

# Instituto Politécnico de Viseu

Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu





**Ao meu avô.**



*“Quem quer bolota, trepa!”*

Evaristo de Almeida Azevedo



## RESUMO

Na indústria automóvel a flexibilidade e volume de produção são requisitos fundamentais nos processos de produção para as empresas alcançarem uma capacidade de resposta diversificada face à variedade de produtos requeridos no mercado atual. Para tal, os robôs industriais desempenham um papel relevante uma vez que permitem aumentar a produção, tal como a programação de autómatos permite uma maior flexibilidade no fabrico, ao permitir que se produzam na mesma máquina, vários produtos diferentes.

O presente trabalho teve como objetivo programar duas células industriais desenvolvidas para o setor automóvel. O trabalho foi desenvolvido numa empresa de máquinas industriais no distrito de Viseu. Foram desenvolvidas várias ferramentas de software para integrar e controlar todos os equipamentos de automação da célula, nomeadamente, robôs industriais, autómatos, câmaras de visão artificial e interfaces homem-máquina (HMI). Programou-se o robô para uma máquina cujo objetivo é colocar agrafes metálicos em moldes plásticos de duas referências diferentes, assim como a comunicação deste com o autómato.

Também se programou o autómato, a HMI e as câmaras de visão artificial de uma outra máquina cujo propósito é o aparafusamento de polias em carris elevatórios e verificação do processo. Para tal, esta máquina possui dois robôs industriais controlados pelo autómato, que aparafusam e verificam o estado do carril, antes de o colocar na zona de evacuação. Este procedimento pode ser feito para seis referências de carris diferentes.



## **ABSTRACT**

In the automobile industry, flexibility and production volume are fundamental requirements in production processes for companies to achieve a diversified responsiveness to the variety of products required in the current market. To this end, industrial robots play a relevant role as they allow for increased production, just as the programming of programmable logic controllers allows for greater flexibility in manufacturing, by allowing several different products to be produced on the same machine.

The present work set as objective to program two industrial cells developed for the automobile sector. The work was developed in an industrial machinery company in the district of Viseu. Several software tools were developed to integrate and control all the cell's automation equipment, namely industrial robots, programmable logic controllers, artificial vision cameras and human-machine interfaces (HMI). The robot was programmed for a machine whose objective is to place metallic staples in plastic molds of two different references, as well as its communication with the programmable logic controller.

The programmable logic controller, the HMI and the artificial vision cameras of another machine were also programmed, the purpose of which is to screw the pulleys onto rails and to check the process. For this purpose, this machine has two industrial robots controlled by the programmable logic controller, which screw and check the condition of the rail, before placing it in the evacuation area. This procedure can be done for six different rail references.



## **PALAVRAS CHAVE**

Robótica  
Interface Homem-Máquina  
Automação Industrial  
Indústria Automóvel



## **KEY WORDS**

Robotics  
Human-Machine Interface  
Industrial Automation  
Automobile Industry



## AGRADECIMENTOS

Aqui expresso a minha profunda gratidão a todos os que contribuíram para a realização do presente trabalho.

Ao meu orientador, Professor Doutor António Manuel Pereira Ferrolho, pela sua orientação, inteira disponibilidade, por tudo o que me ensinou, por todo o incentivo dado ao longo da realização deste trabalho.

À minha coorientadora, colega de trabalho e amiga Engenheira Ana Isabel Carvalho, por toda a ajuda durante este trabalho, pelos ensinamentos em robótica, pela paciência e pela disponibilidade constante mesmo quando estava cheia de trabalho.

À Tojaltec, nomeadamente ao Cândido Roque por fornecer todas as condições para a realização deste trabalho, ao Virgílio Figueiredo pela amizade e companheirismo na resolução dos problemas que surgiram com estas máquinas e ao Ângelo Ferreira por todo o conhecimento transmitido.

À minha família em geral por investirem na minha formação e nunca desistirem de mim.

Ao meu falecido avô Azevedo, ao meu tio Francisco e primo David, por me ensinarem o valor do trabalho e profissionalismo.

Aos meus pais e irmãos por me ajudarem a superar as dificuldades que surgiram ao longo deste percurso.

À minha mulher Anaísa e ao meu filho Benjamim por serem uma fonte inesgotável de motivação e felicidade para mim, sem os quais este trabalho não seria possível.



# ÍNDICE GERAL

ÍNDICE GERAL .....	xv
ÍNDICE DE FIGURAS .....	xix
ABREVIATURAS E SIGLAS .....	xxiii
1. Introdução.....	1
1.1 Motivação .....	1
1.2 Objetivos.....	1
1.3 Estrutura da dissertação .....	2
2. Estado da arte.....	3
2.1 Indústria 4.0 .....	3
2.1.1 Conceito.....	3
2.1.2 Um pouco de história.....	3
2.1.3 Tecnologias.....	6
2.2 A nova revolução industrial da Europa.....	8
2.2.1 Desindustrialização.....	8
2.2.2 Indústria 4.0 a caminho da Europa .....	10
2.2.3 Revolução em Portugal.....	11
2.3 Como a automação domina o mundo da indústria automóvel.....	12
2.3.1 Vantagens .....	12
2.3.2 Digitalização .....	13
3. Desenvolvimento da célula – Máquina de inserção de agrafes metálicos.....	14
3.1 <i>Layout</i> da máquina.....	14
3.2 Alimentador vibratório .....	16
3.3 Rejeição de agrafes .....	18
3.4 JIG.....	19
3.5 Armazém de ferramentas .....	19
3.6 Robô e controlador.....	21
4. Proposta de solução – Máquina de inserção de agrafes metálicos .....	25

4.1	Sinais entre PLC e robô.....	25
4.2	Máquina de estados .....	26
4.3	Programação base.....	27
4.3.1	Posição de segurança .....	27
4.3.2	Posição <i>home</i> .....	28
4.3.3	Rejeição de agrafes .....	28
4.3.4	Troca de ferramenta .....	29
4.3.5	Carregar agrafes .....	31
4.3.6	Introdução de agrafes .....	32
4.4	Teste das comunicações com o PLC .....	34
4.5	Calibração das hastes do robô .....	35
4.6	Definir zonas de trabalho .....	37
4.7	Programar segurança do robô (cubos de interferência).....	38
4.8	Programar <i>I/F Panel</i> .....	38
4.9	Definição da trajetória do robô.....	39
4.10	Programação do retorno à posição de segurança.....	40
4.11	Testes e afinações finais .....	40
4.12	Instalação da máquina no cliente .....	42
5.	Desenvolvimento da célula – Máquina de aparafusamento de carris .....	45
5.1	<i>Layout</i> da máquina .....	45
5.2	Funcionamento geral .....	46
5.3	Posto 1 .....	48
5.3.1	Sistema de alimentação de polias.....	48
5.3.2	Sistema de distribuição de polias .....	50
5.3.3	Visão artificial.....	53
5.4	Posto 2 .....	53
5.5	Posto 3 .....	54
5.5.1	Robô e controlador.....	54
5.5.2	Sistema de aparafusamento .....	56
5.6	Posto 4.....	58
5.6.1	Robô e controlador.....	58
5.6.2	Visão artificial.....	60

5.6.3	Lubrificação.....	60
5.6.4	Rampas de evacuação .....	61
5.6.5	Gaveta de rejeição .....	62
5.7	Prato rotativo.....	62
5.7.1	Variador de frequência .....	63
5.8	Gestor da máquina .....	64
5.9	Interface homem-máquina .....	65
5.10	Dispositivos de segurança .....	66
5.10.1	Barreiras de segurança.....	66
5.10.2	Portas de segurança .....	67
5.10.3	Botoneiras de emergência.....	68
5.11	Dispositivos de comando e sinalização .....	69
6.	Proposta de solução – Máquina de aparafusamento de carris .....	71
6.1	Programação e configuração da segurança da máquina .....	71
6.2	Programação e parametrização do inversor de frequência .....	74
6.3	Programação e parametrização do servomotor .....	76
6.4	Identificação dos sinais necessários a trocar com os robôs .....	77
6.5	Programação do bloco de função de comunicação com os robôs.....	79
6.6	Programação geral da máquina.....	87
6.7	Programação HMI.....	88
6.7.1	Observações gerais .....	89
6.7.2	Ecrã arranque.....	90
6.7.3	Ecrã principal.....	91
6.7.4	Ecrã menu comando manual.....	93
6.7.5	Ecrã comando manual prato indexador .....	94
6.7.6	Ecrã comando manual sistema distribuição de polias .....	94
6.7.7	Ecrã comando manual câmaras .....	95
6.7.8	Ecrã comando manual de segurança e LED's .....	95
6.8	Testes .....	96
6.9	Instalação da máquina no cliente .....	97
7.	Conclusão .....	99
	Referências .....	101



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1: Esquema da máquina a vapor [4].....	4
Figura 2-2: Linha de montagem de Henry Ford [2]. ....	5
Figura 2-3: Fases de evolução da indústria [5].....	6
Figura 2-4: Estado atual da indústria na europa [11].....	9
Figura 2-5: Iniciativas para a industria 4.0 na Europa [11]. ....	11
Figura 3-1: <i>Layout</i> da máquina de inserção de agrafes metálicos. ....	15
Figura 3-2: Alimentador Vibratório. ....	17
Figura 3-3: Esquema Alimentador vibratório.....	17
Figura 3-4: a) Sistema de rejeição .....	18
Figura 3-5: JIG. ....	19
Figura 3-6: Armazém de ferramentas. ....	20
Figura 3-7: Flange robô. ....	20
Figura 3-8: Exatidão versus repetibilidade [15]. ....	22
Figura 3-9: Robô Yaskawa Motoman GP-7 e controlador YRC 1000 Micro.....	24
Figura 4-1: Máquina de estados.....	27
Figura 4-2: Exemplo de código na rejeição de agrafes. ....	28
Figura 4-3: Fluxograma do código da rejeição.....	29
Figura 4-4: Exemplo de código na troca de ferramenta. ....	30
Figura 4-5: Fluxograma do código de troca de ferramenta. ....	30
Figura 4-6: Exemplo de código no carregamento de agrafes. ....	31
Figura 4-7: Fluxograma do código de carregamento de agrafes. ....	32
Figura 4-8: Exemplo de código na verificação de inserção de agrafe.....	33
Figura 4-9: Exemplo de código na escolha de programa com base na referência.....	33
Figura 4-10: Fluxograma do código de inserção de agrafes.....	34
Figura 4-11: Ecrã de configuração da calibração de ferramentas. ....	35
Figura 4-12: Calibração de ferramentas. ....	36
Figura 4-13: Ecrã de configuração do momento de inércia.....	37
Figura 4-14: Exemplo de código da máquina de estados. ....	38
Figura 4-15: <i>I/F Panel</i> . ....	39
Figura 4-16: Exemplo de código de movimento de juntas.....	39
Figura 4-17: Exemplo de código retorno à posição de segurança.....	40
Figura 4-18: a) Zona de alimentação de agrafes.....	41
Figura 4-19: Mão robótica a segurar no molde plástico.....	42
Figura 5-1: <i>Layout</i> da máquina de aparafusamento de carris.....	46
Figura 5-2: Pop-up HMI resultados posto 1. ....	47
Figura 5-3: Pop-up HMI aparafusamento NOK. ....	47
Figura 5-4: Alimentador de polias.....	49

Figura 5-5: Tapete de alimentação de polias. ....	49
Figura 5-6: Prato indexador de polias. ....	50
Figura 5-7: Servomotor SIMOTICS S-1FK2 HD [20]. ....	51
Figura 5-8: Sistema de distribuição de polias. ....	52
Figura 5-9: Componentes de visão artificial do posto 1. ....	53
Figura 5-10: Volume de trabalho robô KR 20 R1810-2 [22]. ....	54
Figura 5-11: Controlador KR C4 [23]. ....	56
Figura 5-12: Alimentador de parafusos. ....	56
Figura 5-13: Parafusadora <i>Weber</i> . ....	57
Figura 5-14: Controlador C30S <i>Weber</i> [24]. ....	57
Figura 5-15: Volume de trabalho robô KR 10 R1420 [25]. ....	58
Figura 5-16: Controlador KR C4 Smallsize-2 [26]. ....	60
Figura 5-17: Câmara CA-035M dentro de caixa escura. ....	60
Figura 5-18: Zona de lubrificação. ....	61
Figura 5-19: Rampas de evacuação. ....	61
Figura 5-20: Gaveta de rejeição: a) gaveta; b) sensor de barreira. ....	62
Figura 5-21: Ciclo do prato rotativo [27]. ....	63
Figura 5-22: Autômato <i>Siemens</i> 1513-F1 PN [29]. ....	64
Figura 5-23: Rede <i>PROFINET</i> . ....	65
Figura 5-24 : Interface homem-máquina HMI TP 900 <i>Confort</i> [32]. ....	66
Figura 5-25: Barreiras de segurança <i>Omron</i> [33]. ....	67
Figura 5-26: Fechadura de segurança <i>Schneider</i> [34]. ....	68
Figura 5-27: Botoneira de emergência <i>Schneider</i> [35]. ....	69
Figura 5-28: Unidade de controlo manual. ....	69
Figura 5-29: LED's de sinalização. ....	70
Figura 6-1: Configuração do tempo de discrepância. ....	72
Figura 6-2: Bloco de função ESTOP1. ....	73
Figura 6-3: Bloco de função SFDOOR. ....	73
Figura 6-4: Lista de parâmetros do inversor de frequência. ....	74
Figura 6-5: Função SINA_SPEED. ....	75
Figura 6-6: Bloco de função de segurança <i>PROFIsafe</i> . ....	76
Figura 6-7: Bloco de função de controlo do servomotor. ....	77
Figura 6-8: Sinais trocados entre o robô de evacuação e o PLC. ....	78
Figura 6-9: Bloco de função FDBACK do sinal <i>Operator Safety</i> . ....	79
Figura 6-10: Grafcet "RPI" parte 1. ....	80
Figura 6-11: Grafcet "RPI" parte 2. ....	81
Figura 6-12: Grafcet "RPI" parte 3. ....	82
Figura 6-13: Grafcet "Tarefa". ....	83
Figura 6-14: Grafcet "Início". ....	85
Figura 6-15: Bloco de função robô. ....	86
Figura 6-16: Fluxograma funcionamento geral da máquina. ....	88

Figura 6-17: Exemplo de navegação entre ecrãs. ....	89
Figura 6-18: Botão <i>home</i> . ....	89
Figura 6-19: Botões de navegação entre ecrãs: a) ecrã anterior; b) ecrã seguinte.....	89
Figura 6-20: Teclado numérico. ....	90
Figura 6-21: Teclado alfanumérico. ....	90
Figura 6-22: Indicadores dos sensores: a) sem detetar; b) a detetar. ....	90
Figura 6-23: Ecrã arranque. ....	91
Figura 6-24: Ecrã principal.....	92
Figura 6-25: Submenu do ecrã principal. ....	93
Figura 6-26: Ecrã menu comando manual.....	93
Figura 6-27: Ecrã comando manual do prato indexador. ....	94
Figura 6-28: Ecrã comando manual do sistema de distribuição de polias.....	95
Figura 6-29: Ecrã do comando manual das câmaras. ....	95
Figura 6-30: Ecrã comando manual da segurança e LED's. ....	96



## **ABREVIATURAS E SIGLAS**

PLC	Programmable Logic Controller
HMI	Human Machine Interface
RPI	Retorno à Posição Inicial
IP	Internet Protocol
CEF	Connecting Europe Facility
CIP	Confederação Empresarial Portuguesa
CPS	Cyber-Physical System
IOT	Internet Of Things
IIOT	Industrial Internet Of Things
TCP	Tool Center Point



# 1. Introdução

Neste capítulo são apresentados os aspetos que motivaram a elaboração da presente dissertação, os objetivos de estudo e o resumo de cada um dos capítulos deste trabalho.

## 1.1 Motivação

Atualmente, e já de algum tempo para cá, a indústria automóvel está em constante crescimento e, como tal, necessita cada vez mais de processos mais eficientes e flexíveis na produção. De forma a produzir mais e melhor, é normal encontrar-se nas linhas de produção, máquinas com robôs industriais. Neste sentido, o trabalho proposto tem como objetivo programar duas máquinas com robôs industriais numa empresa do distrito de Viseu.

## 1.2 Objetivos

Os objetivos da presente dissertação consistem em:

- Programar um robô industrial para inserir agrafes metálicos;
- Programar um autómato com segurança integrada que gere quatro postos numa máquina industrial;
- Programar câmaras de visão artificial para verificar componentes em carris e correto posicionamento;
- Programar uma HMI;
- Garantir o correto funcionamento das máquinas em ambiente industrial.

### **1.3 Estrutura da dissertação**

Esta dissertação encontra-se organizada em sete capítulos onde é descrito o trabalho desenvolvido.

No primeiro capítulo é introduzido o trabalho a realizar e contém as motivações e os objetivos pretendidos.

No segundo capítulo é apresentada uma abordagem à indústria 4.0 e ao papel da automação na indústria automóvel.

No terceiro capítulo é descrito o problema da máquina de inserção de agrafes metálicos assim como um resumo dos equipamentos utilizados.

No quarto capítulo são apresentados os algoritmos propostos como solução da componente robótica, o seu funcionamento, os testes executados e os resultados finais da instalação em meio industrial da máquina de inserção de agrafes metálicos.

No quinto capítulo é descrito o problema da máquina de aparafusamento de carris assim como um resumo dos equipamentos utilizados.

No sexto capítulo são apresentados os algoritmos propostos como solução aplicados no autómato, o seu funcionamento, os testes executados e os resultados finais da instalação em meio industrial da máquina de aparafusamento de carris.

Por fim, no sétimo e último capítulo, são apresentadas as conclusões gerais da dissertação.

## **2. Estado da arte**

### **2.1 Indústria 4.0**

#### **2.1.1 Conceito**

Atualmente encontramos-nos na quarta revolução industrial ou indústria 4.0. Esta indústria é constituída por unidades fabris que por sua vez contêm máquinas e sensores que possuem conectividade *wireless*, que estão ligadas a um sistema que monitoriza toda a produção e é capaz de tomar decisões por si próprio. Na sua essência, a indústria 4.0 engloba as principais inovações tecnológicas nos campos da automação, controlo e tecnologia da informação, aplicadas aos processos de manufatura. Recorrendo a tecnologias que abrangem sistemas ciberfísicos (cyber-physical system - CPS), Internet das Coisas (IoT) e Internet dos Serviços (IoS), os processos de produção tendem a tornar-se cada vez mais eficientes, autónomos e flexíveis [1]. A indústria 4.0 está fortemente focada na melhoria contínua em termos de eficiência, segurança, produtividade das operações e especialmente no retorno de investimento [7]. Antes de abordar algumas das tecnologias que compõem a indústria 4.0, irei debruçar-me acerca de como chegámos a esta revolução industrial.

#### **2.1.2 Um pouco de história**

Ao longo da história recente, mais concretamente a partir do século XVIII, a ciência tomou um rumo de constante evolução, o que desencadeou o surgimento de várias tecnologias que alteraram a forma como produzimos bens, principalmente no setor da indústria. A esta alteração

profunda no setor industrial dá-se o nome de Revolução Industrial [2]. Nos capítulos seguintes iremos abordar as 3 revoluções industriais que precederam a indústria 4.0.

### 2.1.2.1 Primeira revolução industrial - Indústria 1.0

A primeira revolução industrial ocorre quando se utiliza a força motriz da água, mais concretamente vapor de água, como fonte de energia para engenhos industriais. As primeiras aplicações deste novo tipo de energia na indústria surgiram em Inglaterra no final do século XVIII e prolongou-se até ao início século XIX, dando origem a uma mudança da força laboral da agricultura para a fábricas industriais [3]. Esta revolução fica também marcada por duas invenções que surgiram da utilização de carvão como fonte de energia: a máquina a vapor e a locomotiva. Ambas as invenções foram determinantes no setor do transporte de mercadorias, matérias-primas e pessoas. A indústria 1.0 define então o momento da história em que os processos 100% artesanais passaram a ser automatizados [2].

Na Figura 2-1 podemos observar de uma forma geral, como funcionava a máquina a vapor.

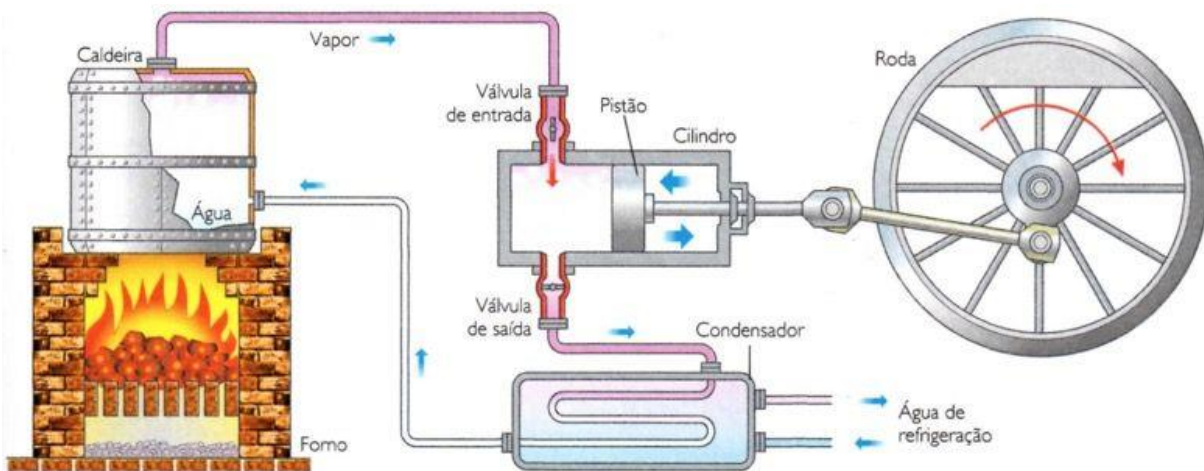


Figura 2-1: Esquema da máquina a vapor [4].

### 2.1.2.2 Segunda revolução industrial - Indústria 2.0

A segunda revolução industrial ocorreu quando deixou de se utilizar o vapor de água como fonte de energia para as máquinas industriais e passou-se a utilizar a eletricidade. Tal como na primeira revolução, esta revolução também ficou marcada pelo aparecimento de novas tecnologias como o motor de combustão. Neste período aplicaram-se princípios de gestão de tempo, especialização de tarefas e produção em massa, cujo principal responsável pela implementação foi Henry Ford [3]. Esta nova forma de se produzir revolucionou a indústria automóvel quando em 1914, Ford introduziu a primeira linha de montagem automatizada. Podemos ver um exemplo desta linha de montagem na Figura 2-2. A indústria 2.0 fica então marcada pela utilização de novas fontes de energia, aperfeiçoamento das tecnologias provenientes da primeira revolução industrial e pela criação de linhas de produção automatizadas provenientes maioritariamente da indústria automóvel e bélica [2].



Figura 2-2: Linha de montagem de Henry Ford [2].

### **2.1.2.3 Terceira revolução industrial - Indústria 3.0**

Ao contrário da primeira e segunda revolução industrial, a indústria 3.0 não surge através de uma mudança na fonte de energia utilizada, mas sim por avanços nas áreas de informática, robótica, telecomunicações, transportes, biotecnologia e química [2]. Surgiu na segunda metade do século XX e é caracterizada pela implementação de robôs, que podem ser programados, nas linhas de montagem e pela gradual substituição de sistemas analógicos por sistemas digitais [3]. Além de alterações nas componentes tecnológicas, esta revolução também fica marcada por uma mudança nos modelos de produção que passaram de modelos de produção em massa para um modelo *Toyotista*, caracterizado por uma produção flexível que satisfaz a procura. O processo da indústria 3.0 foi decisivo para consolidar a presente fase do capitalismo e da divisão internacional do trabalho, a chamada globalização [2].

De uma forma resumida, as fases de evolução que a indústria sofreu, definem-se da seguinte forma [5]:

- A primeira revolução industrial deu-se entre 1760 e 1840 com a mecanização da produção baseada na utilização do vapor de água como fonte de energia;
- A segunda revolução industrial deu-se no final do século XIX e início do século XX. Introduziu-se a utilização da energia elétrica e a produção em massa com a criação de linhas de montagem;
- A terceira revolução industrial teve início na década de 1960 e consistiu na utilização das tecnologias de informação (computadores de grande porte para processamento de um enorme volume de dados) permitindo o desenvolvimento de produções automáticas;
- A convergência entre o mundo físico e o virtual resultou em sistemas ciberfísicos dando origem à quarta revolução industrial. A Figura 2-3 mostra as fases de evolução da indústria.

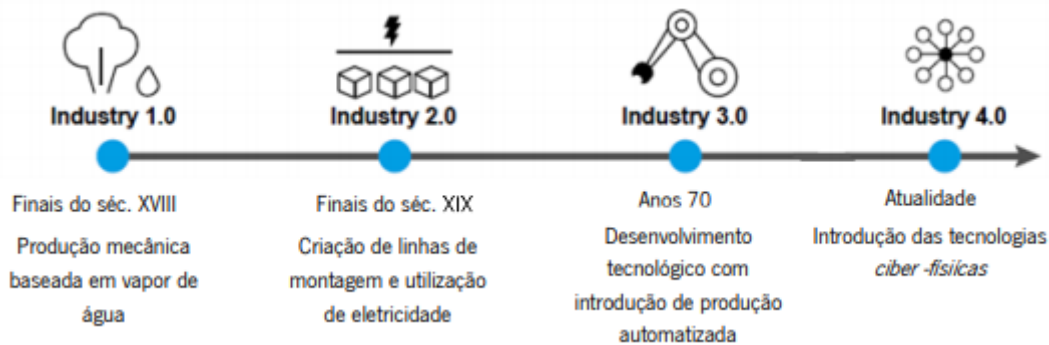


Figura 2-3: Fases de evolução da indústria [5].

### 2.1.3 Tecnologias

São várias as tecnologias contidas na indústria 4.0 pelo que seria exaustivo aprofundar cada uma delas, motivo pelo qual se irá falar apenas de quatro: a IoT/IIoT, a IoS, os CPS e a *Big Data*.

#### 2.1.3.1 IoT/ IIoT e IoS

O termo internet das coisas “*Internet of Things (IoT)*” refere-se a objetos físicos e virtuais ligados à internet [6].

Hoje em dia existem 4,6 bilhões de pessoas que usufruem da internet, mas estima-se que o número de dispositivos que estão ligados à internet ultrapasse em grande escala o número de pessoas: cerca de 30 bilhões de dispositivos estão ligados à internet [7].

Segundo a Iberdrola, a IIoT é o conjunto de sensores, instrumentos e dispositivos autónomos conectados via internet a aplicações industriais. Esta rede utiliza os dados fornecidos por estes equipamentos para analisar e otimizar a produção, reduzindo custos nos processos, aumentando assim a eficiência. As aplicações de IIoT atualmente focam-se em três setores: manufatura, energético e transporte. Prevê-se que no futuro próximo a IIoT se traduza numa maior aplicação de robôs industriais, sistemas de controlo de armazéns e transporte de mercadorias, tal como em sistemas de manutenção capazes de prever falhas e anomalias [7].

A IIoT diferencia-se da IoT na medida em que a IoT é mais orientada ao serviço dos consumidores enquanto que a IIoT aumenta a segurança e eficiência nas unidades fabris.

A estrutura da IIoT divide-se em quatro camadas [7]:

- Dispositivos ou equipamentos: são os sensores, máquinas, entre outros;
- Rede: é a camada superior que estabelece a ligação entre os equipamentos e os servidores;

- Serviços: consistem nas aplicações informáticas que utilizam os dados para proporcionar um serviço ao consumidor;
- Conteúdo: é a interface com o Homem como por exemplo, um telemóvel ou computador.

Entre as suas aplicações, podem destacar-se o uso de veículos autónomos, a otimização de máquinas, redução de erros humanos e redução de acidentes.

### **2.1.3.2 Cyber-Physical System**

Estes sistemas integram computação, processos físicos, redes de comunicação e computadores embutidos que se influenciam mutuamente. Resulta da evolução tecnológica dos computadores, dos sensores, e das tecnologias de comunicação, que ao apresentarem maior capacidade de processamento e preços cada vez mais competitivos tem permitido a sua conjugação de forma efetiva e em tempo-real [6].

As aplicações comuns dos “*Cyber-Physical Systems (CPS)*” enquadram-se em sistemas autónomos habilitados para comunicação com base em sensores. Por exemplo, várias redes de sensores sem fio monitorizam alguma particularidade do ambiente e retransmitem as informações processadas para um nó central. Outros tipos de CPS incluem sistemas autónomos, sistemas de controlo de processo e robótica. Os CPS também são usados em redes elétricas para realizar controlo avançado, especialmente no contexto de redes inteligentes para aprimorar a integração da geração renovável distribuída.

No domínio da indústria, os CPS habilitados por tecnologias de nuvem levaram a novas abordagens que abriram caminho para a Indústria 4.0 [8].

### **2.1.3.3 Big Data**

O termo *Big Data* refere-se a grandes quantidades de dados que são armazenados a cada instante resultante da existência de milhões de sistemas atualmente ligados à rede (IoT), que produzem dados em tempo real sobre quase tudo e que se querem disponíveis em todo o lado [6].

As suas aplicações são inúmeras: o navegador de GPS sabe se a rota consultada por um utilizador sofre alterações no trânsito sugerindo-lhe alternativas; um canal de televisão em *streaming* por assinatura definiu os personagens e o guião da sua série mais bem-sucedida analisando os conteúdos que os espectadores consomem e preferem; os relógios inteligentes registam as pulsações de milhões de utilizadores e identificam padrões que antecipam e evitam doenças cardiovasculares; os sensores de humidade nos campos de cultivo planeiam a rega, intersetando os seus dados com os dados das previsões meteorológicas e assim sucessivamente [9].

## **2.2 A nova revolução industrial da Europa**

### **2.2.1 Desindustrialização**

A situação atual da Europa relativamente à industrialização não é uniforme: por um lado a Alemanha e alguns países da Europa de Leste aumentaram a quota do setor industrial em termos de valor acrescentado e aumentaram a produtividade nos últimos anos; por outro lado, países como a França e Reino Unido têm vindo a desindustrializar a sua economia desde o início do milénio.

Este aspeto é facilmente comprovado ao analisar a história recente da industrialização a nível mundial. No arranque da década de 90, grande parte da atividade industrial, cerca de 60%, era atribuída apenas a seis economias, sendo elas a economia dos Estados Unidos da América, do Japão, da Alemanha, da Itália, do Reino Unido e da França. Apenas 21% desta atividade era atribuída aos países em desenvolvimento. Atualmente a situação é diferente, como se pode observar na Figura 2-4, uma vez que países como a China e o Brasil aumentaram o emprego no setor industrial (39% e 23% respetivamente) enquanto que países europeus como a Alemanha, França e Reino Unido reduziram a atividade em 8%, 20% e 29%, respetivamente. Para esta quebra na tendência de atividade industrial contribuíram dois fatores: o crescimento das economias dos países em desenvolvimento, como por exemplo os países da Europa de Leste, e a falta de investimento dos países desenvolvidos na atividade industrial [10].

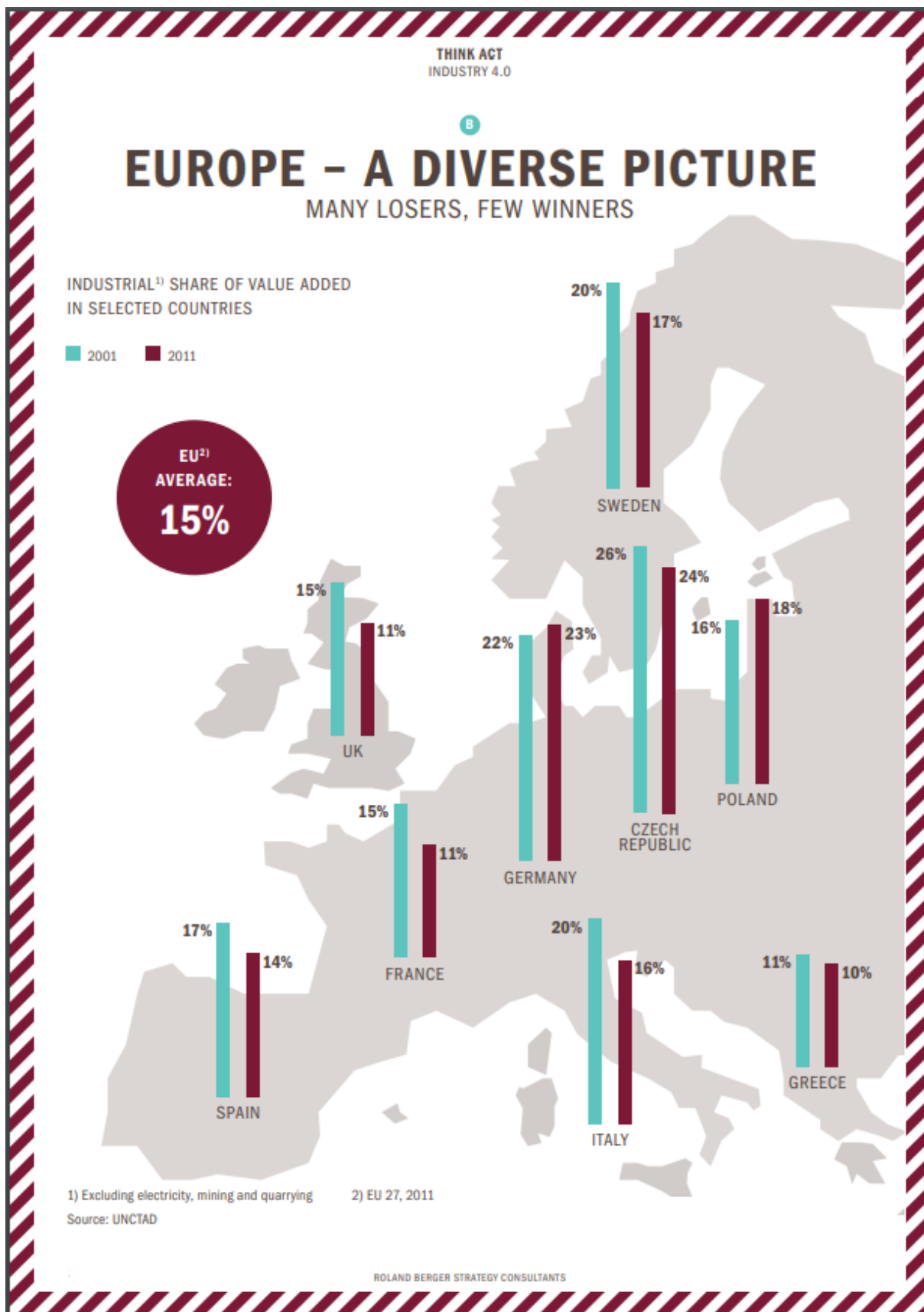


Figura 2-4: Estado atual da indústria na europa [11].

### 2.2.2 Indústria 4.0 a caminho da Europa

A chegada da indústria 4.0 à Europa traduz-se numa oportunidade para mudar as regras do setor económico atual, especialmente para superar as tendências de desindustrialização que alguns países europeus enfrentam como foi abordado no subcapítulo anterior. Na configuração atual da indústria, existem formas de manter a vantagem competitiva da Europa em comparação com países com custo de mão-de-obra baixo: selecionando produtos ou atividades de alto valor agregado, possuindo unidades de produção modernas e automatizadas com tamanho crítico e implementando práticas de excelência de fabricação. Com a indústria 4.0 a procura por serviços altamente qualificados aumentará o número de processos que irão apoiar esta indústria mais complexa [10].

Várias companhias europeias como a *Siemens* e a *Rolls-Royce* desenvolveram ideias inovadoras para mudar as atividades das suas unidades de negócios para a indústria 4.0. Espera-se que outras companhias sigam o mesmo caminho, uma vez que a Europa está numa posição muito mais favorável para competir com o resto do mundo, do que se possa pensar. Os Estados Unidos da América têm vindo a desindustrializar em prol duma economia baseada em serviços e alta tecnologia e a China investiu muito na indústria 3.0 e está focada em reequilibrar a economia para um crescimento mais sustentável. No entanto, o Japão é provavelmente o país mais avançado no campo desta nova revolução, especialmente no que diz respeito à robótica e automação.

É importante que os decisores políticos e os governos europeus partilhem a mesma visão no que toca ao rumo a seguir para a digitalização da Europa, priorizando a indústria 4.0. Este caminho já vem sendo feito, como podemos ver através da Figura 2-5 que mostra um leque de iniciativas que estão a ser feitas por toda a Europa.

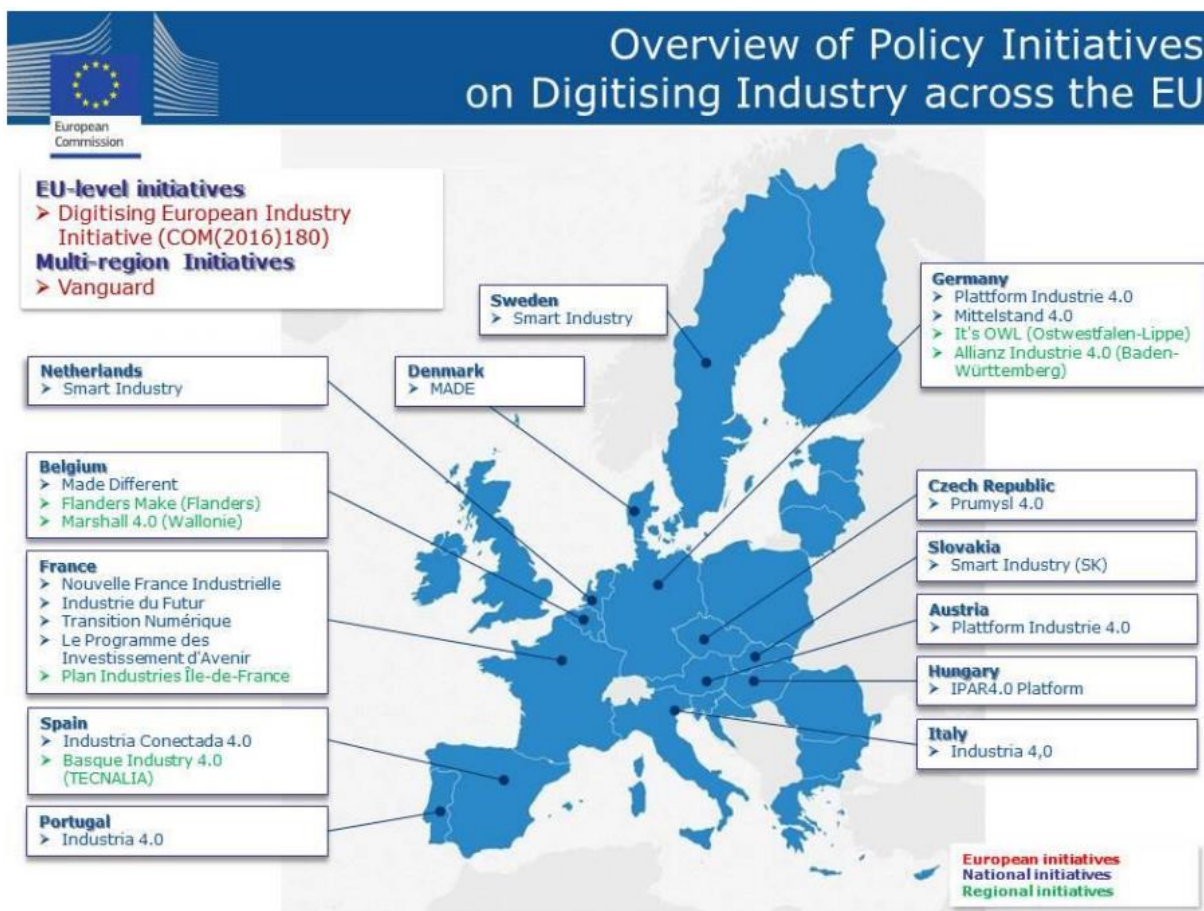


Figura 2-5: Iniciativas para a indústria 4.0 na Europa [11].

A reindustrialização na Europa vai então permitir preservar uma indústria sustentável, desenvolver trabalhadores qualificados, apoiar a transição energética, adaptar-se à personalização em grande escala e competir com sucesso com outras regiões do mundo.

### 2.2.3 Revolução em Portugal

Atualmente, o setor industrial português está a reestruturar-se, com apostas não só na modernização como também na internacionalização, características essenciais para um crescimento equilibrado.

A Confederação Empresarial Portuguesa (CIP) propôs um programa para o desenvolvimento da indústria e dos bens transacionáveis com medidas de curto, médio e longo prazo. As políticas que constam no programa têm como objetivo o desenvolvimento tecnológico, a inovação, o financiamento, a fiscalidade e a redução de custos. Todo este projeto financiado pelos Fundos Comunitários do Programa Portugal 2020 bem como os Programas Europeus Horizonte 2020, Cosme e o *Connecting Europe Facility* (CEF).

Para que o crescimento da economia portuguesa seja possível, é necessário o investimento em unidades produtivas de bens transacionáveis. Tal como mencionado anteriormente, reindustrialização em Portugal tem o apoio financeiro do Programa Portugal 2020 com o apoio de uma política industrial que se baseia em operações de mercados internacionais abertos e concorrenciais. Isto quer dizer que também será necessário realocar recursos para a produção de bens e serviços. Um destes recursos é o fator humano. A força laboral portuguesa, no geral, tem um nível de formação inicial baixo que é compensado por elevados graus de motivação, flexibilidade e capacidade de aprendizagem e na formação contínua em que as empresas onde estes colaboradores trabalham fornece. É necessário que estas empresas invistam numa formação para a próxima geração, para que esta se sinta confortável a trabalhar com as novas tecnologias. Só assim as empresas terão sucesso na implementação de novas tecnologias. Não basta digitalizar os processos se os colaboradores não tiverem formação para operar nestes. Segundo dados da *PricewaterhouseCoopers*, o nível médio de digitalização das empresas do setor industrial deverá crescer de 33% para 72% dentro de 5 anos [5].

Dentro da atual realidade da União Europeia, Portugal está no grupo de países denominados como hesitantes [10]. O papel fundamental que a atividade industrial deverá representar no novo modelo económico que se pretende para o nosso país passa pelas partes interessadas compreenderem as tendências futuras e fundamentos da nova abordagem ao desenvolvimento da atividade industrial, para que consigam atrair o investimento estrangeiro necessário à reindustrialização da economia portuguesa [10].

### **2.3 Como a automação domina o mundo da indústria automóvel**

A indústria automóvel é um dos setores mais avançados no domínio da robotização e automação. Segundo a Siemens, mais de 80% de todas as unidades fabris do ramo automóvel que estão em funcionamento na europa estão automatizadas. Ao utilizarem sistemas de tecnologias de informação no planeamento e produção de bens, estas fábricas aumentam a sua competitividade e capacidade de produção [12].

#### **2.3.1 Vantagens**

Seja para reduzir os custos ou para melhorar a eficiência na produção, tem havido um investimento crescente em máquinas industriais no setor automóvel. Várias vantagens em automatizar as linhas de produção justificam este investimento.

Em primeiro lugar, existe uma redução significativa nos custos operacionais. As empresas do ramo automóvel, ao usarem máquinas industriais e robôs obtêm uma redução de energia e matéria-prima para cada automóvel produzido. Existe também uma redução de tempo na

montagem e, segundo vários fabricantes, existe também uma redução de tempo a desenvolver um automóvel, razão pela qual assistimos a uma maior variedade de automóveis nos últimos anos.

Em segundo lugar, esta automação permite uma maior segurança dos colaboradores das fábricas, quer seja por operarem numa máquina mais segura, quer seja por serem destacados para outra tarefa ao serem substituídos por robôs [13]. Sendo assim, com as soluções de digitalização e automação, os trabalhos no chão de fábrica ficam mais seguros. Com a colaboração entre robôs e humanos (robôs colaborativos) os ambientes de trabalho melhoraram [14].

Por último, ao atualizar as linhas de produção com as tecnologias mais recentes, o índice de erros será menor. Isto acontece porque ao aumentar a tecnologia da unidade fabril, menor serão os erros humanos, uma vez que os robôs e as máquinas executam muito do trabalho efetuado previamente por humanos. Por exemplo, ao colocar as tarefas a cargo de uma célula robótica, a probabilidade de elas não serem executadas como desejado é muito, comparado com o desempenho humano [13].

### **2.3.2 Digitalização**

Como vimos anteriormente, a robótica e a automação têm a maior participação de mercado na indústria automóvel na Europa sendo que muitas aplicações, como pintura, soldadura e colagem são automatizadas. Considerando o crescente volume de automação e mínima intervenção humana, é necessário inspecionar os produtos que saem das células automatizadas. Uma nova tendência é a aplicação de várias tecnologias de inspeção providas com *machine learning* e *deep learning*, aliadas à robótica e automação.

Isto irá fazer com que as linhas de produção se tornem mais eficazes em satisfazer os parâmetros de qualidade ao longo do tempo.

Além disto, a digitalização está a impor-se em grande escala. Grande parte das empresas já desenvolveram um plano para entrar na Indústria 4.0. A implementação da digitalização ajudará as empresas a colocar as “perdas escondidas” no sistema de produção. A otimização das perdas ocultas vai exigir uma maior formação por parte dos operadores e terá um impacto muito positivo no ambiente de trabalho da empresa. Acontece que a digitalização começou a mudar da ‘lista de desejos’ para a ‘lista de necessidades’ das empresas [14].

## **3. Desenvolvimento da célula – Máquina de inserção de agrafes metálicos**

Neste capítulo é apresentada a composição da célula da máquina de inserção de agrafes metálicos em estudo e uma breve descrição do hardware instalado. Todo o material utilizado foi fornecido pela empresa onde foi desenvolvido o projeto.

### **3.1 *Layout* da máquina**

O objetivo desta parte do projeto foca-se na programação do robô numa máquina cujo propósito é inserir agrafes metálicos em moldes plásticos.

A construção da máquina foi feita de forma a garantir o objetivo final de inserir agrafes, num determinado tempo (< 60seg) e encaixar nas dimensões impostas pelo cliente. Na Figura 3-1 está representado o *layout* da máquina. Como se pode verificar, a máquina pode ser dividida em várias zonas para cada referência de molde: a zona dos alimentadores vibratórios, a zona da rejeição de agrafes e a zona dos *JIG's*. Além destas zonas, a máquina também possui a zona do armazém, onde se encontram as ferramentas com as quais o robô irá operar, consoante a referência do molde.

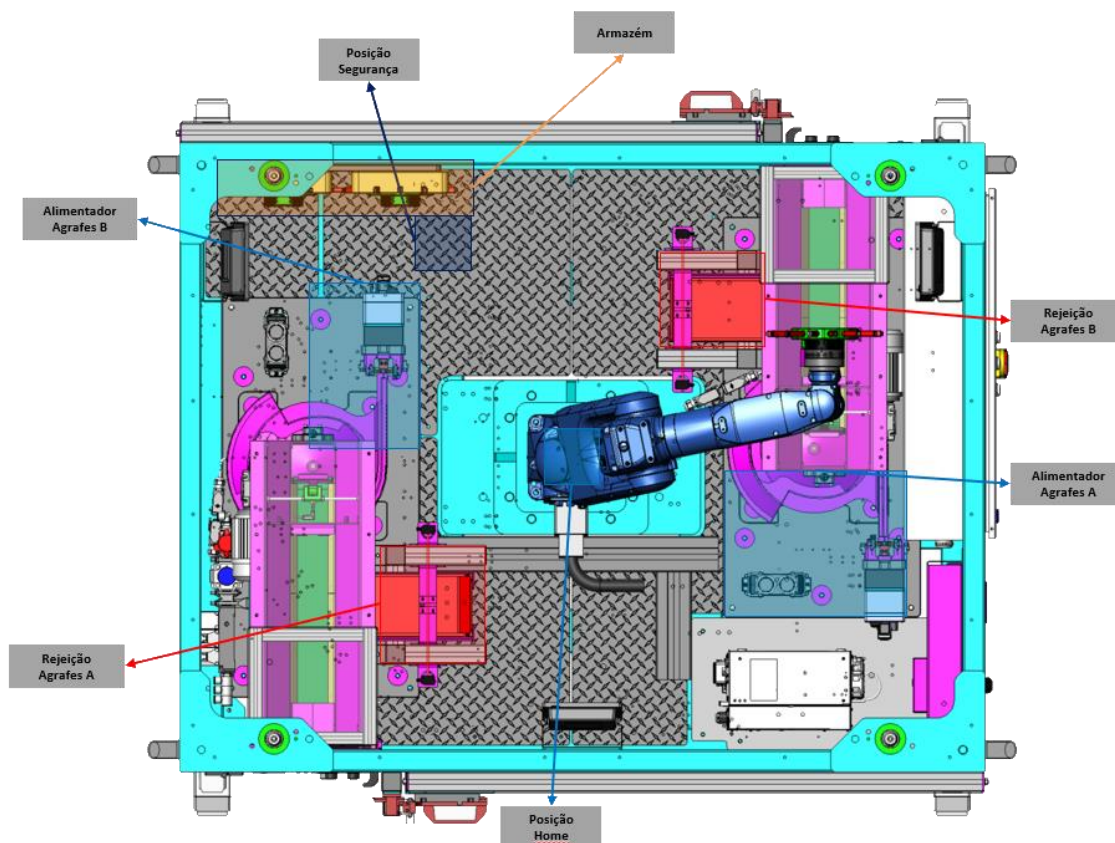


Figura 3-1: *Layout* da máquina de inserção de agrafes metálicos.

Os alimentadores vibratórios são responsáveis por fornecer agrafes ao robô, para que este possa posteriormente inseri-los na peça plástica. Existem dois alimentadores vibratórios, um para cada referência, dado que os agrafes são diferentes. Para fornecer agrafes metálicos ao alimentador, o operador terá de os introduzir num tapete que os guiará à cuba do respetivo alimentador.

A zona de rejeição de agrafes é a zona onde o robô irá remover os agrafes metálicos da estrela. Esta zona possui um sensor fotoelétrico para verificar se o robô possui agrafes nas respetivas hastes, e um mecanismo no qual o robô percorre com a haste em questão para remover o agrafe. A zona dos JIG's é a zona onde serão colocados os moldes plásticos das respetivas referências e onde o robô irá colocar os agrafes previamente carregados no alimentador respetivo. Possuem vários cilindros pneumáticos com calcadores nas suas extremidades, para garantirem a posição da peça. Estes cilindros possuem sensores magnéticos para darem a informação que estão avançados ou recuados. Além do mecanismo pneumático, a estrutura dos JIG's também tem sensores fotoelétricos de presença de peça e peça incompleta. O JIG referente à referência 2 tem dois cilindros adicionais onde o robô irá deixar o agrafe, para que estes o insiram na peça. O robô irá percorrer todas estas zonas durante um ciclo de trabalho, carregando primeiro os agrafes no alimentador, depois coloca-os na peça plástica e, finalmente, dirige-se à zona de

rejeição para verificar se houve algum agrafe que não foi inserido. Também trocará de ferramenta caso a referência do molde altere.

Todo este processo é controlado por um autômato programável (PLC) *Omron NX1P2-9024DT1*. As tarefas do robô tal como os atuadores são geridas pelo autômato que irá interagir com o operador através da interface homem-máquina (HMI) *Omron NA5-9W001*.

### **3.2 Alimentador vibratório**

Os alimentadores vibratórios são muito utilizados na indústria para fornecer componentes que precisem de ser processados pelas máquinas, uma vez que apresentam custos baixos e têm bom rendimento. Possuem umas chapas metálicas na base, sem ligação entre elas, ligadas a um motor que as faz vibrar em sentidos opostos. Este motor tem um controlador que permite ajustar a frequência de vibração de forma a se conseguir o resultado pretendido. Além da componente vibratória, os alimentadores também possuem uma cuba onde se encontram os componentes, e uma pista em espiral por onde estes passam.

Cada alimentador vibratório que a máquina possui, tem dois sensores fotoelétricos e está acoplado a um sistema de inserção de agrafes composto por um cilindro pneumático e dois sensores fotoelétricos, como mostra a Figura 3-2.

O cilindro pneumático é responsável por inserir o agrafe na haste do robô. Tem dois sensores magnéticos acoplados para indicarem ao autômato se está avançado ou recuado. Quando um agrafe chega ao local de inserção onde se encontra o cilindro, este é detetado por um sensor fotoelétrico sendo depois inserido na haste do robô. Existe outro sensor fotoelétrico que informa o autômato se o agrafe foi inserido ou não, caso detete ou não o clip, respetivamente. Ambos os sensores são compostos por um emissor e um recetor e estão sinalizados na Figura 3-3, através de dois quadrados verdes.



Figura 3-2: Alimentador Vibratório.

Os dois sensores fotoelétricos que se encontram no alimentador indicam se a cuba tem poucos agrafes e se o *buffer* está cheio. O primeiro sensor, em que o emissor e o recetor se encontram no mesmo dispositivo, aponta verticalmente para o fundo da cuba e caso esteja vazia, reflete a luz emitida, fazendo com que o sensor ganhe sinal, informando o autómato que há poucos agrafes. O segundo sensor, composto por um emissor e um recetor, encontra-se no início do *buffer* e, caso o feixe seja interrompido durante algum tempo, dá sinal ao autómato de que o *buffer* se encontra cheio de agrafes. Estes sensores encontram-se sinalizados por dois quadrados vermelhos na Figura 3-3. O autómato desliga então o motor do alimentador de forma a evitar um excesso de agrafes no *buffer*, o que pode originar problemas na inserção de agrafes.

Para encher a cuba do alimentador vibratório, o operador coloca agrafes num tapete rolante controlado pelo autómato. Caso a cuba precise de agrafes, será este tapete o meio de os transportar até ela.

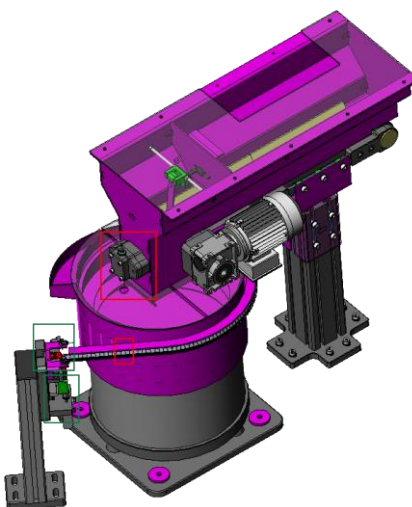


Figura 3-3: Esquema Alimentador vibratório.

### 3.3 Rejeição de agrafes

Num processo industrial automatizado de moldes onde exista um robô que carrega componentes, também existe uma zona de rejeição de componentes. No contexto deste projeto e como referido anteriormente, a zona de rejeição é o local onde são removidos os agrafes da ferramenta do robô.

Conforme é possível verificar através da

Figura 3-4, esta zona possui um sensor de barreira fotoelétrico, com um emissor e um recetor, entre os quais o robô irá colocar a haste para verificar a presença de agrafe. Caso a haste tenha um agrafe metálico, este irá interromper o feixe luminoso, dando informação ao robô que é necessário remover o componente. Caso se verifique a necessidade de remover o componente, o robô transportará o agrafe através duma pista metálica, onde este ficará preso.



a)



b)

Figura 3-4: a) Sistema de rejeição  
b) Caixa de rejeição

### 3.4 JIG

Um JIG é um mecanismo desenvolvido especificamente para um determinado produto, para controlar a posição ou o movimento de partes móveis para que o processo a que o produto é sujeito, seja feito da melhor forma. É um constituinte da máquina geralmente amovível, para que haja uma maior variedade de produtos que a máquina pode fazer. Por exemplo, se um molde é descontinuado e o cliente quiser produzir peças de outro molde, usando a mesma máquina, basta apenas reprogramar os pontos do robô e colocar um JIG diferente, fazendo os ajustes necessários do lado do autômato.

No projeto em questão, como mostra a Figura 3-5, o JIG vai garantir a posição dos moldes das duas referências, para que o robô insira os agrafes. Para tal, utiliza cilindros pneumáticos com sensores indutivos acoplados para dar informação do seu estado e 6 sensores fotoelétricos: 2 sensores para detetarem a presença de peça e 4 para detetarem se a peça veio incompleta do molde.

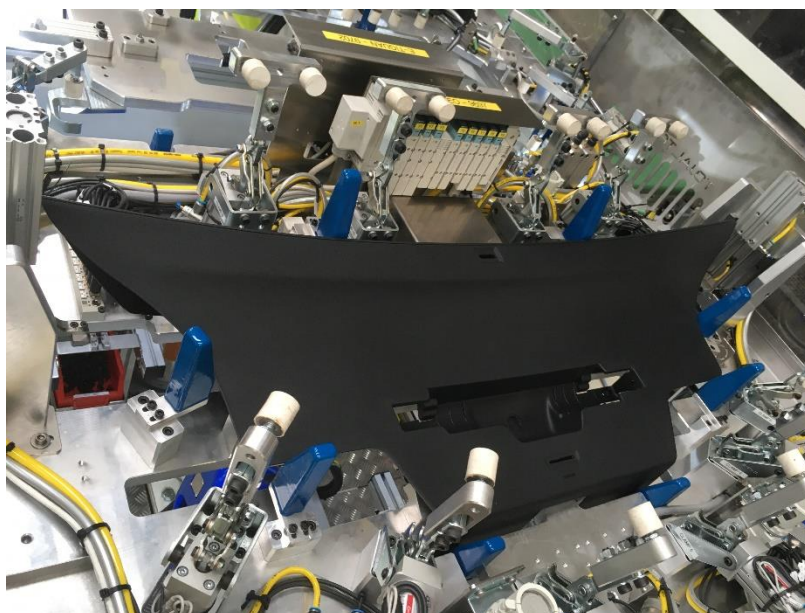


Figura 3-5: JIG.

### 3.5 Armazém de ferramentas

Como podemos verificar na Figura 3-6, o armazém de ferramentas é a zona onde se encontram as ferramentas com as quais o robô irá trabalhar. Tem duas ranhuras para colocar as ferramentas quando não estão a ser necessárias. O robô efetua a troca de ferramenta automaticamente, deixando primeiro a ferramenta equipada (se tiver alguma) e depois irá apanhar a ferramenta correspondente à referência do molde. O robô possui na sua flange um dispositivo pneumático que contém um cilindro e quatro esferas metálicas que permite “agarrar” ou “largar” as

ferramentas, conforme mostra a Figura 3-7. Associado a este mecanismo estão dois sensores indutivos que, através da existência de buracos ou não, na parte traseira da ferramenta, conseguem produzir um código binário de forma ao robô saber qual a ferramenta equipada.



Figura 3-6: Armazém de ferramentas.



Figura 3-7: Flange robô.

### **3.6 Robô e controlador**

Para o projeto em estudo, é necessário escolher um robô manipulador que consiga desempenhar as tarefas desejadas. Para tal, há alguns aspectos a ter em conta, tais como a máxima carga que o robô consegue transportar, o volume de trabalho, a exatidão, a repetibilidade e o tamanho do robô.

A máxima carga que um robô suporta tem em conta tudo o que está acoplado à flange. Neste projeto, a carga que o robô irá suportar será a soma do peso do mecanismo que segura e deteta a ferramenta, e da ferramenta em si.

O volume de trabalho é o espaço de pontos que o robô consegue atingir com a sua extremidade. No projeto em questão, existem dois pontos de inserção de agrafes na segunda referência que o robô escolhido não consegue atingir, mas irá deixar o agrafe num cilindro pneumático que o vai inserir na peça plástica.

A exatidão do robô é definida pela menor distância que o robô consegue percorrer. Neste projeto não é necessário que o robô tenha uma exatidão muito elevada, dado que os pontos de inserção de agrafes têm alguma “folga”.

A repetibilidade do robô é a capacidade que este tem de atingir o mesmo ponto várias vezes, sem se desviar da posição original. Neste projeto esta característica é relevante para garantir uniformidade no processo.

Para melhor compreensão acerca dos conceitos de exatidão e repetibilidade, podemos observar a Figura 3-8.

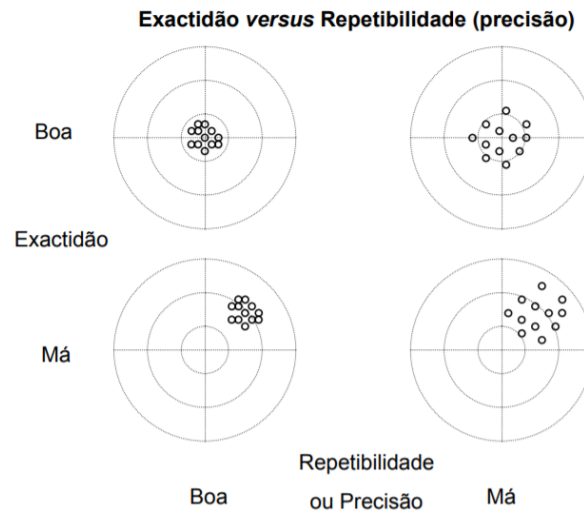


Figura 3-8: Exatidão versus repetibilidade [15].

Em aplicações onde o robô tem um espaço limitado para se mover, é necessário ter em conta o seu tamanho apesar do volume de trabalho. Não se deve escolher um robô com um volume de trabalho grande, se este não conseguir mover-se confortavelmente dentro da máquina. Neste projeto, se fosse colocado um robô com volume de trabalho maior, depois iriam surgir dificuldades em manusear componentes em certas zonas mais próximas da sua base.

O robô escolhido para este projeto foi o robô *Yaskawa GP7* da *Motoman*. As características do robô estão apresentadas na Tabela 3-1.

<b>Robô Yaskawa GP7</b>	
<b>Tipo</b>	Antropomórfico
<b>Referência</b>	Yaskawa GP7
<b>Número de eixos</b>	6
<b>Movimento de eixos</b>	
Eixo 1	-170° a +170°
Eixo 2	-65° a +145°
Eixo 3	-70° a +190°
Eixo 4	-190° a +190°
Eixo 5	-135° a +135°
Eixo 6	-360° a +360°
<b>Velocidade dos eixos</b>	
Eixo 1	375 °/s
Eixo 2	315 °/s
Eixo 3	410 °/s
Eixo 4	550 °/s
Eixo 5	550 °/s
Eixo 6	1000 °/s
<b>Carga máxima</b>	7 kg
<b>Peso</b>	34 kg
<b>Repetibilidade</b>	±0,03 mm
<b>Alcance</b>	927 mm

Tabela 3-1: Especificações do robô [16].

Associado ao robô *Yaskawa GP7* está o controlador YRC1000micro. Este controlador apresentado na Figura 3-9, utiliza uma linguagem de programação INFORM, desenvolvida pela *Motoman*, para programar o robô. Neste controlador estão, portanto, todos os algoritmos, programas e configurações associados ao robô e à sua comunicação. Para acessar e alterar estes programas, o utilizador pode utilizar o bloco de notas do *Windows* e posteriormente descarregar para o controlador, através dum dispositivo de armazenamento de massa USB, ou pode alterar o programa diretamente no *teach pendant*.

O *teach pendant* é uma consola de interface entre o utilizador e o controlador que permite alterar posições do robô, configurações e até programas pelos quais o robô irá ser controlado [17], [18] e [19]. Possui um ecrã *touch*, um teclado, e uma entrada USB através da qual se pode fazer *upload* ou *download* de programas e configurações do controlador.

Neste projeto, o robô irá introduzir agrafes metálicos em duas referências diferentes de moldes plásticos. Cada referência tem um tipo de agrafe associado. Devido a este pressuposto, foram construídas duas ferramentas para o robô. Cada ferramenta é composta por 14 hastes metálicas onde os agrafes serão inseridos e o robô irá alternar a necessidade de uso de uma ou de outra consoante o tipo de referência ativo.

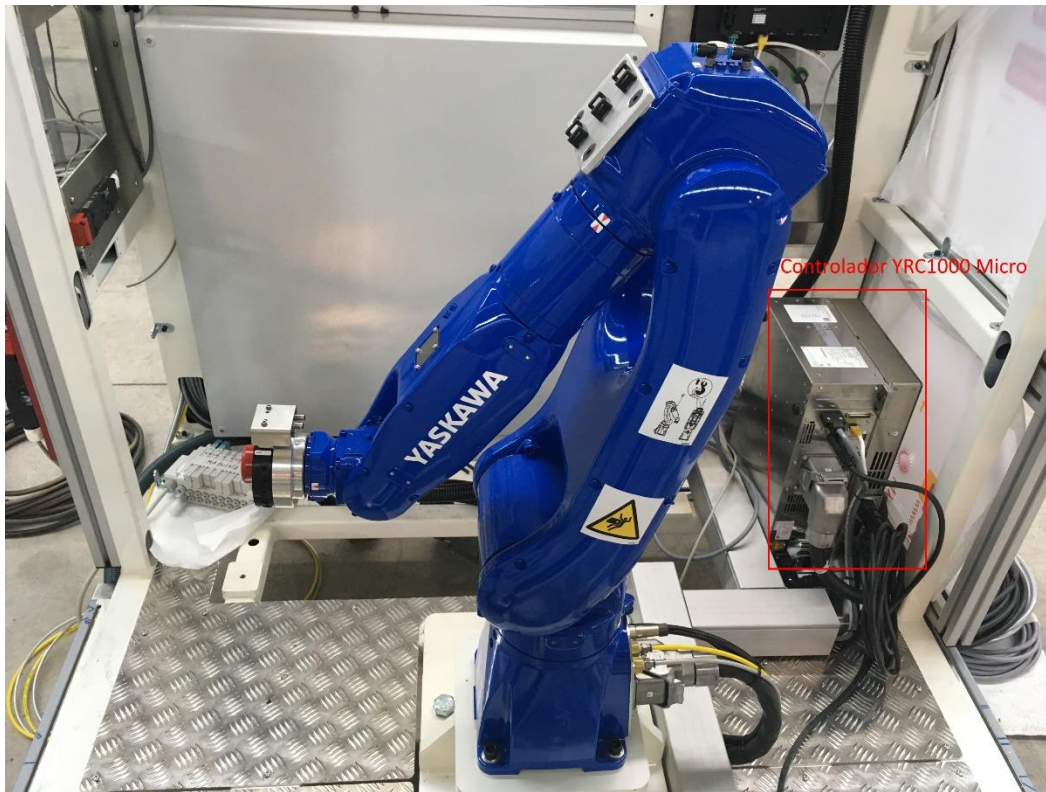


Figura 3-9: Robô Yaskawa Motoman GP-7 e controlador YRC 1000 Micro.

## 4. Proposta de solução – Máquina de inserção de agrafes metálicos

Neste capítulo irá ser abordado o processo de desenvolvimento do projeto, do ponto de vista do robô, desde os sinais a trocar com o PLC até à programação do retorno à posição de segurança. Para a realização deste projeto, foi planeada a seguinte sequência de tarefas:

1. Identificar os sinais necessários a trocar com o PLC (*Master*);
2. Desenvolver a máquina de estados;
3. Programar aspetos base do robô;
4. Testar comunicação com o PLC (*Ethernet/IP*);
5. Calibrar as hastes do robô;
6. Definir as zonas de trabalho no interior da máquina;
7. Programar a segurança do robô (cubos de interferência);
8. Programar *I/F Panel*;
9. Definir a trajetória do robô;
10. Programar retorno à posição de segurança;
11. Testes e afinações de pontos;
12. Instalação da máquina no cliente.

### 4.1 Sinais entre PLC e robô

Para tornar possível a sincronização de trabalhos entre o robô e o PLC, é necessário que estes equipamentos “saibam” o que se passa na máquina, isto é, que haja troca de informação entre

eles. Uma vez que estes dispositivos estão ligados via *Ethernet/IP*, foi definida uma tabela de sinais digitais que o PLC e o robô trocam entre si.

Ao observar a Tabela 4-1 é possível perceber, por exemplo, que vai ser lida no bit 0 do byte 0 do espaço de memória associado à comunicação via *Ethernet/IP* do PLC com o robô, a informação de que os servomotores do robô estão ligados. Uma vez que este sinal é um sinal de origem do robô, ou seja, vem predefinido no controlador do robô, este tem um espaço de memória interno específico associado a esta entrada (50073) e um externo (30030). No *ladder* do robô (programação interna do robô), o booleano 50073 funciona como entrada para a saída 30030.

Para criar esta tabela, foi discutido com o programador do PLC todo o funcionamento da máquina, para saber qual seria a informação necessária trocar, uma vez que foram utilizados espaços de memória definidos por nós, utilizadores.

<b><i>Communication Robot ==&gt; PLC</i></b>						
<i>Address</i>						<i>Comments</i>
<i>Byte</i>	<i>Robot Out (Write)</i>	<i>Universal Out</i>	<i>Specific I/O + Control Input</i>	<i>External Out</i>	<i>PLC (Read)</i>	
0			50073	30030	0	Servo ON
			50020	30031	1	Top Master Job
			50070	30032	2	Running
			50010+50011+50012+50013+50014	30033	3	Alarm/Error Occurence
			50015	30034	4	Memory Battery Alarm
			50016	30035	5	Encoders Battery Alarm
			80011	30036	6	Remote Mode Setting
			80026	30037	7	Emergency Teach Pendant

Tabela 4-1: Exemplo de troca de sinais entre o PLC e robô.

## 4.2 Máquina de estados

A máquina de estados do robô define um sequenciamento de tarefas. Como tal, cada tarefa só poderá ser executada caso seja precedida de uma tarefa válida. Caso contrário, é gerado um alarme de sequenciamento de tarefas. A Figura 4-1 ilustra a máquina de estados desenvolvida para este projeto.

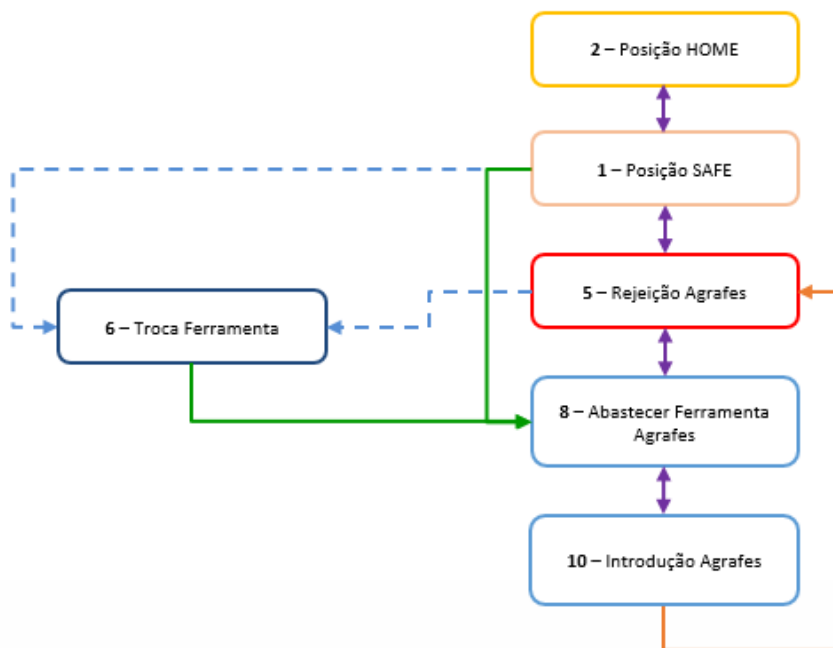


Figura 4-1: Máquina de estados.

### 4.3 Programação base

O programa foi estruturado por forma a facilitar a comunicação com o PLC, garantindo assim uma maior flexibilidade nos procedimentos a executar pelo robô. Deste modo, foi dividido nas seguintes tarefas: posição de segurança, posição *home*, rejeição, troca de ferramenta, carregar agrafes, introdução de agrafes.

#### 4.3.1 Posição de segurança

Nesta tarefa o robô irá retornar a uma posição na qual estará apto para arrancar um novo ciclo. Para tal, o programa irá detetar a posição do robô através das coordenadas do *Tool Center Point* (TCP) e, dependendo da posição e zona em que se encontra, adotar movimentos diferentes de modo a retornar à posição de segurança sem colidir com elementos da máquina e evitar singularidades do robô.

### 4.3.2 Posição *home*

Para executar esta tarefa é necessário que o robô esteja na posição de segurança. Esta consiste em movimentar o robô para uma posição em que ocupe o menor espaço possível no interior da máquina, facilitando assim os procedimentos de manutenção dos equipamentos.

### 4.3.3 Rejeição de agrafes

Esta tarefa consiste na remoção de agrafes da ferramenta do robô. Para tal, o robô desloca-se à zona de rejeição e verifica no sensor de deteção se possui um agrafe na haste. Se o sensor não detetar o agrafe, o robô passará a verificar a haste seguinte. Caso o sensor detete a presença do mesmo, o robô irá fazê-lo passar por um carril de forma a removê-lo, retornando de seguida à posição inicial. Nesta será novamente verificada a presença do agrafe na haste, e consequentemente o sucesso da operação. Caso se verifique a presença de agrafe na haste após o processo de remoção, o robô irá executar mais duas tentativas, e se mesmo após estas, continuar a não ter sucesso, vai ser gerado um alarme para que um operador verifique qual é o problema da máquina.

A tarefa estará concluída quando este procedimento tiver sido executado para todas as hastes da ferramenta do robô. A Figura 4-2 mostra uma parte do código de rejeição de agrafes desenvolvido para este projeto, e a Figura 4-3 o respetivo fluxograma.

```

-----
*Tool_01
MOVJ C00001 T1010 VJ=D014 PL=0 //clip detection position
TIMER T=LI000
'tool without clip?
IFTHEN IN#(85)=ON
    MOVL C00002 T1011 V=D010 PL=0 //approach tool rejection
    MOVL C00003 T1012 V=D010 PL=0 //tool inside rejection
    MOVL C00004 T1015 V=D010 PL=0 //move tool to rejection track
    MOVL C00005 T1019 V=D010 PL=0 //move up to remove clip from tool
ENDIF
-----

```

Figura 4-2: Exemplo de código na rejeição de agrafes.

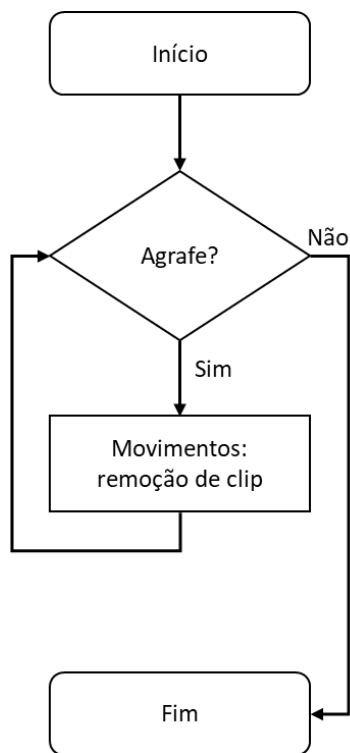


Figura 4-3: Fluxograma do código da rejeição.

#### 4.3.4 Troca de ferramenta

Ao ordenar esta tarefa ao robô, o PLC irá definir a ferramenta de trabalho, podendo ser as ferramentas das respectivas referências, ou simplesmente não possuir nenhuma ferramenta na flange. Para que tal aconteça o robô vai verificar se possui alguma ferramenta, através do código binário fornecido pelos dois sensores presentes na flange do robô. Caso o resultado do código seja 0 (sem ferramenta), o robô desloca-se para a zona do armazém de ferramentas e apanha a ferramenta indicada pelo PLC. No caso de possuir ferramenta na flange, irá primeiro depositá-la no respetivo local do armazém de ferramentas e só depois apanha a ferramenta indicada. Caso a ferramenta indicada pelo PLC não coincida com a ferramenta que se encontra na flange no robô é gerado um alarme. A Figura 4-4 mostra parte do código desenvolvido para o robô fazer a troca de ferramenta, e a Figura 4-5 o respetivo fluxograma.

```

*****
'#          Place Tool B
*****
*Place_B
'open indexer
CALL JOB:OPENINDEXER
'check position to tool B free
CALL JOB:STOREPOSFREE ARGF2
MOVJ C00006 T0020 VJ=D014 PL=4 //approach store tool B
'place tool B in the store
MOVJ C00007 T0021 VJ=D014 PL=2 //approach position tool B
MOVL C00008 T0022 V=D010 PL=0 //approach indexer tool B
MOVL C00009 T0025 V=D016 PL=0 //indexer tool B
'check tool B in position
CALL JOB:STOREPOSBUSY ARGF2
'close indexer
CALL JOB:CLOSEINDEXER
MOVL C00010 T0028 V=D011 PL=0 //leaving indexer tool B
MOVL C00011 T0029 V=D010 PL=2 //leaving position tool B
JUMP *NoTool
'
    
```

Figura 4-4: Exemplo de código na troca de ferramenta.

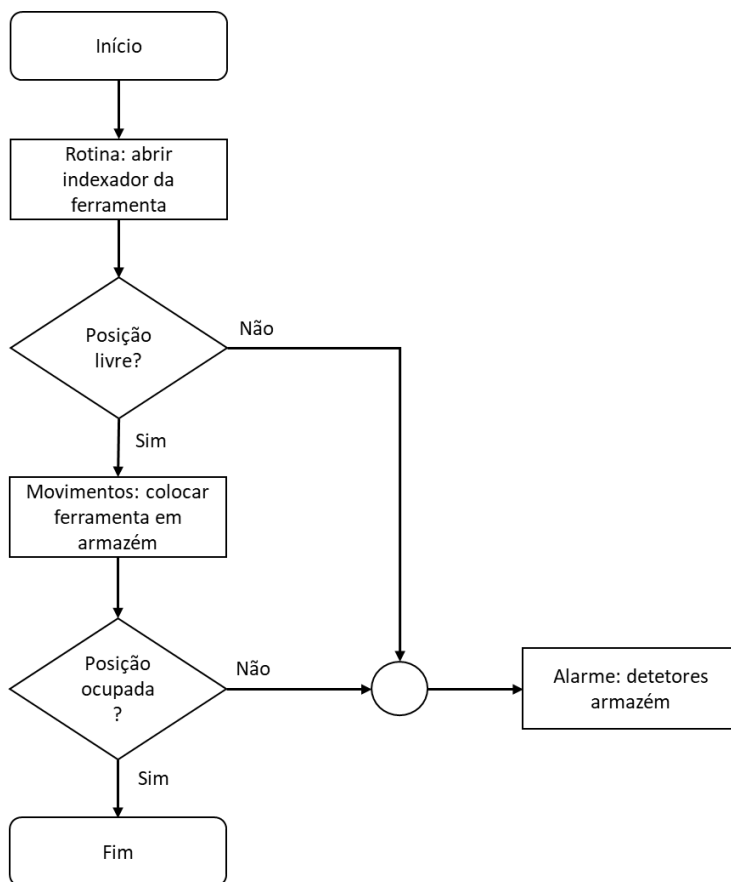


Figura 4-5: Fluxograma do código de troca de ferramenta.

### 4.3.5 Carregar agrafes

Nesta tarefa o robô irá deslocar-se à zona do alimentador vibratório para preencher as hastes com agrafes. Desta forma, quando o robô se encontra em posição de receber o clip na haste, informa o PLC que irá avançar o cilindro de inserção. Neste momento, o sensor de deteção de clip irá detetar se o mesmo ficou inserido na haste. Caso a inserção tenha sido bem-sucedida, o robô passará à haste seguinte, caso contrário, tal como na tarefa rejeição, serão feitas mais duas tentativas de inserção de clip e gerado um alarme caso estas não tenham sucesso. A tarefa estará concluída quando o procedimento tiver sido terminado para todas as hastes. Na Figura 4-6 é possível visualizarmos parte do código desenvolvido para o robô fazer o carregamento de agrafes e na Figura 4-7 o respetivo fluxograma.

```
*Tool_12
'reset ready to load
DOUT OT#(81) OFF
'wait order load clip
WAIT IN#(81)=OFF
'nr clip
SET LB000 8
'nr tool
SET LB001 12
'set clip nr
DOUT OG#(16) LB000
'set tool nr
DOUT OG#(17) LB001
MOVJ C00000 T1080 VJ=D014 PL=0 //approach to feeder
'fbck nr clip
WAIT IG#(16)=LB000
'clip enabled?
IFTHEN IN#(57)=ON
    'set ready to load
    DOUT OT#(81) ON
    'wait order load clip
    WAIT IN#(81)=ON
    'reset ready to load
    DOUT OT#(81) OFF
    'wait order load clip
    WAIT IN#(81)=OFF
ENDIF
```

Figura 4-6: Exemplo de código no carregamento de agrafes.

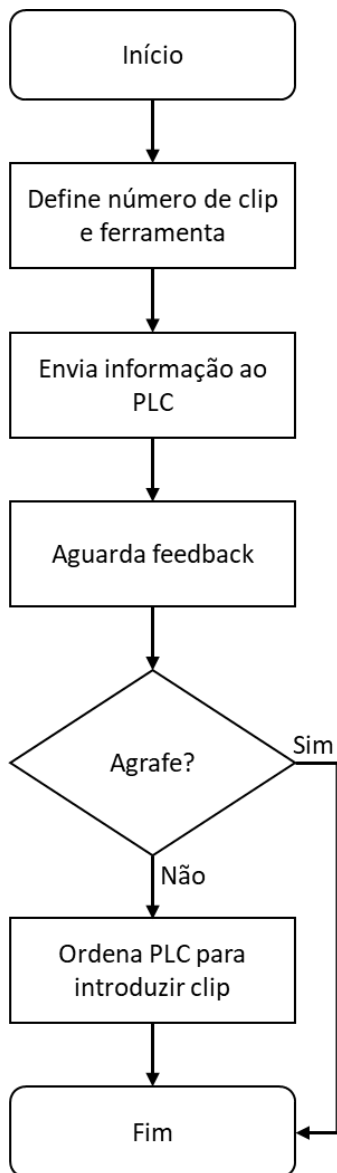


Figura 4-7: Fluxograma do código de carregamento de agrafes.

### 4.3.6 Introdução de agrafes

Esta é a tarefa na qual o robô irá colocar os agrafes nas peças de plástico das respectivas referências selecionadas. O robô irá aproximar-se de cada ponto de inserção e verificar o sinal de PLC para decidir se insere ou não o respectivo clip. Caso o sinal de PLC esteja ligado o robô irá colocar o respectivo agrafe, caso contrário irá passar ao ponto de aproximação do agrafe seguinte. A tarefa estará concluída quando o robô completar a inserção de agrafes na peça. A Figura 4-8 mostra uma parte do código desenvolvido para que o robô introduza agrafes nas peças plásticas.

```

*Tool_07
'clip 3
SET LB000 3
'set clip nr
DOUT OG#(16) LB000
MOVJ C00008 T3030 VJ=D014 PL=2 //approach over panel
'fbck clip nr
WAIT IG#(16)=LB000
'clip enabled?
IFTHEN IN#(57)=ON
    MOVL C00009 T3032 V=D010 PL=0 //approach to insert
    MOVL C00010 T3035 V=D011 PL=0 //insert clip
ENDIF
MOVL C00011 T3038 V=D010 PL=2 //leaving clip

```

Figura 4-8: Exemplo de código na verificação de inserção de agrafe.

Para utilizar um número menor de tarefas, procedeu-se a uma escolha de programas a executar consoante a referência ativa na máquina. Isto é, tarefas como a rejeição, alimentação de agrafes e colocação de agrafes, chamam programas específicos dependendo da referência. No exemplo da Figura 4-9, a tarefa de colocação de agrafes chama o programa V01\_NEO\_JIG se a referência ativa for 1, ou chama o programa V02\_ETIGUAN\_JIG caso a referência seja a 2.

```

*Task10_1
DOUT OT#(57) ON
WAIT IN#(29)=ON
DOUT OT#(57) OFF
MSG "Start Task: Insert Clips Panel"
IFTHEN B020=1
    'check tool ID
    CALL JOB:CHECKIDTOOL ARGF1
    'tool A
    CALL JOB:V01_NEO_JIG
ELSEIF B020=2
    'check tool ID
    CALL JOB:CHECKIDTOOL ARGF2
    'tool B
    CALL JOB:V02_ETIGUAN_JIG
ENDIF

```

Figura 4-9: Exemplo de código na escolha de programa com base na referência.

A Figura 4-10 demonstra o fluxograma do código de inserção de agrafes, que inclui as rotinas de verificação de ferramentas e de inserção de agrafes de ambas as referências.

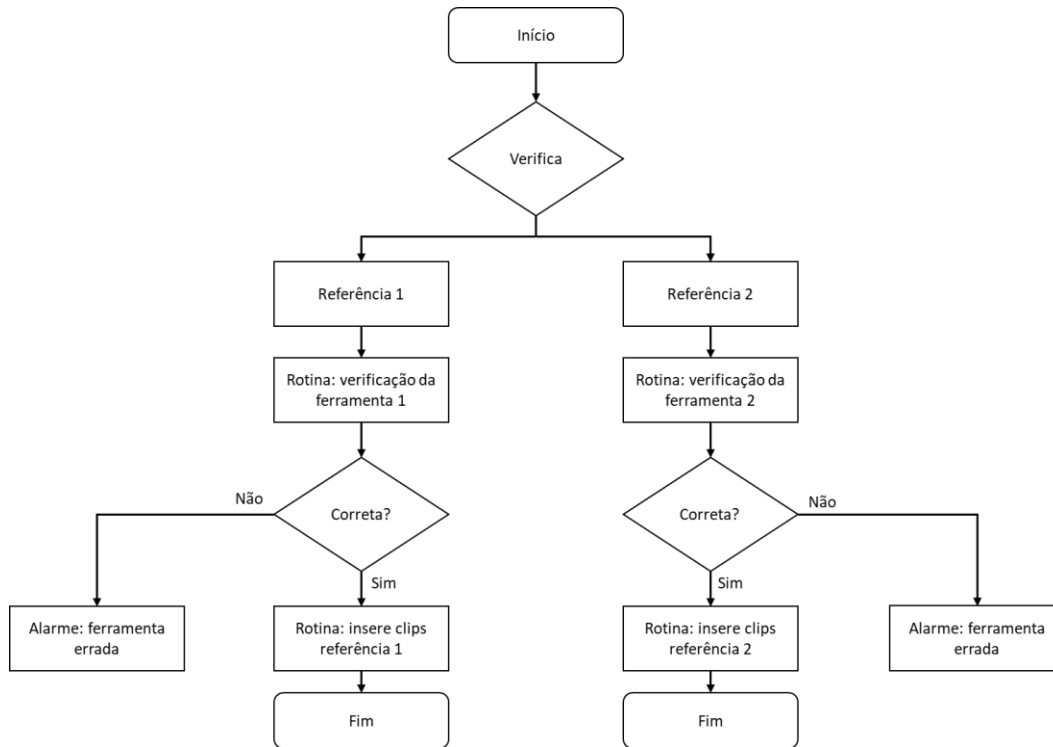


Figura 4-10: Fluxograma do código de inserção de agrafes.

Normalmente, em projetos que incluam um alimentador de componentes, o cliente requer um procedimento automático que se intitula de teste de cadência. Um teste de cadência, tal como o nome indica, tem como objetivo testar a cadência dos alimentadores, isto é, se estes conseguem fornecer componentes em tempo útil: tempo que não prejudica o tempo de ciclo da máquina. Por outras palavras e aplicado a este projeto em específico, este teste serve para verificar se de cada vez que o robô precisar de um clipe, vai haver um disponível no alimentador. Ao selecionar este teste na HMI, o robô irá alternar entre a tarefa de alimentar agrafes e rejeitar os mesmos, nunca procedendo à colocação de agrafes nas peças plásticas. Podemos então definir dois tipos de funcionamento desta máquina: o teste de cadência e o ciclo automático de inserção de agrafes.

#### 4.4 Teste das comunicações com o PLC

Após a programação base do robô *offline* testou-se a comunicação entre o PLC e o robô para verificar se os espaços de memória utilizados correspondiam ao definido na tabela. Para tal, simularam-se sinais chave de comunicação, como o *External Start* (que permite arrancar o robô externamente) assim como os sinais que foram estipulados por mim e pelo programador do PLC, na tabela de comunicações. Testaram-se então todos os sinais assim como os seus endereços, para garantir que o robô estaria a receber e enviar os sinais, nos espaços de memória corretos. Após poucas horas verificou-se que os sinais estavam corretamente alocados.

## 4.5 Calibração das hastes do robô

Embora existam apenas duas ferramentas de trabalho (duas estrelas com 14 hastes metálicas), a programação do robô será feita para 28 ferramentas, isto é, no âmbito da programação do robô, cada haste será uma ferramenta. A programação do robô é feita desta forma, de modo a facilitar a marcação de pontos e a programar o retorno à posição de origem. Para que isto seja possível, é necessário calibrar cada haste do robô de modo a que o controlador consiga “mover” o referencial do robô para a haste desejada. A Figura 4-11 mostra o ecrã de configuração da ferramenta. Através das 4 orientações mencionadas anteriormente, o programa define os valores de X, Y, e Z, mas também é necessário introduzir a rotação correta dos eixos (valores de Rx, Ry e Rz) para que o referencial da ferramenta fique definido corretamente.

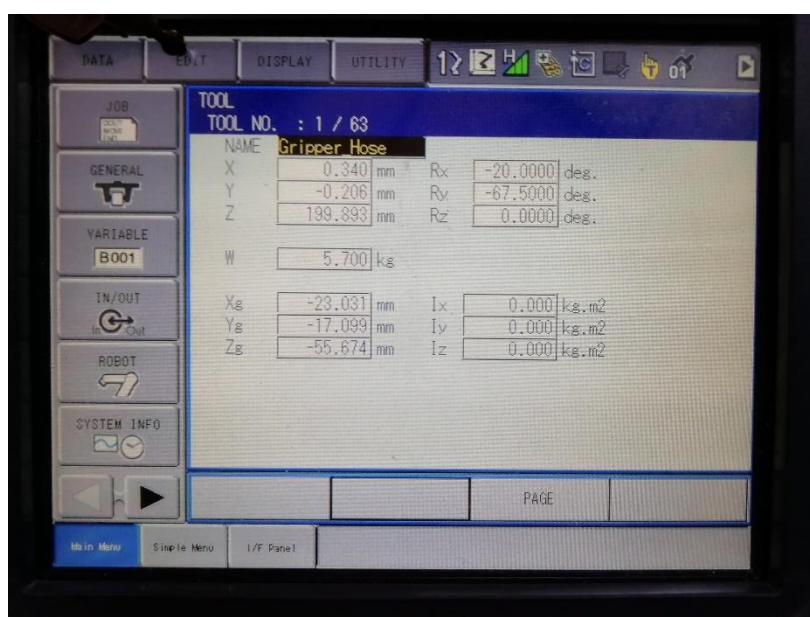


Figura 4-11: Ecrã de configuração da calibração de ferramentas.

O software da *Yaskawa* permite a calibração das ferramentas de forma relativamente simples: basta atribuir 4 orientações diferentes da ferramenta, para um mesmo ponto, como se pode observar na Figura 4-12, que o software extrapola as transformações necessárias para gerar o novo referencial.

Para ajudar nesta calibração, uma vez que as hastes não têm um centro definido, utilizou-se uma ferramenta cónica de apoio a esta calibração.

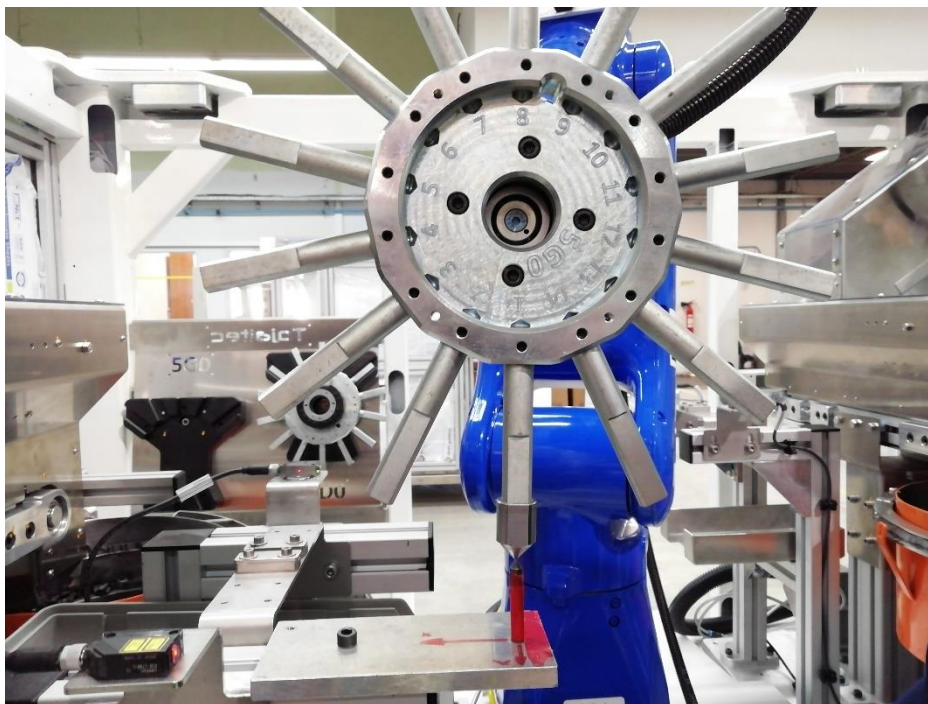


Figura 4-12: Calibração de ferramentas.

Para finalizar a calibração da haste, executou-se uma rotina (também através do software da *Yaskawa*) para verificar o momento de inércia da haste. O robô é colocado numa posição onde o centro de massa da ferramenta estaria mais afastado da base do robô em xx ou yy, por forma a considerar o pior caso. Na Figura 4-13 pode-se observar o ecrã da consola onde é dada a ordem ao robô para fazer o teste de inércia. Este processo de calibração foi feito para todas as hastes das duas ferramentas de trabalho.

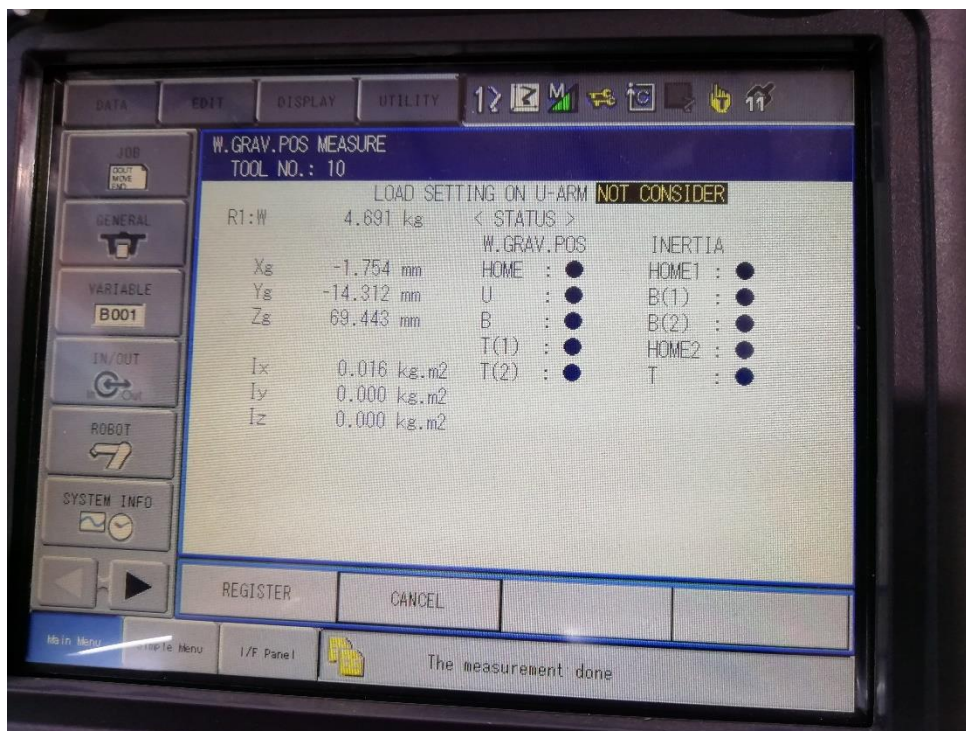


Figura 4-13: Ecrã de configuração do momento de inércia.

## 4.6 Definir zonas de trabalho

Após a calibração das hastes procedeu-se à configuração das zonas de trabalho do robô. Estas zonas são importantes pois, tal como mencionado na tarefa de posição de segurança, permitem definir um modo como mover o robô para a posição de segurança. Além disso serve como redundância para a verificação da última tarefa executada pelo robô, fator importante no que diz respeito à máquina de estados do robô. A Figura 4-14 mostra um exemplo em como as zonas de trabalho são utilizadas em conjunto com a máquina de estados assim como o alarme de sequenciamento errado de tarefas.

Foram então definidas as seguintes zonas de trabalho: posição de segurança, posição *home*, armazém, alimentador A, alimentador B, rejeição A, rejeição B, aproximação JIG A, JIG A, aproximação JIG B e JIG B.

```

'last task=1 & safety position?
IFTHEN B002=1 ANDIF B000=1 ANDIF B014=0
    JUMP *Task06_1
'last task=5?
ELSEIF B002=5
    'neo rejection pos?
    IFTHEN B000=3
        CALL JOB:CHECKIDTOOL ARGF1
        JUMP *Task06_1
    'e-tiguan rejection pos?
    ELSEIF B000=7
        CALL JOB:CHECKIDTOOL ARGF2
        JUMP *Task06_1
    ENDIF
'last task=6 and change tool pos?
ELSEIF B002=6 ANDIF B000=11
    JUMP *Task06_1
ENDIF
'-----
MSG "Wrong Task Sequence"
DOUT OT#(65) ON
IFTHEN B002<>6
    'wait for a different task
    WAIT IG#(13)<>6
ENDIF

```

Figura 4-14: Exemplo de código da máquina de estados.

## 4.7 Programar segurança do robô (cubos de interferência)

No que diz respeito à segurança do robô nesta máquina, foram definidos dois cubos de interferência: a zona da máquina e a zona do JIG. O cubo de interferência da máquina foi delimitado e configurado para que o robô não saia desses limites enquanto que o cubo de interferência da zona do JIG (cuja área está inserida na área da zona da máquina) foi criado para informar o PLC (ligando uma saída digital específica do robô) de que o robô se localiza na zona das peças. Com esta informação o PLC sabe que não pode mover atuadores na zona do JIG sem comprometer a integridade do robô.

## 4.8 Programar I/F Panel

Para facilitar a marcação de pontos em zonas com atuadores, como por exemplo as zonas de alimentação de agrafes, foi configurado o *I/F Panel* do robô. O *I/F Panel* é uma ferramenta dos robôs *Motoman* que permite uma interface ao utilizador semelhante a uma HMI. Isto é, permite configurar botões, para modificar o valor de saídas digitais, assim como obter informação de entradas digitais através de *lamps*. No caso em estudo, uma vez que o PLC é o responsável por

fazer atuar os elementos da máquina (cilindros, motores, etc.) e tem a informação dos sensores, os botões e sensores do *I/F Panel* do robô, comunicam com os atuadores e sensores, por intermédio do PLC.

Poder atuar saídas do PLC através do *I/F Panel* mostrou-se bastante útil na marcação de pontos nos alimentadores de agrafes, uma vez que foi necessário avançar e recuar o cilindro de inserção de agrafes inúmeras vezes. Caso esta programação não fosse feita, de cada vez que fosse necessário atuar o cilindro em questão, o programador precisaria de sair da máquina e deslocar-se à HMI. A Figura 4-15 mostra o ecrã do *I/F Panel*.



Figura 4-15: *I/F Panel*.

## 4.9 Definição da trajetória do robô

Finalizadas as configurações iniciais do robô, está na altura de proceder à marcação de pontos. Foram marcados então os pontos necessários à execução do programa do robô tendo em atenção que cada ponto, quando for gravado, terá de ter a haste correta selecionada nos referenciais. Para marcar um ponto é necessário colocar o robô na configuração e na posição correta do ponto que se quer marcar. De seguida grava-se esse ponto, atribui-se a velocidade, grau de aproximação e define-se o tipo de movimento: movimento de juntas (MOVJ), no qual o robô se desloca para o ponto em questão da forma que lhe é mais favorável, ou movimento linear (MOVL), em que o robô se desloca até ao ponto numa trajetória linear. A Figura 4-16 mostra o código dum ponto marcado em movimento de juntas, velocidade definida pela variável D014 e grau de aproximação 2.

```
MOVJ C00016 T2047 VJ=D014 PL=2
```

Figura 4-16: Exemplo de código de movimento de juntas.

## 4.10 Programação do retorno à posição de segurança

Tal como referido anteriormente, a tarefa posição de segurança permite ao robô retornar a uma posição a partir da qual estará apto para iniciar um novo ciclo. Devido ao facto de o robô poder estar em diferentes zonas da máquina quando esta tarefa é solicitada, foi feita uma programação de movimentos do robô, tendo em consideração estas zonas, assim como a posição da ferramenta (se está horizontal ou vertical). Este programa verifica estes estados do robô (zona e posição) e executa movimentos relativos para retornar à posição de segurança. A Figura 4-17 mostra um excerto do código utilizado na programação do retorno à posição de segurança. Esta tarefa é bastante importante, pois permite ao operador da máquina colocar a mesma em funcionamento sem recorrer a colegas com conhecimentos em programação de robôs.

```
'check tool orientation
IFTHEN B007=1
    'modify Z=52.000
    CALL JOB:INCMOV ARGF3 ARGF52000
    'modify Y=-230.000
    CALL JOB:INCMOV ARGF2 ARGF-230000
    'modify Z=77.000
    CALL JOB:INCMOV ARGF3 ARGF77000
    'modify X=286.000
    CALL JOB:INCMOV ARGF1 ARGF286000
ELSE
    JUMP *Otzones
ENDIF
'##
'safety position
JUMP *SafePos
'##
'
```

Figura 4-17: Exemplo de código retorno à posição de segurança.

## 4.11 Testes e afinações finais

Terminadas as configurações e programação do robô, está na altura de fazer testes e afinar os pontos caso seja necessário.

Começou-se por testar o teste de cadência, em vez do ciclo automático de inserção de agrafes, uma vez que, por experiência, sabe-se que a maioria dos problemas mecânicos estão associados aos alimentadores de agrafes.

Tal como esperado, foi necessário recorrer aos colegas da montagem mecânica para executar uma série de afinações para que a alimentação de agrafes decorre-se de forma fluida e sem impacto no tempo de ciclo da máquina.

Também foi necessário afinar exaustivamente tanto os pontos do robô no alimentador da referência 1, como o alimentador em si, para poder absorver um erro na dimensão dos agrafes fornecidos pelo cliente: os cliques tinham variações muito grandes entre eles.

Após testar a cadência dos alimentadores durante dois dias, passou-se a testar o ciclo automático de inserção de agrafes. Nestes testes foi necessário corrigir erros na programação do PLC, afinar a comunicação entre *Master* e *Slave* (mais concretamente o *timing* da troca de sinais) e afinar pontos de inserção de agrafes. Aqui também foi necessário executar alterações mecânicas com vista a melhorar a trajetória do robô. Para finalizar os testes do ciclo automático de inserção de agrafes, foi verificado se o tempo de ciclo da máquina estaria de acordo com o pretendido pelo cliente. Uma vez que as trajetórias do robô foram pensadas desde o início para executar as tarefas num menor tempo possível, verificou-se que a máquina cumpria o tempo de ciclo pedido pelo cliente: o tempo de ciclo pedido foi de 60 segundos e a máquina faz 42 segundos, o que permite um aumento significativo na produção como iremos ver mais à frente. Entenda-se por tempo de ciclo da máquina, o tempo que esta demora a produzir cada peça. A Figura 4-18 mostra o processo de afinação de pontos no alimentador de agrafes e na rejeição.

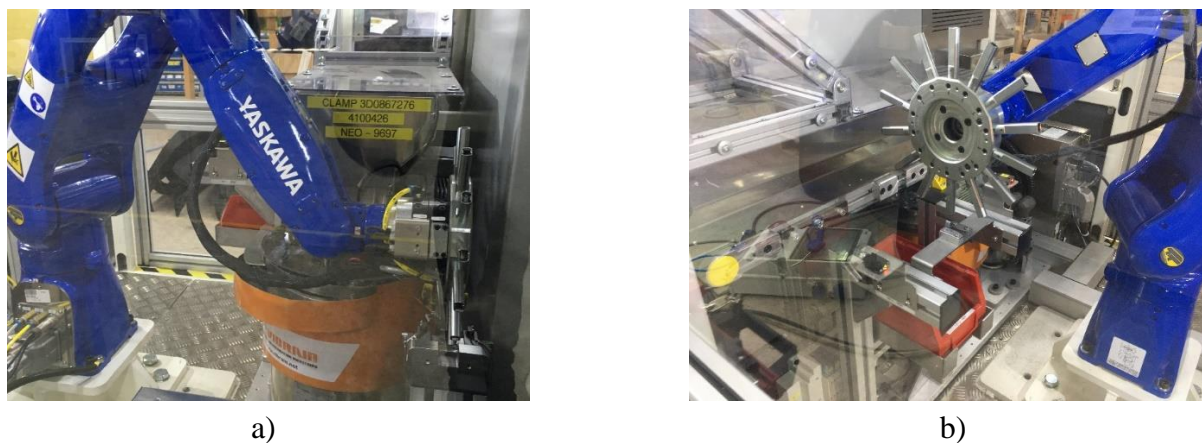


Figura 4-18: a) Zona de alimentação de agrafes  
b) Zona de rejeição de agrafes

## 4.12 Instalação da máquina no cliente

Após testar exaustivamente a máquina e esta ter sido validada pelo cliente na empresa onde o projeto foi desenvolvido, o passo seguinte foi colocar a máquina em funcionamento nas instalações do cliente. Sendo assim, no dia 25 de julho de 2020, acompanhado pelo colega responsável por desenhar a máquina, desloquei-me às instalações do cliente, em Laskowice na Polónia.

O primeiro passo é certificar que a máquina se encontra em boas condições de funcionamento após o transporte, para de seguida serem feitas as ligações elétricas e pneumáticas na linha de montagem onde vai ficar inserida a célula/máquina. Após a ligação da máquina (elétrica e pneumática) e invertendo a sequência de fases na mesma, uma vez que a sequência de fases da unidade fabril do cliente é diferente da sequência de fases da empresa onde se desenvolveu a máquina, o que fez com que o motor que alimenta os agrafes funcionasse no sentido inverso, estava pronto para verificar se os pontos do robô estavam corretos, uma vez que no transporte até à Polónia, a estrutura poderia ter sofrido deformações mínimas mas que iriam influenciar o processo.

Enquanto o cliente afinava os moldes e a mão robótica que alimenta a nossa célula com peças plásticas, testou-se as trajetórias do robô efetuando o teste de cadência. Verificou-se que os pontos marcados se mantinham inalterados, provavelmente devido ao facto de a célula ser de pequenas dimensões e compacta. A Figura 4-19 mostra a mão robótica que o cliente usa nas suas instalações para manipular as peças provenientes do molde.



Figura 4-19: Mão robótica a segurar no molde plástico.

Assim que as afinações do molde e da mão robótica foram concluídas, começou-se a produzir peças e a afinar os pontos de inserção de agrafes. Estas afinações são feitas sempre nas instalações do cliente pois, embora tenham sido efetuados testes com peças enquanto a máquina esteve em desenvolvimento, as peças utilizadas estavam frias. A temperatura da peça é um fator relevante uma vez que o plástico é um material que expande quando aquecido, levando a que os pontos de inserção de agrafes estejam em posições diferentes quando a peça está quente. Tendo isto em conta, foi necessário uma peça para afinar cada ponto de inserção, para se poder afinar este ponto com a peça ainda quente. Após uma tarde e uma manhã de testes exaustivos, concluíram-se as afinações de uma das referências. Para colocar agrafes em peças da segunda referência, além de afinações de pontos do robô, também foi necessário afinar os dois cilindros de inserção de agrafes na peça (conforme falado anteriormente, foram necessários estes cilindros pois o robô não consegue chegar aos dois pontos da extremidade das peças da referência 2). As afinações desta referência foram mais demoradas, cerca de dois dias, dado que ocorreu um imprevisto mecânico no qual houve quebra dum suporte do cilindro de inserção de agrafes.

Concluídas as afinações, a máquina foi posta a trabalhar em série e, no total de 600 peças produzidas, apenas 7 foram dadas como não estando OK (NOK), sendo que em 3 destas o problema esteve relacionado com o molde do cliente e não com a máquina instalada. A Tabela 4-2 mostra os resultados alcançados.

Tempo		Peças Produzidas		
Total (h)	Média Tempo de Ciclo (s)	Total	Peças OK	Peças NOK
7	42	600	593	7

Tabela 4-2: Tabela peças produzidas.

Para melhor entendermos o desempenho alcançado no projeto, a Tabela 4-3 demonstra o resultado obtido em relação ao resultado esperado pelo cliente, assim como o resultado real (tendo em conta o tempo de ciclo da mão robótica do cliente, que não conseguimos controlar).

Solicitado			Alcançado			Real		
Tempo de Ciclo (s)		Peças	Tempo de Ciclo (s)		Peças	Tempo de Ciclo (s)		Peças
Dia	Ano		Dia	Ano		Dia	Ano	
60			42			55		
1440	525600				2057	750805	1570	573050

Tabela 4-3: Tabela de produção solicitada vs. alcançada.

O ganho por parte do cliente, na produção de peças, em relação ao esperado é dado pela Tabela 4-4, na qual podemos observar o ganho teórico (caso não dependesse do tempo de ciclo da mão robótica) e o ganho real (tendo em conta os 55 segundos que a mão robótica demora a colocar moldes na máquina).

<b>Ganho</b>			
Teórico		Real	
Diário	Anual	Diário	Anual
613	224078	129	47212

Tabela 4-4: Tabela de ganho do cliente

## 5. Desenvolvimento da célula – Máquina de aparafusamento de carris

Neste capítulo é apresentada a composição da máquina de aparafusamento de carris e uma breve descrição do hardware instalado. Todo o material utilizado foi fornecido pela empresa Tojaltec.

### 5.1 *Layout* da máquina

Esta parte do projeto consiste na programação do autómato duma máquina que foi concebida para a montagem de componentes em carris (polias, *anti-creep* e *sleeve*) para 6 referências diferentes. Esta polia é um componente plástico no qual irá passar um cabo metálico dos carris, responsável por transferir força e energia cinética do motor que se encontra nos carris, para os vidros. A *sleeve* é um componente metálico, semelhante a um tubo, que se coloca no interior da polia e faz o interface entre esta e o carril plástico. O *anti-creep* é uma peça metálica que é colocada por cima da polia, após assemblagem da *sleeve*, para evitar que o cabo metálico descarrile e, caso a polia se danifique, garante a posição do cabo para não comprometer os restantes componentes da cadeia cinemática.

Através da observação da Figura 5-1, pode-se verificar que a máquina foi projetada para ter 4 postos, nos quais os carris vão sendo processados, e um prato rotativo que vai ser responsável por os transferir desde o posto 1 até ao posto 4.

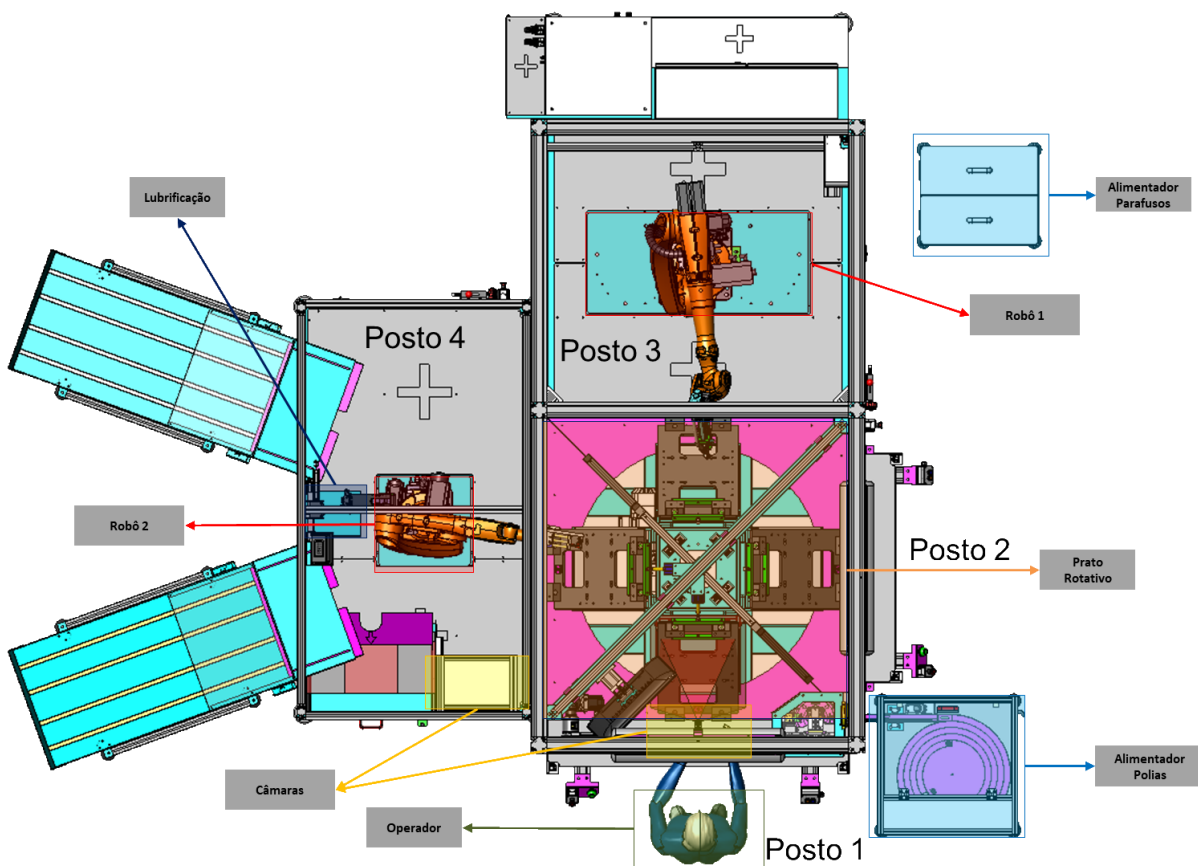


Figura 5-1: *Layout* da máquina de aparafusamento de carris.

## 5.2 Funcionamento geral

Inicialmente, é solicitado ao operador que faça o retorno à posição inicial (RPI) da máquina. Caso nenhuma receita esteja selecionada, é solicitado ao operador que escolha a receita para a referência que irá ser produzida. Após este procedimento, o operador dá início ao processo carregando no botão “Início”. Neste momento a máquina irá carregar o programa correspondente à receita, no controlador das câmaras.

Após este processo é solicitado ao operador (através duma mensagem na HMI) que coloque as peças e respetivos componentes nas cassetes, como mostra a Figura 5-2 e pressione o botão “Início”, depois de desimpedir a barreira. A câmara irá então inspecionar a peça e devolver o valor OK ou NOK consoante se verifique a referência da peça, ou não, respetivamente. Caso o resultado seja OK, o prato rotativo espera que o resto dos postos estejam prontos e então gira colocando a paleta seguinte no posto 1; caso o resultado seja NOK, a seguinte janela surgirá no ecrã da HMI indicando qual ou quais os testes de verificação visual que falharam.



Figura 5-2: Pop-up HMI resultados posto 1.

É então solicitado ao operador que coloque/remova os componentes e execute novo teste de verificação, pressionando novamente o botão “Início”.

O posto 2 pode ser ativado no ecrã principal da HMI. Caso esteja ativo, a câmara do posto 1, não irá verificar a presença de *anti-creep* na peça, pois passa a ser a função desempenhada pelo operador colocado no posto 2. Neste posto, caso esteja ativo, a função do operador é colocar os componentes em falta (*anti-creep* e *sleeves*) e quando terminar, pressionar o botão “Início” do posto 2.

O posto 3 tem um robô com uma parafusadora, cuja função é aparafusar as polias na peça. O robô deteta a presença de componente metálico e só depois aparafusa o componente. Caso não detete o componente metálico ou caso o aparafusamento não esteja dentro dos parâmetros definidos no controlador da parafusadora, irá surgir o seguinte pop-up na HMI, como podemos observar na Figura 5-3.

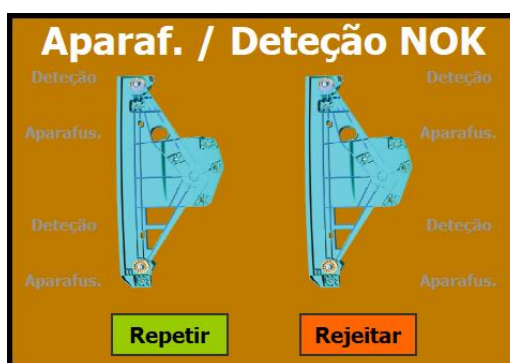


Figura 5-3: Pop-up HMI aparafusamento NOK.

Neste *pop-up* o operador poderá escolher se quer que o robô repita o processo (deteção ou aparafusamento, dependendo do problema) ou que rejeite o parafuso. Caso rejeite o parafuso, a peça será dada como NOK e o robô passa a processar a peça seguinte.

No posto 4 encontra-se um robô que pode desempenhar 4 tarefas: verificar componentes, lubrificação, evacuação e rejeição. Caso a peça esteja validada como OK no posto 3, o robô irá pegar na peça e transportá-la para a zona de verificação onde se encontra uma câmara de visão que irá verificar se o *anti-creep* está na posição correta. Caso o posicionamento do *anti-creep* seja validado, o robô leva a peça para a zona de lubrificação, caso esteja habilitada na receita, onde a peça será lubrificada. Caso seja validada a lubrificação, o robô coloca a peça numa das rampas de saída. Caso a peça seja dada como NOK em algum destes processos ou no posto 3, o robô coloca a peça na gaveta de rejeição. Caso esta gaveta esteja cheia, um alarme irá surgir na HMI para que o operador a esvazie.

## **5.3 Posto 1**

O posto 1 é o posto onde se encontra o operador. Contém um sistema de alimentação de polias, um sistema de distribuição de polias e uma câmara ligada a um controlador, para verificar a peça e componentes.

### **5.3.1 Sistema de alimentação de polias**

O sistema de alimentação de polias é composto por um alimentador vibratório de polias, um motor acoplado a um tapete e um prato pneumático indexador de 4 posições.

O alimentador vibratório tem como função fornecer polias ao tapete. É constituído por um motor responsável por criar a vibração (tal como explicado anteriormente), por um sensor de cuba vazia e por um sensor de cuba cheia. O sensor de cuba vazia é um sensor indutivo acoplado a uma haste metálica que se move quando colide com as polias, não sendo detetada pelo sensor indutivo quando tal acontece. O sensor de cuba cheia é um sensor fotoelétrico que deteta polias no topo da cuba, antes de entrarem no tapete. Na Figura 5-4 podemos observar o alimentador de polias utilizado neste projeto.



Figura 5-4: Alimentador de polias.

Após chegarem ao topo da cuba, as polias são colocadas no tapete. A função deste tapete é fornecer polias ao prato indexador. O tapete tem acoplado um motor trifásico responsável por o fazer mover, levando as polias ao prato indexador. A Figura 5-5 mostra o tapete de alimentação de polias.

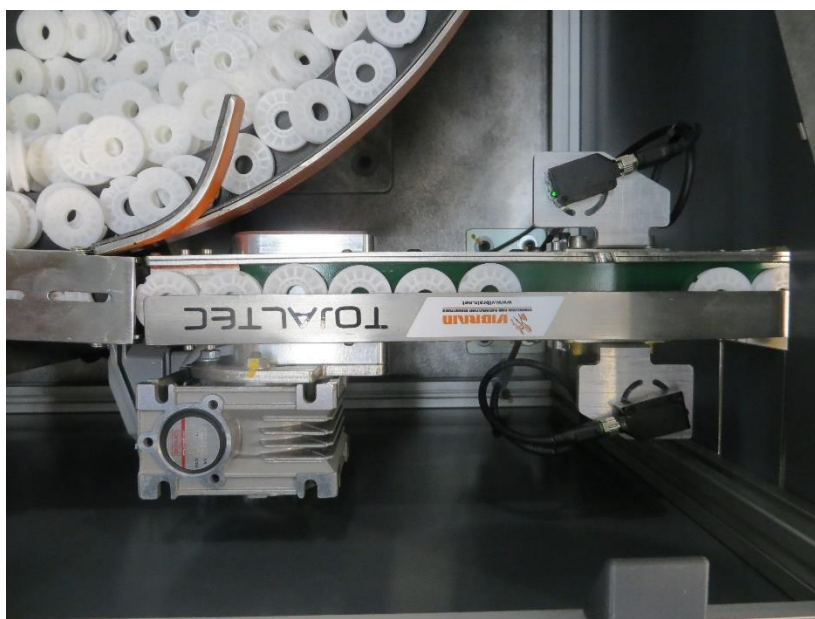


Figura 5-5: Tapete de alimentação de polias.

O prato indexador vai fazer a ligação entre o sistema de alimentação de polias e o sistema de distribuição de polias. Tem quatro posições, cada uma com uma ranhura para ser inserida uma polia. Possui 3 cilindros pneumáticos, dois destes com dois sensores magnéticos acoplados (sinal de avançado e recuado) e um com três sensores indutivos, 2 válvulas de massa, cada uma com um sensor indutivo acoplado para informar se estão avançadas, e 2 sensores fotoelétricos que detetam a presença de polias. Podemos então, dividir o prato indexador em quatro partes,

conforme as posições do mesmo. A primeira posição é a posição de chegada da polia e possui, portanto, um dos sensores de presença. A segunda posição é uma posição de espera. A terceira posição contém as duas válvulas de lubrificação (superior e inferior) e o outro sensor de presença de polia. É aqui que a polia é lubrificada após ser detetada. Na quarta e última posição, a polia é transferida para o sistema de distribuição. Esta posição contém os 3 cilindros pneumáticos: cilindro de transporte, cilindro horizontal e cilindro vertical. O cilindro vertical tem 3 sensores uma vez que as polias vão ser inseridas num pino metálico do sistema de distribuição, servindo o sensor intermédio para informar o autómato que o pino metálico já possui 4 polias (está cheio). A Figura 5-6 mostra o prato indexador utilizado neste projeto.

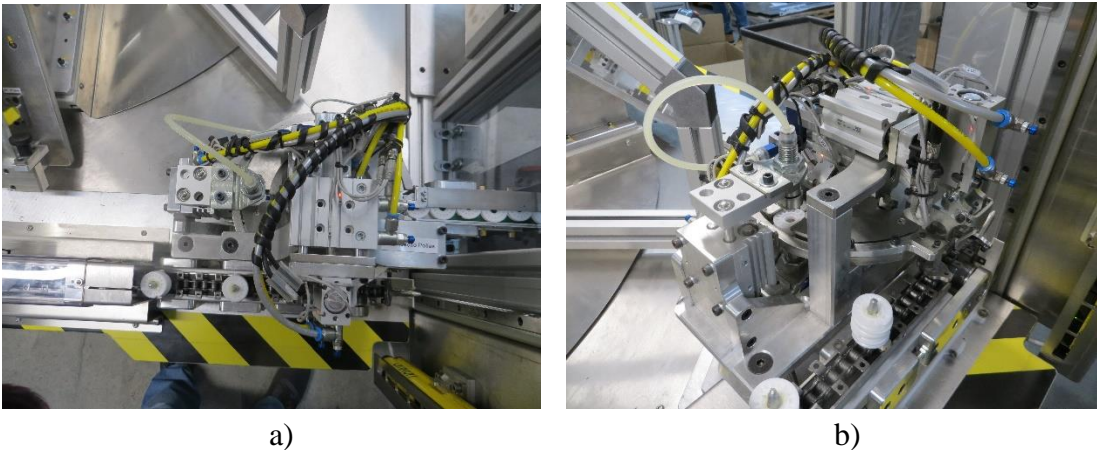


Figura 5-6: Prato indexador de polias.

### 5.3.2 Sistema de distribuição de polias

O sistema de distribuição de polias está encadeado com o sistema de alimentação de polias. É constituído por uma corrente com pinos metálicos acoplada a um servomotor, por dois sensores fotoelétricos e um sensor indutivo (adicionado posteriormente).

O servomotor utilizado foi o SIMOTICS S-1FK2 HD do fabricante Siemens, cujas características podem ser consultadas na Tabela 5-1.

<b>SIMOTICS S-1FK2 HD</b>	
<b>Tipo</b>	Servomotor
<b>Referência</b>	1FK2104-4AF00-0MA0
<b>Proteção</b>	IP64
<b>Binário</b>	1,27
<b>Encoder</b>	Absoluto
<b>Trifásico</b>	
Potência	0,4 kW
RPM	3000
<b>Monofásico</b>	
Potência	0,2 kW
RPM	1500

Tabela 5-1: Características do servomotor [20].

O servomotor possui um *encoder* absoluto que permite deslocar o mesmo para posições absolutas e relativas, motivo pelo qual foi utilizado um servomotor e não um motor convencional. Este servomotor está acoplado à corrente de pinos metálicos através de uma caixa de redução, uma vez que uma volta deste servomotor provocaria uma variação mínima no movimento linear da corrente. A Figura 5-7 mostra o servomotor utilizado.



Figura 5-7: Servomotor SIMOTICS S-1FK2 HD [20].

O motor é controlado pelo PLC através dum driver. Este driver é o SINAMICS S210 do fabricante Siemens. As suas características podem ser consultadas na Tabela 5-2.

SINAMICS S210 PN	
<b>Tipo</b>	Driver
<b>Referência</b>	6SL3210-5HB10-4UF0
<b>Proteção</b>	IP20
<b>Potência</b>	0,4 kW
<b>Fases</b>	3
<b>Tensão</b>	200-480 V
<b>Bus</b>	Profinet
<b>Frequência</b>	45-66 Hz

Tabela 5-2: Características do driver S210 [21].

Os dois sensores fotoelétricos servem para detetar a presença de quatro e duas polias nos pinos metálicos à direita e à esquerda do operador, respetivamente. O sensor indutivo adicionado posteriormente é necessário para o cálculo da posição de receção de polias. Isto é, o sensor deteta um pino metálico e o PLC começa a contar o número de milímetros que a corrente percorre e, quando este número igualar o número parametrizado, o servomotor para. Este sensor foi adicionado pois a distância entre pinos metálicos não era constante, uma vez que a corrente poderia estar mais esticada ou não. Caso não possuísse este sensor, e dando um intervalo constante de paragem do servomotor, iria ser acumulado um erro que provocaria mau posicionamento dos pinos metálicos. Assim, o sensor serve como um zero de posição, evitando o acumular de erros, o que invalida a utilização do servomotor. Foi um erro não previsto no projeto da máquina. Na Figura 5-8 pode-se observar o sistema que distribui as polias.



Figura 5-8: Sistema de distribuição de polias.

### 5.3.3 Visão artificial

Para verificar a referência da peça e a presença dos seus componentes, no posto 1 existe uma câmara de visão, da marca *Keyence*, modelo CA-200M. Esta é uma câmara monocromática de 2 megapixel que está ligada ao controlador *Keyence* CV-X320A que é um controlador para câmaras de 2 megapixel. O controlador é o responsável por executar os testes de visão artificial e enviar os resultados para o autómato.

Para atenuar o ruído causado pela luz ambiente, uma vez que esta câmara não está numa caixa isolada, foram adicionadas luzes infravermelhas ao posto 1. Na Figura 5-9 podemos observar o sistema de visão artificial utilizado neste projeto. Nesta figura também é possível visualizarmos o controlador da câmara e as luzes infravermelhas.



Figura 5-9: Componentes de visão artificial do posto 1.

## 5.4 Posto 2

O posto 2 é um posto opcional, que pode ser ativado caso o operador do posto 1 esteja a influenciar o tempo de ciclo da máquina negativamente, isto é, que esteja a demorar mais tempo que qualquer um dos outros postos. Caso seja ativo, é neste posto que um operador auxiliar colocará parte dos componentes nas peças.

## 5.5 Posto 3

O posto 3 é o posto onde as polias e respetivos componentes são aparafusados aos carris. Para tal, o posto 3 é constituído por um robô e um sistema de aparafusamento.

### 5.5.1 Robô e controlador

Tal como indicado anteriormente, o posto 3 possui um robô cuja ferramenta é uma parafusadora, responsável por aparafusar os componentes aos respetivos carris. O robô utilizado é do fabricante *KUKA* modelo KR 20 R1810-2 com uma capacidade de carga de 20kg e uma repetibilidade +/- 0.04mm. Este manipulador, de seis graus de liberdade, apresenta uma estrutura antropomórfica com seis eixos de rotação e um punho esférico (*roll, pitch, roll*). Este robô vem acompanhado com um *teach pendant* do fabricante *KUKA* modelo *smartPAD-2*.

Na Figura 5-10 podemos observar o volume de trabalho do robô KR 20 R1810-2 que engloba a zona de aparafusamento dos carris (prato rotativo) e a zona de rejeição de parafusos.

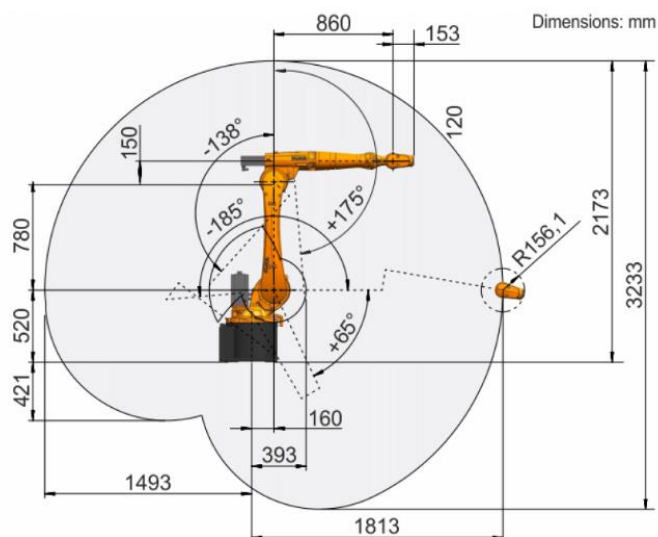


Figura 5-10: Volume de trabalho robô KR 20 R1810-2 [22].

Na Tabela 5-3, são apresentadas outras características do robô mencionado, como o limite dos eixos, a velocidade dos mesmos, a carga máxima que conseguem transportar sem condicionar as características de repetibilidade e exatidão, assim como o seu alcance.

<b>Robô KUKA 20 R1810-2</b>	
<b>Tipo</b>	Antropomórfico
<b>Referência</b>	R1810-2
<b>Número de eixos</b>	6
<b>Movimento de eixos</b>	
Eixo 1	-185° a +185°
Eixo 2	-185° a +65°
Eixo 3	-138° a +175°
Eixo 4	-350° a +350°
Eixo 5	-130° a +130°
Eixo 6	-350° a +350°
<b>Velocidade dos eixos</b>	
Eixo 1	200 %/s
Eixo 2	175 %/s
Eixo 3	190 %/s
Eixo 4	430 %/s
Eixo 5	430 %/s
Eixo 6	630 %/s
<b>Carga máxima</b>	23,9 kg
<b>Peso</b>	255 kg
<b>Repetibilidade</b>	±0,04 mm
<b>Alcance</b>	1813 mm

Tabela 5-3: Características do robô KUKA 20 R1210-2 [22].

Associado a este robô está o controlador KR C4. Este controlador apresentado na Figura 5-11 utiliza uma linguagem de programação KRL (*Kuka Robot Language*), desenvolvida pela *KUKA*, para controlar o robô. Neste controlador estão, portanto, todos os algoritmos, programas e configurações associados ao robô e à sua comunicação, assim como um módulo de segurança. Para aceder e alterar estes programas, o utilizador pode utilizar software gratuito do fabricante *Workvisual 6.0* e posteriormente descarregar para o controlador, através dum dispositivo de armazenamento de massa USB ou por ligação *ethernet*. O utilizador também pode alterar o programa diretamente no *teach pendant*.



Figura 5-11: Controlador KR C4 [23].

### 5.5.2 Sistema de aparafusamento

Para aparafusar os componentes aos carris, foi utilizada uma parafusadora, controlador e alimentador de parafusos do fabricante Weber. A parafusadora está acoplada à flange do robô e ligada por via dum tubo, ao alimentador de parafusos. Este alimentador, Figura 5-12, é constituído por um sensor de cuba vazia, um sensor de pista cheia, três sopros (orientação de parafuso, rejeição de parafuso e envio de parafuso) e um cilindro responsável pela passagem de parafusos para o tubo, com dois sensores magnéticos acoplados.



Figura 5-12: Alimentador de parafusos.

O alimentador fornece parafusos à parafusadora (um de cada vez) que possui um sensor indutivo no tubo que permite saber que houve passagem de parafuso. A parafusadora é constituída por um servomotor e um cilindro pneumático que atuam aquando do

aparafusamento. Na Figura 5-13 podemos observar a parafusador *Weber* acoplada ao punho do robô.

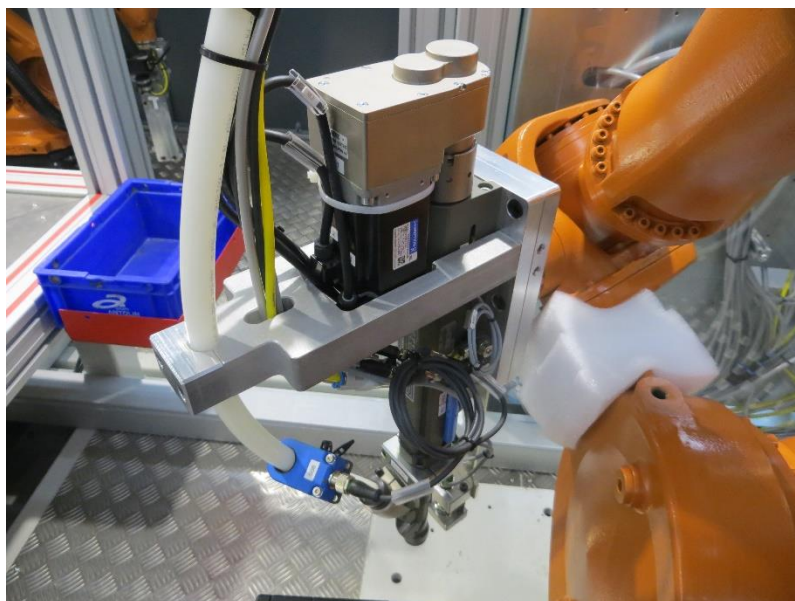


Figura 5-13: Parafusadora *Weber*.

A qualidade de aparafusamento é verificada pelo controlador C30S do fabricante Weber, que permite parametrizar vários programas. Estes programas verificam parâmetros como o torque, distância percorrida pelo parafuso, número de voltas, entre outros, e permitem validar o aparafusamento como OK ou NOK, enviando depois essa informação através de saídas digitais para o autômato. A Figura 5-14 mostra o controlador C30S da parafusadora.



Figura 5-14: Controlador C30S *Weber* [24].

## 5.6 Posto 4

O posto 4 é o posto mais complexo da máquina, uma vez que possui mais tarefas a realizar pelo robô. É o posto de extração de peças, e como tal, possui rampas de evacuação de peças OK e caixa de rejeição de peças NOK. Também comporta uma caixa isolada onde está uma câmara ligada ao controlador de visão artificial, e uma zona de lubrificação.

### 5.6.1 Robô e controlador

Este posto possui um robô cuja ferramenta é uma garra composta por um cilindro pneumático, com dois sensores indutivos acoplados, cuja função é agarrar e largar os carris. O robô utilizado é do fabricante *KUKA* modelo KR 10 R1420 com uma capacidade de carga de 10kg e uma repetibilidade +/- 0.04mm. Este manipulador, de seis graus de liberdade, apresenta uma estrutura antropomórfica com seis eixos de rotação e um punho esférico. Este robô vem acompanhado com um *teach pendant* do fabricante *KUKA* modelo *smartPAD*.

Na Figura 5-15 podemos observar o volume de trabalho do robô KR 10 R1420 que engloba a zona de levantamento dos carris (prato rotativo) e a zona de rejeição, a zona da câmara, a zona de evacuação e a zona de lubrificação.

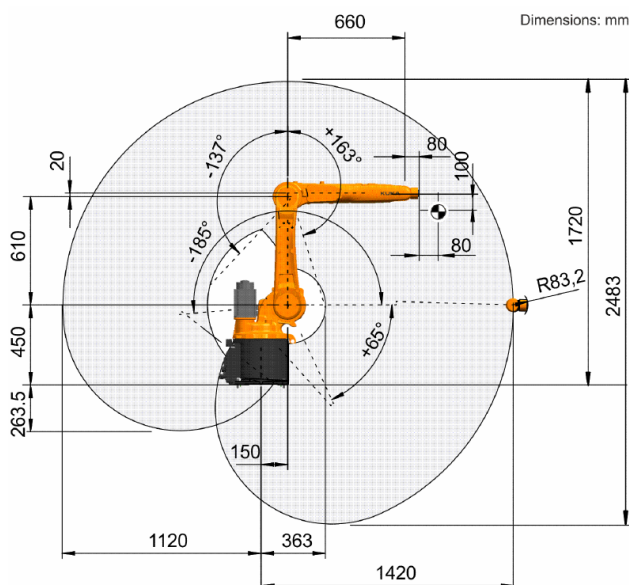


Figura 5-15: Volume de trabalho robô KR 10 R1420 [25].

Na Tabela 5-4, são apresentadas outras características do robô mencionado, como o limite dos eixos, a velocidade dos mesmos, a carga máxima que conseguem transportar sem condicionar as características de repetibilidade e exatidão, assim como o seu alcance.

<b>Robô KUKA 10 R1420</b>	
<b>Tipo</b>	Antropomórfico
<b>Referência</b>	10 R1420
<b>Número de eixos</b>	6
<b>Movimento de eixos</b>	
Eixo 1	-170° a +170°
Eixo 2	-185° a +65°
Eixo 3	-137° a +163°
Eixo 4	-185° a +185°
Eixo 5	-120° a +120°
Eixo 6	-350° a +350°
<b>Velocidade dos eixos</b>	
Eixo 1	220 %/s
Eixo 2	210 %/s
Eixo 3	270 %/s
Eixo 4	381 %/s
Eixo 5	311 %/s
Eixo 6	492 %/s
<b>Carga máxima</b>	10 kg
<b>Peso</b>	160 kg
<b>Repetibilidade</b>	±0,04 mm
<b>Alcance</b>	1420 mm

Tabela 5-4: Características do robô KUKA 10 R1420 [25].

Associado a este robô está o controlador KR C4 *Smallsize-2*. Este controlador apresentado na Figura 5-16 utiliza uma linguagem de programação KRL (*Kuka Robot Language*), desenvolvida pela *KUKA*, para controlar o robô. Neste controlador estão, portanto, todos os algoritmos, programas e configurações associados ao robô e à sua comunicação, assim como um módulo de segurança. Para aceder e alterar estes programas, o utilizador pode utilizar software gratuito do fabricante *Workvisual 6.0* e posteriormente descarregar para o controlador, através dum dispositivo de armazenamento de massa USB ou por ligação ethernet. O utilizador também pode alterar o programa diretamente no *teach pendant*.



Figura 5-16: Controlador KR C4 Smallsize-2 [26].

### 5.6.2 Visão artificial

Para verificar a posição do *anti-creep* na peça, no posto 4 existe uma câmara de visão, da marca *Keyence*, modelo CA-035M. Esta é uma câmara monocromática de 0.31 megapixel que também está ligada ao controlador *Keyence* CV-X320A, tal como a câmara do posto 1. Esta câmara foi colocada numa caixa escura para evitar ruído provocado pela iluminação ambiente. Não foi possível implementar esta solução no posto 1 uma vez que o operador partilha o mesmo espaço que o plano de visão da câmara.



Figura 5-17: Câmara CA-035M dentro de caixa escura.

### 5.6.3 Lubrificação

Excetuando uma das referências, todas as peças precisam de ser lubrificadas. Existe, então, uma zona do posto 4 onde o robô leva o carril para ser lubrificado, conforme mostra a Figura 5-18. Esta zona de lubrificação é composta por uma válvula de massa lubrificante com um sensor indutivo acoplado. Esta válvula e sensor estão ligados diretamente ao robô, comunicando o robô com o PLC caso haja algum problema com o atuador.



Figura 5-18: Zona de lubrificação.

#### **5.6.4 Rampas de evacuação**

Para colocar as peças OK após sofrerem todos os processos anteriores, o posto 4 possui duas rampas de evacuação iguais. Estas rampas possuem apenas um sensor fotoelétrico no topo para indicar ao operador que as rampas estão cheias. Podemos observar estas rampas na Figura 5-19.



Figura 5-19: Rampas de evacuação.

### 5.6.5 Gaveta de rejeição

A gaveta de rejeição é o local onde serão colocadas as peças NOK. Possui uma barreira fotoelétrica que está ligada diretamente ao robô. Esta barreira tem duas funções: informar acerca da passagem de peça (para garantir que não ficou presa na garra do robô) e informar que a gaveta de rejeição está cheia, como se pode observar na Figura 5-20.



Figura 5-20: Gaveta de rejeição: a) gaveta; b) sensor de barreira.

### 5.7 Prato rotativo

Tal como mencionado anteriormente, o prato rotativo é o responsável por mover as cassetes com os carris, pelos diferentes postos. O prato escolhido para esta máquina foi o FIBROTO ER.14.0350.1.142.04.0.0.1 do fabricante FIBRO. Este prato é um prato rotativo de quatro posições que possui um motor trifásico, e dois sensores indutivos na sua base. A função destes sensores é informar se o prato está entre posições ou numa posição. A Figura 5-21 demonstra um ciclo do prato rotativo (que corresponde a um quarto de volta) onde a azul está representado o deslocamento angular do prato, a vermelho a aceleração angular e a verde a velocidade.

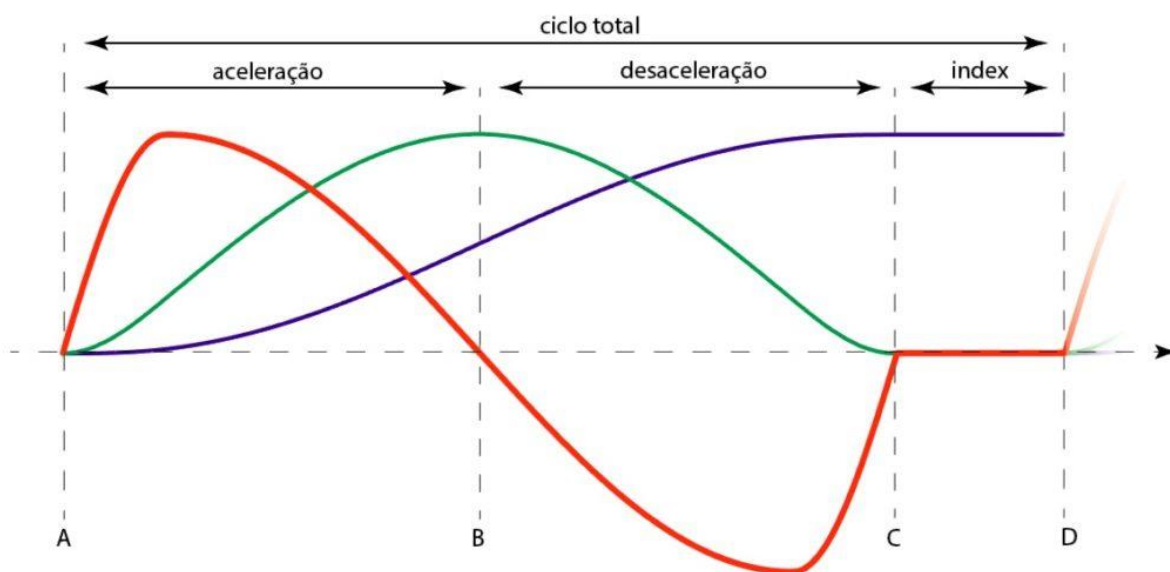


Figura 5-21: Ciclo do prato rotativo [27].

Podemos observar que o prato rotativo tem uma zona de indexação onde, embora o motor esteja a rodar, o prato não sai da posição. Quando o prato está nesta zona, o sensor de posição ganha sinal e o sensor de prato em movimento perde sinal. Caso o prato não esteja nesta zona, o sinal dos sensores é o inverso.

### 5.7.1 Variador de frequência

Um variador de frequência altera a velocidade e torque dum motor de corrente alternada, fazendo variar a frequência da corrente e a tensão. Para controlar a velocidade do prato rotativo, utilizou-se um variador de frequência do fabricante Siemens modelo SINAMICS G120C. As características deste variador podem ser observadas na Tabela 5-5.

SINAMICS G120C PN	
<b>Tipo</b>	Variador de Frequência
<b>Referência</b>	6SL3210-1KE12-3AF2
<b>Proteção</b>	IP20
<b>Potência</b>	0,75 kW
<b>Fases</b>	3
<b>Tensão</b>	380-480 V
<b>Bus</b>	Profinet
<b>Frequência</b>	45-66 Hz

Tabela 5-5: Características do variador de frequência G120C [28].

Este variador permite um controlo por parte do PLC da velocidade do prato assim como também confere segurança nas paragens de emergência, que ocorrem sempre que a segurança da zona envolvente do prato é violada, caso seja configurado no lado do autómato.

## 5.8 Gestor da máquina

O Gestor da máquina é constituído por um PLC e tem como função gerir todos os postos e respetivos componentes, gerir o prato rotativo e também as seguranças que constituem a máquina, assim como designar as tarefas para cada um.

Para executar as funcionalidades do Gestor da máquina foi utilizado um controlador lógico programável do fabricante Siemens modelo CPU 1513-F1 PN, como é apresentado na Figura 5-22.



Figura 5-22: Autómato *Siemens* 1513-F1 PN [29].

O modelo apresentado possui diversas especificações técnicas, contudo apenas serão mencionadas as necessárias ao projeto. Este controlador não possui quaisquer entradas ou saídas digitais, apenas comunica com vários atuadores e recebe informação de sensores, através da rede *PROFINET*. *PROFINET* é uma norma industrial aplicada à comunicação através de *ethernet* industrial que tem como grande vantagem o seu elevado desempenho em aplicações onde a velocidade de comunicação tem de ser elevada. Esta norma possui um perfil dedicado à comunicação de segurança chamado *PROFIsafe*. Este perfil *fail-safe* permite que o mesmo barramento partilhe a comunicação segura e a comunicação padrão, o que reduz os custos em cablagem e barramentos especiais, permitindo uma consistência maior do sistema no que diz respeito à parametrização [30].

Através da Figura 5-23, podemos observar que estão inseridos na rede *PROFINET* do Gestor da máquina vários dispositivos sendo eles: um módulo de comunicação *fieldbus* com vários módulos de entradas e saídas digitais acoplados (do fabricante Siemens), um terminal de electroválvulas (modelo EX-260 SPN do fabricante SMC), a HMI, o drive do servomotor do sistema de distribuição de polias, o variador de frequência do prato rotativo, o controlador das câmaras e os controladores dos robôs, assim como o *switch* de *ethernet*. Alguns dos módulos de entradas e saídas digitais, são de segurança, ou seja, são específicos para controlar entradas e saídas de segurança. Desta forma, percebe-se que a segurança da máquina é feita pela programação do autómato e não eletricamente. O terminal de electroválvulas é responsável por fazer a ponte entre o Gestor da máquina e os atuadores pneumáticos do sistema de alimentação de polias. Uma vez que o autómato não tem fichas RJ45 suficientes para comunicar com os dispositivos inseridos na rede *PROFINET*, utilizou-se um *switch* de *ethernet* do fabricante Siemens modelo SCALANCE XC-200. Para a programação deste autómato foi utilizado o software TIA PORTAL V15.1 do fabricante Siemens.

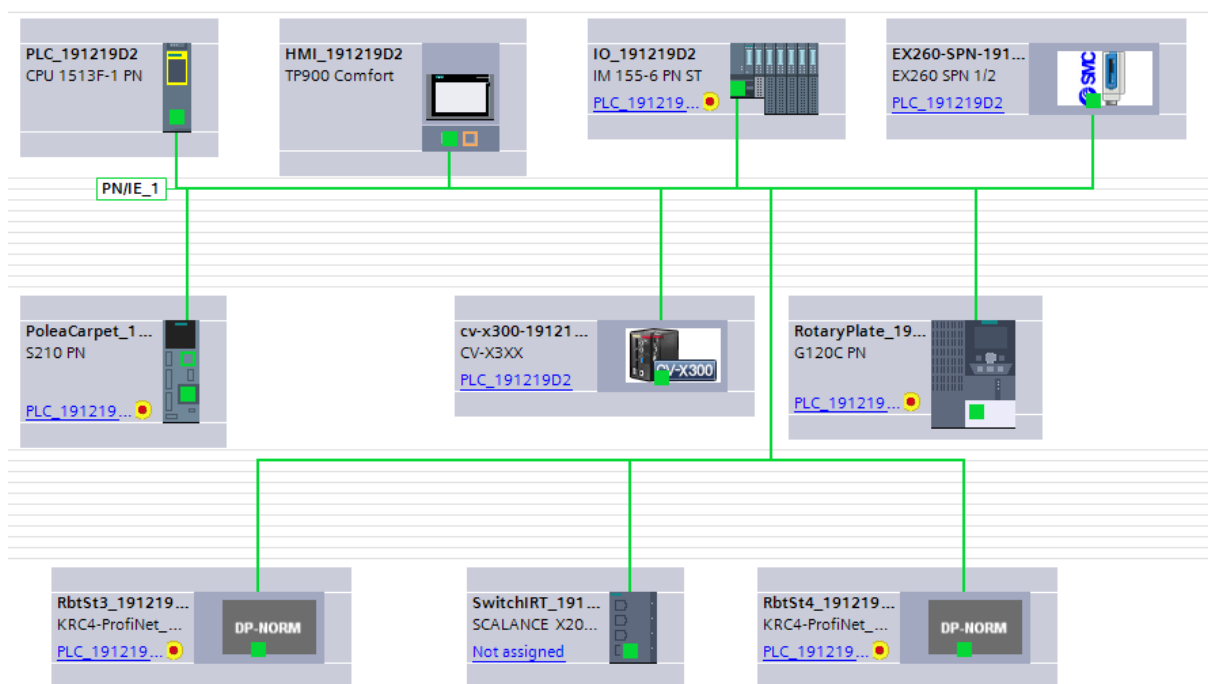


Figura 5-23: Rede *PROFINET*.

## 5.9 Interface homem-máquina

Uma interface homem-máquina é um dispositivo que permite ao homem comunicar com uma máquina. Um sistema de produção deve englobar sistemas de interface homem-máquina simples e intuitivos, que garantam a segurança dos operadores e a funcionalidade do sistema de produção [31]. Neste projeto, para fazer a ponte entre o operador e a máquina, utilizou-se a

HMI TP 900 *Comfort* do fabricante *Siemens*, como mostra a Figura 5-24. Esta HMI possui um ecrã de 9 polegadas (cerca de 23cm), 16 milhões de cores, interface *PROFINET* e 12 MB de memória. As HMI's do fabricante *Siemens* também possuem o sistema operativo *Windows*. É através desta interface que o operador poderá escolher a receita adequada ao funcionamento da máquina, assim como controlar os elementos (cilindros, motores, entre outros) e obter informação sobre o estado da mesma.



Figura 5-24 : Interface homem-máquina HMI TP 900 *Comfort* [32].

## 5.10 Dispositivos de segurança

No que diz respeito à automação industrial, os dispositivos de segurança têm um papel fulcral no funcionamento duma célula industrial, uma vez que garantem a segurança das pessoas envolvidas no processo, segundo as normas em vigor. Estes dispositivos são responsáveis por identificar possíveis situações de perigo (através de sensores, como por exemplo as barreiras de segurança) e comunicar ou ativar a segurança da máquina em tempo útil, para que a vida humana seja salvaguardada.

Neste projeto, foram utilizadas barreiras de segurança nos postos 1 e 2, portas de segurança de acesso aos postos 3 e 4, assim como várias botoneiras de emergência.

Estes dispositivos estão ligados ao PLC e, tal como referido anteriormente, será este, através da programação, que irá garantir a segurança dos intervenientes no processo.

### 5.10.1 Barreiras de segurança

Foram colocadas barreiras de segurança nos postos 1 e 2, pois são os postos em que os operadores irão intervir no processo. A Figura 5-25 apresenta as barreiras de segurança utilizadas neste projeto.



Figura 5-25: Barreiras de segurança *Omron* [33].

Estas barreiras, ao serem trespassadas, informam o PLC, e este não permitirá que haja movimento na máquina nas zonas que estão ao alcance do operador. Ou seja, se for intercetada a barreira do posto 1, tanto o prato rotativo, como o servomotor das polias e o cilindro que desbloqueia as peças do posto 1, não se movimentam, ou param o movimento imediatamente, por forma a garantir a segurança do operador. Neste projeto foram utilizadas as barreiras FS3G-4RE1200P14 da marca *Omron*. A Tabela 5-6 contém as características das barreiras.

<b>Omron F3SG-4RE1200P14</b>	
<b>Norma</b>	IEC 61496-1
<b>Nível de Segurança</b>	4
<b>Tipo de Proteção</b>	Dedos
<b>Capacidade deteção</b>	14 mm
<b>Altura</b>	1200 mm
<b>Intervalo entre feixes</b>	10 mm
<b>Número de feixes</b>	119
<b>Tempo de reação</b>	11 ms
<b>Tipo</b>	Detetor e recetor

Tabela 5-6: Características das barreiras de segurança [33].

### 5.10.2 Portas de segurança

As portas de segurança são responsáveis por colocar uma barreira física entre a máquina e o operador. Neste projeto, estas portas são utilizadas para que o operador possa aceder aos postos 3 e 4 em segurança. Para tal, as portas possuem fechaduras de segurança, conforme a indicada na Figura 5-26, que é controlada pelo PLC, que abre somente se a segurança no interior da máquina estiver garantida.



Figura 5-26: Fechadura de segurança Schneider [34].

Isto é, caso o operador queira entrar na máquina através duma destas portas terá de “pedir permissão”, ao pressionar um botão de acesso. Ao tomar esta ação, o operador informa o PLC que quer entrar na máquina e este, após parar os robôs, a mesa rotativa e todos os elementos móveis dos postos 3 e 4, desbloqueia a porta para que o operador possa entrar na máquina em segurança. A Tabela 5-7 mostra algumas características da fechadura de segurança *Schneider* XCSLF3837512, utilizada neste projeto.

<b>Schneider XCSLF3837512</b>	
<b>Norma</b>	ISO 13849-1
<b>Nível de Segurança</b>	4
<b>Numero de ciclos</b>	1000000
<b>Tempo de atuação mín.</b>	0,01 ms
<b>Tempo de atuação máx.</b>	0,5 ms

Tabela 5-7: Características das fechaduras de segurança [34].

### 5.10.3 Botoneiras de emergência

As botoneiras de emergência são um dispositivo de segurança utilizado há muito tempo na indústria, uma vez que permite, duma forma bastante simples e económica, parar uma máquina ou equipamento. Embora, normalmente, ao pressionar este botão, se corte diretamente a energia e ar comprimido aos elementos móveis da máquina, neste projeto, estas botoneiras irão apenas informar o PLC, tal como os outros dispositivos de segurança, e este tomará as decisões no que diz respeito à segurança da máquina.

As botoneiras de emergência utilizadas neste projeto são da *Schneider*, modelo ZB5AS844, conforme mostra a Figura 5-27.



Figura 5-27: Botoneira de emergência Schneider [35].

### 5.11 Dispositivos de comando e sinalização

Os dispositivos de comando permitem ao operador da máquina dar início ao processo automático, assim como rearmar a segurança, reiniciar erros e solicitar a abertura das portas de segurança. A unidade de controlo manual, apresentada na Figura 5-28, desta máquina consiste em dois botões de Início (um para cada operador), três botões de Rearme (um em cada uma das duas portas de segurança e outro na zona do operador 1), dois botões de pedido de acesso, e um botão de Reinício. Com exceção dos botões de Início que são capacitivos, todos os outros botões de controlo são de impulso.

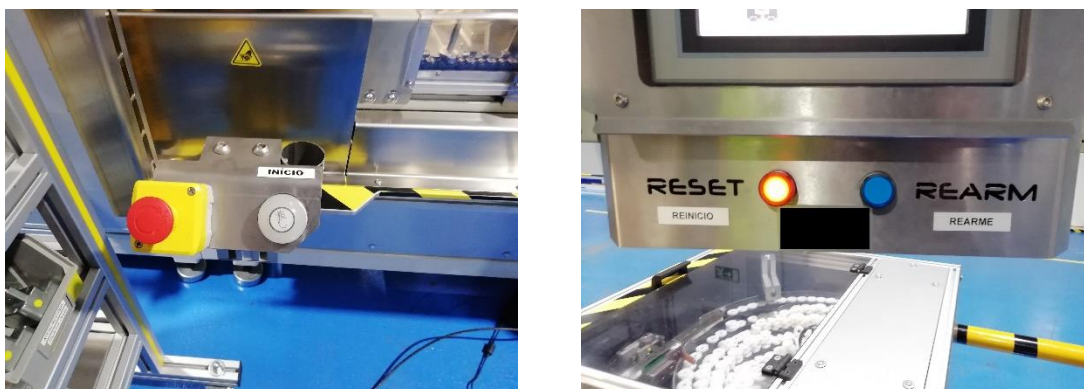


Figura 5-28: Unidade de controlo manual.

Além do controlo da máquina, é importante também para o operador ter o *feedback* do estado atual da mesma. Para tal, além dos dispositivos de comando, também existe uma baliza de sinalização na máquina, assim como LED's no seu interior, Figura 5-29, que permitem ao operador perceber, facilmente o estado em que se encontra a máquina. Estes dispositivos obedecem a um código de cores, solicitado pelo cliente, de forma a serem uniformes os alertas nas suas instalações.



Figura 5-29: LED's de sinalização.

## **6. Proposta de solução – Máquina de aparafusamento de carris**

Neste capítulo irá ser abordado o processo de desenvolvimento do projeto, do ponto de vista do PLC, desde a segurança da máquina até à instalação no cliente.

Para a realização deste projeto, foi planeada a seguinte sequência de tarefas:

1. Programação e configuração da segurança da máquina;
2. Programação e parametrização do inversor de frequência (prato rotativo);
3. Programação e parametrização do servomotor (sistema de distribuição de polias);
4. Identificação dos sinais necessários a trocar com os robôs (*slaves*);
5. Programação bloco de função de comunicação com os robôs;
6. Programação geral da máquina;
7. Programação HMI;
8. Testes;
9. Instalação da máquina no cliente.

### **6.1 Programação e configuração da segurança da máquina**

Tal como abordado anteriormente, o controlo da segurança da máquina vai passar pela lógica do autómato em vez de ser feito diretamente através de impulsos elétricos. Isto é, a segurança da máquina e do operador depende da boa programação e configuração do autómato.

## 6 – Proposta de Solução – Máquina de aparafusamento de carris

Para perceber a configuração do autômato de segurança é necessário entender que o autômato monitoriza constantemente o estado dos dispositivos de segurança a ele ligado, através de impulsos elétricos que envia e recebe destes dispositivos. Esses sinais têm um desfasamento temporal máximo, isto é, após enviar um sinal para um dispositivo de segurança, o autômato tem um tempo limite para receber o feedback desse sinal, caso contrário entra em erro. A primeira parte da configuração do autômato de segurança consiste precisamente em configurar este tempo limite de monitorização dos dispositivos de segurança. A Figura 6-1 mostra onde configurar este tempo, no projeto do TIA Portal.

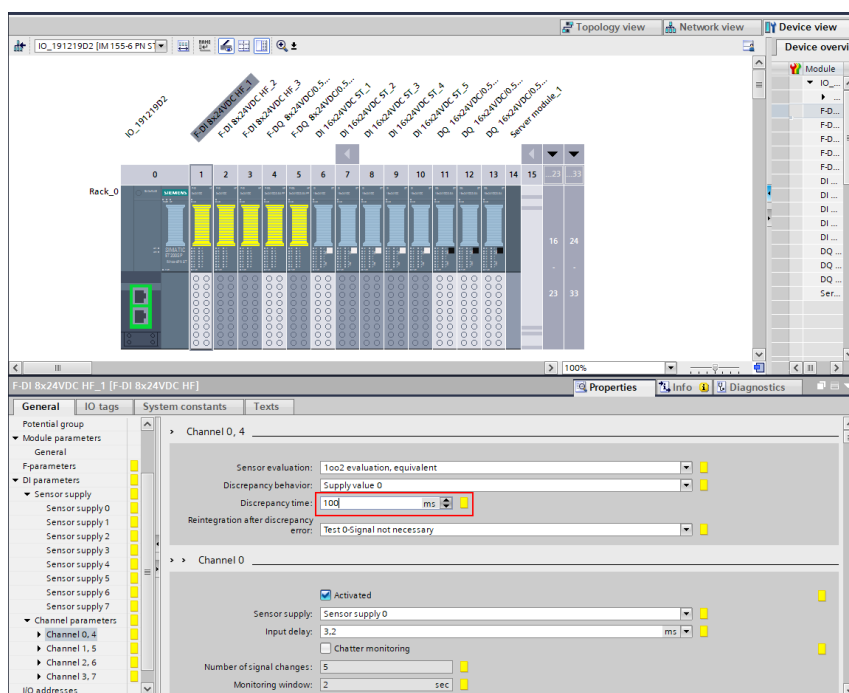


Figura 6-1: Configuração do tempo de discrepância.

Depois de configurar os dispositivos de segurança da máquina, é necessário programar a segurança da mesma. Para tal, o software da Siemens possui blocos de funções específicos e não permite utilizar funções desenvolvidas pelo utilizador, garantindo assim a segurança da máquina perante erros de programação. Na Figura 6-2 está demonstrado o bloco de função utilizado para programar a botoneira de emergência.

## 6 – Proposta de Solução – Máquina de aparafusamento de carris

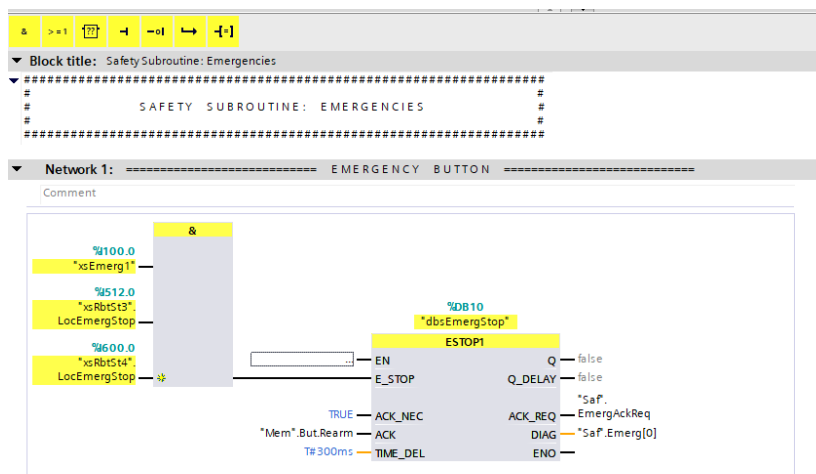


Figura 6-2: Bloco de função ESTOP1.

Foram também utilizados blocos de funções dedicados a portas para programar a segurança das portas de manutenção, a tampa de proteção do prato rotativo das polias e as barreiras fotoelétricas. Este bloco de função pode ser observado na Figura 6-3.

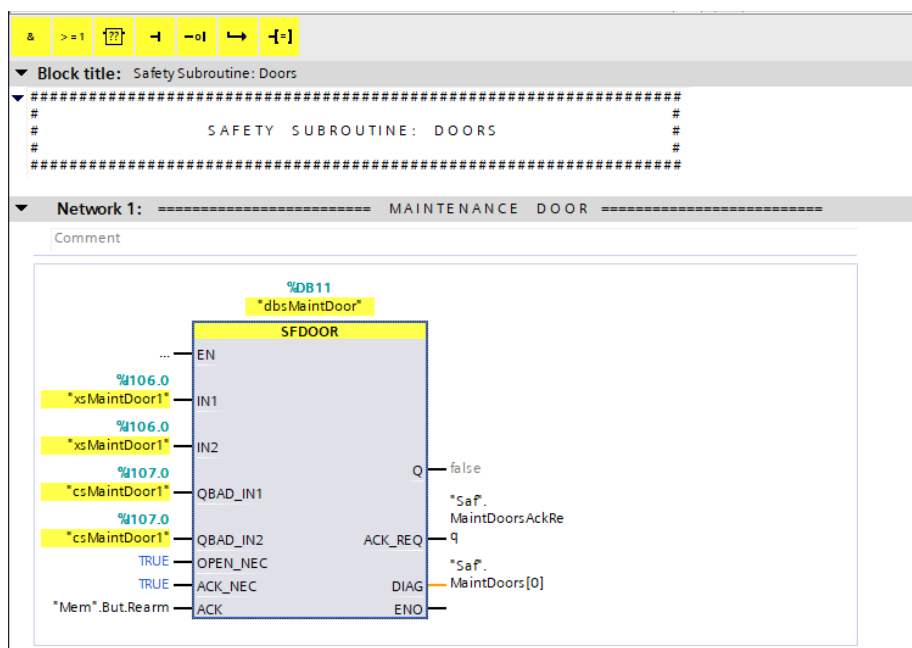


Figura 6-3: Bloco de função SFDOOR.

## 6.2 Programação e parametrização do inversor de frequência

De seguida, após a programação e configuração da segurança, parametrizou-se o inversor de frequência responsável por controlar o prato rotativo. A parametrização consistiu em dar os valores característicos do motor do prato rotativo, indicar o travão DC, assim como indicar o protocolo de comunicação com o autómato. A Figura 6-4 mostra a lista de parâmetros do inversor de frequência.

Number	Parameter text	Value	Unit
<All>	<All>	<All>	<All>
r2	Drive operating display	[45] Switching on inhibited - rectify fault, acknowledged	
p10	Drive commissioning parameter filter	[0] Ready	
p15	Macro drive unit	[7] Fieldbus with data set changeover	
r18	Control Unit firmware version	4711504	
r20	Speed setpoint smoothed	0.0	rpm
r21	Actual speed smoothed	0.0	rpm
r25	Output voltage smoothed	0.0	Vrms
r26	DC link voltage smoothed	601.2	V
r27	Absolute actual current smoothed	0.00	Arms
r31	Actual torque smoothed	0.00	Nm
r32	Active power actual value smoothed	0.00	kW
r34	Motor utilization thermal	-200	%
r35	Motor temperature	20.6	°C
r39[0]	Energy display, Energy balance (sum)	2.31	kWh
r41	Energy consumption saved	14.08	kWh
r42[0]	Process energy display, Energy balance (sum)	0	Wh
p43	BI: Enable energy usage display	0	
r46	Missing enable signal	50020101H	
r47	Motor data identification and speed controller optimization	[300] Stationary measurement selected	
r51	Drive Data Set DDS effective	0H	
r52	Status word 1	E8E0H	
r53	Status word 2	2A2H	
r54	Control word 1	47EH	
p96	Application class	[1] Standard Drive Control (SDC)	
p100	IEC/NEMA mot stds	[0] IEC-Motor (50 Hz, 51 units)	
p133[0]	Motor configuration	0H	
p170	Number of Command Data Sets (CDS)	2	
r206[0]	Rated power unit power, Rated value	0.75	kW
r208	Rated power unit line supply voltage	400	Vrms
p230	Drive filter type motor side	[0] No filter	
p233	Power unit motor reactor	0.000	mH
p234	Power unit sine-wave filter capacitance	0.000	µF
p235	Motor reactor in series number	1	
p300[0]	Motor type selection	[1] Induction motor	
p301[0]	Motor code number selection	0	
p304[0]	Rated motor voltage	400	Vrms
p305[0]	Rated motor current	1.90	Arms
p306[0]	Number of motors connected in parallel	1	
p307[0]	Rated motor power	0.55	kW
p308[0]	Rated motor power factor	0.000	
p310[0]	Rated motor frequency	50.00	Hz

Figura 6-4: Lista de parâmetros do inversor de frequência.

Após esta parametrização, utilizou-se uma função da *Siemens* indicada para o controlo deste inversor de frequência, como se pode verificar na Figura 6-5.

## 6 – Proposta de Solução – Máquina de aparafusamento de carris

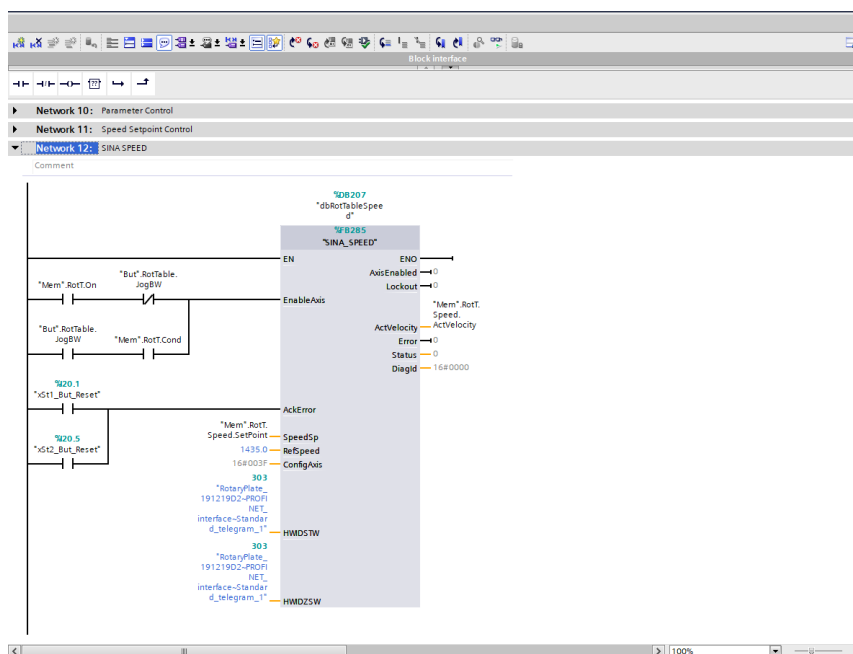


Figura 6-5: Função SINA\_SPEED.

Foi então necessário adicionar este inversor de frequência, à segurança da máquina. Uma vez que a segurança era feita através da rede *PROFIsafe*, também se utilizou um bloco de função indicado para segurança de equipamentos controlados por este inversor de frequência. A Figura 6-6 mostra o bloco de função indicado. Pode perceber-se então que, bastando perder os sinais de segurança das botoneiras de emergência, das barreiras ou dos robôs estarem fora da zona do prato, o *Safety Torque Off (STO)* do inversor é ativado, garantindo a paragem do prato rotativo em segurança.

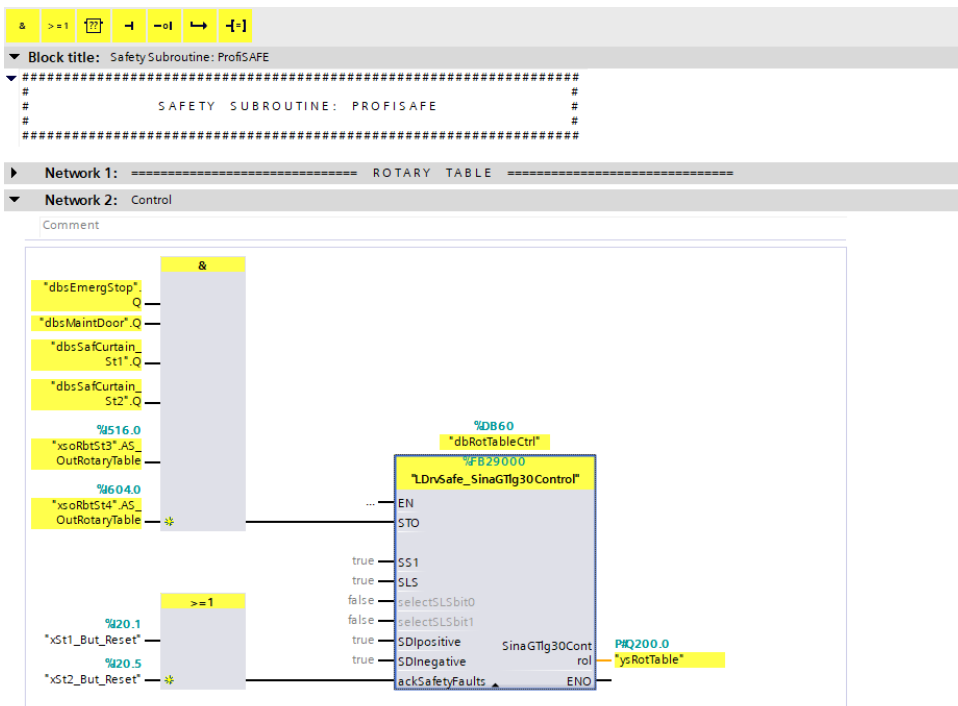


Figura 6-6: Bloco de função de segurança *PROFIsafe*.

### 6.3 Programação e parametrização do servomotor

Após programação, configuração e parametrização do inversor de frequência do prato rotativo, fez-se o mesmo ao servomotor responsável por distribuir as polias ao operador. Este servomotor, tal como o inversor de frequência, tem a segurança garantida pela rede *PROFIsafe*. Desta forma, os procedimentos de configuração e parametrização são semelhantes aos do inversor de frequência, pelo que não há necessidade de estar a repetir pormenorizadamente os procedimentos indicados no capítulo anterior.

Para controlar este servomotor, desenvolveu-se um bloco de função. Este bloco utiliza várias funções da Siemens indicadas para controlo de servomotores, utilizando cada uma delas em alturas específicas. Estas funções são geridas por um Grafcet desenvolvido especificamente para o controlo deste servomotor. A Figura 6-7 mostra o bloco de função desenvolvido a ser “chamado” no programa principal.

## 6 – Proposta de Solução – Máquina de aparafusamento de carris

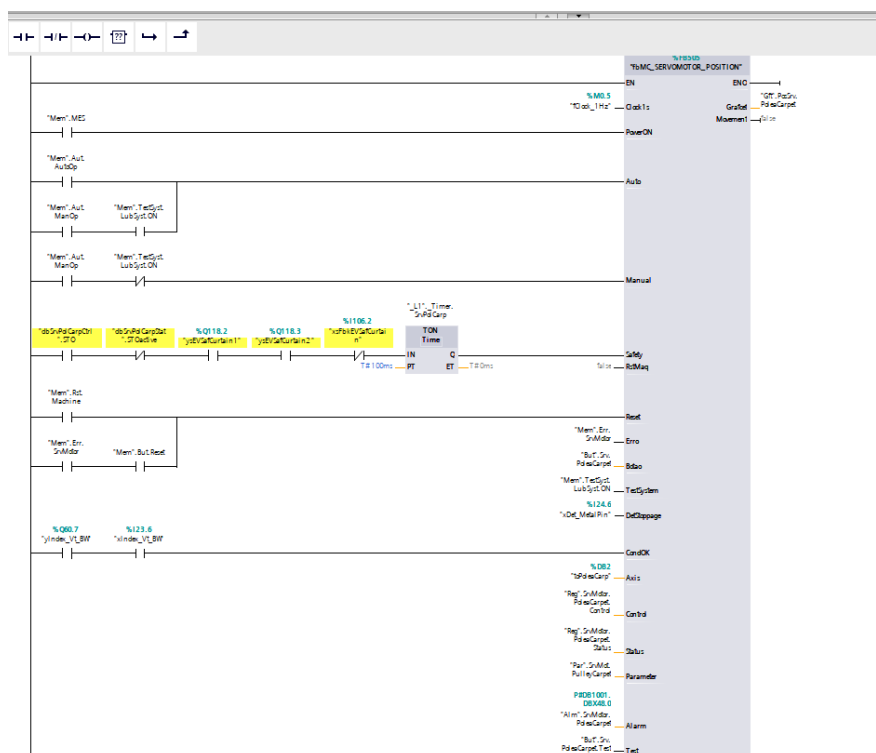


Figura 6-7: Bloco de função de controlo do servomotor.

### 6.4 Identificação dos sinais necessários a trocar com os robôs

Tal como no projeto da máquina de inserção de agrafes metálicos, também neste projeto foi desenvolvida uma tabela no Microsoft Excel para definir os sinais a serem trocados entre os robôs e o PLC. A Figura 6-8 é um excerto da tabela de sinais trocados de um dos robôs.

6 – Proposta de Solução – Máquina de aparafusamento de carris

[191219D2] - OP10_20 PULLEY SCREWING HHN (Antolin Lus)							
Robot 2 - Evacuation							
Communication Robot ==> PLC				Communication PLC ==> Robot			
Address			Comments	Address		Comments	
Byte	Robot (Write)	PLC (Read)		Robot (Read)	PLC (Write)		
6	\$OUT[1]	0	Controller Ready	\$IN[1]	0	External Start	
7	\$OUT[2]	1	Drives Ready	\$IN[2]	1	Move Enable	
8	\$OUT[3]	2	Emergency Stop	\$IN[3]	2	Alarm/Error Reset	
9	\$OUT[4]	3	Internal Emergency Stop	\$IN[4]	3	Drives OFF (Inverse)	
10	\$OUT[5]	4	Error Collection	\$IN[5]	4	Drives ON	
11	\$OUT[6]	5	User Safety Switch Closed	\$IN[6]	5	External Stop	
12	\$OUT[7]	6	Program Active	\$IN[7]	6	Activate Interface	
13	\$OUT[8]	7	Program Number Request	\$IN[8]	7	External Pause	
14	\$OUT[9]	0	Application Running	\$IN[9]	0		
15	\$OUT[10]	1	Robot - T1 Mode	\$IN[10]	1		
16	\$OUT[11]	2	Robot - T2 Mode	\$IN[11]	2		
17	\$OUT[12]	3	Robot - Auto Mode	\$IN[12]	3		
18	\$OUT[13]	4	Robot - Auto EXTERNAL Mode	\$IN[13]	4		
19	\$OUT[14]	5	ON Path	\$IN[14]	5		
20	\$OUT[15]	6	Interface Active	\$IN[15]	6		
21	\$OUT[16]	7	Robot Stopped	\$IN[16]	7		
22	\$OUT[17]	0	PGNO - bit 0	\$IN[17]	0	PGNO - bit 0	
23	\$OUT[18]	1	PGNO - bit 1	\$IN[18]	1	PGNO - bit 1	
24	\$OUT[19]	2	PGNO - bit 2	\$IN[19]	2	PGNO - bit 2	
25	\$OUT[20]	3	PGNO - bit 3	\$IN[20]	3	PGNO - bit 3	
26	\$OUT[21]	4	PGNO - bit 4	\$IN[21]	4	PGNO - bit 4	
27	\$OUT[22]	5	PGNO - bit 5	\$IN[22]	5	PGNO - bit 5	
28	\$OUT[23]	6	PGNO - bit 6	\$IN[23]	6	PGNO - bit 6	
29	\$OUT[24]	7	PGNO - bit 7	\$IN[24]	7	PGNO - bit 7	
30	\$OUT[25]	0	Brake Test - Request	\$IN[25]	0	PGNO - Parity	
31	\$OUT[26]	1	Brake Test - Working	\$IN[26]	1	PGNO - Validation	
32	\$OUT[27]	2	Brake Test - Warning	\$IN[27]	2		
33	\$OUT[28]	3	Brakes OK	\$IN[28]	3		
34	\$OUT[29]	4	Mastering Test - Request	\$IN[29]	4		
35	\$OUT[30]	5	Mastering Test - Active	\$IN[30]	5		
36	\$OUT[31]	6	Mastering Test - Switch OK	\$IN[31]	6		
37	\$OUT[32]	7		\$IN[32]	7		

Figura 6-8: Sinais trocados entre o robô de evacuação e o PLC.

Além destes sinais trocados com o PLC via *PROFINET*, também há sinais trocados via *PROFIsafe*, ou seja, sinais de segurança. Estes sinais permitem ao autômato saber se os robôs estão dentro da zona do prato rotativo (para não mover o prato), se estes estão parados (para abrir e destrancar as portas de manutenção), se têm a emergência ativa, se requerem teste de masterização (teste no qual o robô compara a posição das juntas numa posição de referência, com a posição gravada e verifica se há discrepância nos valores), entre outros.

A Figura 6-9 mostra a gestão de um destes sinais, por parte do PLC.

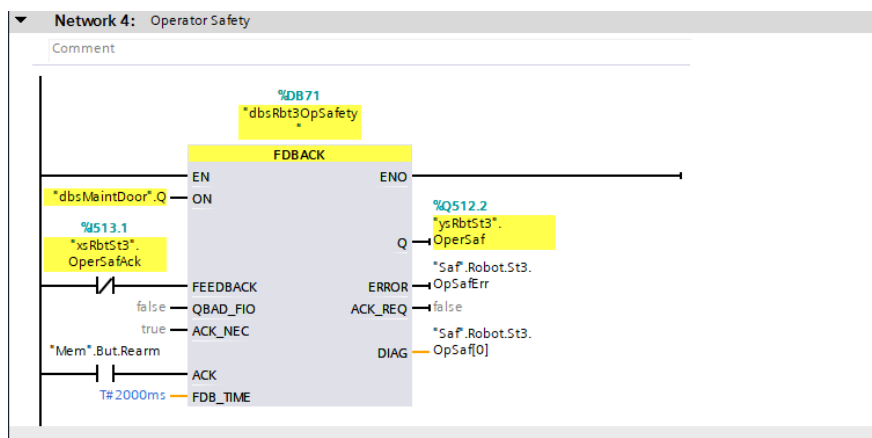


Figura 6-9: Bloco de função FDBACK do sinal *Operator Safety*.

Neste bloco de função FDBACK podemos observar que, apenas quando as portas de manutenção estão fechadas e a sua segurança rearmada, é que o PLC envia o sinal ao robô a indicar que a segurança do operador está garantida. Espera pelo sinal de feedback do robô (que é um sinal negado) por um tempo de 2 segundos. Caso não tenha feedback do robô dentro desse intervalo de tempo, a função FDBACK gera um erro que é transmitido ao operador sob a forma de mensagem na HMI.

## 6.5 Programação do bloco de função de comunicação com os robôs

Após definir os sinais a trocar com os robôs, programou-se um bloco de função (para cada robô) encarregue de garantir a boa comunicação com o robô e fluidez no processo. Este bloco será o único bloco de função aprofundado nesta tese, uma vez que foi o que se mostrou o maior desafio.

Para garantir que o robô está pronto para iniciar uma tarefa, é necessário dar uma sequência de sinais após o seu arranque. Para tal, foi desenvolvido um Grafcet que garante esse mesmo *setup* do robô. Foram consultados os manuais do robô para saber qual a sequência de sinais e só depois se começou a delinear o Grafcet ao qual foi dado o nome de RPI do robô. A Figura 6-10 contém a primeira parte do Grafcet mencionado acima, assim como a Figura 6-11 contém a segunda parte e a Figura 6-12, a terceira.

6 – Proposta de Solução – Máquina de aparafusamento de carris

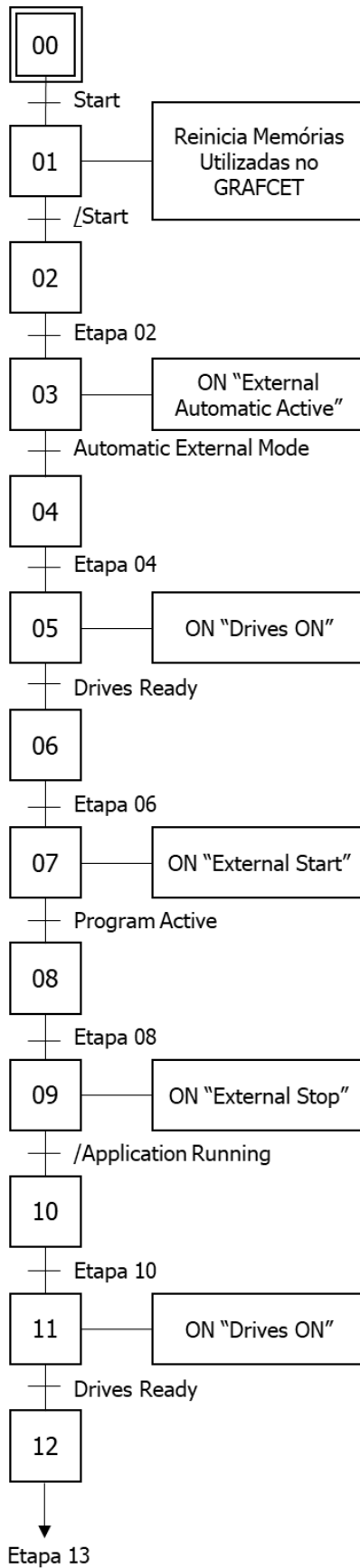


Figura 6-10: Grafcet “RPI” parte 1.

6 – Proposta de Solução – Máquina de aparafusamento de carris

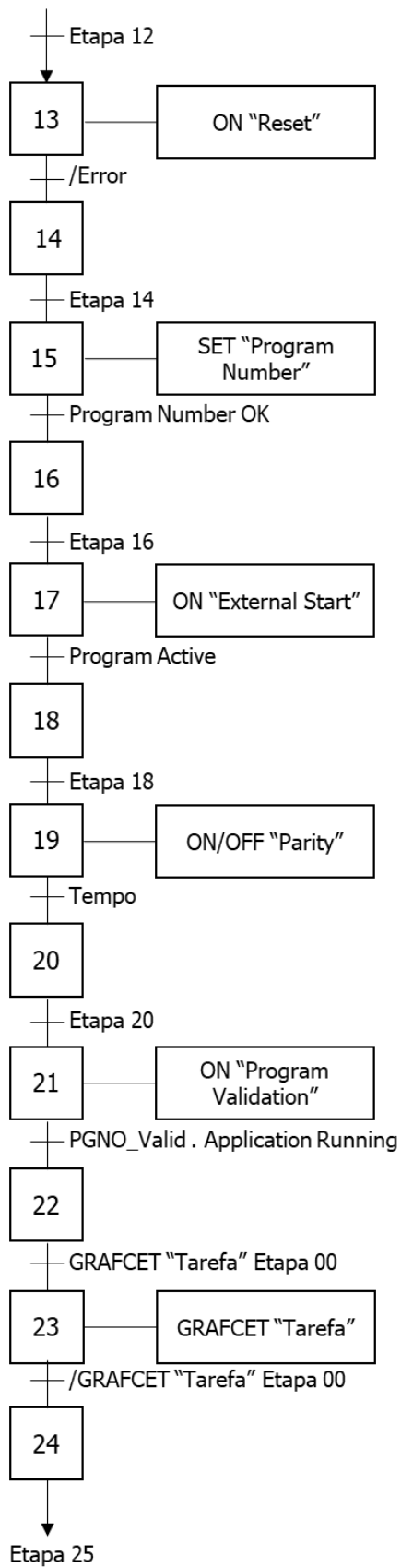


Figura 6-11: Grafcet "RPI" parte 2.

## 6 – Proposta de Solução – Máquina de aparafusamento de carris

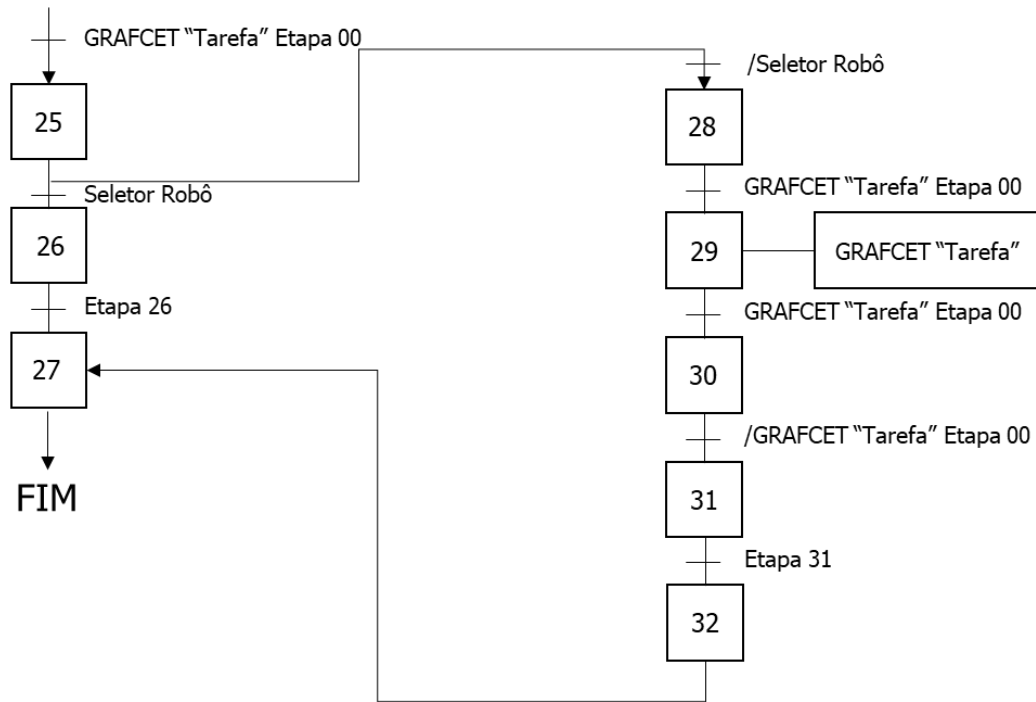


Figura 6-12: Grafcet "RPI" parte 3.

Neste momento, foram desenvolvidos mais dois Grafcet para controlar o robô, também estes incluídos no bloco de função de comunicação com o robô. Estes Grafcet são o "Tarefa" e o "Início". O Grafcet "Tarefa" foi desenvolvido para atribuir uma tarefa ao robô (sendo esta qual for) e é composto por uma série de sinais e feedbacks que garantem o bom funcionamento da máquina. A Figura 6-13 mostra o Grafcet "Tarefa".

6 – Proposta de Solução – Máquina de aparafusamento de carris

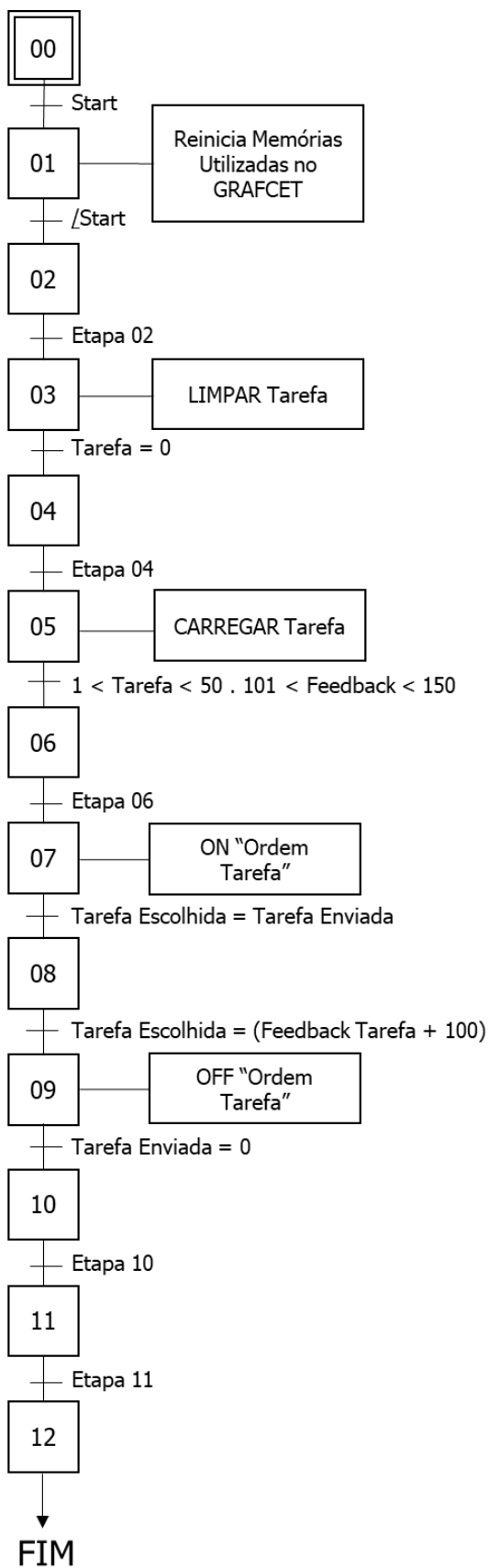


Figura 6-13: Grafcet “Tarefa”.

## 6 – Proposta de Solução – Máquina de aparafusamento de carris

Este Grafcet “Tarefa” é chamado pelo Grafcet “Posto 3” que controla o posto onde está inserido o robô, do qual se irá falar mais à frente.

O Grafcet “Início” consiste numa sequência de sinais para arrancar o robô após uma paragem provocada pelo controlo do PLC, isto é, após aberturas das portas de manutenção. Este Grafcet permite ao robô arrancar do ponto do programa onde ficou. É extremamente útil para a manutenção, uma vez que permite a afinação de pontos de robô sem condicionar o processo da máquina. A Figura 6-14 mostra o Grafcet “Início”.

6 – Proposta de Solução – Máquina de aparafusamento de carris

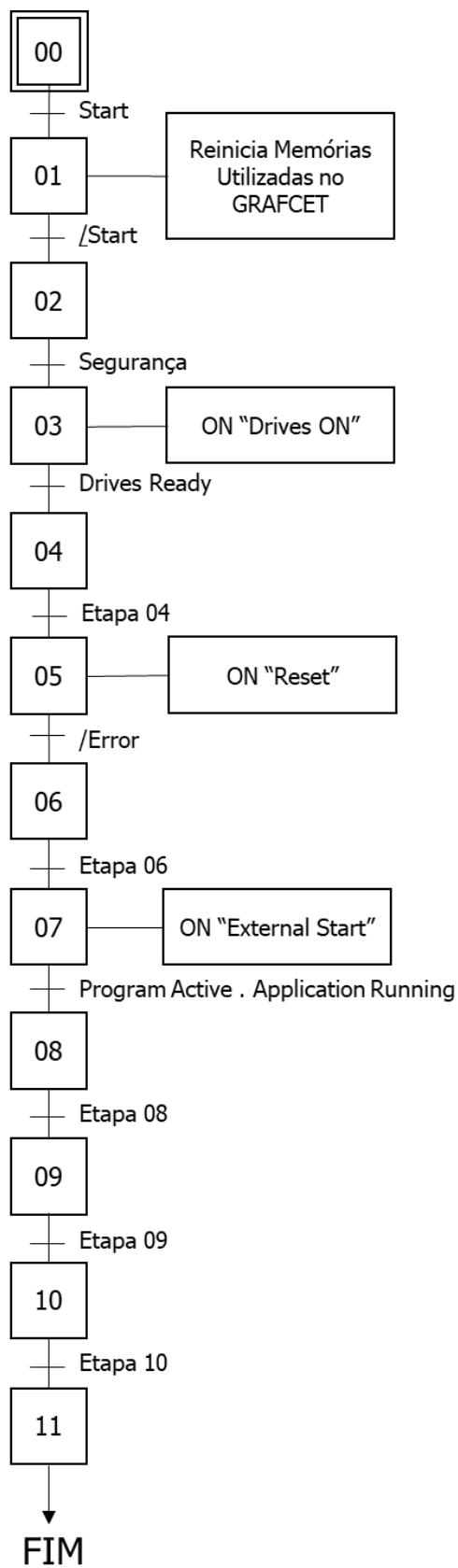


Figura 6-14: Grafcet “Início”.

## 6 – Proposta de Solução – Máquina de aparafusamento de carris

Além destes Grafcet que controlam o robô, este bloco de função também gera alarmes referentes ao robô. Existem vários alarmes que garantem o bom funcionamento deste bloco de função, sendo responsáveis por monitorizar os sinais enviados para o robô assim como o feedback. Este bloco de função, juntamente com os sinais de segurança, garante que a comunicação entre o PLC e o robô é estável e, caso não o seja, alarmes são despoletados que imobilizam a máquina e avisam o operador.

A Figura 6-15 mostra parte do bloco de função do robô onde está a ser monitorizado o sinal de *External Automatic Active*.

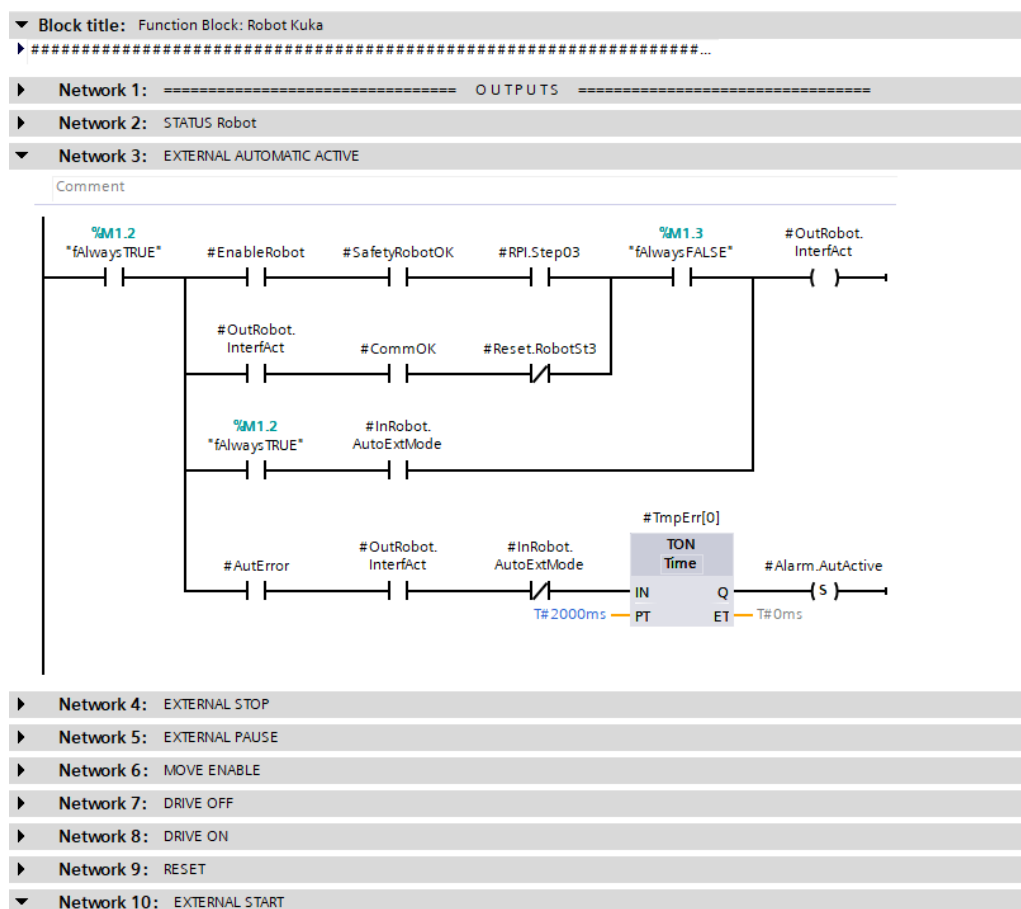


Figura 6-15: Bloco de função robô.

Foi desenvolvido um bloco de função para cada robô uma vez que, apesar de ambos serem da marca KUKA, os controladores e as funções desempenhadas pelos robôs são diferentes.

## 6.6 Programação geral da máquina

Neste capítulo será abordada a forma como foi encarado o processo de programação desta máquina, ou seja, a estratégia de controlo da máquina.

Em primeiro lugar, dividiu-se a máquina em cinco grandes zonas: o posto 1, o posto 2, o posto 3, o posto 4 e o prato rotativo. Depois foram programados Grafcet e blocos de funções para controlar cada equipamento e procedimento que fazem parte dessa zona. O Grafcet é um método gráfico que permite descrever, em forma de diagrama, as fases de funcionamento de um automatismo [36], [37] e [38].

No posto 1 foi programado o Grafcet geral do posto, o alimentador de polias, o sistema de distribuição de polias e o controlador da câmara de verificação de componentes.

No posto 2 foi programado apenas o Grafcet geral do posto.

No posto 3 foi programado o Grafcet geral do posto que chama as tarefas do robô de aparafusamento, o alimentador de parafusos e o controlador do mesmo.

No posto 4 foi programado o Grafcet geral do posto que chama as tarefas do robô de evacuação, o controlador da câmara de verificação de componentes, a válvula de lubrificação e as rampas de saída.

No que diz respeito ao prato rotativo, foi programado o Grafcet geral que espera que os procedimentos de cada um dos postos estejam terminados, para poder mover o prato. Também é neste Grafcet que se gere o tempo de ciclo da máquina, assim como as peças, isto é, a informação das peças (aparafusamento, lubrificação, componentes, entre outros) estão associadas à base onde elas estão inseridas.

O fluxograma da Figura 6-16 permite perceber de forma geral o procedimento da máquina.

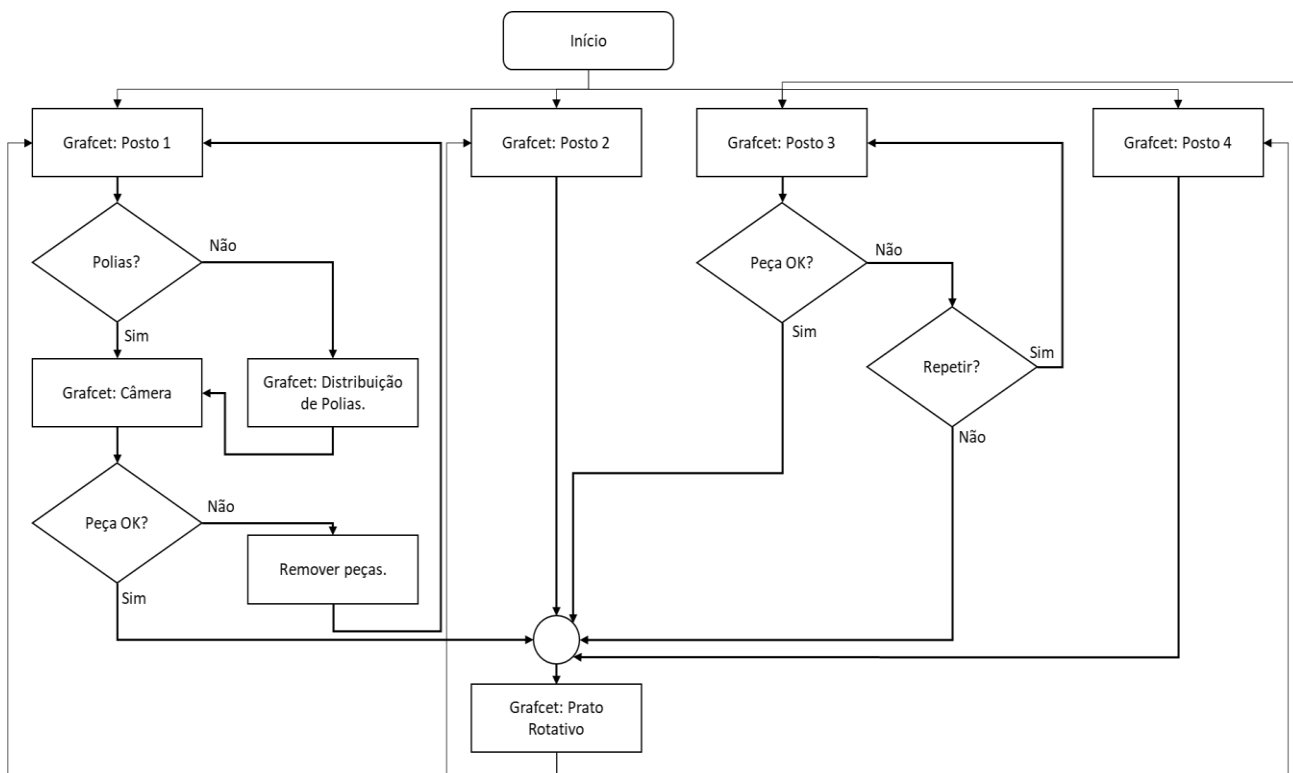


Figura 6-16: Fluxograma funcionamento geral da máquina.

## 6.7 Programação HMI

Após programação do PLC, procedeu-se à programação da HMI. Esta, tal como referido anteriormente, é a ponte entre o operador e a máquina e, como tal, deve ser fácil de operar e conter toda a informação relevante no que diz respeito à máquina.

Neste capítulo serão demonstrados alguns dos 43 ecrãs e funcionalidades que foram programadas para esta máquina, uma vez que seria exaustivo falar de todos os ecrãs desenvolvidos.

Para melhor perceber como navegar entre ecrãs e perceber algumas funcionalidades que resultam da programação da HMI, deve ter-se em atenção algumas observações gerais.

### 6.7.1 Observações gerais

O acesso aos diversos ecrãs que constituem a consola é feito através dos botões com nomes apropriados, a título de exemplo, ao pressionar o botão menu no ecrã principal irá surgir o ecrã menu, tal como o representado na Figura 6-17.

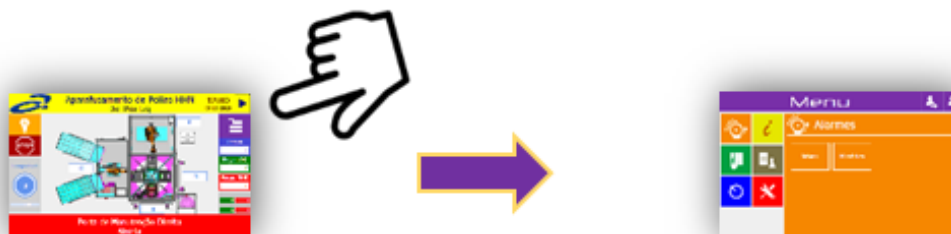


Figura 6-17: Exemplo de navegação entre ecrãs.

Quando se está perante um ecrã que não seja o principal e se deseja regressar a este, pressiona-se o botão com o símbolo de uma casa, Figura 6-18, localizado no canto superior esquerdo de cada ecrã. Exceção para os ecrãs que não possuem este botão, no entanto esta função é assegurada pela barra de título no topo do respetivo ecrã.



Figura 6-18: Botão *home*.

Para navegar entre ecrãs do mesmo grupo, quando é possível, existem botões de navegação com aspeto semelhante aos botões da Figura 6-19. Estes botões encontram-se localizados, normalmente, no canto superior direito de cada ecrã.

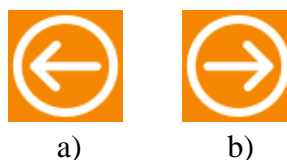


Figura 6-19: Botões de navegação entre ecrãs: a) ecrã anterior; b) ecrã seguinte.

Alguns dos ecrãs são constituídos por variáveis numéricas e permitem a edição do conteúdo. Para editar as variáveis, o operador pressiona o formulário em causa, desde que tenha permissão para tal, de forma a exibir o teclado onde deve introduzir o valor pretendido. A Figura 6-20 demonstra este teclado.



Figura 6-20: Teclado numérico.

Alguns dos ecrãs são constituídos por variáveis alfanuméricas e permitem a edição do conteúdo. Para editar as variáveis, o operador pressiona o formulário em causa, desde que tenha permissão para tal, de forma a exibir o teclado da Figura 6-21 onde deve introduzir o valor pretendido.

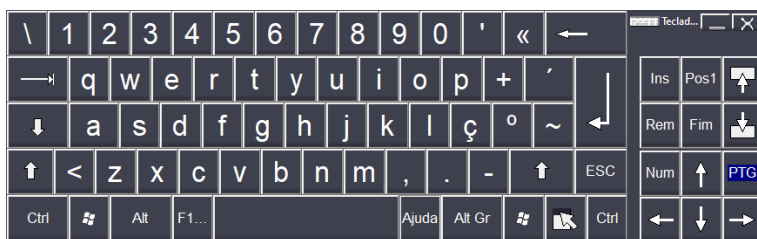


Figura 6-21: Teclado alfanumérico.

A sinalização relativamente ao posicionamento é feita através de indicadores visuais como os da Figura 6-22, localizados na imagem representativa do correspondente cilindro. No caso do atuador se encontrar fora da posição de alcance do detetor o indicador apresenta a cor branca, Figura 6-22 a), por outro lado se este se encontrar na posição de alcance do detetor a cor apresentada no indicador é a vermelha, Figura 6-22 b).



Figura 6-22: Indicadores dos sensores: a) sem detetar; b) a detetar.

### 6.7.2 Ecrã arranque

O ecrã arranque, tal como o nome indica, é apresentado no momento do arranque da máquina durante um período de cinco segundos. Entenda-se por arranque da máquina o momento a partir

do qual se liga o interruptor seccionador de corte geral da máquina. Decorrido o período mencionado, é apresentando o ecrã principal.

Este ecrã de boas-vindas, que pode ser observado na Figura 6-23, apresenta informações relativamente ao fabricante da máquina, nome, número e também a data e a hora atual.



Figura 6-23: Ecrã arranque.

### 6.7.3 Ecrã principal

O ecrã principal, representado na Figura 6-24, é apresentado durante o processo de montagem, todas as mensagens necessárias para a operação com a máquina são apresentadas neste ecrã. Depois de ligada a alimentação da máquina e decorrido o período de arranque é apresentando o ecrã principal.

Neste ecrã encontram-se três contadores que mostram ao operador o número total de ciclos, o total de ciclos OK e o número de ciclos NOK. É permitido ao operador que reinicie estes contadores, para isso basta pressionar sobre o contador pretendido durante um segundo. O tempo de ciclo é cronometrado enquanto o carril está a ser processado e uma vez concluído o resultado é apresentado ao operador durante três segundos, dando assim informação direta do tempo de produção atual.

Existe neste ecrã uma barra de mensagens onde são exibidos os erros ocorridos bem como as tarefas/procedimentos. Nesta barra a mensagem exibida será sempre a mais recente e será sempre dada prioridade às mensagens de erro. As mensagens de tarefas/procedimentos aparecem sobre o fundo verde com o respetivo procedimento. Por outro lado, as mensagens de erro aparecem sobre fundo vermelho com o respetivo procedimento de recuperação. Sempre

## 6 – Proposta de Solução – Máquina de aparafusamento de carris

que exista mais do que uma mensagem de erro, apenas é apresentado o erro com a prioridade mais alta.

Este ecrã também possui um botão de stop que, se for pressionado e a máquina estiver em ciclo automático, irá concluir as peças que se encontram no interior da máquina e terminar o ciclo automático, não permitindo que o operador coloque mais peças. Este procedimento é necessário sempre que se pretenda mudar a referência que a máquina está a produzir.



Figura 6-24: Ecrã principal.

No ecrã principal existe um submenu acessível através dum botão no canto superior direito, conforme demonstra a Figura 6-25.

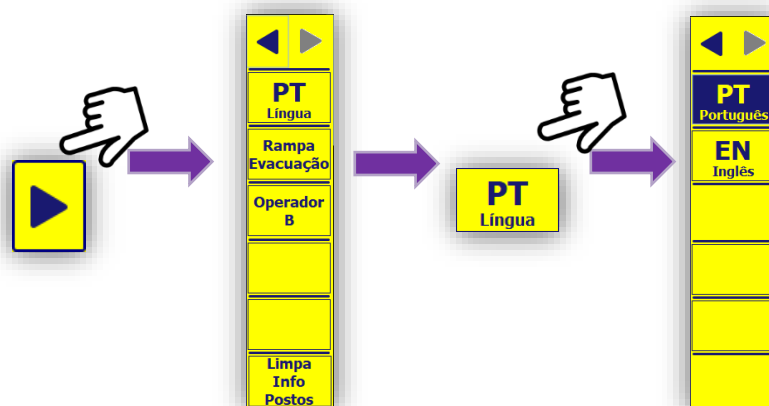


Figura 6-25: Submenu do ecrã principal.

Este submenu permite escolher a linguagem da interface, escolher quais as rampas de evacuação que o robô do posto 4 deve usar, habilitar ou não o posto 2 (operador B) e limpar a informação dos postos. Ao limpar a informação dos postos, a máquina assume que não existem peças no seu interior.

#### 6.7.4 Ecrã menu comando manual

O ecrã de menu do comando manual, Figura 6-26, oferece ao operador a capacidade de manusear qualquer componente individualmente, bem como visualizar a informação relativa ao estado ou posição desses mesmos componentes.



Figura 6-26: Ecrã menu comando manual.

Embora estejam presentes vários botões de acesso a ecrãs de controlo de componentes, neste menu de comando manual, apenas iremos falar sobre o prato indexador, o sistema de

distribuição de polias, as câmaras e sobre a segurança e LED's. Foram escolhidos estes ecrãs pois são os mais interessantes do ponto de vista de programação.

### 6.7.5 Ecrã comando manual prato indexador

O ecrã comando manual do prato indexador, permite verificar e alterar o estado dos pneumáticos associados ao funcionamento do prato indexador, avançado ou recuado, e visualizar o estado das deteções associadas a cada cilindro e presença de componentes necessários ao processo. Também é possível rodar o prato e verificar se algum erro ocorreu na sua rotação, assim como limpar esse erro através do botão *reset*. A Figura 6-27 mostra este ecrã.

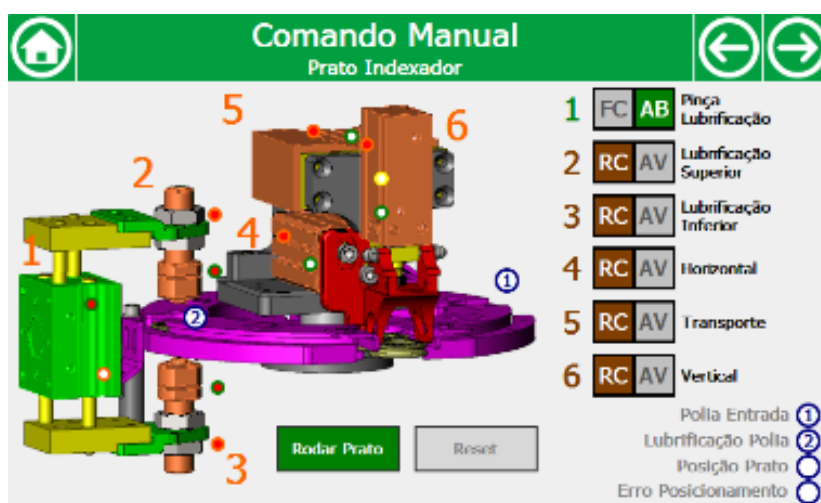


Figura 6-27: Ecrã comando manual do prato indexador.

### 6.7.6 Ecrã comando manual sistema distribuição de polias

O ecrã comando manual sistema distribuição de polias, Figura 6-28, permite verificar e alterar o estado do servomotor associado ao funcionamento da corrente de distribuição de polias. Podem-se executar testes de posição assim como testes de movimento do servomotor. Também é possível ver o estado dos detetores de presença de polias.

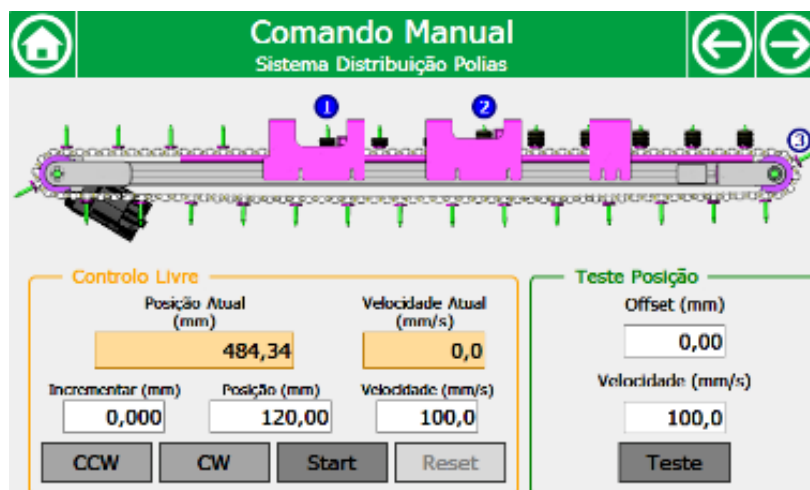


Figura 6-28: Ecrã comando manual do sistema de distribuição de polias.

### 6.7.7 Ecrã comando manual câmaras

O ecrã comando manual câmaras, permite escolher o programa do controlador da câmara e fazer testes às câmaras do posto 1 e 4, assim como verificar o resultado destes (OK ou NOK). Caso ocorra um erro no controlador da câmara, ao pressionar o botão *reset*, o operador elimina esse erro, deixando o controlador novamente operacional. A Figura 6-29 mostra este ecrã.

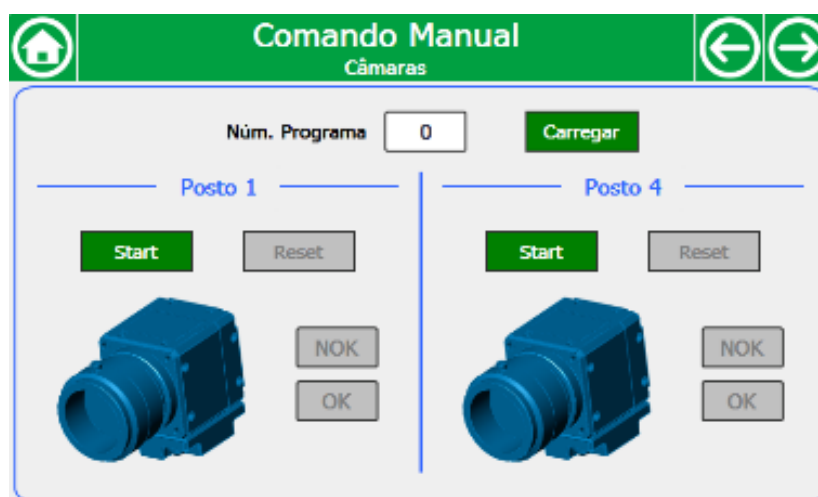


Figura 6-29: Ecrã do comando manual das câmaras.

### 6.7.8 Ecrã comando manual de segurança e LED's

O ecrã comando manual de segurança e LED's, permite verificar o estado dos componentes de segurança da máquina como as portas de segurança e as barreiras, assim como o estado dos LED's. Também é possível executar um teste aos sinais luminosos, fazendo-os ligar

alternadamente, para verificar o bom funcionamento da sinalização da máquina. A Figura 6-30 demonstra o ecrã referido.

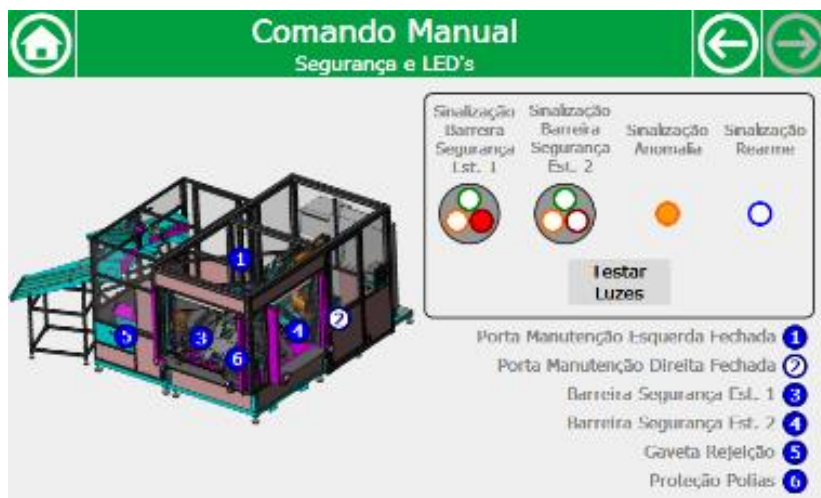


Figura 6-30: Ecrã comando manual da segurança e LED's.

## 6.8 Testes

Terminada a programação do PLC e da HMI foram executados inúmeros testes para garantir o bom funcionamento da máquina, garantindo que esta responde a qualquer necessidade por parte do operador.

Começou-se por testar a segurança da máquina, pois é a base de qualquer equipamento que inclua presença humana para funcionar. Verificou-se que a segurança cumpria os requisitos de tempo de reação e atuação.

De seguida, testou-se a programação geral da máquina, começando pelos alimentadores, para que os mecânicos possam ir testando a componente mecânica destes alimentadores, garantindo a cadência e ausência de encravamentos.

Após garantir a boa programação dos alimentadores, testou-se o resto do comando manual, para afinar os sensores da máquina.

Os testes do comando manual correram bem no geral e levaram a poucas alterações na programação do PLC.

Estava na altura de testar a programação da comunicação do PLC com os robôs. Estes testes foram mais exaustivos uma vez que havia muitos pontos a cobrir. Conseguiu-se criar uma

programação de base para o futuro que consegue gerir bem estes robôs da Kuka em termos de programação geral, assim como de programação de segurança.

Por fim, testou-se a programação do processo automático da máquina. Este processo não estava a cumprir o tempo de ciclo de 25 segundos que o cliente pediu, daí ter-se alterado um pouco a programação do PLC e do robô para otimizar o processo. No que diz respeito ao PLC, mudou-se o processo da máquina, para que o prato rotativo, que transporta as peças pelos postos, rodasse assim que o robô do posto 4 removesse a última peça. Anteriormente esperava que o robô deste posto terminasse de processar as duas peças, para que a o prato se movesse. No que diz respeito ao robô, o meu colega optimizou as trajetórias para que o robô do posto 4 fosse mais rápido a processar as peças. Mexeu-se no posto 4 pois era o posto com maior tempo de ciclo, o que definia o tempo de ciclo da máquina. Após estas alterações, verificou-se que o tempo de ciclo ia de encontro ao pretendido pelo cliente. A máquina ficou com um tempo de ciclo de 23 segundos, aproximadamente.

Após todos estes testes, o cliente visitou a empresa onde estava a ser desenvolvida a máquina e ficou bastante satisfeito com o processo em geral. Pediu apenas algumas alterações na HMI de forma a ser mais intuitiva para os operadores da empresa, e uma peça de ajuda a afinação dos pontos de aparafusamento.

## **6.9 Instalação da máquina no cliente**

Após validação da máquina por parte do cliente nas instalações da empresa onde o projeto foi desenvolvido, estava na altura de a instalar nas instalações do cliente em Vila Nova de Cerveira. Desloquei-me então com o desenhador da máquina, um electricista e o programador dos robôs, às instalações do cliente. O primeiro passo é montar a máquina, uma vez que esta se divide em duas partes para facilitar o transporte. Para tal, toda a equipa ajudou por forma a diminuir o tempo necessário à montagem.

Depois foi altura de afinar os componentes da máquina. Enquanto o meu colega verificava os pontos dos robôs através das *frames* colocadas na máquina, eu fui afinando as câmaras de visão artificial.

Uma vez que afinar as câmaras demorou muito menos tempo que afinar os pontos do robô, dirigi-me ao responsável do departamento das tecnologias de informação (TI) da empresa, uma vez que pediram que desenvolvesse uma base de dados no PLC com informação relativa ao processo. Esta base de dados contém informação sobre as peças OK e NOK, a referência a ser produzida assim como a data e hora a que são produzidas peças. Esta informação depois é enviada para o servidor da empresa do cliente, para posterior processamento, demonstrando que

## 6 – Proposta de Solução – Máquina de aparafusamento de carris

o cliente já utiliza algumas vertentes da indústria 4.0. Precisei então do responsável do departamento de TI para me ajudar a configurar o *switch ethernet* onde a rede do cliente se ligava à máquina. Configurou-se e testou-se exaustivamente esta base de dados para garantir o seu bom funcionamento e qualidade da informação enviada.

Após estes testes, fizeram-se várias peças de várias referências para garantir que a máquina continuava a ter o bom desempenho que demonstrou antes do transporte, assim como a facilidade de manuseamento por parte dos operadores.

Concluídos estes testes finais, o cliente validou a máquina e demos por concluída a instalação da mesma.

## 7. Conclusão

Ao analisar o trabalho desenvolvido, percebe-se que os objetivos definidos foram cumpridos. Os principais objetivos consistiam na programação de um robô de uma célula de inserção de agrafes que cumprisse quer em termos qualitativos como produtivos, os objetivos pretendidos pelo cliente; e na programação de um autômato, de uma HMI e de um sistema de visão artificial numa máquina com quatro postos que conseguisse aparafusar e verificar corretamente componentes em carris, num determinado tempo. Ambos os objetivos foram cumpridos, sendo que o objetivo referente ao robô não só cumpriu como excedeu o pretendido, permitindo uma maior produção de bens por parte do cliente, refletindo-se num ganho significativo para a empresa.

As duas máquinas foram sujeitas a testes exaustivos por parte da empresa que desenvolveu o equipamento e pelo cliente final. Estes testes demonstraram a flexibilidade, segurança e robustez de ambas as máquinas.

De realçar que o trabalho desenvolvido para ambas as máquinas englobou várias áreas da engenharia, como é o caso da robótica industrial, automação, visão artificial, entre outras. Sendo assim, para atingir o resultado final houve vários obstáculos a superar. Na área da robótica industrial, mais concretamente na máquina de inserção de agrafes, foi difícil criar soluções para que o robô conseguisse, de qualquer ponto da máquina (que tem dimensões reduzidas), retornar à posição de segurança de forma automática, sem colidir com nenhum obstáculo. No que diz respeito à automação da máquina de aparafusamento de carris, foi desafiante desenvolver a segurança da máquina, pois nunca antes o tinha feito. Além da segurança, outro desafio prendeu-se com estruturar a programação para que todos os postos funcionassem independentemente e estivessem prontos para qualquer eventualidade, assegurando a flexibilidade e tempo de ciclo da máquina. Também foi nesta máquina que me estreei na

## 7 – Conclusão

programação e parametrização de equipamento de visão artificial, o que se mostrou complexo uma vez que tive de avaliar soluções para iluminação ambiente, como o caso da iluminação por infravermelhos, e escolher ferramentas do software que permitissem avaliar corretamente os componentes das seis referências diferentes de carris.

## REFERÊNCIAS

- [1] “Industria 4.0” [Online] Disponível em: <https://www.ctcv.pt/bi.html> (Data de consulta: 28/06/2021)
- [2] “Revolução Industrial - Um pouco de história da Indústria 1.0 até a Indústria 4.0” [Online] Disponível em: <https://www.linkedin.com/pulse/revolu%C3%A7%C3%A3o-industrial-um-pouco-de-hist%C3%B3ria-da-10-at%C3%A9-boettcher/> (Data de consulta: 28/06/2021)
- [3] “O que é a Indústria 4.0 e como evoluiu até aqui” [Online] Disponível em: [https://www.moloni.pt/blog/dicas-e-conselhos/o-que-e-a-industria-4-0-e-como-evoluiu-ate-aqui?gclid=EAIAIQobChMI\\_Mn2kdzx8AIVchoGAB0pigB8EAAyAAEgJoUPD\\_BwE](https://www.moloni.pt/blog/dicas-e-conselhos/o-que-e-a-industria-4-0-e-como-evoluiu-ate-aqui?gclid=EAIAIQobChMI_Mn2kdzx8AIVchoGAB0pigB8EAAyAAEgJoUPD_BwE) (Data de consulta: 28/06/2021)
- [4] “Máquina a Vapor” [Online] Disponível em: <https://www.coladaweb.com/fisica/mecanica/maquina-a-vapor> (Data de consulta: 28/06/2021)
- [5] J. M. Ribeiro, “O Conceito da Indústria 4.0 na Confeção: Análise e Implementação”, Braga: Universidade do Minho.
- [6] P. Coelho, “Rumo à Indústria 4.0”, Coimbra: FCT-UC.
- [7] “O que é a IIoT? Descubra a Internet Industrial das Coisas” [Online] Disponível em: <https://www.iberdrola.com/inovacao/o-que-e-iiot> (Data de consulta: 22/05/2021)
- [8] “*Cyber-Physical System*” [Online] Disponível em: [https://en.wikipedia.org/wiki/Cyber-physical\\_system](https://en.wikipedia.org/wiki/Cyber-physical_system) (Data de consulta: 22/05/2021)
- [9] “*Big data*: principais usos e aplicações” [Online] Disponível em: <https://www.iberdrola.com/inovacao/o-que-e-o-big-data-e-para-que-serve> (Data de consulta: 22/05/2021)
- [10] “Indústria 4.0 - A nova revolução industrial da Europa” [Online] Disponível em: [https://www.jornaldenegocios.pt/opiniao/colunistas/roland-berger-consultants/detalhe/industria\\_40\\_a\\_nova\\_revolucao\\_industrial\\_da\\_europa](https://www.jornaldenegocios.pt/opiniao/colunistas/roland-berger-consultants/detalhe/industria_40_a_nova_revolucao_industrial_da_europa) (Data de consulta: 29/06/2021)

- [11] “*Industry 4.0 - A Policy Brief from the Policy Learning Platform on Research and innovation*” [Online] Disponível em: [https://www.interregeurope.eu/fileadmin/user\\_upload/plp\\_uploads/policy\\_briefs/INDUSTRY\\_4.0\\_Policy\\_Brief.pdf](https://www.interregeurope.eu/fileadmin/user_upload/plp_uploads/policy_briefs/INDUSTRY_4.0_Policy_Brief.pdf) (Data de consulta: 29/06/2021)
- [12] “Automóvel dá cartas na automação, mas futuro passa por indústria ‘*taylor made*’” [Online] Disponível em: <https://www.dinheirovivo.pt/economia/automovel-da-cartas-na-automacao-ma> (Data de consulta: 01/07/2021)
- [13] “Automação na indústria automobilística: o que você precisa saber?” [Online] Disponível em: <https://www.bit9.com.br/automacao-na-industria-automobilistica-o-que-voce-precisa-saber/> (Data de consulta: 01/07/2021)
- [14] “*THE ROLE OF AUTOMATION & ROBOTICS IN THE AUTOMOTIVE INDUSTRY*” [Online] Disponível em: <https://www.industr.com/en/the-role-of-automation-robotics-in-the-automotive-industry-2392939> (Data de consulta: 01/07/2021)
- [15] A. Ferrolho, Apontamentos das aulas de Robótica Industrial, Viseu: DEE-ESTGVIPV.
- [16] “*Robots Industrial Assembly-handling GP-series GP7*” [Online] Disponível em: <https://www.motoman.com/en-us/products/robots/industrial/assembly-handling/gp-series/gp7> (Data de consulta: 15/05/2021)
- [17] J. J. Craig (1986) “Introduction to Robotics Mechanics & Control”, Addison Wesley.
- [18] K. S. Fu, R. C. Gonzalez, C. S. G. Lee (1987) “Robotics: Control, Sensing, Vision, and Intelligence”, McGraw-Hill.
- [19] Phillip John McKerrow (1991) “Introduction to Robotics”, Addison-Wesley.
- [20] “*Catalog Product 1FK2104-4AF00-0MA0*” [Online] Disponível em: <https://mall.industry.siemens.com/mall/en/se/Catalog/Product/1FK2104-4AF00-0MA0> (Data de consulta: 15/05/2021)
- [21] “*Catalog Product 6SL3210-5HB10-4UF0*” [Online] Disponível em: <https://mall.industry.siemens.com/mall/en/WW/Catalog/Product/6SL3210-5HB10-4UF0> (Data de consulta: 15/05/2021)
- [22] “*KUKA KR 20 R1810-2*” [Online] Disponível em: [https://www.kuka.com/-/media/kuka-downloads/imported/6b77eacafe542d3b736af377562ecaa/0000321012\\_pt.pdf?rev=7eb5c38](https://www.kuka.com/-/media/kuka-downloads/imported/6b77eacafe542d3b736af377562ecaa/0000321012_pt.pdf?rev=7eb5c38)

[c8a2d4e6abddf449bc0727562&hash=2EE3DD4C7A53787A570DAA0368B2B1B3](https://www.kuka.com/-/media/kuka-corporate/images/products/controllers/kr_c4_steuerung_einzeln.jpg?rev=-1&w=767&hash=BAB73458210B1170E0797763D106187A) (Data de consulta: 15/05/2021)

[23] ”KUKA KR C4” [Online] Disponível em:  
[https://www.kuka.com/-/media/kuka-corporate/images/products/controllers/kr\\_c4\\_steuerung\\_einzeln.jpg?rev=-1&w=767&hash=BAB73458210B1170E0797763D106187A](https://www.kuka.com/-/media/kuka-corporate/images/products/controllers/kr_c4_steuerung_einzeln.jpg?rev=-1&w=767&hash=BAB73458210B1170E0797763D106187A) (Data de consulta: 15/05/2021)

[24] ”Process Controller C30s” [Online] Disponível em:  
<https://www.weber-online.com/en/control-systems/process-controller-c30s/> (Data de consulta: 15/05/2021)

[25] ”KUKA KR 10 R1420” [Online] Disponível em:  
[https://www.kuka.com/-/media/kuka-downloads/imported/6b77eecacfe542d3b736af377562ecaa/0000255784\\_en.pdf?rev=adecbfa0daa74840884511a11c8ba9ea&hash=211E74B583E7EC7E375297723FC08236](https://www.kuka.com/-/media/kuka-downloads/imported/6b77eecacfe542d3b736af377562ecaa/0000255784_en.pdf?rev=adecbfa0daa74840884511a11c8ba9ea&hash=211E74B583E7EC7E375297723FC08236) (Data de consulta: 15/05/2021)

[26] ”The New KUKA KR C4 Robot Controller” [Online] Disponível em:  
<https://www.robots.com/blogs/the-new-kuka-kr-c4-robot-controller> (Data de consulta: 15/05/2021)

[27] ”Rotomotion FIBRotor” [Online] Disponível em:  
<https://www.fibro.de/en/rotary-tables/product-groups/rotomotion/fibrotor/> (Data de consulta: 17/12/2020)

[28] ”Catalog Product 6SL3210-1KE12-3AF2” [Online] Disponível em:  
<https://mall.industry.siemens.com/mall/pt/pt/Catalog/Product/6SL3210-1KE12-3AF2> (Data de consulta: 15/05/2020)

[29] ”Catalog Product 6ES7513-1AL02-0AB0” [Online] Disponível em:  
<https://mall.industry.siemens.com/mall/pt/pt/Catalog/Product/6ES7513-1AL02-0AB0> (Data de consulta: 15/05/2020)

[30] ”PROFINET” [Online] Disponível em:  
<https://pt.wikipedia.org/wiki/PROFINET#PROFIsafe> (Data de consulta: 15/05/2021)

[31] Mikell P. Groover (2001) “Automation, Production Systems, and Computer Integrated Manufacturing”, USA: Prentice Hall.

[32] ”Catalog Product 6AV2124-0JC01-0AX0” [Online] Disponível em:

<https://mall.industry.siemens.com/mall/en/ww/Catalog/Product/6AV2124-0JC01-0AX0> (Data de consulta: 15/05/2020)

[33] ”*Products F3SG-4RE1200P14*” [Online] Disponível em:  
<https://industrial.omron.pt/pt/products/F3SG-4RE1200P14> (Data de consulta: 17/12/2020)

[34] ”*Interruptor segurança metálico xcslf - 5 nc+1 no- pausa lenta- 3 entradas roscadas m20 - 24v*” [Online] Disponível em:

<https://www.se.com/pt/pt/product/XCSLF3837512/interruptor-seguran%C3%A7a-met%C3%A1lico-xcslf---5-nc%2B1-no--pausa-lenta--3-entradas-roscadas-m20---24v/> (Data de consulta: 15/05/2020)

[35] ”*Cabeça botão de pressão ø40 paragem de emergência vermelha - rodar para libertar*” [Online] Disponível em:

<https://www.se.com/pt/pt/product/ZB5AS844/cabe%C3%A7a-bot%C3%A3o-de-press%C3%A3o-%C3%B840-paragem-de-emerg%C3%Aancia-vermelha---rodar-para-libertar/> (Data de consulta: 15/05/2020)

[36] António M.S. Francisco “Autómatos Programáveis”, Portugal: ETEP.

[37] J. R. Caldas Pinto “Técnicas de Automação”, Portugal: ETEP.

[38] José Novais “Programação de Autómatos, Método GRAFCET”, Fundação Calouste Gulbenkian.

