COORDINATE	
NO.	NAME
00	STANDARD TOOL
01	
02	
03	
04	

Figura 26 - Seleção e atribuição de nome à Tool em Yaskawa

Ao selecionar esta opção é aberto um menu que permite a introdução de valores para relocalização manual do TCP, representado na Figura 27.

TOOL			
TOOL NO. : 1 / 63			
NAME			
X	0.000	mm	Rx 0.0000 deg.
Y	0.000	mm	Ry 0.0000 deg.
Z	0.000	mm	Rz 0.0000 deg.
W	0.000	kg	
Xg	0.000	mm	Ix 0.000 kg.m2
Yg	0.000	mm	Iy 0.000 kg.m2
Zg	0.000	mm	Iz 0.000 kg.m2

Figura 27 - Relocalização manual do TCP em Yaskawa

Caso não exista acesso aos valores necessários para calcular a posição do TPC manualmente, é necessário selecionar a opção “Calibration” em “Utility” que dará lugar ao menu da Figura 28.

TOOL CALIBRATION			
TOOL NO.: 01			
R1	:S	*	METHOD Coord
L		*	POSITION TC1
U		*	<STATUS> TC2
R		*	TC1 : TC3
B		*	TC2 : TC4
T		*	TC3 : TC5
			TC4 : ○
			TC5 : ○

Figura 28 - Criação de Tool's, seleção do ponto a modificar

Para guardar cada uma das 5 posições é necessário movimentar o robô até à posição pretendida e efetuar a alteração pressionando a tecla “Modify” seguido por Enter. Após serem guardadas as 5 posições é necessário selecionar a opção “Complete” dando a ferramenta como criada.

Após a criação da ferramenta é importante efetuar o cálculo da massa da mesma e do respetivo centro de massa, para efetuar este cálculo é necessário selecionar a opção W.GRAV.POS MEASURE, tal como representado na Figura 29.



Figura 29 - Opção para Cálculo do centro de gravidade

Após a seleção da opção anterior é aberta a janela representada na Figura 30.

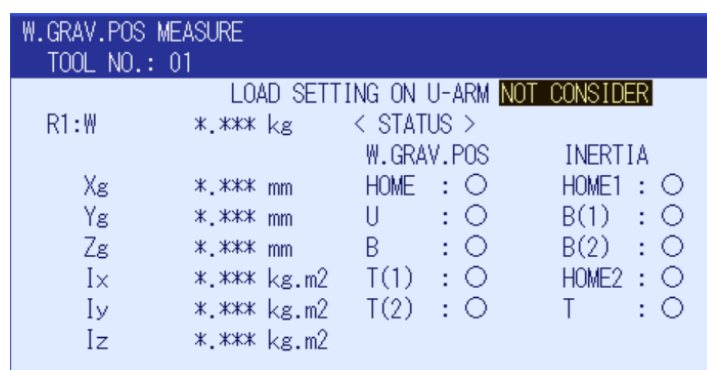


Figura 30 - Janela de Cálculo do centro de gravidade

Na janela anterior existe um elemento que é necessário ter em atenção aquando do cálculo da massa e centro de massa: Load Setting On U-Arm. Esta opção, por defeito não se encontra selecionada, no entanto, se a aplicação apresentar uma massa no topo do eixo U (como representado na Figura 31) é necessário selecionar esta opção.

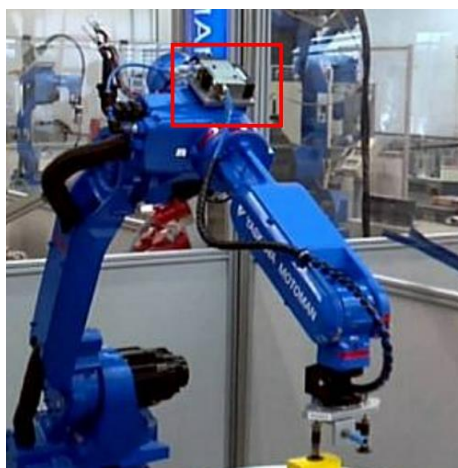


Figura 31 - Robô Yaskawa com carga no eixo U ²⁵

²⁵ Figura retirada de: <https://www.timesofisrael.com/nothing-to-fear-from-robots-says-yaskawa-israel/>

Efetuada a decisão de selecionar ou não a opção anterior, é necessário efetuar os seguintes passos:

1. Premir a tecla Servo On;
2. Manter premida a tecla homem morto;
3. Manter premida a tecla Forward.

Ao efetuar este procedimento o robô irá calcular a massa da ferramenta e o seu centro de massa.

3.2. Conceitos de cinemática em robótica Industrial

Antes de avançar é importante compreender alguns conceitos de robótica industrial e algumas particularidades da programação em Yaskawa, nomeadamente no que diz respeito à cinemática dos robôs:

1. Nível de posição em movimentos;
2. Tipos de movimentos em robótica Industrial.

No planeamento das trajetórias dos robôs industriais é possível especificar o grau de aproximação com que queremos que o robô vá a um determinado ponto.

Nos robôs industriais da Yaskawa esta característica é dada como PL, podendo variar de 0 a 8, sendo que com PL=0 o robô vai exatamente ao ponto. Quanto maior for o PL menos o robô se aproxima do ponto. Na Figura 32 encontra-se representada uma figura com um exemplo deste conceito.

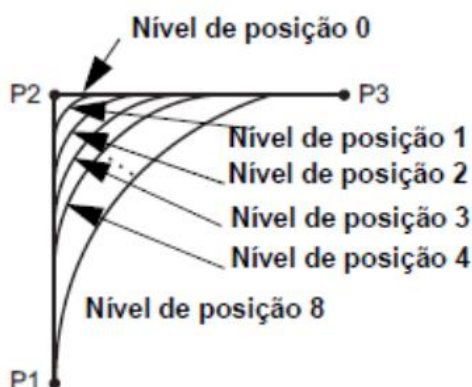


Figura 32 - Nível de Posição em Movimentos

É importante notar que quando não é especificado o nível de posição o robô não assume nenhum dos níveis por defeito, tornando-se de certo modo imprevisível. Desta forma, para situações em que é necessária uma elevada precisão deve especificar-se PL como igual a 0 e quando não o é necessário deve ajustar este parâmetro de forma a reduzir o tempo de ciclo se assim o for necessário.

Quanto aos tipos de movimentos que é possível realizar com um robô considera-se que existem 4:

1. Movimientos Lineares;
2. Movimientos de Junta;
3. Movimientos Circulares;
4. Movimientos Spline (Elípticos).

A programação destes movimentos é efetuada através de instruções específicas, estas instruções encontram-se representadas na Figura 33.

TIPO DE MOVIMENTO	INSTRUÇÃO (EXEMPLO)
1. MOVIMENTOS CIRCULARES	MOV $V = 1500 \text{ mm/s}$
2. MOVIMENTOS LINEARES	MOVL $V = 1500 \text{ mm/s}$
3. MOVIMENTOS DE JUNTA	MOVJ $VJ = 100\%$
4. MOVIMENTOS ELIPTICOS	MOV $V = 1500 \text{ mm/s}$

Figura 33 - Tipos de instruções para movimentos em robôs industriais

Da figura representada anteriormente é importante observar as unidades nas quais a velocidade do movimento é apresentada para cada um dos movimentos. Em todos os movimentos a velocidade é dada em mm/s à exceção dos movimentos de junta nos quais a velocidade é dada como uma percentagem da velocidade máxima permitida pelo robô.

Adicionalmente, na Figura 34 encontra-se representada uma figura que tem como objetivo apresentar uma explicação gráfica para os vários tipos de movimentos descritos de seguida.

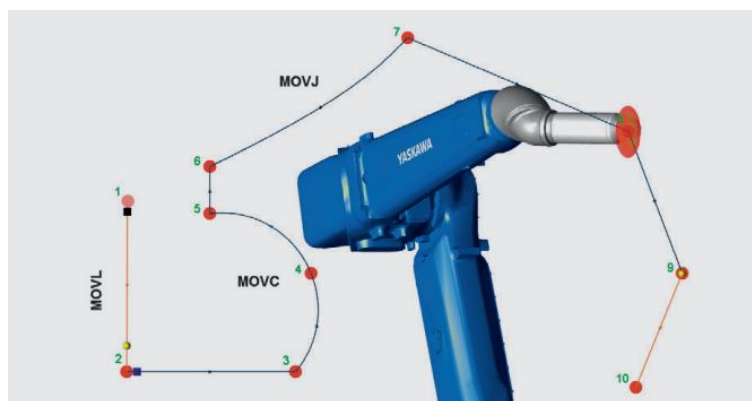


Figura 34 - Representação dos tipos de movimentos em robótica Industrial ²⁶

²⁶ Figura retirada de: https://www.roboplan.pt/upload/flyer-software-motosimeg-vrc-e-08_5e6a0455a67d5.pdf

3.2.1. Movimento Linear

Este tipo de movimentos, tal como o nome sugere são movimentos nos quais a trajetória percorrida pelo robô é linear. Estas interpolações são muito utilizadas quando é necessário um elevado controlo sobre a trajetória do robô, como por exemplo em espaços apertados.

Este tipo de movimentos do robô da Yaskawa apresentam as seguintes características:

1. Velocidade do movimento efetuado entre 0.1 a 1500 mm/s;
2. Nível de posição (PL) entre 0 e 8;
3. Razão de ajuste da aceleração (ACC) entre 20 e 100%;
4. Razão de ajuste da desaceleração (DCE) entre 20 e 100%.

3.2.2. Movimento de Junta

Contrariamente aos movimentos lineares, este tipo de interpolações nem sempre é linear. Este tipo de movimentos é utilizado quando não existe uma trajetória específica a seguir, onde apenas importa o ponto inicial e o final. Ao executar este género de movimentos o robô efetua a interpolação pela melhor trajetória calculada pelo controlador, tendo em conta a massa da Tool, velocidade do movimento, esforços nos eixos...

Este tipo de movimentos em robôs da marca Yaskawa apresentam as seguintes características:

1. Velocidade do movimento efetuado entre 0.01% e 100% da velocidade máxima do robô;
2. Nível de posição (PL) entre 0 e 8;
3. Razão de ajuste da aceleração (ACC) entre 20 e 100%;
4. Razão de ajuste da desaceleração (DCE) entre 20 e 100%.

3.2.3. Movimento Circular

Este tipo de interpolações, como o seu nome sugere apresentam uma trajetória circular

Para criar este tipo de trajetória são necessários 3 pontos (como representado na Figura 35 através dos pontos P1, P2 e P3). O raio do arco de circunferência e o seu centro são calculados com base na localização geométrica dos 3 pontos dados.

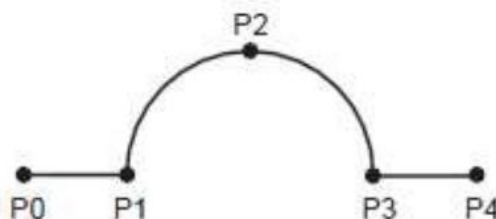


Figura 35 - Exemplo de Movimento Circular

Este tipo de movimentos em robôs da Yaskawa apresentam as seguintes características:

1. Velocidade do movimento efetuado entre 0.1 a 1500 mm/s;
2. Nível de posição (PL) entre 0 e 8;
3. Razão de ajuste da aceleração (ACC) entre 20 e 100%;
4. Razão de ajuste da desaceleração (DCE) entre 20 e 100%.

3.2.4. Movimentos Spline

Ao efetuar este tipo de interpolação o robô segue uma trajetória criada pela combinação de curvas parabólicas. A diferença deste tipo de movimento em relação às interpolações circulares, é que neste caso, quando temos pontos idênticos, não é necessário a introdução do ponto entre as duas curvas elíticas (ponto P3 representado na Figura 36).

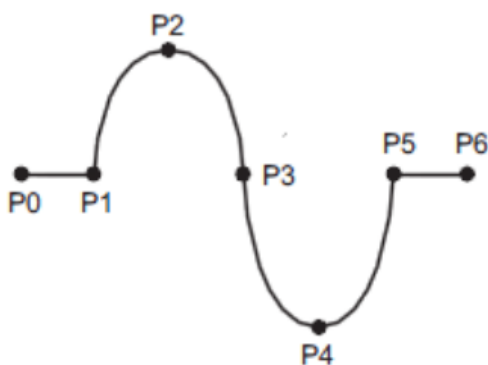


Figura 36 - Exemplo de Movimento Elíptico

À semelhança dos movimentos anteriores, este tipo de movimentos dos robôs da Yaskawa apresentam as seguintes características:

1. Velocidade do movimento efetuado entre 0.1 a 1500 mm/s;
2. Nível de posição (PL) entre 0 e 8;
3. Razão de ajuste da aceleração (ACC) entre 20 e 100%;
4. Razão de ajuste da desaceleração (DCE) entre 20 e 100%.

3.3. Aplicação de robôs Yaskawa para Lixagem de Elementos de Elevadas Dimensões

Durante o estágio curricular realizado efetuou-se a colaboração efetiva num projeto onde foram integrados dois robôs industriais.

O projeto em questão tinha como objetivo automatizar o processo de Lixagem de Comboios. Este processo tradicionalmente efetua-se de forma manual, sendo um processo moroso e perigoso para a saúde dos operadores não só devido à libertação de grandes quantidades de pó nocivo para a saúde humana como o ruído produzido pelos equipamentos de Lixagem.

3.3.1. Estudo da melhor solução para a aplicação pretendida

Para solucionar a questão colocada pelo cliente optou-se por uma aplicação com robôs Industriais. Esta escolha deveu-se à elevada diversidade de produtos bem como as diferenças de geometria entre os mesmos, características que dificultam imenso a utilização de um sistema apenas com automação.

Possuindo os objetos a produzir elevadas dimensões (até 30 metros de comprimento) como representado na Figura 37, determinou-se necessário a utilização de um Track Linear. A utilização deste equipamento permite estender o alcance do robô num dos seus eixos, permitindo assim o deslocamento do robô ao longo do elemento.

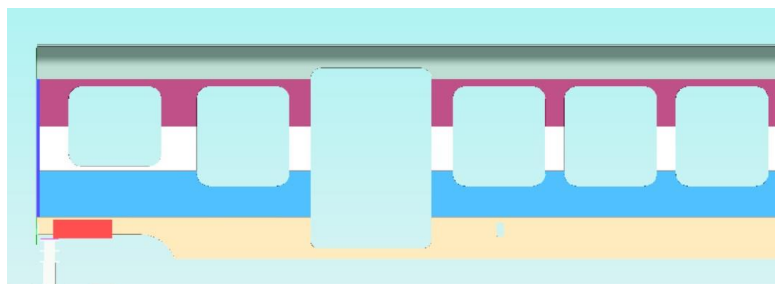


Figura 37 - Exemplo de Comboio

Na Figura 38 encontra-se representado um exemplo de um robô Yaskawa montado num Track Linear.

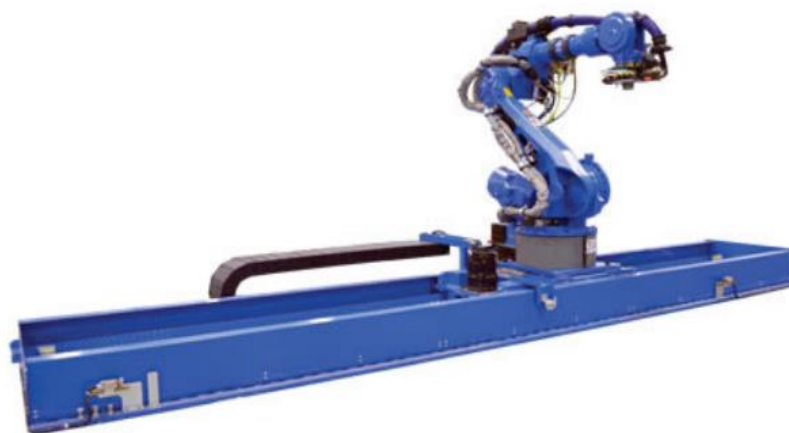


Figura 38 - Robô Yaskawa com Track Linear ²⁷

Sendo a utilização de robôs da marca Yaskawa Motoman uma das exigências do cliente, tornou-se claro que a opção mais viável seria optar por Track e Robô da Yaskawa.

A utilização deste sistema teria como principal vantagem o facto de ser uma solução fechada e comercializada na totalidade pela marca Yaskawa, no entanto, devido aos custos associados a esta solução optou-se por efetuar a construção de um Track “In House”.

²⁷ Figura Retirada de: <https://www.motoman.com/en-us/products/peripherals/positioners/floor-tracks>

Quanto à escolha de robôs optou-se por robôs Yaskawa GP180-120 com as seguintes características:

1. Payload de 180 Kg;
2. Versão de longo alcance, quando comparada com a versão standard GP180;
3. Repetibilidade de ± 0.05 mm;
4. 6 eixos;
5. Massa de 1090 Kg.

Na Figura 39 encontra-se representado um dos robôs utilizados.



Figura 39 - Robô Industrial Yaskawa GP180-120

3.3.2. Equipamentos utilizados

Após a seleção dos elementos essenciais (robô e Track) foi necessário proceder a uma escolha dos restantes equipamentos a utilizar. Esta escolha dependeu não só do processo de Lixagem como também das questões mecânicas a abordar.

3.3.2.1. Sistemas de lixagem e Aspiração

A lixagem dos produtos é efetuada por lixadoras orbitais (como representado na Figura 40) que utilizam lixas com um diâmetro de 15cm, para os materiais em questão foi indicado pelo cliente que seriam utilizadas lixas com duas gramagens diferentes, 80 e 320. Na Figura 41 é possível observar um exemplo de uma das lixas utilizadas.



Figura 40 - Exemplo de lixadora utilizada ²⁸

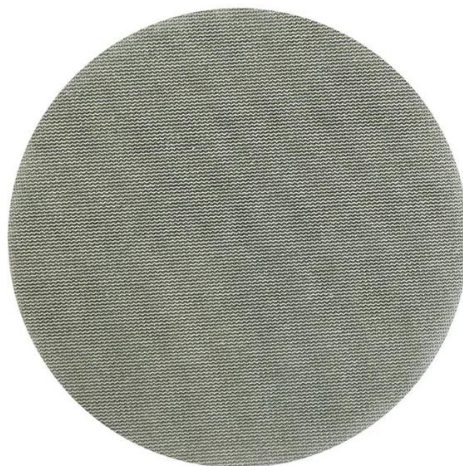


Figura 41 - Exemplo de lixas utilizadas ²⁹

De forma a evitar ao máximo a proliferação de poeiras resultantes do processo as lixadoras utilizadas estão dimensionadas de forma que seja possível a utilização de um sistema de aspiração de pó.

²⁸ Figura retirada de: <https://www.mirka.com/en/p/MIA6502012>

²⁹ Figura retirada de: <https://www.mirka.com/en/p/AUTONET-150-----GRIP-NET?category=products/dust-free-sanding/net-abrasives>

3.3.2.2. Sistema de medição de força e Amortecimento

Para uma boa lixagem do produto é importante que se mantenha a força de contacto aplicada o mais próximo possível de um valor definido e constante.

Apresentado o robô industrial uma repetibilidade extremamente elevada é correto assumir que a força aplicada pelo mesmo seja aproximadamente constante. No entanto, foi comunicado pelo cliente que devido ao processo de fabrico dos produtos e dadas as suas elevadas dimensões por vezes existem imperfeições na sua geometria, o que implica que não é possível garantir uma força constante apenas com a utilização do robô.

Para resolver estas possíveis imperfeições recorreu-se a utilização do seguinte equipamento: ACF (Active Contact Flange), representado na Figura 42.



Figura 42 - ACF (Active Contact Flange) ³⁰

Este equipamento é colocado na Flange do robô e permite que seja programada a força que se pretende que o mesmo aplique. Após a configuração da força, este equipamento ajusta o seu curso de forma a garantir uma força de contacto constante.

³⁰ Figura retirada de: <https://www.ferrobotics.com/en/services/products/active-contact-flange/>

Na Figura 43 encontra-se um esquema para melhor compreender o funcionamento deste equipamento.

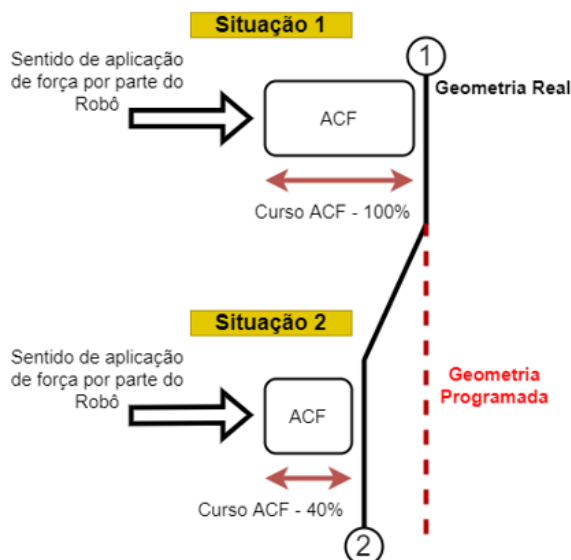


Figura 43 - Funcionamento de ACF (Active Contact Flange)

Imagine-se a seguinte situação: O robô encontra-se a efetuar uma trajetória vertical com sentido de 1 para 2 na qual se encontra a lixar a respetiva geometria programada. A dado momento da trajetória existe uma imperfeição no produto (não prevista pela programação), com a utilização do ACF, este deteta a mudança da força a ser aplicada e diminui o seu curso de forma a manter a força aplicada constante.

Este equipamento, além de efetuar este ajuste dinâmico do seu curso de forma a manter a força constante, também dá feedback do seu curso atual, bem como, se está em contacto com algum objeto. Estes dois parâmetros serão utilizados em dois temas posteriormente debatidos: rotinas de medição do produto e aplicação de um programa de compensação dinâmica da trajetória do robô.

3.3.2.3. Equipamentos Elétricos

No que diz respeito a equipamentos utilizados, por uma questão de brevidade no presente subcapítulo serão apenas abordados os componentes mais relevantes: PLC, Computador Industrial e HMI.

1. PLC: Este equipamento é utilizado para efetuar toda a gestão da máquina. Na máquina implementada existem três PLC's, um em cada quadro elétrico presente na estrutura dos robôs e um no quadro elétrico onde se encontra o HMI. Os PLC's utilizados fazem parte da gama 1200 de equipamentos da Siemens;
2. Computador Industrial: Utilizado nos controladores, tem como principal objetivo expandir a memória do controlador, permitindo assim guardar no computador os programas de todos os produtos e apenas carregar para o controlador os programas de cada produto selecionado;
3. HMI: Utilizado como forma de interface entre o operador e toda a máquina, o HMI utilizado é um equipamento da Tuck.

Adicionalmente, são também utilizados vários equipamentos acessórios ao processo, desde os servos motores responsáveis pela movimentação da estrutura onde o robô se encontra, compressor para alimentação de ar comprimido e diversas válvulas pneumáticas.

3.3.3. Descrição do processo de Lixagem

Quanto ao processo, após vários testes efetuados em conjunto com o cliente foi decidido que o melhor seria efetuar duas passagens, uma vertical seguida de uma horizontal, com a possibilidade ainda de no fim da lixagem do produto retomar ao início e efetuar uma segunda passagem horizontal.

Este processo de passagens encontra-se representado na Figura 44.



Figura 44 - Processo de Lixagem Final

Quanto ao processamento dos produtos (Carruagens de Comboios) é efetuada uma divisão em várias secções. Esta divisão é efetuada com o propósito de permitir a lixagem de determinadas zonas do produto.

Inicialmente era efetuada a troca de lixa após cada secção, ou seja, efetuava-se uma passagem vertical seguida de uma horizontal e depois era efetuada uma troca de lixa. A pedido do cliente, dada a divergência entre tamanhos de secções a troca de lixa passou a efetuar-se consoante a área de superfície despolida, este processo permite assim uma lixagem mais uniforme. A forma como este controlo da troca de lixas é efetuado será explicado em detalhe posteriormente.

De forma a tornar o processo de lixagem o melhor possível, foi solicitado pelo cliente a possibilidade de alterar os seguintes parâmetros de lixagem:

1. Força aplicada durante a lixagem;
2. Velocidade da lixadora;
3. Velocidade de movimentação do robô.

Efetuada a manipulação dos vários parâmetros é possível obter uma lixagem bastante boa. Após um processo iterativo chegou-se aos seguintes valores de defeito para os vários parâmetros de lixagem:

1. Força aplicada entre 60 e 80 Newton;
2. Velocidade de lixadora entre 7000 e 9000 RPM;
3. Velocidade de movimentação do robô entre 150 e 200 mm/s.

Ainda que os valores anteriores sejam dados como valores defeito, devido à natureza do processo a decisão final sobre estes valores é sempre tomada pelo operador de forma a efetuar a melhor lixagem para o produto selecionado.

3.3.4. Apresentação do Layout final

Encontrando-se o grosso do material escolhido foi efetuado um Layout. O Layout final da máquina encontra-se representado na Figura 45.

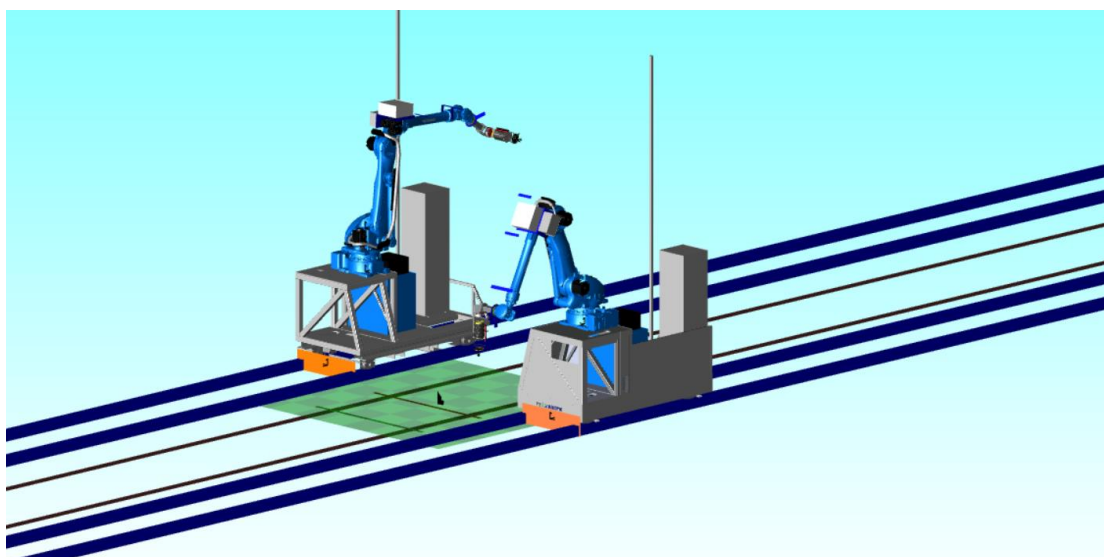


Figura 45 - Layout Final da Máquina de Lixagem

Como é possível observar pelo Layout apresentado a solução final consiste em dois robôs montados em estruturas que se movimentam ao longo dos eixos lineares, estas estruturas possuem a bordo os seguintes componentes:

1. Quadro elétrico;
2. Controlador do robô;
3. Sistema de aspiração do pó gerado durante o processo;
4. Compressor.

Na Figura 46 é possível observar uma vista do Layout da máquina quando vista de cima.

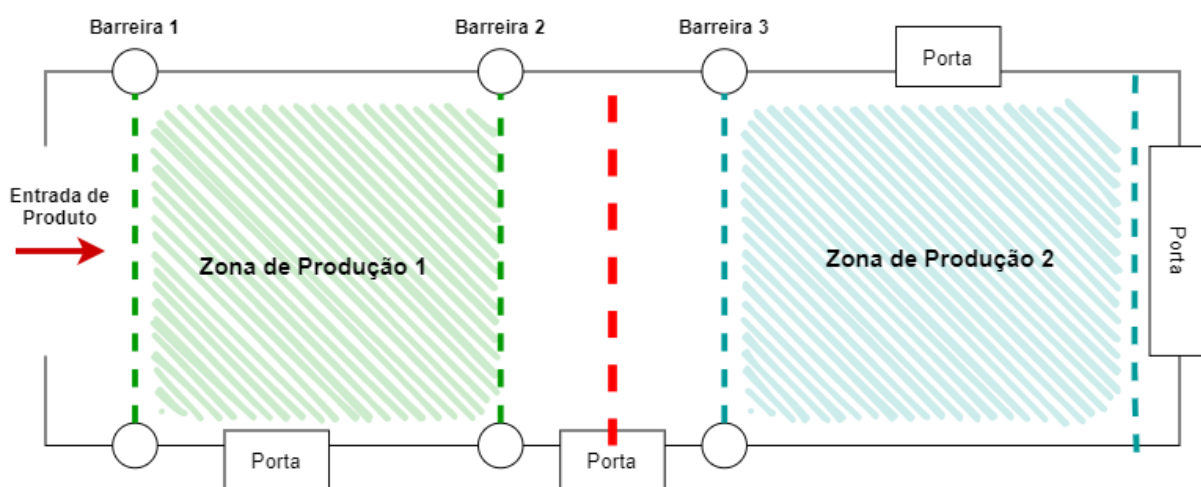


Figura 46 - Layout final da máquina visto de topo

Sendo o processo de Lixagem um processo bastante demorado (+/- 4 horas por produto) tornou-se interessante para o cliente a criação de 2 zonas de produção. Com a criação de 2 zonas de produção é possível ter os robôs a trabalhar numa zona e os operadores a trabalhar numa outra zona. Estas zonas encontram-se delimitadas com barreiras de segurança de forma a garantir que em momento nenhum seja possível ao operador estar na mesma zona que o operador e vice-versa.

Na Figura 47 encontra-se representada uma das estruturas com um dos robôs utilizados na presente aplicação.



Figura 47 - Estrutura mecânica com robô

De forma a obter uma melhor compreensão do Layout final da máquina, na Figura 48 encontra-se uma representação do mesmo. É importante salientar que o Layout representado apresenta zonas desfocadas de forma a proteger a propriedade intelectual do cliente em questão.



Figura 48 - Layout final presente no cliente

3.3.4.1. Elaboração de Simulação em MotoSim

De forma a facilitar a tarefa de programação efetuou-se uma simulação em MotoSim o mais realista possível. O presente subcapítulo tem como objetivo descrever brevemente o processo de criação de uma simulação neste software.

No software existem duas formas distintas de efetuar a “criação” de modelos 3D. A primeira, passa pela criação de modelos 3D diretamente no software enquanto a segunda forma permite a importação de ficheiros 3D externos. Quando se cria uma simulação é possível importar os 3D dos equipamentos mais complexos e criar modelos mais simples para os restantes, de forma a diminuir o tamanho da simulação.

Para criar um modelo 3D no software de acordo com a primeira forma indicada é necessário efetuar os seguintes passos:

1. Seleção do menu CadTree, como representado na Figura 49;
2. Seleção da opção Add New Model, como representado na Figura 50;
3. Indicar um nome para o modelo e efetuar a dição do mesmo, como apresentado na Figura 51;
4. Após a criação do modelo este será apresentado na CadTree, onde será possível criar vários sólidos e modificar as suas dimensões e posições no espaço (Figura 52).

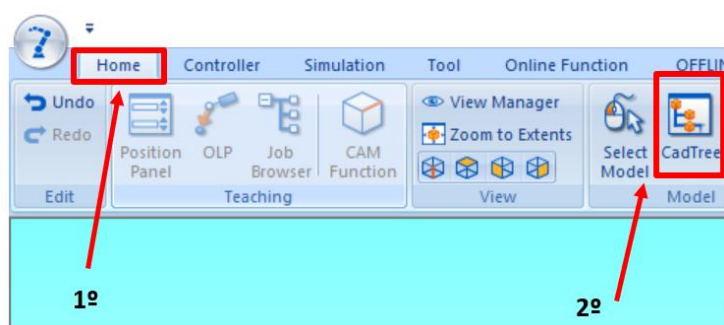


Figura 49 - Seleção do menu CadTree no simulador MotoSim

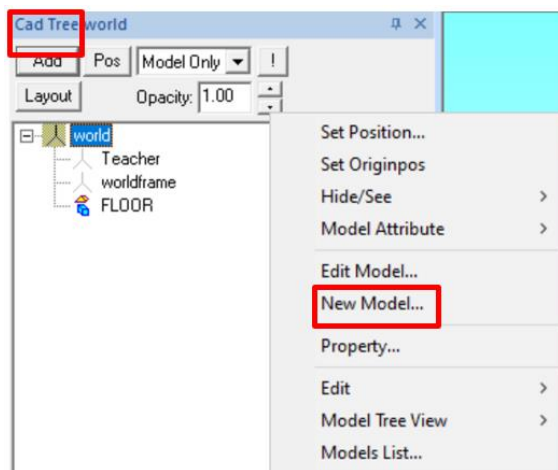


Figura 50 - Seleção de opção Add New Model no simulador MotoSim

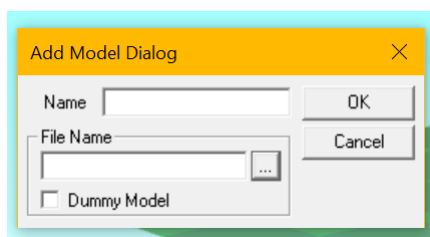


Figura 51 - Atribuição de nome a um modelo 3D no simulador MotoSim

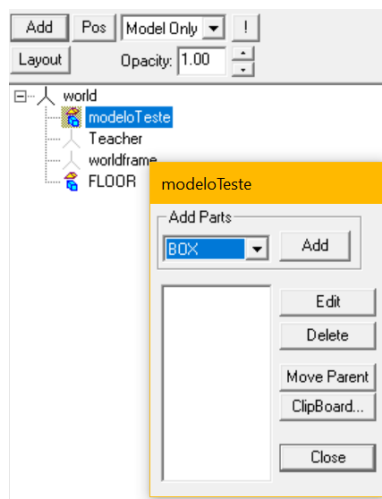


Figura 52 - Adição de elementos a modelos 3D no simulador MotoSim

No que diz respeito à segunda forma de adição de modelos 3D a uma simulação no software MotoSim é possível a obtenção de modelos com um maior nível de detalhe uma vez que é possível importar ficheiros provenientes de softwares de modelação 3D, como por exemplo o SolidWorks.

Para efetuar a adição de modelos 3D recorrendo a este processo é necessário efetuar os seguintes passos:

1. Seleção do menu CadTree, como representado na Figura 49;
2. Seleção da opção Add New Model, como representado na Figura 50;
3. Na janela que é aberta é necessário selecionar a opção que permite a escolha de um ficheiro, como é possível visualizar na Figura 53;
4. Por fim, é apenas necessário selecionar o ficheiro a importar, o MotoSim suporta os tipos de ficheiros apresentados na Figura 54.

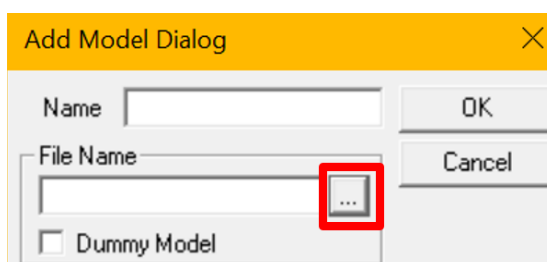


Figura 53 - Adição de ficheiro 3D no software MotoSim

```
Model data
MotoSimEG data(*.mdl)
HoopsMetaFile(*.hmf)
HoopsStreamFile(*.hsf)
Acis(*.sat)
Iges(*.igs;*.iges)
Step(*.stp;*.step)
ProE/CREO(*.prt;*.asm.*)
Catia(*.CATPart;*.CATProduct)
SolidWorks(*.SLDPRT;*.SLDASM)
Parasolid(*.x_t;*.x_b)
Inventor(*.ipt)
DXF(*.dxf)
RenderWare(*.rwx)
Standard Triangulated Language(*.stl)
VRML(*.wrl)
3D Model(*.3ds)
PLY(*.ply)
```

Figura 54 - Formatos de ficheiros 3D suportados no software MotoSim

Quando são efetuadas simulações em MotoSim é importante ter em atenção o sistema de atributos dos modelos 3D, no qual é possível indicar que um modelo pertence a outro. Esta opção permite que modelos 3D fiquem solidários a outros. Um exemplo da utilização deste sistema de atributos prende-se na adição de modelos 3D de ferramentas de um robô na qual se deve-se indicar que esta pertence à flange do robô, de forma que quando o robô se move a ferramenta se mova solidariamente.

3.3.5. Estratégias de programação utilizadas

O presente capítulo tem como finalidade apresentar de forma resumida de que forma se encontra programada a máquina, com principal ênfase à programação do robô

3.3.5.1. Fluxograma de funcionamento da máquina

Avançadas todas as questões mecânicas do projeto seguiu-se a elaboração de um fluxograma representativo do funcionamento da máquina. O fluxograma idealizado encontra-se representado na Figura 55.

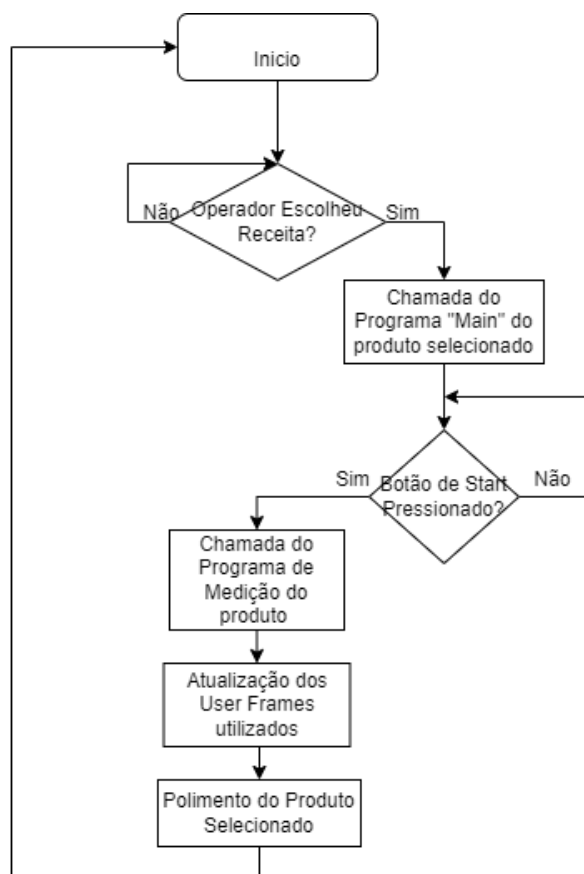


Figura 55 - Fluxograma de funcionamento geral da máquina

Dada a simplicidade do processo é possível considerar o mesmo como um processo sequencial, no qual existe uma rotina em loop a aguardar a seleção de um produto por parte do operador seguida de uma serie de rotinas com a finalidade de processar o mesmo. Este conjunto de rotinas pode ser dividido da seguinte forma:

1. Rotina Main Geral, com o intuito de detetar a seleção de um produto;
2. Main do produto selecionado;
3. Rotina de medição do produto;
4. Rotinas de manipulação do produto.

Adicionalmente existem rotinas a serem executadas em paralelo no robô, estas rotinas bem como a sua finalidade serão abordadas posteriormente.

3.3.5.2. Programa Main Geral

Esta rotina, tem como objetivo detetar a seleção de um produto por parte do utilizador, encontrando-se a trabalhar em loop e a monitorizar o valor de uma variável que corresponde ao código de produto selecionado.

Este programa é constituído maioritariamente por duas instruções:

1. Jump – Label;
2. Switch – Case.

Adicionalmente, este programa também monitoriza o tipo de lixa com a qual se irá lixar o produto e a linha em que irá ser lixado.

Quanto ao tipo de lixa é importante a distinção uma vez que dependente da fase do processo em que o produto se encontra irá ter zonas que não são necessárias lixar, tendo assim um programa diferente.

Na Figura 56 encontra-se um exemplo desta monitorização e diferenciação quanto ao tipo de lixa a utilizar.

```
CASE 11
    DOUT OT#(65) ON
    'B015=1 - P80 // B015=2 - P320
    SET B015 1
    SET S001 "KEOLIS_MSL_RIGHT_JOBS_P80"
    CALL S002
    CALL S001
    CALL JOB:KEOLIS_MSL_RIGHT_MAIN_P380
    DOUT OT#(65) OFF
    ,
CASE 12
    DOUT OT#(65) ON
    'B015=1 - P80 // B015=2 - P320
    SET B015 2
    SET S001 "KEOLIS_MSL_RIGHT_JOBS_P320"
    CALL S002
    CALL S001
    CALL JOB:KEOLIS_MSL_RIGHT_MAIN_P320
    DOUT OT#(65) OFF
    ,
```

Figura 56 - Exemplo de Rotina Main Geral

Como é possível observar no exemplo anterior, consoante o estado da variável correspondente ao código de produto, o programa entra dentro do Case 11 ou 12 e efetua o seguinte:

1. Ativa a saída digital 65, responsável por dar feedback de que os programas dos produtos estão a ser carregados do computador industrial para o controlador do robô;
2. Coloca o Byte 15 como 1 ou 2, dependendo do tipo de lixa que se pretende;
3. Coloca na String 1 o nome do produto selecionado no HMI;
4. Chama os programas correspondentes ao produto selecionado.

Após carregar os programas para o controlador do robô, o programa chama o programa Main do produto.

3.3.5.3. Programa Main do Produto

Após entrar neste programa, as estruturas dos robôs movem-se até ao ponto inicial do produto onde ficam a aguardar um pulso de um botão de Start que dá início ao processo.

Após um premir deste botão as seguintes ações são realizadas:

1. Movimentação das estruturas linearmente até à sua Home Position;
2. Execução da rotina de medição da carruagem;
3. Atualização dos parâmetros de lixagem: força de contacto pretendida, velocidade da lixadora e velocidade do robô;
4. Execução sequencial dos programas com as trajetórias de lixagem de cada uma das secções do produto.

De seguida, cada uma das ações indicadas anteriormente serão abordadas.

3.3.5.4. Movimentação das Estruturas Linearmente (Carro do robô)

Tendo sido utilizado um servo motor Yaskawa, é possível incorporar este no controlador, fazendo do mesmo um sétimo eixo ou um segundo robô. Ao utilizar como sétimo eixo, existe a possibilidade de mover o robô ao longo do Track enquanto este efetua trajetórias.

Inicialmente, o sistema foi dimensionado tendo esta característica em conta, sendo que a mesma iria facilitar a tarefa de programação de produtos e diminuir o tempo de ciclo por produto significativamente. No entanto, verificou-se que ao tentar movimentar o Track e o robô ao mesmo tempo, a estrutura onde o robô se encontra patinava ao longo do Track, isto ocorre devido a dois valores:

1. Inércia do robô durante as suas trajetórias provoca um momento linear bastante elevado na estrutura que a obriga a movimentar-se;
2. A construção do Track baseia-se em carris e rodas sobre os mesmos, contrariamente aos Track's comercializados onde este movimento é realizado através de pinhão e cremalheira. Assim, com esta construção não existe nenhum elemento mecânico que impeça o movimento involuntário da estrutura ao longo dos carris para além do atrito entre as rodas e o carril.

Desta forma, o sistema implementado encontra-se como segundo robô, ficando assim com o primeiro robô correspondente ao GP180-120 e o segundo robô correspondente à estrutura.

Para efetuar a movimentação desta estrutura através de programação é implementado o código representado na Figura 57.

```

///GROUP1 RB2
///LVARs 0,1,1,1,0,1,0,0
NOP
DOUT OT#(90) ON
SFTOF
'HEADER - NORMAL JOB + 1 IN_ARG
,
'Move AGV to Position mm
,
'*****LI*****
'LI000 - N/A
,
'*****LD*****
'LD001 - Y VARIABLE
,
'*****LR*****
'LR000 - VALUE IN mm (0.001)
,
'*****LP*****
'LP000 - CAR POSITION
,
'*****INITIAL DEFENITIONS*****
' Initialize Local Variable
GETS LPX000 $PX001
SUB LP000 LP000
' Get Value to Move
GETARG LR000 IARG#(1)
,
'Prepare Position
SET LD000 EXPRESS LR000 * -1000
SETE LP000 (2) LD000
'Move car to position
MOVJ LP000 VJ=50.00 PL=0 ACC=20 DEC=2
,

```

Figura 57 - Programa de movimentação da Estrutura Linearmente

É de notar que nos da robôs Yaskawa, quando se cria um programa (JOB) novo é possível escolher que este pertença ao grupo do robô dois, ficando assim associado ao mesmo. Desta forma, todos os movimentos efetuados dentro deste ficheiro são executados sobre a estrutura.

Na figura apresentada é possível observar a seguinte instrução: MOVJ LP000 VJ=50.00 PL=0 ACC=20 DEC=20. Esta é a instrução responsável por toda a movimentação da estrutura, e efetua o seguinte:

Movimenta a estrutura para a posição guardada na variável de posição local P000, com uma velocidade de 50 % da velocidade máxima do robô, com uma aceleração de 20 e uma desaceleração de 20.

3.3.5.5. Programa de medição e referência do produto

Tal como mencionado anteriormente, dadas as elevadas dimensões dos produtos por vezes podem existir defeitos de fabrico. Juntado esta característica ao facto de não ser possível indexar os produtos (como por exemplo é efetuado em jigs de soldadura) torna-se necessário recorrer a rotinas de medição de forma a referenciar o produto.

A programação de todos os produtos é efetuada no software MotoSim, no qual é utilizado como base um User Frame, segundo o qual todos os Jobs são gerados. O programa de medição efetua a medição do produto e ajustar o User Frame de forma a coincidir a programação à posição real do produto.

O programa de medição divide-se em dois, o programa de busca (representado na Figura 58) e o programa de atualização do User Frame, representado na Figura 59.

```
'SEARCH UNTIL CONTACT
,
'RESET COUNTER
SET I070 0
,
'IF ALREADY IN CONTACT
'SKIP SEARCH
IFTHENEXP IN#(74)=ON
        JUMP *SKIP
ENDIF
,
'LOOP UNTIL ACF CONTACT
'OR MAX SEARCH DISTANCE
*LOOP
,
'MOVE ONE INCREMENT
IMOV P075 V=10.0 PL=0 TF
,
'PAUSE
TIMER T=0.50
,
'INCREMENT
INC I070
,
'LOOP
IFTHENEXP IN#(74)=OFF ANDE
        JUMP *LOOP
ENDIF
,
'IF CONTACT NOT DETECTED
'STOP THE ROBOT AND GIVE E
IFTHENEXP IN#(74)=OFF
        CALL JOB:MEASUREM
ENDIF
,
'SKIP
*SKIP
,
'READ CURRENT ACF VALUE
SET I007 EXPRESS ( IG#(18
```

Figura 58 - Programa de Medição – Busca

O programa de busca apresenta um *loop* que busca linearmente até detetar o produto. Esta procura é efetuada com um IMOV que em cada iteração avança um determinado valor, quando o ACF deteta o produto, é efetuada uma soma dos *offsets* efetuados e do curso atual do ACF, com este valor é possível determinar o desvio do produto em relação à sua zona de programação original.

```
'CALCULATE X SHIFT
SET D081 EXPRESS ( -479 - ( I007 - I070 * D075 )) * 100
'APPLY X SHIFT
SET P070 (1) D081
SET P070 (2) 0
SET P070 (3) 0
MFRAME UF#(1) P070 BF
```

Figura 59 - Programação de medição - Atualização User Frame

A figura anterior representa a atualização do User Frame após uma das medições, neste caso segundo a coordenada X, é de notar que o programa de medição mede segundo as 3 coordenadas, X, Y e Z.

Inicialmente é efetuado o cálculo do *offset* entre a programação e aposição real do produto, de seguida, este valor (guardado na variável D081) é colocado na primeira coordenada da variável de posição P070.

Por fim, para efetuar a atualização do User Frame é utilizada a instrução MFRAME, esta instrução coloca no User Frame os valores da variável de posição P070 segundo o Frame da base do robô.

3.5.5.6. Programas de Secções Individuais (Manipulação de Produto)

À semelhança do que foi descrito anteriormente, para facilitar a lixagem do comboio decidiu-se dividir o mesmo em secções. Estas secções de forma geral dividem-se entre janelas e espaços entre janelas nas quais é dado um espaçamento entre pontos de 25 mm verticalmente e 100 mm horizontalmente, como representado na Figura 60.

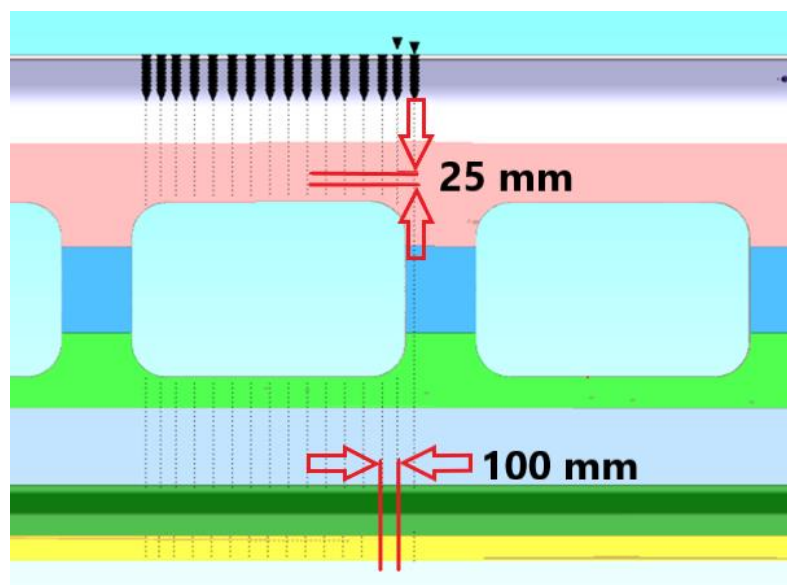


Figura 60 - Divisão de Secções do produto

O espaçamento efetuado horizontalmente deve-se ao diâmetro da lixa utilizada enquanto o espaçamento vertical tem como objetivo atenuar as transições quando existem superfícies curvas.

Para efetuar a programação de novos produtos é utilizado o software MotoSim, no qual é utilizada a função CamPath que permite gerar pontos através de uma aresta selecionada num desenho 3D importado previamente para a simulação.

Para efetuar um *Path* é necessário seguir os seguintes passos:

1. Importar um ficheiro 3D para o MotoSim;
2. Selecionar a função CAM, como representado na Figura 61;
3. Adicionar um novo CAM JOB como representado na Figura 62;
4. Selecionar a aresta através da qual pretendemos criar a trajetória do robô, como (representado na Figura 63), caso tenhamos várias arestas selecionadas é importante selecionar a opção Process As One Edge para sejam interpretadas como apenas uma trajetória;
5. Alterar os valores de espaçamento entre pontos (como representado na Figura 64), neste conjunto de menus é possível alterar bastantes mais parâmetros, no entanto para programação de novos produtos apenas este é relevante.

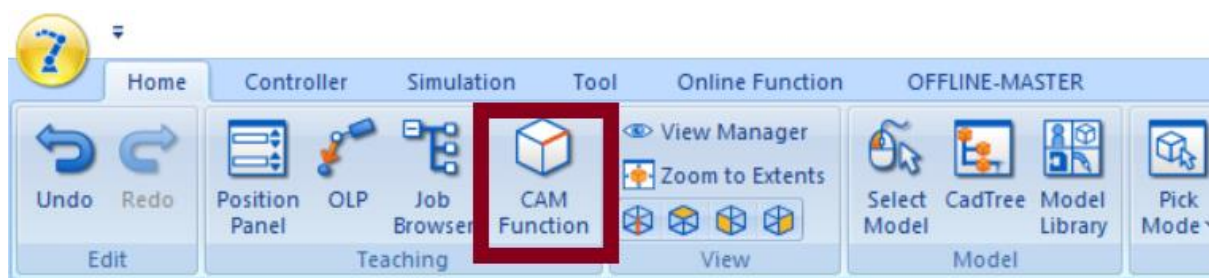


Figura 61 - Seleção da função CAM

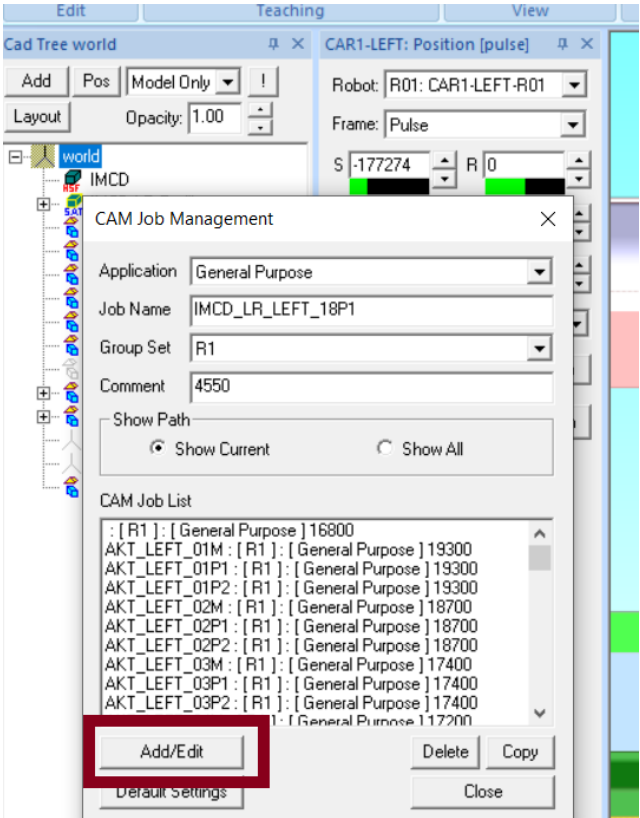


Figura 62 - Criação de um Novo CAM JOB

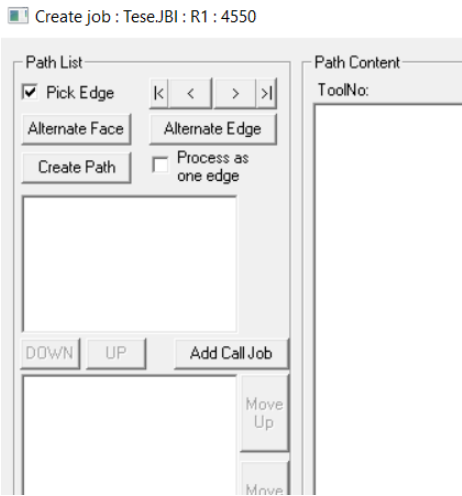


Figura 63 - Opção de Create Path

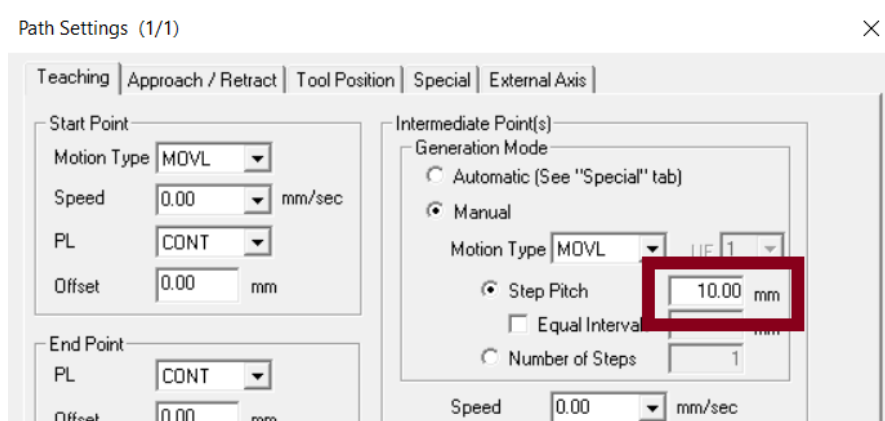


Figura 64 - Selecionar o espaçamento entre pontos

Após efetuar todos os passos descritos anteriormente obtêm-se inúmeros pontos ao longo da trajetória, como representado na Figura 65. Após a geração destes pontos são efetuadas as transformações necessárias aos mesmos, como por exemplo movimentação de pontos de modo a efetuar um buraco, como por exemplo uma janela.

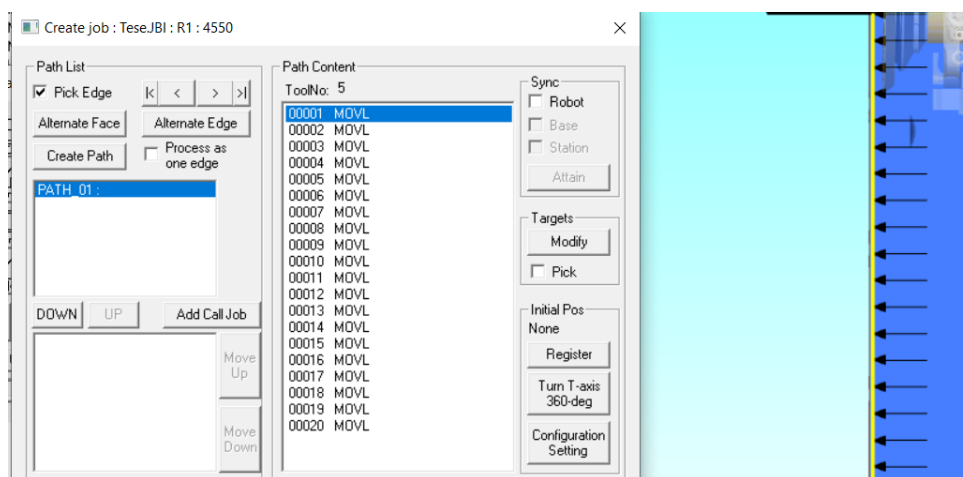


Figura 65 - Pontos de uma trajetória ao longo de uma aresta

3.5.5.7. Rotinas de funcionamento especial

Tal como mencionado anteriormente, durante a programação da máquina em questão foi necessário criar alguns programas “especiais”:

1. Monitorização da posição da estrutura e Mute das barreiras;
2. Interrupt Job para efetuar rotina de troca de lixa.

Tal como representado anteriormente na Figura 46, no *Layout* da máquina existem barreiras de segurança entre a linha de produção 1 e 2, estas barreiras têm como objetivo impedir possíveis contactos entre operadores e robô. No entanto, existem situações nas quais as carruagens são maiores que a linha 1 e ocupam também a linha 2, nestes casos, é importante desabilitar as barreiras de forma que os robôs passem livremente sem quebrarem o estado de segurança da máquina.

Desta forma, foi efetuado um programa que está a “correr” em background do robô e que monitoriza a posição da estrutura e desliga as barreiras quando é necessário. Este programa encontra-se representado na Figura 66.

```

NOP
*LABEL
DIN B023 SOUT#(62)
DOUT OT#(62) B023
SET I001 EXPRESS -( IG#(18) * 255 + IG#(17) )
GETS LPX000 $PX001
GETE LD000 LP000 (2)
SET LR000 EXPRESS LD000 / 1000
IFTHENEXP LR000<=-850
    DOUT OT#(89) OFF
ELSE
    DOUT OT#(89) ON
ENDIF
IFTHENEXP LR000<=4500 ANDEXP LR000>=-3900
    DOUT OT#(88) ON
ELSE
    DOUT OT#(88) OFF
ENDIF
DIN B020 IN#(9)
'Get difference from Robot to Zer
IFTHENEXP IN#(9)=ON ANDEXP B019=0
    GETS LPX000 $PX001
    GETE D019 LP000 (2)
    SET B019 1
ENDIF
IFTHENEXP IN#(9)=OFF ANDEXP B019=1
    SET B019 0
ENDIF
DELAY 20
JUMP *LABEL
END

```

Figura 66 - System JOB para Mute das barreiras

O programa representado na figura anterior é um System JOB. Nos robôs Yaskawa é possível criar programas que se encontram-se sempre a “correr” em *loop* independentemente se o robô está em Play, Remote ou Teach, estes programas habitualmente são utilizados para verificar constantemente o estado de condições.

Neste caso, o programa está constantemente a verificar o valor da variável R000 (correspondente à posição da estrutura). Quando esta variável está entre -3900 e 4500 é forçada a saída 88 que corresponde a um “pedido” ao PLC para efetuar mute à barreira de segurança.

Por outro lado, nos robôs Yaskawa é possível atribuir a programas o “estatuto” de Interrupt Job, ficando a execução destes dependente de uma entrada digital. Durante a programação desta máquina foi utilizado um programa deste género para a rotina de troca de lixas.

Inicialmente, a troca de lixa era efetuada no fim de cada secção, no entanto, após uma melhor compreensão do processo tornou-se claro que esta troca de lixa tem de estar dependente da área lixada, de forma a tornar os intervalos de utilização de lixas o mais semelhantes possível. Desta forma,

a partir do momento em que o ACF possui contacto com alguma superfície e a lixadora se encontra a trabalhar o PLC inicia um timer (com um valor máximo escolhido pelo operador no HMI), após o término deste timer é dado um sinal ao robô que ativa o programa de troca de lixas, representado na Figura 67.

```

NOP
'Interrupt_enable
DOUT OT#(4089) ON
''

CALL JOB:MIRKA_STOP
'POS BEFORE INTERRUPT
GETS PX124 $PX000
'OFFSET POS
SETE P006 (3) D016
IMOV P006 V=45.0 TF
GETS PX007 $PX000
''

CALL JOB:CHANGE_SANDPAPER
''

MOVJ P007 VJ=28.00
MOVL P124 V=20.0 UNTIL IN#(74)=ON
CALL JOB:MIRKA_START
''

'Interrupt_desable
DOUT OT#(4089) OFF
''

END
    
```

Figura 67 - Interrupt Job

O programa apresentado anteriormente pode considerar-se como um programa intermédio uma vez que não executa qualquer ação relacionada com o processo. Uma vez que a troca de lixa é dependente de um sinal por parte do PLC, na programação das secções de lixagem não existe forma de prever quando irá ocorrer a troca de lixa.

Desta forma, torna-se necessário um programa intermédio que guarde a posição onde a troca de lixa foi chamada, retire o robô do produto e no fim da troca volte a colocar o robô na posição inicial.

Esta gestão de posições é efetuada pelo programa anterior na seguinte ordem:

1. É guardada a posição em que foi chamado o Interrupt Job na variável de posição PX124, esta posição é guardada com os valores do robô em pulsos (fator importante para garantir que quando o robô retorna a este ponto retorna com os eixos na mesma configuração inicial);
2. Na terceira coordenada da variável de posição P006 é colocado um offset proveniente da variável D016;
3. É efetuado um movimento linearmente segundo o Tool Frame e segundo a variável P006, afastando assim a Tool linearmente do ponto de chamada do Interrupt Job;
4. É gravada a posição após efetuar o offset anterior, esta posição é gravada na variável de posição PX007.

Após a troca de lixa o robô efetua os mesmos passos descritos anteriormente pela ordem contrária, indo primeiro ao ponto após offset e depois ao ponto original de chamada do Interrupt Job.

Para habilitar as interrupções é necessário colocar a instrução EI (Enable Interrupt), caso não seja colocada esta instrução, independentemente do sinal digital o Interrupt Job não será chamado.

3.5.5.8. Aplicação Motoplus para compensação dinâmica da trajetória

Como descrito anteriormente, devido a defeitos de fabrico por vezes existem variações de cota na superfície das carruagens. Embora maior parte destas imperfeições sejam atenuadas com a utilização do ACF, existem situações nas quais é necessário alterar a trajetória do robô. Desta forma foi desenvolvida uma aplicação em Motoplus.

O Motoplus é um software de desenvolvimento da marca Yaskawa que permite criar aplicações em C que podem ser posteriormente colocadas a decorrer em background em controladores de robôs, estas aplicações expandem largamente as capacidades do robô, permitindo inúmeras possibilidades, como por exemplo:

1. Protocolos de comunicação TCP / UDP;
2. Acesso a instruções da INFORM Language;
3. Gestão de programas;
4. Movimentação do robô;
5. Leitura e escrita de variáveis e de entradas e saídas.

Este software por defeito não vem ativo nos robôs de fábrica (visto que é uma opção paga), para o habilitar é necessário efetuar os seguintes passos:

1. Aceder ao modo Manutenção do robô. Pode ser acedido de duas formas: desligando e ligando o robô premindo a tecla Main Menu ou, no caso dos controladores YRC1000 é possível efetuar um reset do CPU e selecionar para o CPU arrancar em modo manutenção;
2. Colocar uma pen Yaskawa (Permite habilitar opções pagas) na consola e entrar no modo Yaskawa, premindo as teclas Interlock + Select aquando da seleção de um utilizador;
3. Aceder ao System e de seguida selecionar a opção Setup, como representado na Figura 68;
4. Selecionar a opção Option Function, como representado na Figura 69;
5. Habilitar a opção Motoplus, como representado na Figura 70.

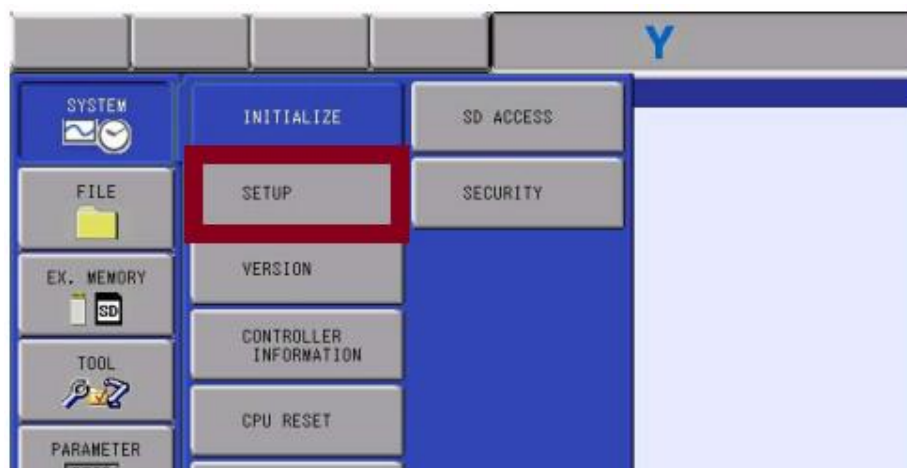


Figura 68 - Selecionar Menu System – Setup

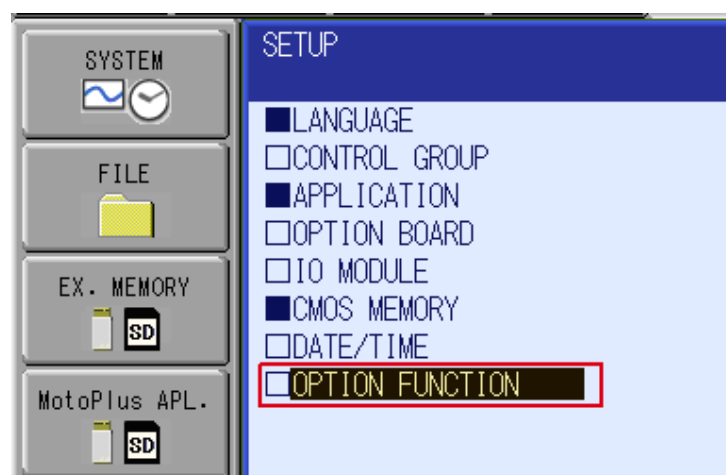


Figura 69 - Selecionar Setup - Option Function

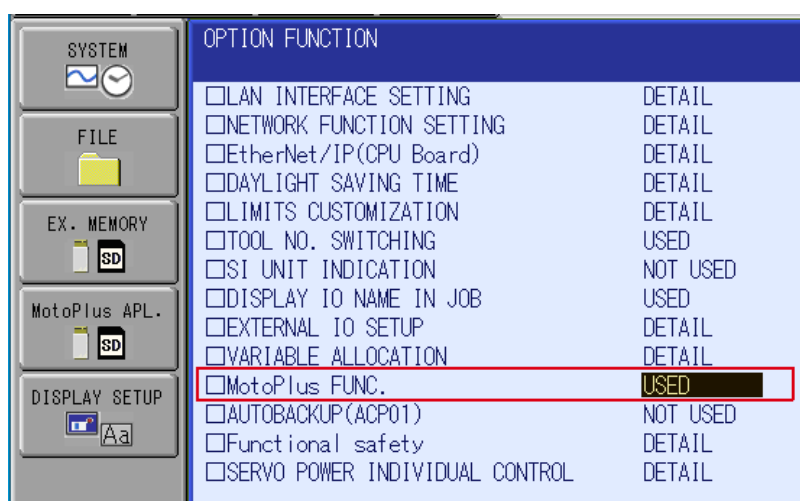


Figura 70 - Habilitar Opção Motoplus

Após a função Motoplus ser ativa é colocado um menu na consola do robô onde é possível carregar e/ou apagar aplicações Motoplus.³¹

³¹ Para carregar uma aplicação Motoplus para o robô é necessário estar no modo Manutenção.

Parte da aplicação desenvolvida encontra-se representada na Figura 71.

```

corrpath_src_p.grp_pos_info[0].pos_tag.data[0] = 0x3f; // Effective axis specification (6 axes)

corrpath_src_p.grp_pos_info[0].pos_tag.data[2] = 0;
corrpath_src_p.grp_pos_info[0].pos_tag.data[3] = MP_CORR_TF_DTYPE; //Corrects in tool cordinates

corrpath_src_p.grp_pos_info[0].pos[0] = 0; //X
corrpath_src_p.grp_pos_info[0].pos[1] = 0; //Y
corrpath_src_p.grp_pos_info[0].pos[2] = 0; //Z
corrpath_src_p.grp_pos_info[0].pos[3] = 0; //Rx
corrpath_src_p.grp_pos_info[0].pos[4] = 0; //Ry
corrpath_src_p.grp_pos_info[0].pos[5] = 0; //Rz
FOREVER
{
    mpClkAnnounce(MP_INTERPOLATION_CLK); // Performs the following process per interpolation control cycle
    //puts("path ok\r\n");
    if ( correct_req == 1 ) // Request for correction? Set by command receiving task.
    {

        //1000001 - ACF Postion
        //10102   - Mirka Start
        //00101   - Contact Stat
        //&& (ReadIO(10102)) && (ReadIO(00101)))
        if ((ReadIO(1000001)>260) && (ReadIO(10102)) && (ReadIO(10210)))
        {
            incremento_a_efetuar = (ReadIO(1000001) - 240);
            corrpath_src_p.grp_pos_info[0].pos[2] = incremento_a_efetuar; //Z
            printf("+++++++Aproxima Tool+++++++\r\n"); //Debug only
        }
        else if (ReadIO(1000001)<220 && (ReadIO(10102)) && (ReadIO(10210)))
        {
            incremento_a_efetuar = (240 - ReadIO(1000001));
            corrpath_src_p.grp_pos_info[0].pos[2] = -incremento_a_efetuar; //Z
            printf("+++++++Afasta Tool-----\r\n"); //Debug only
        }
    }
}

```

Figura 71 - Código desenvolvido em Motoplus

Ainda que a aplicação apresente um tamanho superior ao apresentado na figura anterior, para efeitos de compensação de trajetória dinâmica torna-se apenas importante as instruções representadas na figura anterior.

Como mencionado anteriormente, o código desenvolvido efetua uma correção da trajetória em Tool Frame segundo o eixo do Z, para definir esta forma de compensação são utilizados os seguintes comandos:

1. Corrpath_src_p.grp_pos_info[0].pos_tag.data[3]=MP_CORR_TF_DTYPE;
2. Corrpath_scr_p.grp_pos_info[0].pos[2].

A primeira instrução define de que forma a correção será efetuada, esta correção pode ser efetuada em coordenadas Tool, base ou user frame. Para a aplicação pretendida utilizou-se Tool frame de forma a afastar ou aproximar a ferramenta da carruagem consoante necessário.

Por outro lado, a segunda instrução define a coordenada que será compensada, esta instrução permite as seguintes coordenadas:

1. Corrpath_scr_p.grp_pos_info[0].pos[0], corresponde a correção em X;
2. Corrpath_scr_p.grp_pos_info[0].pos[1], corresponde a correção em Y;
3. Corrpath_scr_p.grp_pos_info[0].pos[2], corresponde a correção em Z;

4. `Corrpath_scr_p.grp_pos_info[0].pos[3]`, corresponde a correção em Rx;
5. `Corrpath_scr_p.grp_pos_info[0].pos[4]`, corresponde a correção em Ry;
6. `Corrpath_scr_p.grp_pos_info[0].pos[5]`, corresponde a correção em Rz.

Após ser definida a forma como a compensação será efetuada, o programa verifica se tem a lixadora a rodar e o ACF a detetar contacto, esta verificação garante que apenas é efetuada compensação quando se está efetivamente a lixar o produto.

Por fim, consoante o estado do curso do ACF (IO 1000001) é aproximada ou afastada a TOOL da carruagem.

Conclusões finais sobre o estágio efetuado

Atualmente, a área da robótica e automação industrial encontra-se em continua evolução e desenvolvimento. Esta evolução prende-se na necessidade de resolver desafios propostos pela indústria cada vez mais complexos.

Com a crescente exigência tida com todo o tipo de produtos cada vez mais se torna interessante automatizar processos que tradicionalmente são efetuados por humanos, levando assim a uma constante necessidade de sistemas robóticos e de automação.

Sendo o foco do estágio realizado nesta mesma área, foi possível observar e colaborar num projeto complexo, com uma necessidade de soluções inovadoras.

Desta forma, considero que o estágio efetuado tenha sido um sucesso, não só em termos profissionais, onde fui introduzido no mundo da robótica e automação industrial e onde adquiri importantes conhecimentos, como também, a nível pessoal, onde conheci pessoas tão ou mais entusiasmadas com o que esta área tem de melhor.

Adicionalmente, considero o estágio efetuado uma mais-valia no meu percurso como engenheiro uma vez que me permitiu ter contacto com diversas áreas para além da robótica e automação industrial, como por exemplo: projeto mecânico, projeto elétrico, montagens e eletrificação. Contacto este que me permitiu ter uma melhor noção de todos os processos necessários para a projeção e implementação de uma máquina industrial.

Referências

- Carlos Pereira Fernandes Junior, D. (2014). *UNIVERSIDADE DO VALE DO PARAÍBA FACULDADE DE ENGENHARIA, ARQUITETURA E URBANISMO GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA / ELETRÔNICA ROBÔ PARA EMPILHAMENTO DE PRATOS-C6*.
- Cheng, F. S. (n.d.). *5 Calibration of Robot Reference Frames for Enhanced Robot Positioning Accuracy*. www.intechopen.com
- Dr. Bob Williams. (n.d.). *An Introduction to Robotics*.
- Li, P., & Liu, X. (2019). Common Sensors in Industrial Robots: A Review. *Journal of Physics: Conference Series*, 1267(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1267/1/012036>
- Raksiri, C., Pa-im, K., & Rodkwan, S. (2020). An analysis of joint assembly geometric errors affecting end-effector for six-axis robots. *Robotics*, 9(2). <https://doi.org/10.3390/ROBOTICS9020027>
- Robla-Gomez, S., Becerra, V. M., Llata, J. R., Gonzalez-Sarabia, E., Torre-Ferrero, C., & Perez-Oria, J. (2017). Working Together: A Review on Safe Human-Robot Collaboration in Industrial Environments. In *IEEE Access* (Vol. 5, pp. 26754–26773). Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2773127>
- Sherwani, F., Asad, M. M., & Ibrahim, B. S. K. K. (2020). *Collaborative Robots and Industrial Revolution 4.0 (IR 4.0); Collaborative Robots and Industrial Revolution 4.0 (IR 4.0)*. <https://www.mirai-lab.co.jp/>
- Singh, B., & Sellappan, N. (2008). International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering Evolution of Industrial Robots and their Applications. In *Certified Journal* (Vol. 9001, Issue 5). www.ijetae.com
- Vítor M. F. Santos. (2003). *Robótica Industrial. Sebenta Engenharia Mecânica*. [http://lars.mec.ua.pt/public/LAR%20Projects/Humanoid/2013_EmilioEstrelinha/Disse](http://lars.mec.ua.pt/public/LAR%20Projects/Humanoid/2013_EmilioEstrelinha/Disse%20rta%20ção_Emílio_Estrelinha/Datasheets/RoboticalIndustrial-Sebenta2003-2004-v2a.pdf)
[rtação_Emílio_Estrelinha/Datasheets/RoboticalIndustrial-Sebenta2003-2004-v2a.pdf](http://lars.mec.ua.pt/public/LAR%20Projects/Humanoid/2013_EmilioEstrelinha/Disse%20rta%20ção_Emílio_Estrelinha/Datasheets/RoboticalIndustrial-Sebenta2003-2004-v2a.pdf)
- Wallén, J. (2008). *Technical report from Automatic Control at Linköpings universitet The history of the industrial robot*.