



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR
Engenharia

Sistema automatizado de inserção de terminais em conectores de cablagens

Tiago Pinheiro Patrício

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Electrotécnica e de Computadores: Ramo Sistemas Biónicos
(2º ciclo de estudos)

Orientador: Prof. Doutor Pedro Dinis Gaspar

Covilhã, Outubro de 2013

Agradecimentos

Gostaria de expressar o meu agradecimento a todos aqueles que, de variadas formas, suavizaram a longa viagem cujo destino resultou no trabalho que a seguir apresento. Na impossibilidade de enunciar aqui todas as pessoas que me deram algum tipo de contributo, não poderia deixar de destacar certas pessoas pela forma como se excederam na ajuda que me foram constantemente prestando.

Ao meu orientador, o Professor Doutor Pedro Dinis Gaspar, pela oportunidade que me concedeu de realizar este trabalho, pela boa disposição, simplicidade e sabedoria com que me orientou e pela confiança que depositou no meu trabalho e nas minhas capacidades.

Ao meu co-orientador, o Professor Doutor Sílvio Mariano, pela sua disponibilidade, crítica e motivação e pelos recursos que colocou a minha disposição.

Ao Engenheiro António Barata, pela disponibilidade e forma como me recebeu no seu local de trabalho, como também pela sua experiência e comentários críticos que deram um rumo a este trabalho.

Ao Engenheiro Paulo oliveira, pela simpatia, disponibilidade e o empenho que dedicou a parte deste projeto.

Ao Engenheiro José Pombo, pelas suas sugestões, pelo tempo que dedicou para me ajudar e pela forma como me transmitiu os seus conhecimentos.

A todos os amigos que fiz na UBI, com particular destaque para o Henrique Saraiva e Paulo Gouveia, pela amizade, apoio e ajuda que me deram ao longo deste período.

E, por fim, aos meus pais, Jacinto Patrício e Isabel Pinheiro, pela vida que me proporcionaram em detrimento de muitos sacrifícios e pela compreensão, carinho e amor que sempre me deram.

Um sincero obrigado a todos!

Resumo

O processo manual de inserção de terminais em conectores para produção de cablagens é um processo complexo, moroso e propenso a falhas e erros. Embora exista uma grande variedade de conectores e terminais, o processo de inserção propriamente dito, segue sempre o mesmo procedimento de execução. Por este motivo, propõe-se nesta dissertação o projeto de um sistema automatizado que visa mecanizar o processo de inserção de terminais em conectores com o objetivo de reduzir o tempo de operação, libertando o colaborador para outras funções, e de melhorar a qualidade final das cablagens por diminuição das falhas decorrentes do procedimento manual. A concepção do sistema aqui apresentado inclui o design da estrutura, desde um esboço inicial ao modelo final, a seleção dos vários elementos atuadores e sensores que o integram, até ao desenvolvimento de um sistema de controlo de posicionamento do manipulador robótico cartesiano do sistema. O sistema de controlo inclui a programação do autómato programável destinado ao controlo, regulação e comando do sistema, assim como do interface homem-máquina e criação do respetivo interface gráfico destinado à monitorização e definição de parâmetros de operação do sistema. É também apresentado um protótipo do sistema de posicionamento, que constitui uma parte do sistema robotizado de inserção de terminais em conectores, de modo a permitir avaliar o seu desempenho na realização das tarefas anteriormente propostas a executar.

Palavras-chave

Inserção; terminais; conectores; sistema robotizado; atuadores; sensores; sistema de controlo; interface gráfico; protótipo.

Abstract

The manual process of inserting terminals on connectors for production of wiring harness is a complex process, slow and prone to failures. Although there are a wide range of connectors and terminals, the insertion process itself, always follows the same execution procedure. For this reason, we propose in this dissertation an automated system that aims to mechanize the insertion process of terminals in connectors in order to reduce the operation time, releasing the collaborators for other functions, and to improve quality, decreasing the number of failures from the manual process. The conception of the project includes the structure design, starting from an initial sketch to the final model, the selection of various actuators and sensors that compose the system and the development of a control system of the Cartesian robotic manipulator. The control system includes the programmable logic controller programming for the control, regulation and command of the system, and human-machine interface programming and its graphical interface for monitoring and definition of operation parameters of the system. It is presented a prototype of the positioning system that is part of the robotic system for insertion of terminals in connectors, in order to evaluate its performance in the execution of the tasks previously proposed.

Keywords

Insertion; terminals; connectors; robotic system; actuators; sensors; control system; graphical interface; prototype.

Índice

Agradecimentos	i
Resumo	iii
Abstract	v
Índice	vii
Lista de Figuras.....	ix
Lista de Tabelas	xiii
Nomenclatura.....	xv
1. Introdução	17
1.1. Enquadramento	17
1.2. O problema em estudo e a sua relevância	18
1.3. Objetivos e contribuição da dissertação	18
1.4. Visão geral e organização da dissertação	19
2. Estado da Arte	21
2.1. Introdução	21
2.2. Sistemas automatizados	21
2.3. Pinças robóticas.....	24
2.4. Manipuladores cartesianos	27
2.5. Braços robóticos	30
2.6. Nota conclusiva	31
3. Desenvolvimento do Sistema Automatizado	33
3.1. Estrutura física	33
3.1.1. Esboço inicial	33
3.1.2. Sistema final	35
3.2. Atuadores	40
3.2.1. Atuadores elétricos	42
3.2.2. Atuadores eletromecânicos	42
3.2.3. Atuadores eletromagnéticos	43
3.2.4. Atuadores pneumáticos e hidráulicos	43
3.2.5. Descrição dos atuadores do sistema	43
3.3. Sensores	46
3.3.1. Sensores de posição	48

3.3.2.	Sensores de aceleração	48
3.3.3.	Sensores de força, binário e pressão	48
3.3.4.	Sensores de proximidade	48
3.3.5.	Sensores de luminosidade	49
3.3.6.	Descrição dos sensores do sistema	49
3.4.	Nota conclusiva	51
4.	Sistema de Controlo	53
4.1.	Dispositivo de controlo do sistema	53
4.1.1.	Características do PLC	55
4.2.	Programação.....	57
4.3.	Interface gráfico do utilizador	67
4.4.	Nota conclusiva	70
5.	Protótipo do Sistema Automatizado	71
5.1.	Introdução	71
5.2.	Esquema de montagem do sistema	73
5.3.	Programa elaborado.....	74
5.4.	Interface gráfico criado	85
5.5.	Nota conclusiva	88
6.	Análise e Discussão dos Resultados	89
6.1.	Otimização do controlador.....	89
6.1.1.	Resultados Obtidos.....	92
6.2.	Análise do desempenho do sistema	97
6.3.	Nota conclusiva	97
7.	Conclusões.....	99
7.1.	Análise do desempenho.....	99
7.2.	Sugestões de trabalhos futuros.....	100
8.	Referências bibliográficas.....	101
9.	Anexos.....	105
9.1.	Anexo I - Programa do sistema automatizado.	105
9.2.	Anexo II - Interface gráfico do sistema automatizado.	111

Lista de Figuras

Figura 1 - Fios com vários tipos de terminais cravados.	17
Figura 2 - Conectores.....	18
Figura 3 - Cabeça de inserção da máquina Zeta 651 [1].	22
Figura 4 - Vista anterior da Zeta 656 [1].	22
Figura 5- P350 Pin Insertion Machine da TE Connectivity [2].	23
Figura 6 - Vista anterior do prototipo robô pick and place [3].	24
Figura 7 - Pinça robótica inteligente segurando dois objetos diferentes [4].	24
Figura 8 - Pinça robótica magnetoreologica segurando uma bola [5].	25
Figura 9 - (A) Vista inferior da pinça robótica de material granular segurando objeto. (B) Esquema de operação [6].	26
Figura 10 - Esquema da swirl gripper [7].	26
Figura 11 - Esquema conceitual do mecanismo paralelogramico [9].	27
Figura 12 - Vista de um manipulador robótico cartesiano [11].	29
Figura 13 - Esquema de um manipulador paralelo cartesiano [12].	29
Figura 14 - Braço robótico fazendo caligrafia chinesa [13].	30
Figura 15 - Vista esquemática do actuador DEMED do braço superior [14].	31
Figura 16 - Esboço inicial do sistema automatizado (As setas " " representam os movimentos das estruturas representadas).	34
Figura 17 - Estruturas 3, 4 e 5 do primeiro esboço, respectivamente.	34
Figura 18 - Sistema que transfere os conectores da estrutura 1 para a estrutura 3 da Figura 14.	35
Figura 19 - Visão geral do sistema automatizado final.	36
Figura 20 - Estrutura que aloca os fios na vertical.....	37
Figura 21 - Estrutura que aloja os conectores, com respectivos movimentos dos actuadores que o constituem.	37
Figura 22 - Ilustração do manipulador robótico e de alguns dos movimentos dos actuadores que o caracterizam.....	38
Figura 23 - Ilustração do movimento do manipulador que permite enrolar os fios.	39
Figura 24 - Ilustração do manipulador libertando o fio enrolado.	39
Figura 25 - Guias lineares (esquerda) e guias em fuso (direita)	44
Figura 26 - Pinças robóticas do sistema.	45
Figura 27 - Actuadores biestáveis com accionamento on/off do sistema.	46

Figura 28 - Posição dos sensores ópticos.	50
Figura 29 - Representação da força de inserção.	51
Figura 30 - Esquema básico de um sistema de controlo.	53
Figura 31 - Painel de relés em analogia ao PLC.	54
Figura 32 - Estrutura básica de um PLC.....	54
Figura 33 - Ciclo de varrimento de um PLC.	54
Figura 34 - SIMATIC S7-1200.	57
Figura 35 - Visão geral do ambiente de trabalho do TIA Portal.	58
Figura 36 - Esquema da estrutura do programa.	59
Figura 37 - Contactos NA e NF em paralelo e em série.	61
Figura 38 - SIMATIC HMI KTP600.....	67
Figura 39 - Exemplo de um screen com vários tipos de objetos.....	68
Figura 40 - Twin Line Servodrive TLD132F da Berger Lahr.	71
Figura 41 - Esquema de ligações do circuito elétrico do sistema.	73
Figura 42 - Código de cores que ilustra as ligações ao interface de sinais do controlador.	74
Figura 43 - Fluxograma exemplificativo da rotina de posicionamento relativo.	75
Figura 44 - Rotina de calibração e de posicionamento absoluto.	76
Figura 45 - Rotina que realiza sequências de posicionamento absoluto.	77
Figura 46 - Instruções do bloco hardware interrupt.	78
Figura 47 - Instruções do block_1, parte 1.	79
Figura 48 - Instruções do block_1, parte 2.	79
Figura 49 - Instruções do block_1, parte 3.	80
Figura 50 - Instruções do block_3.	81
Figura 51 - Instruções do block_4, parte 1.	81
Figura 52 - Instruções do block_4, parte 2.	82
Figura 53 - Instruções do bloco Main, parte 1.	83
Figura 54 - Instruções do bloco Main, parte 2.	83
Figura 55 - Instruções do bloco Main, parte 3.	84
Figura 56 - Instruções do bloco Main, parte 4.	85
Figura 57 - (1) Main screen (2) Screen 1 (3) Screen 2 (4) Screen 3	86
Figura 58 - Interconexão entre screens.	86
Figura 59 - Estrutura do controlador [24].	89
Figura 60 - Diagrama de blocos do controlador em controlo de corrente.	90
Figura 61 - Diagrama de blocos em controlo de velocidade.	90
Figura 62 - Sistema de malha fechada com controlador proporcional [26].	91
Figura 63 - Oscilações sustentáveis com o período P_{cr} [26].	91
Figura 64 - Resposta obtida para diferentes valores de K_{Pn}	92

Figura 65 - Resposta obtida para os valores de $KP_n=0,02$, $TN_n=3,76$, $KFP_n=0$, $KFD_n=0$ e $TV_n=0$.	93
Figura 66 - Resposta para diferentes valores de KFP_n .	94
Figura 67 - Resposta obtida para diferentes valores de KFD_n .	95
Figura 68 - Resposta obtida para os valores de $KP_n=0,02$, $TN_n=3,76$, $KFP_n=0,0001$, $KFD_n=0,000001$ e $TV_n=0$.	96
Figura 69 - Instalação experimental onde foram realizados os testes.	96
Figura 70 - Instruções do block_1, parte 1.	105
Figura 71 - Instruções do block_1, parte 2.	106
Figura 72 - Instruções do block_1, parte 3.	106
Figura 73 - Instruções que controlam a abertura e o fecho da pinça 1 (block_2).	107
Figura 74 - Instruções que controlam a abertura e o fecho da pinça 2 (block_2).	107
Figura 75 - Instruções do block_3, parte 1.	108
Figura 76 - instruções do block_3, parte 2.	108
Figura 77 - Instruções do block_4, parte 1.	108
Figura 78 - Instruções do block_4, parte 2.	109
Figura 79 - Instruções do block_5, parte 1.	109
Figura 80 - Instruções do block_5, parte 2.	110
Figura 81 - Screens do interface gráfico.	111
Figura 82 - Interligação entre os screens.	112

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Principais tipos de actuadores e suas características [19]	41
Tabela 2 - Tipos de sensores e características [19]	47
Tabela 3 - Áreas da memória.	60
Tabela 4 - Contatos.....	60
Tabela 5 - Bobines de saída.	61
Tabela 6 - Temporizadores.....	62
Tabela 7 - Contadores.	63
Tabela 8 - Instruções de Comparação.	63
Tabela 9 - Instruções matemáticas.	64
Tabela 10 - Instruções Move.	65
Tabela 11 - Instrução de conversão.	65
Tabela 12 - Instruções de controlo do fluxo do programa.	66
Tabela 13 - Instruções de tecnologias.....	66
Tabela 14 - Basic objects.....	69
Tabela 15 - Elements.....	69
Tabela 16 - Controls.....	69
Tabela 17 - Significado das ligações do interface de sinais do controlador [24].	72
Tabela 18 - Botões do Main screen.	87
Tabela 19 - Botões comuns dos Screens 1, 2 e 3.	87
Tabela 20 - Outros objetos dos Screens 1, 2 e 3.	88
Tabela 21 - Parâmetros de controlo do controlador de velocidade.	91
Tabela 22 - Fórmulas para o ajuste dos parâmetros baseado no ganho K_{cr} e periodo crítico P_{cr}	92
Tabela 23 - Características das respostas obtidas para diferentes valores de K_{FPn}	94
Tabela 24 - Características das respostas obtidas para diferentes valores de K_{FPn}	95

Nomenclatura

Geral:

θ_i	Angulo, [rad];
d_i	Deslocamento da junta, [mm];
p_i	Passo do parafuso, [mm];
K_p	Ganho proporcional;
T_i	Tempo integral;
T_d	Tempo derivativo;
K_{cr}	Ganho crítico;
P_{cr}	Período crítico, [ms];
t_r	Tempo de subida, [ms];
t_p	Tempo de pico, [ms];
t_s	Tempo de estabelecimento, [ms];
S	Erro, [%];

Acrónimos:

PCB	Printed circuit board;
CRM	Cartesian robot manipulator;
CPM	Cartesian parallel manipulator;
DEMED	Dual Excitation Multiphase Eletrostatic Drive;
HSV	Hue, Saturation and Value;
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor;
LVDT	Linear variable differential transformer;
RVDT	Rotatory variable differential transformer;
CLP	Controlador Lógico Programável;
PLC	Programmable Logic Controller;
CPU	Central Processing Unit;
HSC	High Speed Counter;

PWM Pulse-width modulation;
HMI Human-machine interface.

1. Introdução

1.1. Enquadramento

As cablagens resultam de um complexo processo de fabrico manual. Este processo de fabrico encontra-se implementado numa empresa em particular que serviu de base de estudo para o trabalho desenvolvido na presente dissertação. A empresa é a Delphi Automotive Systems - Portugal, Unip., Lda, dedicada à produção de um variado conjunto de equipamentos para o ramo automóvel. Nesta empresa, o processo de fabrico das cablagens consiste na evolução do produto por várias etapas. Primeiramente, numa secção inicial, os fios são cortados com diferentes comprimentos de acordo com as suas especificações e são cravados os terminais nas suas extremidades (ver Figura 1). Após finalização deste processo, os fios são enrolados e separados pelas suas especificações, para posteriormente serem enviados para uma secção denominada de “Kits”. Nesta secção, os fios são desenrolados e colocados em depósitos mantendo os fios com especificações diferentes separados. De seguida, estando todo o material reunido e separado (isto é, os conectores e os diferentes fios necessários à produção de uma cablagem), um colaborador dá início ao processo de inserção dos terminais nos conetores (Figura 2). Para realizar esta tarefa, o colaborador segue um mapa que indica qual o fio que deve inserir em cada pino do conector para produzir uma determinada cablagem. Depois de concluir o processo de inserção e para finalizar a produção da cablagem, os conjuntos de fios que se encontram inseridos no mesmo conector são encapados em conjunto, de modo a mantê-los agrupados e evitar que a cablagem seja danificada por fios que se encontrarem soltos. Após conclusão desta tarefa, a cablagem encontra-se terminada, pelo que é reencaminhada para a secção de qualidade. Caso a cablagem passe nos testes de estanquicidade e de conformidade de ligações elétricas nos conetores, é reencaminhada para a secção de expedição. Caso contrário, a equipa de qualidade tenta identificar o erro e corrigi-lo. Todavia, esta tarefa, para além de demorada, por vezes não é mesmo possível, incorrendo na recusa da cablagem.



Figura 1 - Fios com vários tipos de terminais cravados.



Figura 2 - Conectores.

1.2. O problema em estudo e a sua relevância

O método de produção de uma cablagem apresentado anteriormente possui algumas inconveniências. É um método que necessita de muita mão-de-obra, visto que todo o processo de produção da cablagem é controlado pelo homem sem recorrer a automatismos. As várias fases do processo estão dependentes do constante abastecimento de material, isto é, o colaborador que faz a inserção dos terminais nos conectores está dependente de colaboradores que trazem os fios e os colocam nos depósitos, que por sua vez também estão dependentes dos colaboradores que cravam os terminais nos fios. Para atenuar estes efeitos, o material vai sendo armazenado nas várias secções de modo a criar algum stock, o que significa que grande parte da área útil da fábrica serve para contenção do material. Mesmo assim, isto representa um problema de grande importância, porque para além de uma paragem num sector primário afetar todos os outros sectores em cadeia, representa um investimento inicial elevado que não é lucrativo para a empresa porque se encontra imóvel.

1.3. Objetivos e contribuição da dissertação

Propõe-se nesta dissertação o desenvolvimento de um sistema automatizado de inserção de terminais em conectores de cablagens, com o objetivo de corrigir ou melhorar algumas características do processo de produção das cablagens e, como consequência aumentar a produção das empresas que usufruem deste tipo de sistema automatizado. Assim, inserido na secção de inserção de terminais, pretende-se que o sistema aumente a produtividade desta mesma secção através do melhoramento dos tempos de execução das tarefas, como também aumente a qualidade final da cablagem produzida. Prevê-se também, que o sistema possa libertar área útil de solo que poderá ser utilizada para novas linhas de montagem. De modo a criar um sistema viável, apresentam-se algumas características importantes que o sistema deve possuir: (1) Deve ser um sistema autónomo, que requer a mínima atenção possível do colaborador, mas que possui um determinado interface que forneça informação sobre o seu estado de funcionamento; (2) Deve ser muito flexível, isto é, este sistema deve ser capaz de lidar com uma grande variedade de terminais e conectores estruturalmente diferentes entre si; (3) Deve ser expedito, ou seja, pretende-se que o sistema não ultrapasse os tempos de inserção praticados pelo homem; (4) Deve ser programável, de modo que seja possível introduzir novas

seqüências de inserção de terminais nos conectores; (5) Deve ser escalável, isto é, permitir, caso seja necessário, a possibilidade de expansão do equipamento, com o intuito de alojar mais cabos ou mais conectores.

1.4. Visão geral e organização da dissertação

Neste trabalho, o projeto do sistema de inserção de terminais em conectores de cablagem será desenvolvido ao longo de vários capítulos.

No capítulo inicial, apresenta-se enquadramento do tema, o problema em estudo e a sua relevância, assim como os objetivos propostos e qual a contribuição da presente dissertação.

De seguida, no capítulo 2 é apresentado o estado da arte, que consiste num estudo bibliográfico que fornece algum conhecimento científico desenvolvido sobre esta temática.

No capítulo 3 é discutida a estrutura física do sistema, assim como os sensores e atuadores escolhidos para constituir o sistema.

No capítulo 4, dedicado ao sistema de controlo, é apresentado o dispositivo escolhido para controlar o sistema, é realizada uma breve abordagem sobre suas características de programação. É também, apresentado um dispositivo capaz de criar um interface gráfico que monitoriza e controla o dispositivo de controlo.

De seguida, no capítulo 5 é descrito e apresentado o protótipo desenvolvido, sendo discutidas as capacidades e características do equipamento através de testes experimentais realizados.

Por último, no capítulo 6 é analisado e discutido todo o trabalho efetuado, e são indicadas as sugestões de trabalho futuro.

2. Estado da Arte

2.1. Introdução

Um estado da arte consiste em levantamentos e revisões do conhecimento produzido sobre determinado tema, que permite aos interessados perceberem a evolução das pesquisas na área, bem como suas características e foco, além de identificar as lacunas ainda existentes. Assim, o Estado da Arte é uma parte fundamental de todo trabalho científico, uma vez que faz referência aos estudos relevantes para um determinado tema, permitindo evitar o percurso por caminhos errôneos já desvendados por outros autores, assim como para utilizar as boas práticas e conhecimentos adquiridos.

No Estado da Arte do presente trabalho, a explicação científica faz-se em duas partes. A primeira parte consiste no estudo de alguns exemplos de sistemas automatizados de inserção de terminais em conectores, ou outras tipologias semelhantes. A segunda parte consiste no estudo de vários componentes que poderão constituir estes sistemas automatizados, tais como pinças robóticas, manipuladores cartesianos e braços robóticos.

2.2. Sistemas automatizados

A Komax [1] (empresa tecnológica focada no mercado do sector de automação) possui dois sistemas automatizados para a inserção de terminais em conectores: a Zeta 651 *Fully automatic wire crimping machine* e a Zeta 656 *Fully automatic wire crimping machine*. Tanto a Zeta 651 como a Zeta 656, estão preparadas para serem abastecidas com fios que contêm os terminais cravados produzidos pela Zeta 633 *fully automatic crimping machine*.

A Zeta 651 é uma máquina automática que controla todo o processo de inserção do terminal no conector até ao seu travamento. Com a Zeta 651, os terminais são mecanicamente centrados, e opcionalmente girados, antes de serem inseridos. Para além dos vários sistemas de controlo providos pelos seus sensores, a Zeta 651 utiliza uma cabeça de inserção que direciona o terminal aquando da sua inserção, garantindo a perfeita inserção do terminal no conector (ver Figura 3). Esta máquina pode ser reabastecida com os componentes mesmo quando se encontra em funcionamento. Possui também um sistema de depósito que pode ser adaptado a diferentes necessidades, podendo fazer uma determinada separação previamente programada. Opera cabos com secções entre os 0,22 mm² até 4 mm² e com comprimentos entre os 85 mm até 3000 mm. Cada operação de inserção de um terminal no conector demora um ciclo de 1,5 segundos.

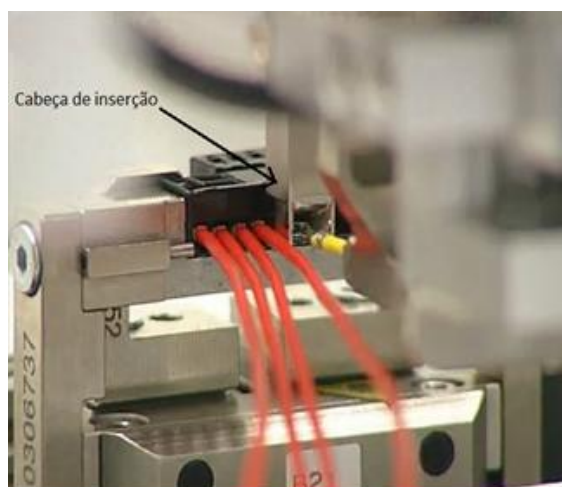


Figura 3 - Cabeça de inserção da máquina Zeta 651 [1].

A Zeta 656 (ver Figura 4) é uma máquina automática de inserção mais sofisticada do que a Zeta 651. A Zeta 656 foi concebida para executar duas operações de inserção distintas ao mesmo tempo em lados opostos. Com a sua tecnologia de inserção de elevada precisão, a Zeta 656 é capaz de processar secções transversais de fios de $0,13 \text{ mm}^2$ com um espaçamento de $1,25 \text{ mm}$ no conector. Por este motivo, não possui a cabeça de inserção que possui a Zeta 651. Da pré-inserção e inserção efetiva até à inserção final e ao teste de travamento, o processo de inserção é monitorizado por um sensor de pressão integrado com o fim de garantir uma elevada qualidade de inserção. Eixos de movimento precisos produzidos por acionamento por fuso permitem processos de inserção de elevada dinâmica e rapidez. Possui uma opção “pós produção”, que é usada para substituir terminais incorretamente cravados e encaixá-los com os componentes automaticamente, sem ser necessária qualquer intervenção do operador. Tal como a Zeta 651, cada operação de inserção demora aproximadamente 1,5 segundos dependendo do comprimento dos fios. Possui também uma característica importante: a Zeta 656 insere o primeiro terminal do fio num conector mas a outra extremidade do fio, o segundo terminal, poderá ser inserido em dois conectores distintos mediante a sua programação.



Figura 4 - Vista anterior da Zeta 656 [1].

Outro tipo de máquinas de inserção, são as máquinas de inserção de componentes em placas PCB (*Printed circuit board*). Um exemplo de uma destas máquinas é a *P350 Pin Insertion Machine* (ver Figura 5) da TE Connectivity [2]. A P350 é totalmente focada na velocidade de operação automática, capaz de inserir cinco componentes por segundo, com o objetivo de aumentar a produção e reduzir os custos residuais. Processa placas de até 450 x 450 mm² que são posicionadas numa mesa X/Y por motores de passo. A mesa X/Y movida por um servomotor posiciona a placa PCB sob uma estação de acionamento central (local onde ocorre a inserção dos componentes) a elevada velocidade. Pode trocar automaticamente até 3 cabeças de inserção pré-definidas, em que cada uma é capaz de aplicar um componente diferente. A cabeça de inserção rotativa permite aplicar os componentes em até 7 ângulos diferentes sem ter de girar o PCB, o que lhe permite manter a velocidade de inserção e minimizar os erros provocados pela rotação do PCB através do servomotor. Possui uma bigorna ativa inferior que fornece suporte ao PCB durante a inserção e, em casos especiais, pode também soldar os componentes (quando aplicável) e monitoriza em tempo real as forças envolvidas em aplicações de prensagem. Possui também uma tela de toque que oferece ao operador um interface intuitivo e simples de usar.



Figura 5- P350 Pin Insertion Machine da TE Connectivity [2].

Uma máquina de inserção pode ser vista como um robô “pick and place” (robô de posicionamento). Aravind *et al.* [3] desenvolveram um robô “pick and place” semiautomático de dois graus de liberdade bastante simples para sistemas de manuseio de materiais (ver Figura 6). Este robô deteta o objeto, o que ativa o motor de uma pinça robótica, pegando o objeto a partir de uma plataforma. De seguida, a ativação de um interruptor move a pinça de acordo com um trajeto definido até outra plataforma de destino. A ativação de um segundo interruptor liberta o objeto num cesto ou recipiente na plataforma de destino. Para que a pinça volte a posição inicial é ativado o primeiro interruptor na direção oposta, ficando pronto para agarrar um novo objeto.

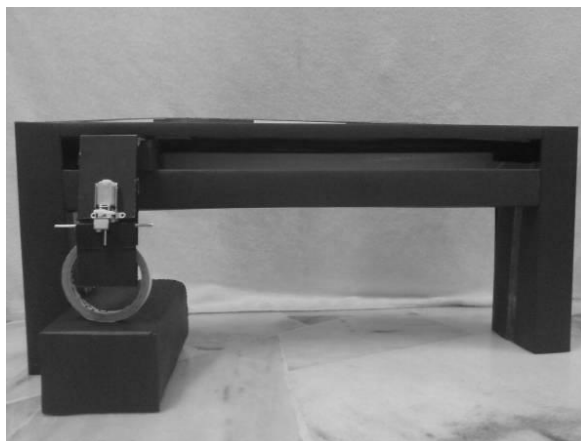


Figura 6 - Vista anterior do protótipo robô pick and place [3].

2.3. Pinças robóticas

Um constituinte importante de uma máquina de inserção, é a ferramenta que tem como função pegar nos fios ou nos seus terminais, segurá-los aquando do seu deslocamento e libertá-los no devido lugar. As pinças ou mãos robóticas são as ferramentas mais comuns no desempenho destas tarefas. Por este motivo, serão abordados de seguida várias tecnologias desenvolvidas nesta área.

Kim [4] desenvolveu um sensor de força de três eixos para ser aplicado a uma pinça robótica. Assim, criou uma pinça inteligente com dois destes sensores de força capaz de agarrar objetos desconhecidos com estabilidade conforme exemplificado na Figura 7. Esta pinça inteligente, para agarrar os objetos com segurança, mede as forças na direção de agarrar e na direção da gravidade, e realiza o controlo de forças em função das medições efetuadas. Portanto, o sensor de força de 3 eixos que compõe a pinça robótica mede as forças F_x , F_y e F_z simultaneamente. Foram realizados testes característicos para os sensores fabricados e os erros de interferências dos sensores desenvolvidos eram menores do que 3%.



Figura 7 - Pinça robótica inteligente segurando dois objetos diferentes [4].

Os produtos alimentares são frequentemente variáveis na forma e estragam-se com relativa facilidade, por isso são de difícil manuseamento para um robô. De forma a resolver este problema, Pettersson *et al.* [5] apresentaram uma pinça robótica que faz uso do efeito de um fluido magneto-reológico (MR). Um fluido magneto-reológico é um fluido cujas propriedades reológicas mudam quando um campo magnético é aplicado, ou seja, em condições normais apresenta um comportamento de fluido Newtoniano mas na presença de um campo magnético apresenta resistência à deformação. Este fluido está em bolsas que se encontram nas extremidades internas da pinça robótica, de maneira que quando agarram um determinado produto, o fluido vai deformar-se adquirindo os contornos do produto. É nesta altura que é aplicado um campo magnético através de eletroímãs, que induzem uma resistência à deformação fazendo com que o produto fique confinado ao molde criado. Esta característica encontra-se exemplificada na Figura 8.



Figura 8 - Pinça robótica magnetoreologica segurando uma bola [5].

Existem outros tipos de pinças robóticas que fazem uso do mesmo princípio de funcionamento anterior, como é o caso da pinça robótica baseada na compressão de material granular [6] conforme exposto na

Figura 9. Trata-se de uma pinça de garra única constituída por uma massa de material granular, que quando pressionada sobre um objeto, flui em torno dele e adquire a sua forma. Após aplicação de vácuo, o material granular contrai e endurece rapidamente, apertando e segurando o objeto sem a necessidade de uma resposta sensorial. As mudanças de volume são menores do que 0,5%, o que confere uma aderência fiável ao objeto e segura-o com uma força que excede muitas vezes o seu peso.

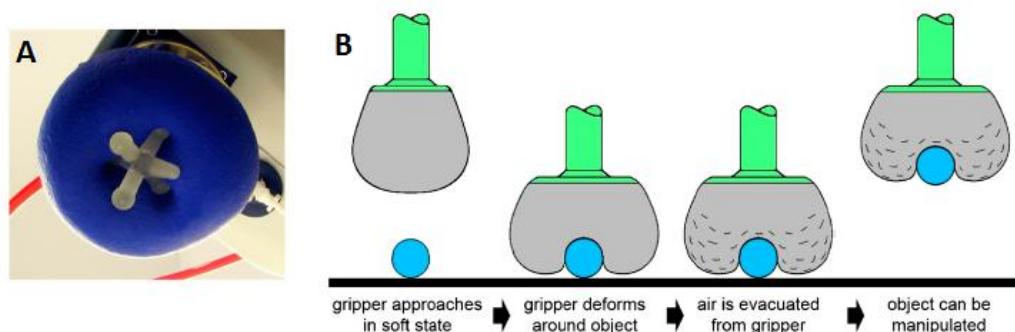


Figura 9 - (A) Vista inferior da pinça robótica de material granular segurando objeto. (B) Esquema de operação [6].

Embora tenha aplicações muito restritas, Li e Kagawa [7] desenvolveram uma pinça de “não-contacto” chamada “*swirl gripper*” (pinça de remoinho). Apesar de não possuir o aspeto estrutural de uma pinça, é assim chamada pela função que desempenha ao pegar nos objetos (ver Figura 10). A pinça é composta por um motor com uma ventoinha inserido numa câmara circular com umas pequenas entradas de ar no topo e aberta em baixo. A rotação do motor gera um fluxo de ar espiral na câmara, que por sua vez cria uma pressão negativa na área central devido à força centrífuga que puxa o ar do centro para a periferia da câmara. Deste modo, quando colocado um objeto debaixo do dispositivo, atua uma força de elevação ascendente sobre o objeto que, como consequência, o eleva. O objeto tende a manter uma ligeira folga em relação à pinça para que o ar seja descarregado, por isto, é possível manusear os objetos sem contacto.

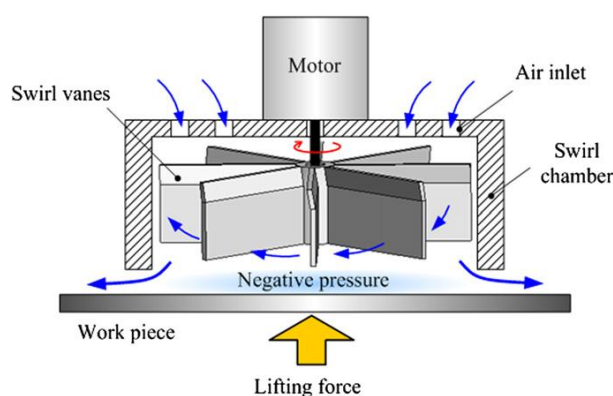


Figura 10 - Esquema da swirl gripper [7].

Outro tipo de solução industrial muito utilizada mas também mais complexa são as pinças com múltiplas garras (isto é, com mais do que duas garras). As pinças com múltiplas garras possuem a vantagem de pegar objetos com diferentes formas como uma mão humana sem ter de trocar

ou adaptar a pinça ao tipo de objeto a apanhar. Com o objetivo de simplificar o manuseamento destas pinças, Fischer [8] apresentou um sistema sensor para o controlo de uma pinça de múltiplas garras num braço robótico. Este sistema é composto por uma estação de manipulação, que tem como tarefas: determinar a localização do objeto; determinar os movimentos nas proximidades do objeto; determinar pontos estáveis onde agarrar o objeto para evitar que caia depois de ser agarrado; e por fim, determinar os movimentos do braço robótico para mover o objeto para uma posição de destino. Para realizar estas tarefas, o feedback é feito através de sensores de força em cada garra que fornecem informação sobre o estado do objeto e através da triangulação de sensores lasers que fornecem informação sobre o objeto antes de este ser agarrado e sobre o espaço de trabalho que envolve o objeto.

Yi *et al.* [9], com o objetivo de criar um instrumento capaz de agarrar objetos com formas irregulares e de grande volume, desenvolveram um dispositivo com uma plataforma paralelogrâmica capaz de ser dobrada flexivelmente para agarrar os objetos (ver Figura 11). Este dispositivo tem também a particularidade de poder ser usado para “micro posicionamento” após agarrar o objeto. Esta pinça paralelogrâmica consiste numa parte de ligação e outras partes de condução, compostas por motores pneumáticos utilizados como atuadores e sensores de pressão. O sensor de pressão permite o controlo indireto das forças através da medição da pressão do deslocamento que ocorre devido ao contacto entre o objeto agarrado e a plataforma paralelogrâmica.

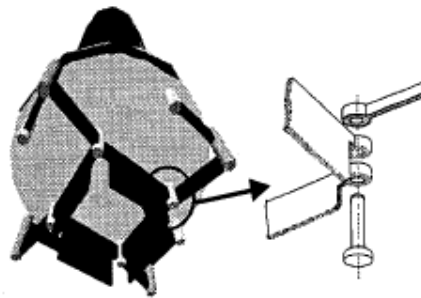


Figura 11 - Esquema conceitual do mecanismo paralelogrâmico [9].

2.4. Manipuladores cartesianos

Outra função importante de uma máquina autónoma ou robô é o movimento. Um robô ou manipulador robótico (no caso de um sistema automatizado como a máquina de inserção) deve ser capaz de mover materiais, partes, ferramentas ou dispositivos especializados através de movimentos programáveis, com o objetivo de desempenhar da melhor forma uma variedade de tarefas. Logo, um robô útil é aquele que é capaz de controlar os seus movimentos e as forças que aplica ao seu meio envolvente. Tipicamente, os manipuladores robóticos são estudados tendo em consideração o deslocamento das juntas, por esta razão o robô é analisado em termos de referência espacial de juntas. No entanto, considerar o espaço de trabalho do robô, como um espaço de juntas, tem alguns problemas de interpretação, pois o utilizador necessita de ter conhecimento dimensional das juntas para perceber qual o deslocamento que as juntas têm de fazer para alcançar uma posição final desejada. Este problema de interpretação pode ser resolvido usando o espaço cartesiano, que consiste em interpretar os movimentos do robô usando coordenadas cartesianas num referencial de espaço cartesiano. Por esta razão, são

necessárias certas ferramentas matemáticas para analisar os movimentos do robô num espaço cartesiano, que permitem propor estruturas de controlo, usar um modelo dinâmico e entender os fenómenos físicos no manipulador robótico no espaço cartesiano [10].

Portanto, um manipulador robótico cartesiano (CRM) é um manipulador robótico de 3 graus de liberdade que possui como espaço de trabalho, o espaço cartesiano, conforme exposto na Figura 12. A estrutura principal de um CRM consiste em três juntas prismáticas lineares e ortogonais que se movem separadamente para atingir uma posição final. Khan *et al.* [11] projetaram e desenvolveram um controlador de 3 eixos que serve de interface com o manipulador, para analisar quantitativamente a resposta dinâmica de vários fatores, a fim de desenvolver um modelo dinâmico e cinemático para um CRM. Neste manipulador robótico cartesiano, o utilizador coloca a posição do atuador final em coordenadas cartesianas no espaço de trabalho e o modelo de cinemática inversa transforma esta posição em movimento de juntas, que neste caso são prismáticas, isto é, têm movimento linear. Estes movimentos lineares das juntas são posteriormente convertidos em movimento angular dos motores. Assim, o modelo cinemático do CRM é o seguinte:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} l_x \\ l_y \\ l_z \end{bmatrix} \quad (1)$$

Onde $d_i = p_i \frac{\theta_i}{2\pi}$.

θ_i é a medida de rotação (ângulo) expressa em radianos, que é transformada em pulsos do encoder. Neste caso, x , y e z são as coordenadas da posição global, l_x , l_y e l_z são o deslocamento na direção x , y e z , d_i é o deslocamento da junta i , enquanto p_i é o passo do parafuso i , onde $i = 1, 2, 3$ ou eixos x , y e z .

Após realizar alguns testes, averiguaram os efeitos da variação de certos parâmetros. Concluíram que existe um limite inferior para o tempo de amostragem, porque tempos de amostragem muito grandes representam perda de informação de feedback, mas tempos de amostragem demasiado pequenos sobrecarregam o processador. Investigaram também os efeitos da variação dos parâmetros do controlador. Como o controlador utilizado foi um compensador discreto em atraso ou em avanço, possui como parâmetros: ganho; zero; e pólo. Concluíram que o ganho tem uma ação corretiva mas que pode afetar a estabilidade do sistema e, o zero e o pólo afetam a resposta transiente e o ganho estático do sistema respetivamente.

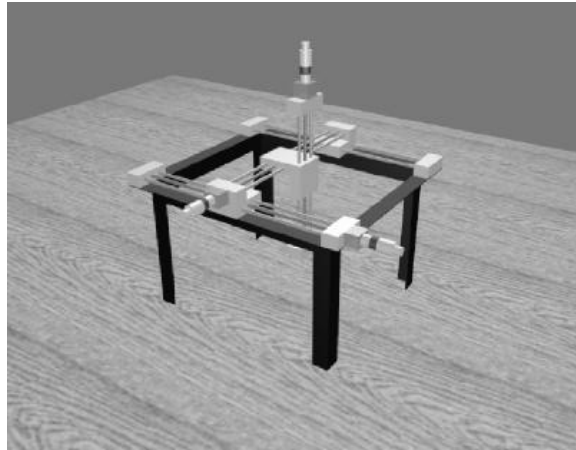


Figura 12 - Vista de um manipulador robótico cartesiano [11].

Semelhante trabalho foi desenvolvido por Yen & Lai [12], que apresentaram uma equação dinâmica derivada pela formulação de Lagrange-D'Alembert para controlar um manipulador paralelo cartesiano (CPM) de 3 graus de liberdade. Um CPM consiste numa plataforma móvel, uma estrutura base com três mecanismos lineares em "ball-screw" localizados nos eixos X , Y e Z e três membros conectores, conforme exposto na Figura 13. Cada membro conector é uma corrente cinemática aberta, que consiste em dois elos. Os eixos de rotação das juntas de revolução em cada membro são todos paralelos aos eixos das juntas prismáticas do controlo deslizante. Esta disposição permite que a plataforma móvel se mova no mesmo passo com a sobreposição dos três deslizantes nos mecanismos lineares X , Y e Z . Por exemplo, quando o deslizante do mecanismo linear X se move e os deslizantes Y e Z permanecem estacionários, a plataforma móvel terá a mesma translação que o deslizante X .

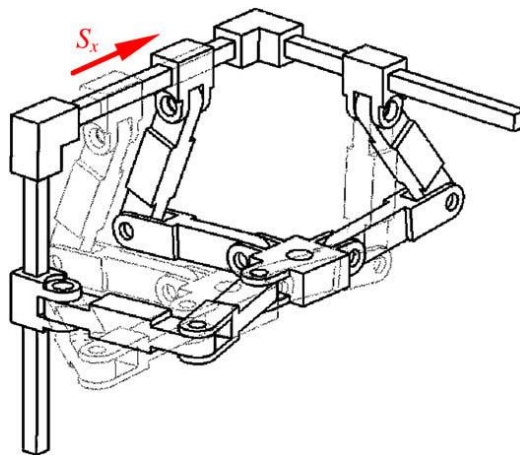


Figura 13 - Esquema de um manipulador paralelo cartesiano [12].

2.5. Braços robóticos

Outro tipo de dispositivos que produzem movimento são os braços robóticos. Muitas considerações devem ser tomadas no projeto e controlo de um braço robótico, pois estruturas de braços robóticos diferentes levam a diferentes soluções de controlo. Zhang *et al.* [13], com o objetivo de desenvolver um braço robótico capaz de desempenhar múltiplas tarefas, fabricaram um braço robótico com 6 graus de liberdade. Este braço robótico possui na base um sistema de tração de 4 rodas para aumentar a sua mobilidade. Em cada junta foi usado um servomotor como atuador que possui elevado binário e resolução. Possui também 5 tipos de mãos robóticas que podem ser acopladas ao braço mediante a função que se pretende desempenhar. O interface homem-máquina utilizado foi o computador que envia os sinais de controlo através de USB. Como este braço robótico foi projetado para participar numa competição de robótica, ele é capaz de desempenhar as seguintes funções: dança criativa, levantamento de pesos, caligrafia chinesa e classificação de cores (ver Figura 14).



Figura 14 - Braço robótico fazendo caligrafia chinesa [13].

Yamamoto *et al.* [14] apresentaram um braço robótico com 2 graus de liberdade usando actuadores lineares de filme eletrostático flexível chamados “*Dual Excitation Multiphase Electrostatic Drive*” (DEMED). O DEMED consiste num filme estático e outro deslizante de tamanho centimétrico feitos de filmes de circuitos impressos e flexíveis de poliimida. Estes DEMED são caracterizados pela capacidade de gerarem elevada potência, possuírem uma estrutura leve e serem flexíveis de modo a poderem ser dobrados em qualquer direção sem perder a sua função. Além disso, podem ser facilmente controlados eletricamente. O princípio de funcionamento baseia-se em que, quando é aplicada uma tensão alternada trifásica aos elétrodos do filme estático e deslizante, as suas superfícies são percorridas por uma distribuição de potenciais que se movem em sentidos opostos. Esta condição gera uma força eletrostática que impulsiona o filme deslizante a mover-se sobre o filme estático. Assim, construíram um braço robótico com 2 graus de liberdade constituído por um braço superior e inferior com estes actuadores montados numa estrutura do tipo muscular antagónica conforme exposto na Figura 15.

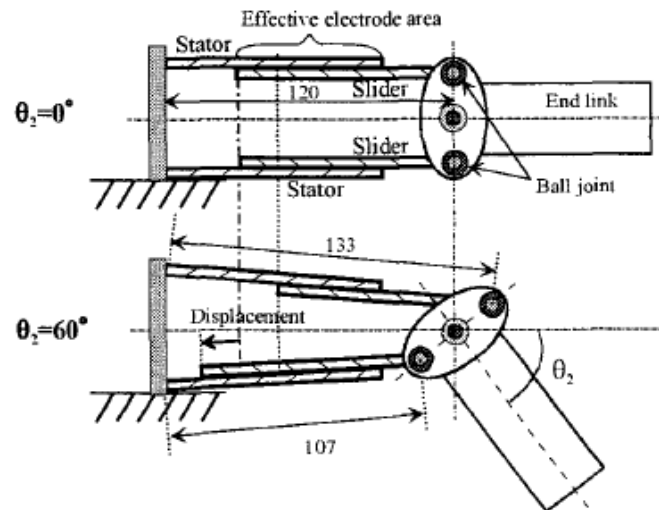


Figura 15 - Vista esquemática do actuador DEMED do braço superior [14].

Huang *et al.* [15] desenvolveram um sistema de detecção visual de objetos aplicado a um braço robótico autônomo que agarra objetos e os coloca numa determinada posição de acordo com a sua cor. Através de autocontrolo, o braço robótico é capaz de executar 3 tarefas: localizar o objeto; agarrar o objeto; e colocar o objeto. Para realizar estas tarefas, o sistema recorre a processamento de imagem proveniente de uma câmara. Quando agarra os objetos, o sistema mede com boa exatidão a distância relativa entre o objeto e o braço robótico usando um algoritmo de detecção das extremidades do objeto. Para saber onde colocar os objetos, o sistema diferencia as cores após sua segmentação e conversão para o modelo de cores HSV (Hue, Saturation, Value).

2.6. Nota conclusiva

Neste capítulo, foi apresentado o estado da arte, que começa por estudar as características que possuem alguns sistemas automatizados de inserção que se encontram atualmente no mercado. De seguida, foram revistos alguns componentes característicos destes sistemas, nomeadamente, as pinças e braços robóticos e os manipuladores cartesianos, citando várias soluções desenvolvidas mediante uma problemática, bem como suas vantagens e desvantagens.

3. Desenvolvimento do Sistema Automatizado

3.1. Estrutura física

Neste capítulo, é realizada a descrição física do sistema automatizado para inserção de terminais em conectores desenvolvido nesta dissertação. Para tal, é primeiramente apresentado um esboço inicial que serviu de orientação de base, onde foi possível avaliar certos aspetos funcionais do sistema e de modo a extrair algumas conclusões que melhorassem os esboços seguintes. Posteriormente, é apresentada a descrição física do projeto final de modo detalhado.

Os sistemas ilustrados que se seguem foram desenvolvidos através do ambiente de desenvolvimento SolidWorks, uma ferramenta de desenho técnico e mecânico em 3D assistido por computador.

3.1.1. Esboço inicial

O primeiro esboço do sistema automatizado para inserção de terminais em conectores encontra-se exposto na Figura 16, onde é possível visualizar as diferentes estruturas que o constituem e onde se encontra representados alguns dos movimentos básicos destas mesmas estruturas.

Na estrutura 1 encontram-se dispostos os conectores verticalmente separados consoante as diferentes configurações de conectores utilizados. Na estrutura 2 encontra-se uma das extremidades dos fios individualizadas e separadas em grupos de 10 fios (neste caso), consoante a sua tipologia. A estrutura 3 (ver detalhes na Figura 17) é responsável por ir buscar os conectores que se encontram na estrutura 1 e segurá-los firmemente aquando do processo de inserção. Esta estrutura é capaz de segurar dois conectores em simultâneo, de modo a permitir a inserção das duas extremidades de um fio em conectores diferentes. A estrutura 4 (ver Figura 17) é uma tipologia de manipulador robótico que manuseia as extremidades dos fios, fazendo passar a primeira extremidade do fio pela estrutura 5 (Figura 17) e, realizando o processo de inserção propriamente dito dos terminais nos conectores que se encontram na estrutura 3. A estrutura 5 tem como função puxar o fio até à outra extremidade através de dois cilindros rotativos, para que a estrutura 4 (i.e. o manipulador) possa pegar no segundo terminal e inseri-lo no segundo conector. Para facilitar a realização das tarefas anteriormente descritas, o manipulador robótico possui uma cabeça rotativa.

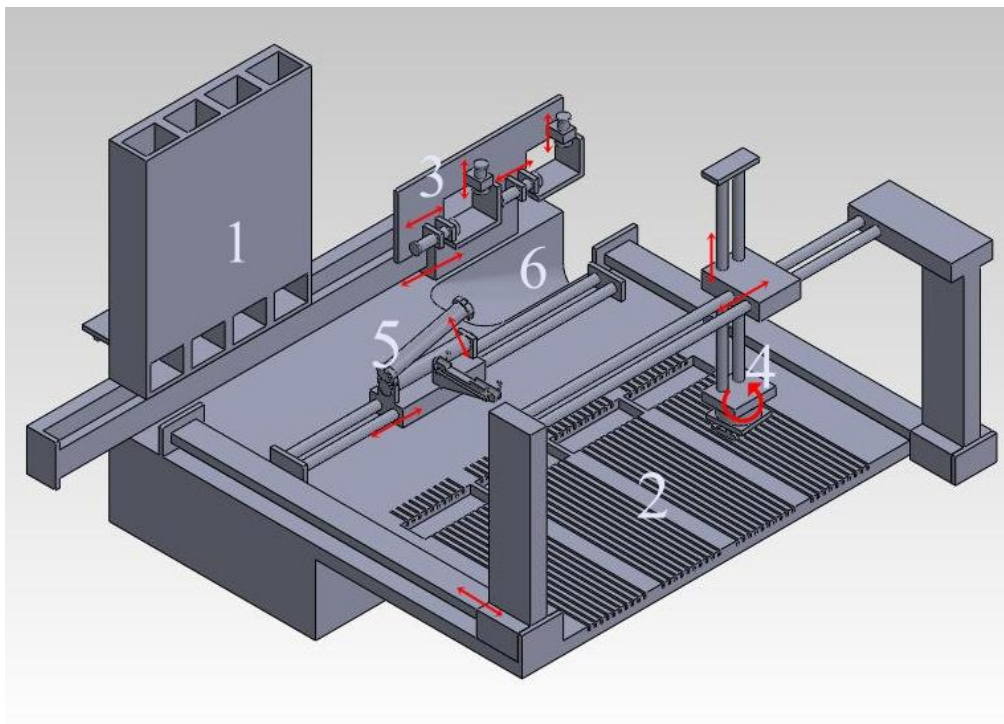


Figura 16 - Esboço inicial do sistema automatizado (As setas "→" representam os movimentos das estruturas representadas).

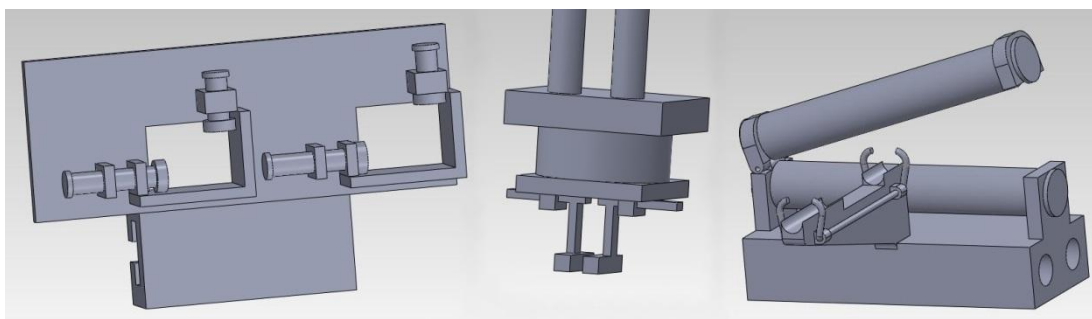


Figura 17 - Estruturas 3, 4 e 5 do primeiro esboço, respectivamente.

Após inserir todos os terminais nos conectores, a cablagem é libertada pela estrutura 3 para a estrutura 6, que por força gravítica conduz a cablagem para um depósito. Os conectores são transferidos da estrutura 1 para a estrutura 3 através do sistema representado na Figura 18, onde um acionamento empurra o conector que se encontra numa posição inicial para a frente e que após retrair-se, deixa cair o próximo conector para a posição inicial, aguardando futura transferência.

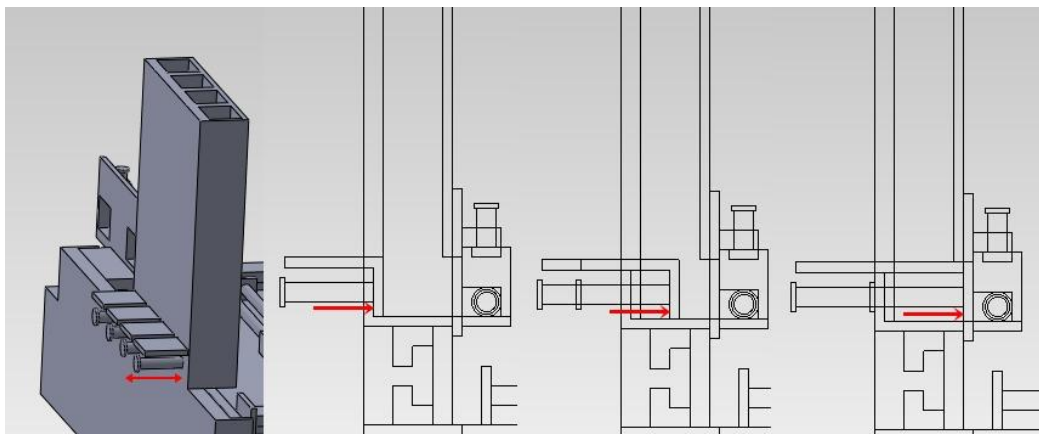


Figura 18 - Sistema que transfere os conectores da estrutura 1 para a estrutura 3 da Figura 16.

Este sistema automatizado é uma possível solução para o problema inicialmente proposto. No entanto, este foi descartado por não satisfazer certos objetivos previamente propostos, dentro dos quais: (1) O sistema automatizado ocupa demasiada área útil devido a disposição dos fios que se encontram estendidos na horizontal; (2) Não é um sistema expedito, pois realiza uma seqüência de operações que demoram algum tempo a completar, e que poderiam tornar o processo de inserção demasiado moroso e complexo.

3.1.2. Sistema final

De modo a satisfazer melhor os objetivos inicialmente propostos e contornar algumas das falhas do primeiro sistema projetado, foram tomadas algumas medidas que serão descritas de seguida. Como a inserção dos dois terminais de um fio em conectores diferentes aumenta substancialmente a complexidade do sistema, optou-se que o sistema apenas faça a inserção de um único terminal no conector. Esta abordagem simplifica bastante o sistema, pois reduz o número e a duração de tarefas a executar. No entanto, a inserção dos dois terminais poderá constituir um melhoramento futuro a efetuar numa nova versão do sistema automatizado exposto. Para obter um sistema compacto, que não ocupe demasiada área de solo, lidou-se com os fios dispostos verticalmente, como já era feito com os conectores. Esta é uma característica importante porque as fábricas possuem muito espaço disponível em altura ao contrário do espaço do solo, o qual é indispensável. Com o objetivo de simplificar mais o processo de inserção executado pelo sistema automatizado, eliminou-se a estrutura 3 do esboço inicial por se concluir que a sua função era dispensável e não apresentar vantagens que justificassem o seu uso.

Reunindo as características acima descrita e seguindo os moldes do esboço inicial elaborou-se um novo sistema automatizado, que se encontra representado pela Figura 19.

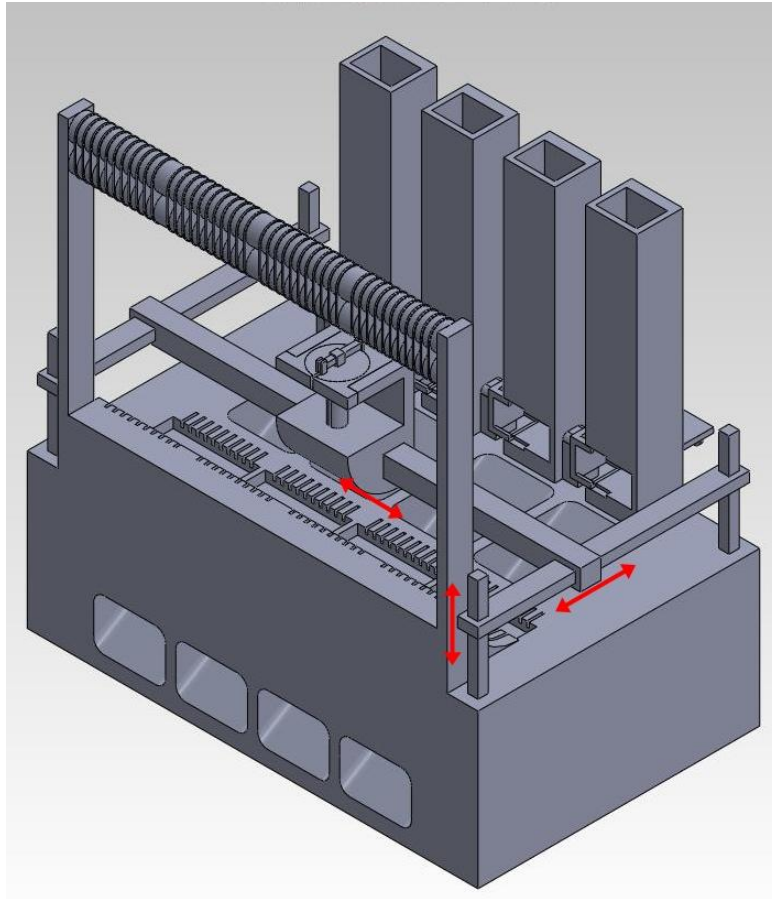


Figura 19 - Visão geral do sistema automatizado final.

Sucintamente, este sistema automatizado faz uso de um manipulador robótico cartesiano que pega em cada fio e enrola-o, para de seguida inserir um terminal no conector e libertar o enrolamento. Após inserir todos os terminais num conector, liberta a cablagem que é direcionada para um depósito.

Neste sistema automatizado é possível identificar três estruturas principais:

- (1) A estrutura onde se encontram dispostos os fios (ver Figura 20);
- (2) A estrutura onde se encontram dispostos os conectores (ver Figura 21);
- (3) O manipulador robótico cartesiano (ver Figura 22, Figura 23 e Figura 24).

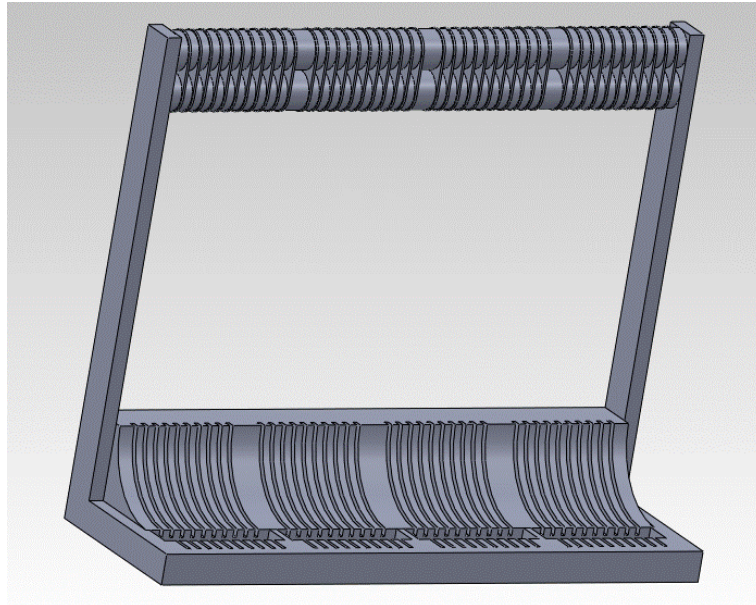


Figura 20 - Estrutura que aloja os fios na vertical.

A estrutura exposta na Figura 20 que aloja os fios é constituída por duas partes: uma superior e outra inferior. A parte inferior possui ranhuras onde é inserida uma das extremidades dos fios, de maneira a servir de referência ao manipulador robótico, para que este se posicione corretamente sobre o terminal quando o pretender agarrar. A parte superior serve de suporte físico, de maneira a manter os fios dispostos verticalmente. A parte superior é também constituída por rolamentos que facilitam o escorregamento do fio quando este for puxado pelo manipulador.

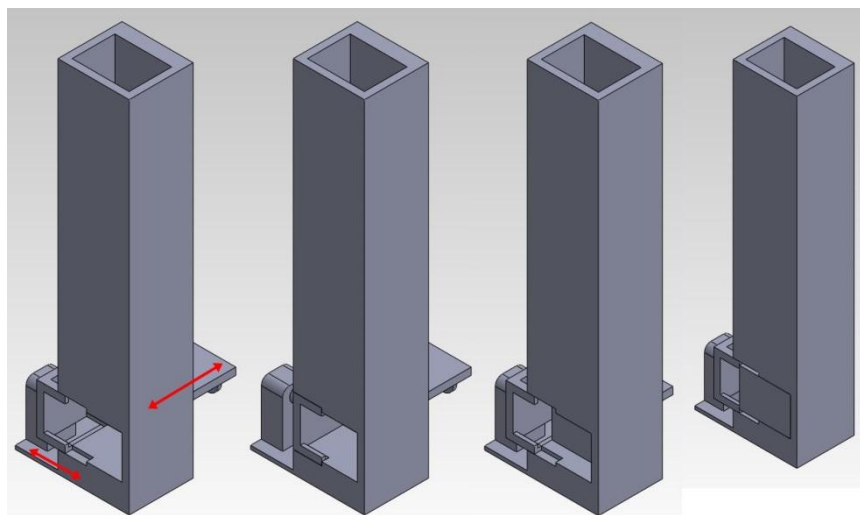


Figura 21 - Estrutura que aloja os conectores, com respectivos movimentos dos actuadores que o constituem.

Os conectores encontram-se alojados numa estrutura (ver Figura 21) semelhante ao esboço inicial. Eles encontram-se empilhados uns em cima dos outros, com a parte dos pinos (orifícios onde são inseridos os terminais) virada para a frente. Assim, o conector que se encontra na parte inferior é aquele que está pronto para ser inserido. Devido à remoção da estrutura 3 do esboço inicial, estas estruturas no sistema final possuem dois acionamentos. O primeiro acionamento faz uso de uma matriz lateral que se adapta ao conector de modo a imobiliza-lo empurrando-o contra a parede lateral oposta. O segundo acionamento tem como objetivo a extração do conector desta estrutura quando a inserção de todos os terminais é concluída, que é feita de forma semelhante ao primeiro esboço: neste caso, o primeiro acionamento retrai-se para trás de modo a libertar-se do conector e o segundo acionamento desloca-se para a frente empurrando a cablagem para que caia para a abertura que se encontra na sua frente (ver Figura 18).

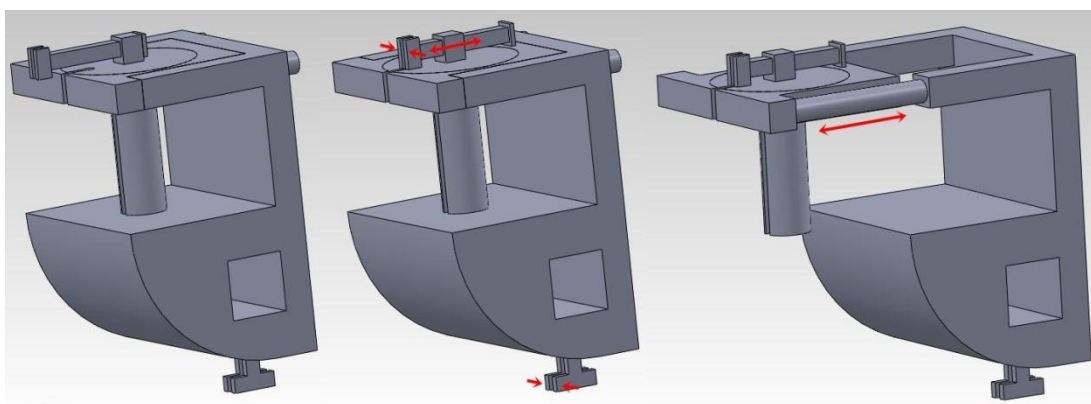


Figura 22 - Ilustração do manipulador robótico e de alguns dos movimentos dos actuadores que o caracterizam.

O manipulador robótico (ver Figura 22) é o componente do sistema com a estrutura mais complexa devido ao maior número de tarefas que desempenha. Este é um manipulador cartesiano e, como dito no capítulo 2, usa a translação nos eixos x , y e z para movimentar-se no seu espaço de trabalho. Sucintamente, pega nos fios, enrola-os, insere o terminal no conector e liberta o fio enrolado. Para realizar estas tarefas, inicialmente o manipulador robótico posiciona-se sobre o fio que pretende agarrar. Depois, através da pinça inferior, agarra o terminal que vai inserir no conector. Simultaneamente, a pinça superior vai agarrar outra parte do fio de modo que, após retraindo-se para trás, coloque o fio no orifício da estrutura que o vai enrolar. Após a estrutura central do manipulador começar a rodar, a pinça superior pode imediatamente libertar o fio, pois já não existe o risco de o fio sair do orifício. Em seguida, o movimento rotativo contínuo desta estrutura vai enrolar o fio, que deverá dar tantas voltas quanto o comprimento do fio, de modo a garantir que todo o fio é enrolado (ver Figura 23).

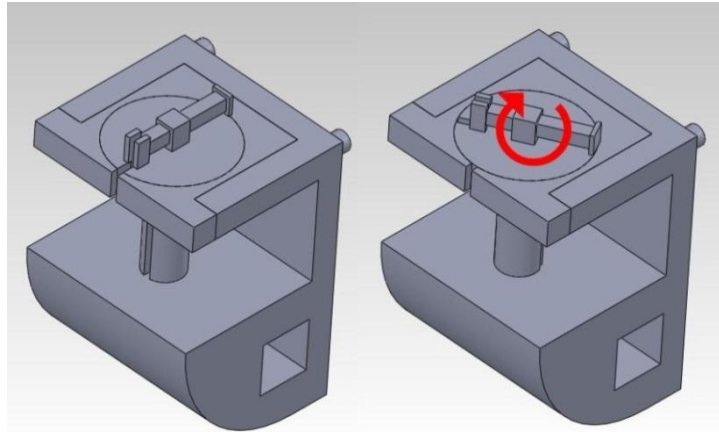


Figura 23 - Ilustração do movimento do manipulador que permite enrolar os fios.

Após concluir o enrolamento, o manipulador dirige-se para o conector e insere o terminal no pino correto. De seguida, após a inserção do terminal, a estrutura rotativa central retrai-se para trás de modo a permitir que o enrolamento se liberte desta estrutura e caia para a abertura. Este movimento é ainda facilitado por um acionamento que empurra o fio enrolado para baixo como apresentado na Figura 24.

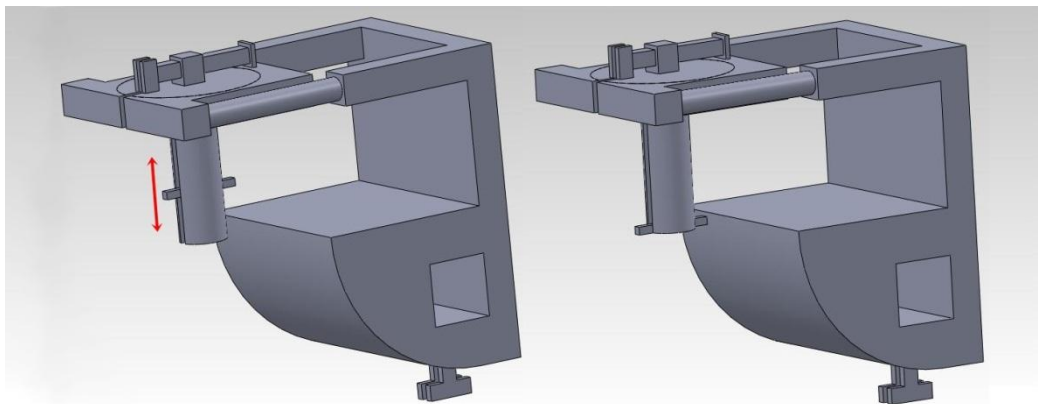


Figura 24 - Ilustração do manipulador libertando o fio enrolado.

Após todos os terminais serem inseridos no conector, como dito anteriormente, a cablagem é libertada para uma abertura descendente que, por força de gravidade, vai direccionar a cablagem para um depósito.

3.2. Atuadores

Esta secção destina-se a definir os tipos de atuadores que vão ser utilizados neste sistema automatizado. Para isso, é realizada uma breve introdução sobre os principais tipos de atuadores disponíveis e suas características. Depois é analisada cada situação do sistema passível de atuação para se escolher o melhor atuador a realizar cada tarefa.

Os componentes mais importantes dos sistemas mecatrónicos são os vários tipos de transdutores. Um transdutor é um dispositivo que converte uma forma de energia numa outra forma de energia. Claro está, que neste caso em particular, interessam os transdutores onde uma das formas de energia é a eléctrica, isto é, transdutores que transformam energia eléctrica em energia mecânica ou vice-versa. Os atuadores e sensores são portanto formas de transdutores [16] [17].

Os atuadores são basicamente os músculos por detrás de um sistema mecatrónico, que aceitam comandos de controlo (na forma de sinal eléctrico) e produzem uma mudança no sistema físico gerando força, movimento, calor, fluxo, e assim em diante. Outro conceito relacionado com os atuadores em robótica, é o “efetor”. O “efetor” é um dispositivo que tem um determinado efeito (impacto ou influência) no seu ambiente, e que portanto, possui certos mecanismos que permitem realizar o seu trabalho. Um atuador pode também ser entendido como o mecanismo que permite ao “efetor” realizar uma ação ou movimento [18] [19].

Existem várias maneiras de classificar os atuadores. Com base na forma de energia, podem ser classificados de atuadores passivos e ativos. Isto é, os designs mais inteligentes de atuadores usam atuação passiva, utilizando energia potencial da mecânica do efetor e da interação com o ambiente, em vez do consumo contínuo de energia como é o caso da atuação ativa. O atuador pode também ser classificado como binário e contínuo com base no número de estados de saída estáveis. Um relé com dois estados estáveis é um bom exemplo de um atuador binário. De forma semelhante, um motor de passo é um bom exemplo de um atuador “contínuo” (embora na realidade seja discreto), pois quando usado para controlo posicional, o motor de passo pode fornecer muitas saídas estáveis com pequenos incrementos de movimento. Outra classificação possível é com base no tipo de energia, que será apresentada seguidamente para descrever os tipos de atuadores mais essenciais. Assim, os tipos básicos de atuadores são fundamentalmente os eléctricos, eletromecânicos, eletromagnéticos, pneumáticos ou hidráulicos conforme descritos na Tabela 1. No entanto, a nova geração de atuadores inclui também os atuadores de materiais inteligentes, microatuadores e nanoatuadores, que não serão aqui abordados [18] [19].

Tabela 1 - Principais tipos de actuadores e suas características [19]

Atuador		Características		
Elétrico				
Díodos, tiristor, transistores bipolares, triacs, diacs, MOSFET, relé de estado sólido, etc.		Do tipo eletrônico Resposta de alta frequência Baixo consumo de energia		
Eletromecânico				
Motor de corrente contínua (DC)	Convencionais	Excitação separada	A velocidade pode ser controlada pela tensão do enrolamento da armadura ou pela corrente de campo	
		Shunt	Aplicações de velocidade constante	
		Em série	Binário de arranque elevado, elevado binário de aceleração, elevada velocidade com pouca carga	
		Composto	Binário de arranque baixo e boa regulação da velocidade Instável com grandes cargas	
	Imanes permanentes	Convencional	Elevada eficiência, elevado pico de potência e resposta rápida	
		Bobina móvel	Maior eficiência e menos indutância que o motor DC convencional	
		Motor binário	Concebido para trabalhar por longos períodos em condições de baixa rpm	
	Comutação eletrônica (motor sem escovas)		Resposta rápida Elevada eficiência (>75%) Longa vida útil e não requer manutenção Ruído e interferências de baixa frequência	
	Motor de corrente alternada (AC)	Motor de indução		O mais usado na indústria Simples, robusto e barato
		Motor síncrono		O rotor com velocidade síncrona Eficiência muito elevada para larga faixa de velocidades e cargas Necessita de sistema adicional para efetuar o arranque
Motor universal		Opera com corrente AC ou DC Elevada relação potência-carga		
Motor de passo	Híbrido		Converte pulsos elétricos em movimento mecânico Posicionamento preciso sem necessidade de realimentação	
Eletrômagnético				
Dispositivos do tipo solenóide		Elevada força e curta duração		
Eletroímãs, relé		Controlo on/off		
Cilindro hidráulico e pneumático		Adequados para movimento linear		
Motor hidráulico	Tipo engrenagem		Ampla faixa de velocidade	
	Tipo ventilador		Elevada potência de saída	
	Tipo pistão		Elevado grau de fiabilidade	
Motor pneumático	Tipo rotativo		Sem o perigo de choque elétrico	
	Alternativo		Baixa manutenção	

3.2.1. Atuadores elétricos

Os interruptores elétricos são os atuadores preferenciais para desempenhar a maior parte das ações de controlo do tipo on/off. São dispositivos interruptores tais como díodos, transístores, triacs, MOSFET e relés, que aceitam sinais de comando de baixo nível de energia do controlador e permitem ligar ou desligar dispositivos elétricos tais como motores, válvulas e elementos caloríficos.

3.2.2. Atuadores eletromecânicos

O atuador eletromecânico mais comum é o motor que converte energia elétrica em movimento mecânico. São muito adequados para atuar em rodas, visto que produzem movimento rotativo, mas são também muito uteis para dirigir outros tipos de efetores para além das rodas. Geralmente são classificados como motores de corrente contínua (DC), motores de corrente alternada (AC) e motores de passo. Os motores DC operam com corrente contínua e variando a tensão pode-se controlar facilmente a velocidade. Comparados com outros tipos de atuadores, os motores DC são simples, baratos, fáceis de usar e fáceis de encontrar. Podem ser comprados numa grande variedade de tamanhos e pacotes, de modo a satisfazer diferentes sistemas e tarefas, sendo amplamente utilizados em aplicações que vão desde motores de milhares de cavalos de potência utilizados em laminadoras até motores de potência fracionária utilizados em automóveis (motores de arranque, ventiladores, etc.). São, no entanto, mais caros, precisam de fonte de energia de corrente contínua, e requerem mais manutenção quando comparados com motores AC. É muito comum a combinação de engrenagens com diferentes raios nestes motores, de modo a manipular a quantidade de força e binário gerado, como também a velocidade de rotação. Por exemplo, quando uma engrenagem menor dirige uma maior, o binário aumenta e a velocidade diminui. Analogamente, quando uma engrenagem maior dirige uma menor, o binário diminui e a velocidade aumenta.

Os motores DC são ótimos a rodar continuamente numa direção, no entanto, pode ser útil o motor mover-se até uma posição particular. Os motores capazes de mover o eixo até uma posição específica são chamados de servomotores. Os servomotores são feitos a partir de motores DC, que possuem adicionalmente alguns componentes: reduções nas engrenagens; um sensor de posição para o eixo do motor, para localizar quanto o motor rodou e em que direção; e um circuito eletrónico que controla o motor, para lhe dar ordens de quanto deve rodar e em que direção.

Os motores de corrente alternada são muito populares visto que usam a corrente alternada padrão, não necessitam de escovas e comutadores, e são mais baratos. Os motores de corrente alternada podem ainda ser classificados como motores de indução, motores síncronos e universais de acordo com a sua construção física. O motor de indução é simples, robusto e livre de manutenção. Estão disponíveis em vários tamanhos e formas com base no número de fases usadas. O motor síncrono é um dos motores mais eficientes na indústria, por isso é muito usado para reduzir o custo da energia elétrica. Adicionalmente, como o motor síncrono roda a velocidade síncrona, é também usado em aplicações que requerem operações de sincronismo. Os motores universais tanto operam com corrente alternada como contínua. O motor universal DC possui a melhor relação peso-potência, mas possui um tempo de operação relativamente curto.

O motor de passo é um dispositivo de posicionamento discreto (incremental) que move um passo de cada vez que recebe um pulso de comando como entrada. Uma vez que aceitam

comandos digitais diretos e produzem movimento mecânico, os motores passo são amplamente usados em aplicações de controle industrial.

3.2.3. Atuadores eletromagnéticos

O atuador eletromagnético mais comum é o solenoide. O atuador solenoide de corrente contínua consiste num núcleo de ferro dentro de uma bobina portadora de corrente. Quando a bobina é alimentada, estabelece-se um campo magnético que cria uma força que permite empurrar ou puxar o núcleo de ferro. Também é possível encontrar dispositivos solenóides de corrente alternada, como os relés de excitação AC. Os eletromagnetos são outro tipo de atuador eletromagnético importante que são extensivamente requeridos em aplicações que exigem grandes forças.

3.2.4. Atuadores pneumáticos e hidráulicos

Os atuadores pneumáticos e hidráulicos são normalmente tanto motores como pistões lineares ou válvulas de controle. São idealmente apropriados para gerar forças elevadas acoplado com movimento de grandes proporções. Os atuadores pneumáticos usam ar sob pressão que são bastante adequados para gerar forças pequenas ou médias, de curta distancia e em aplicações de elevada velocidade. Os atuadores hidráulicos usam óleos pressurizados que são incompressíveis. Podem produzir forças muito elevadas acopladas com movimentos de maior distância, de um modo custo-eficiente. A desvantagem dos atuadores hidráulicos reside na sua complexidade e manutenção. Este tipo de atuadores, por serem tipicamente largos e potentes, são potencialmente perigosos.

3.2.5. Descrição dos atuadores do sistema

Após esta breve análise sobre os vários tipos de atuadores e algumas das suas características, em seguida é analisado detalhadamente cada componente do sistema passível de ser um atuador de modo a escolher os atuadores que melhor satisfazem as necessidades do sistema automatizado.

Começando pelo manipulador cartesiano, este movimenta-se no espaço cartesiano que é composto por três eixos (como ilustrado na Figura 19). Assim, como se movimenta sobre três eixos (eixo x , y e z), são requeridos três atuadores idênticos, em que cada um é responsável pelo deslocamento nesse eixo. Nesta aplicação, a precisão do posicionamento do manipulador é um fator crucial na escolha do atuador. Por este motivo, apenas as tecnologias do motor de passo e servomotor podem desempenhar tal função quando comparados com qualquer outro tipo de atuador de posicionamento eletromagnético, pneumático ou hidráulico. Antes de discutir as diferenças entre o motor de passo e o servomotor, é de salientar que para esta aplicação cada motor deverá ter acoplada uma guia em cada eixo. As guias podem ser tanto lineares como em fuso (Figura 25). Em guias lineares, o motor é colocado perpendicularmente à guia, enquanto que em fuso o motor é acoplado paralelamente numa das extremidades da guia. Apesar das diferenças, ambas desempenham a sua função eficientemente, no entanto prefere-se guias em fuso para constituir este sistema por serem usualmente de menores dimensões quando comparadas

com as guias lineares, o que torna o sistema seja mais compacto. Contudo, os testes realizados no protótipo do sistema possuíam guias lineares por motivos relacionados com a aquisição do material como explicado mais adiante nesse capítulo.



Figura 25 - Guias lineares (esquerda) e guias em fuso (direita)

Como dito anteriormente, tanto o motor de passo como o servomotor podem ser utilizados para esta aplicação, no entanto estes motores possuem características diferentes o que resulta em benefícios diferentes para o sistema. É de conhecimento geral que os motores de passo são mais económicos e os servomotores são mais rápidos, no entanto, para fazer uma escolha inteligente deve-se analisar o problema mais profundamente. De facto, os motores de passo são geralmente uma solução mais barata do que servomotores da mesma potência. Os servomotores, geralmente têm menos binário do que os motores de passo de mesma potência, mas possuem maior velocidade de rotação. Em aplicações que requerem elevada velocidade, apesar de seu preço, os servomotores devem ser preferidos pois, por exemplo, colocar um motor de passo a rodar a 3000 rpm é extremamente difícil e arriscado. Para aplicações de baixa velocidade, o motor de passo apresenta um binário superior e melhor preço. Em certas aplicações, outro fator importante para além da velocidade e binário, é o movimento ponto a ponto que depende da aceleração. Nestes casos, são favoráveis os servomotores porque para velocidades reduzidas a aceleração é a mesma que os motores de passo mas para velocidades elevadas duplicam a aceleração em relação aos motores de passo. Os sistemas de motor de passo são normalmente “open loop”, o que significa que eles aplicam corrente aos enrolamentos do motor e esperam que as leis da Física façam o resto. Por este motivo, os motores de passo são também muito populares, pois são simples de entender e empregar. Por outro lado, os servomotores são do tipo “closed loop”, onde um encoder ótico ou um resolver fornecem uma realimentação precisa. Esses dispositivos informam o controlador sobre o posicionamento angular do veio do motor e da carga. Assim, os sistemas servomotor ajustam constantemente os sinais de comando baseados na realimentação do motor. Isso permite aos servomotores superarem distúrbios inesperados e serem automaticamente compensados. OS servomotores possuem ainda vantagens adicionais em relação aos motores de passo devido a sua natureza “closed loop”. Por exemplo, a corrente pode ser monitorizada como uma medida da carga. Se o sistema sofrer carga, o atrito e a corrente aumentam. Um sistema servomotor pode detetar esta condição e alertar o operador. Os servomotores também podem ser sobre-excitados de modo a aumentar o binário. Estes podem suportar tipicamente correntes até 3 vezes maiores que a corrente nominal de modo a ajudar a vencer variações inesperadas

de carga ou para se obter uma aceleração rápida. Devido ao facto de que os servomotores utilizam realimentação, servomotres bem ajustados operam de uma forma mais fina do que os motores de passo, pois possuem um erro menor.

Assim, a escolha recai sobre os servomotores, pois, para além de superarem largamente as velocidades dos motores de passo, são mais precisos e permitem recuperar de erros inesperados mais facilmente. O motor passo proposto nesta dissertação é o Accurax G5 servo motor (R88M-K40030) da Omron [20], sendo controlado pelo Drive Accurax ETHERCAT (R88D-KN04H-ECT) da Omron [21]. No entanto, por motivos referidos mais adiante, o motor utilizado no protótipo foi o SER 397/4L3S servomotor AC síncrono da Berger Lahr equipado com o eixo portal LM-P404R-AT5 e controlado pelo Twin Line servodrive TLD132F da Berger Lahr [22].

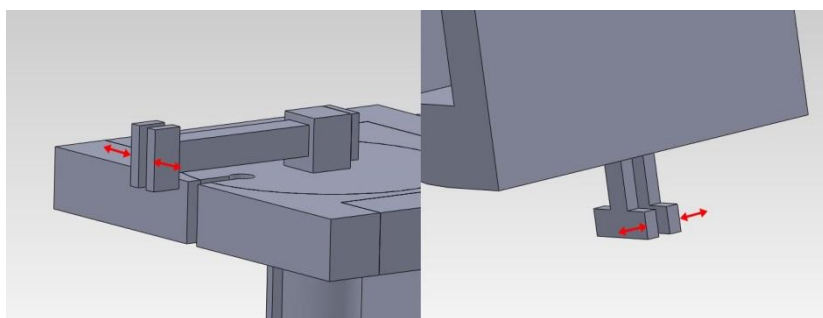


Figura 26 - Pinças robóticas do sistema.

No manipulador cartesiano existem duas pinças robóticas que têm como função agarrar os fios (ver Figura 26). O atuador escolhido para desempenhar esta função foi o servomotor. Nesta aplicação, o servomotor possui algumas vantagens em relação a outros tipos de atuadores: permite controlar a posição das pinças; como a corrente elétrica do motor é proporcional ao binário aplicado, é possível controlar a força de aperto e a velocidade; possui menor consumo energético quando comparado com atuadores pneumáticos; entre outras características enunciadas anteriormente na discussão comparativa com os motores de passo. É também vantajosa a compra integral de um sistema composto pelo servomotor e pinça robótica (efetor), pois a instalação e calibração são mais fáceis. A pinça robótica escolhida foi a *Lynxmotion A Style Gripper* com o servomotor HS-225MG da Hitec [22].

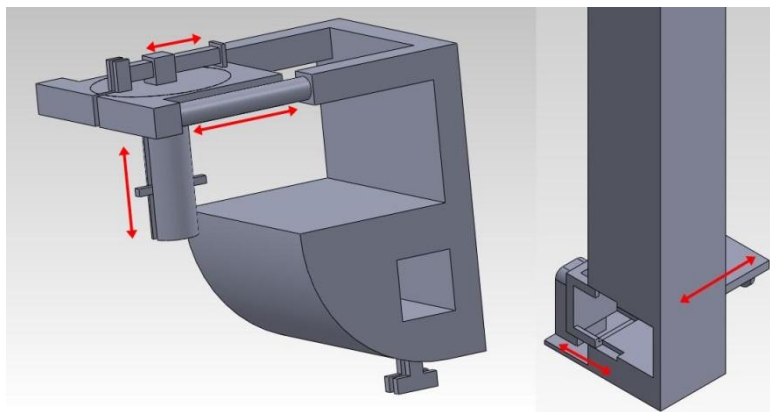


Figura 27 - Actuadores biestáveis com accionamento on/off do sistema.

Existem outros atuadores no sistema que são caracterizados por possuírem dois estados estáveis (biestável) e um acionamento do tipo on/off. Esses atuadores encontram-se ilustrados na Figura 27 e são dois atuadores que fazem parte da estrutura dos conectores e três atuadores do manipulador robótico cartesiano. Para estas aplicações, tanto são adequados acionamentos do tipo elétrico como pneumáticos. Optou-se pelos atuadores elétricos porque, apesar de os atuadores elétricos apresentarem um maior desgaste (têm um número finito de ciclos), os atuadores pneumáticos necessitam de bomba pneumática e mangueiras que ocupam espaço no sistema e o tornam também mais complexo. Portanto, para desempenhar estas funções foram escolhidos os cilindros elétricos da série LZ da SMC [23] controlados pelo controlador direcional da série LC3F2 da SMC [24].

Por último, falta apenas escolher o atuador que faz rodar a estrutura que enrola o fio dentro do manipulador robótico (Figura 23). Para realizar esta tarefa optou-se por um motor DC, pois como é de conhecimento geral, o melhor atuador para realizar movimento de rotação é o motor. Embora os sensores não sejam tratados nesta secção, é favorável encontrar um motor que seja fornecido com encoders, pois é necessário controlar o número de voltas dadas pelo motor. Como o enrolamento do fio deve ser uma tarefa prudente permitindo que o fio seja enrolado mais ou menos uniformemente, o motor deve possuir engrenagens para que rode a uma velocidade adequada a esta aplicação. O motor escolhido foi o Pololu 6VDC, 1010 RPM 17 oz-in Gearmotor com encoder [25].

3.3. Sensores

Um sensor é um dispositivo que quando exposto a um fenómeno físico (temperatura, deslocamento, força, etc.) produz um sinal de saída proporcional (elétrico, mecânico, magnético, etc.). A importância do sensor baseia-se na capacidade para detetar ou medir uma determinada quantidade física. É de salientar que, tal como para os atuadores, são do interesse apenas os tipos de sensores em que a saída é elétrica. O termo transdutor é frequentemente usado sinonimamente com sensor. Isto deve-se ao facto dos sensores serem transdutores, tal como foi dito no subcapítulo relativo aos atuadores. No entanto, não é correto tratar os sensores por transdutores porque os transdutores podem também ser atuadores, que são os dispositivos contrários aos sensores e portanto, podem induzir ao erro [17] [19].

A classificação dos sensores é por convenção pelo princípio de conversão, pela quantidade a ser medida, pela tecnologia usada, ou pela aplicação. Os sensores podem ser também classificados como passivos ou ativos. Em sensores ativos, a energia requerida para produzir o sinal de saída é fornecida pelo fenômeno físico que é sentido em si (por exemplo, como os termopares na medição de temperatura), enquanto os sensores passivos requerem uma fonte de alimentação externa (no mesmo exemplo, como os termístores). Tipicamente, os sensores passivos operam modulando a tensão e a corrente da fonte de alimentação. Além disso, os sensores são classificados como analógicos ou digitais com base no tipo de sinal de saída. Sensores analógicos produzem sinais contínuos que são proporcionais ao parâmetro sentido e portanto requerem conversão analógica para digital antes de serem enviados a um controlador digital. Sensores digitais, por outro lado, produzem sinais de saída digitais que podem servir diretamente de interface com um controlador. De seguida, na Tabela 2 são apresentados os tipos de sensores mais importantes, estando classificados pelo objetivo de medição (ou aplicação).

Tabela 2 - Tipos de sensores e características [19]

Sensores	Características
Sensores de posição	
LVDT/RVDT linear/transdutor diferencial variável angular	Elevada resolução com amplo intervalo Muito estáveis em aplicações estáticas
Encoder ótico	Simples, viável e solução de baixo custo
Tacómetro elétrico	Resolução depende do tipo (gerador ou captador)
Sensor de efeito Hall	Elevada precisão para gama de entrada baixa a média
Transdutor capacitivo	Resolução muito elevada com elevada sensibilidade Baixo requisitos de energia Bons para medições de elevada frequência dinâmica
Extensómetro	Precisão muito elevada em faixas pequenas Têm elevada resolução com baixo nível de ruído
Interferómetro	Resolução extremamente elevada em grandes faixas de medição Muito fiáveis e caros
Captador magnético: Giroscópio	Resolução elevada em pequenas faixas de medição
Sensores de aceleração	
Acelerómetro sísmico	Bom a medir frequências de até 40% da sua frequência natural
Acelerómetro piezoelétrico	Elevada sensibilidade, compactos e robustez Frequência natural muito elevada (tipicamente 100 kHz)
Sensores de força, binário e pressão	
Dinamómetro/células de carga	Bons tanto para medições dinâmicas como estáticas Também disponíveis como micro- e nano-sensores
Células de carga piezoelétrica	Bons para medições de força de elevada precisão dinâmica
Sensor táctil	Compacto, têm faixa dinâmica elevada
Sensor de stress ultrassónico	Bom para medições de pequenas forças
Tipo infravermelho	Sensor de não contacto com resolução limitada pelo comprimento de onda
Termografia infravermelha	Mede a distribuição da temperatura de um campo inteiro
Sensores de proximidade	
Indutivo, efeito de Hall, fotoelétrico, capacitivo, etc.	Interruptores de não contacto robustos Saídas digitais ligadas diretamente ao controlador digital
Sensores de luminosidade	
Foto resistências, foto díodos, foto transístores, etc.	Medem a intensidade da luz com elevada sensibilidade Baratos, confiáveis e são sensores de não contacto
Díodo de carga acoplada	Captura a imagem digital de um campo de visão

3.3.1. Sensores de posição

O posicionamento linear e angular são duas das medidas mais importantes que são usadas nos típicos sistemas mecatrônicos. Em geral, os sensores de posição produzem uma saída elétrica que é proporcional ao deslocamento que experienciam. Um dos tipos de sensores de contacto inclui o extensómetro, LVDT, RVDT, tacómetro e por ai adiante. Os sensores do tipo “sem contacto” incluem encoders, sensor de efeito Hall, sensor capacitivo, indutivo e do tipo interferómetro. A classificação destes sensores pode também ser realizada com base na faixa de medição. Usualmente, o sensor de efeito Hall, indutivo, capacitivo e o extensómetro possuem elevada resolução e são adequados para medições de faixa menor (tipicamente de 0,1 mm até 5 mm). Por outro lado, os transformadores diferenciais (LVDT) possuem uma faixa de medição muito maior e com uma boa resolução. O sensor do tipo interferómetro fornece as duas coisas, elevada resolução (em termos de micrómetros) e larga faixa de medição (até 1 metro). No entanto, o sensor do tipo interferómetro é volumoso, caro e requer muito tempo de estabelecimento. O extensómetro é também bastante popular por possuir elevada resolução com baixo nível de ruído e por ser mais barato.

3.3.2. Sensores de aceleração

Medir a aceleração é importante em sistemas sujeitos ao choque e a vibração. Embora a aceleração possa ser derivada do histórico dos dados do tempo obtidos por sensores de posição lineares ou angulares, é preferível a utilização de um acelerómetro que possui uma saída diretamente proporcional à aceleração. Os dois tipos de sensores mais comuns são o acelerómetro de massa sísmica e o piezoelétrico. O acelerómetro de massa sísmica é baseado no movimento relativo entre uma massa e uma estrutura de suporte. A frequência natural da massa sísmica limita o seu uso para aplicações com baixa ou média frequência. O acelerómetro piezoelétrico, porém, é mais compacto e mais adequado para aplicações de elevada frequência.

3.3.3. Sensores de força, binário e pressão

Dentro dos vários tipos de sensores de força/binário, o dinamómetro e o sensor de tipo piezoelétrico são os mais comuns. Ambos estão disponíveis para medir força e/ou binário, num eixo ou em múltiplos eixos. Dinamómetros fazem uso de membros mecânicos que experienciam deflexão elástica quando carregados. Este tipo de sensor está limitado pela sua frequência natural. Por outro lado, o sensor piezoelétrico é particularmente adequado para carregamentos dinâmicos numa vasta gama de frequências. Estes fornecem elevada rigidez, elevada resolução ao longo de uma ampla faixa de medição e são compactos.

3.3.4. Sensores de proximidade

Usados para medir a proximidade de um objeto em relação a outro objeto. Usualmente fornecem um sinal do tipo on/off indicando a presença ou ausência de um objeto. Os sensores indutivo, capacitivo, fotoelétrico e de efeito de Hall são tipos de sensores de proximidade muito usados. O sensor de proximidade indutivo consiste numa bobina

enrolada à volta de um núcleo de ferro. A indutância do sensor altera-se quando um objeto ferroso está nas proximidades. Esta mudança é convertida num interruptor acionado por tensão. O sensor do tipo capacitivo é similar ao indutivo exceto que a proximidade de um objeto afeta a capacitância. Os sensores fotoelétricos são normalmente alinhados com uma fonte de luz infravermelha. A proximidade de um objeto deslocável interrompe o feixe de luz, causando uma mudança no nível de tensão. A tensão do sensor efeito de Hall é produzida quando um condutor portador de corrente é exposto a um campo magnético transversal. A tensão é proporcional à distância transversal entre o sensor do efeito de Hall e o objeto nas suas proximidades.

3.3.5. Sensores de luminosidade

A intensidade da luz e a visão total de um campo são duas medições importantes em muitas aplicações de controlo. Foto transístores, foto resistências e foto díodos são alguns dos tipos de sensores de intensidade luminosa mais comuns. Uma foto resistência comum é feita de sulfureto de cádmio, cuja resistência é máxima quando o sensor está no escuro. Quando a foto resistência é exposta à luz, a resistência decai proporcionalmente com a intensidade da luz. Estes sensores são simples, seguros, baratos e amplamente usados para medir a intensidade luminosa.

Os sensores enunciados acima não constituem uma lista exaustiva dos vários tipos de sensores existentes atualmente. Faltou ainda abordar outros tipos de sensores importantes tais como os sensores de materiais inteligentes, os sensores NBC, sensores nucleares, sensores químicos, micro e nanosensores.

3.3.6. Descrição dos sensores do sistema

Tal como foi efetuado no subcapítulo dos atuadores, será feita uma análise e descrição das várias estruturas do sistema que necessitam algum tipo de sensorização.

É fundamental limitar a área de trabalho do manipulador robótico por motivos de controlo e segurança. Para executar esta tarefa foram escolhidos os sensores indutivos em detrimento das usuais chaves de fim de curso. Os sensores indutivos não requerem contacto físico para atuar, o que proporciona uma maior durabilidade, segurança e velocidade de trabalho do equipamento. Foram escolhidos sensores indutivos 2,5 mm PNP normalmente fechados da Balluff (BES0341) [27].

É importante saber o número e a posição dos fios que se encontram dispostos na estrutura de suporte aos fios. Realizar esta tarefa é difícil devido ao elevado número de fios que existem nessa estrutura. Uma possibilidade de executar esta tarefa seria através de uma câmara fotográfica, que após algum processamento de imagem devolvesse a posição relativa dos fios. Esta solução é de árdua implementação devido aos recursos requeridos para o processamento de imagem e não é muito confiável (possui muitos erros associados). Outra possibilidade reside em colocar um sensor de proximidade em cada posição dos fios. Esta solução é bastante simples mas pode ter custos elevadíssimos de implementação devido a quantidade de sensores necessários, pois são necessários tantos sensores quantas

posições existirem para os fios. No entanto, foi esta a solução adotada e os sensores escolhidos foram LVDT, nomeadamente a série GCD (GCD-121-050) da Schaevitz [28].

Também é necessário verificar a presença dos conectores na estrutura onde se encontram armazenados. Para realizar esta tarefa são necessários sensores de proximidade, e os selecionados foram os sensores óticos por reflexão difusa. Este tipo de sensor apresenta várias vantagens como sejam o custo reduzido, a sua vida útil praticamente infinita, o tamanho reduzido, robustez diante de ruídos eletromagnéticos e a capacidade de detetar todo tipo de material (desde que não sejam transparentes) com uma boa resolução. Então, é requerida a presença de um destes sensores na zona 1 da Figura 28 que tem como objetivo verificar se o conector desceu e se pode ser agarrado pelo atuador, e outro sensor na zona 2 que tem o objetivo de alertar o sistema e o operador de que resta apenas um determinado número de conectores e que é necessária a recarga. Os sensores óticos escolhidos foram os sensores optoelectrónicos SOEG-RT-Q20 da Festo [28].

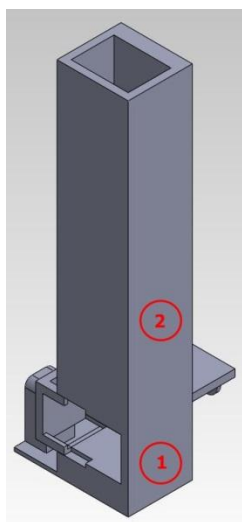


Figura 28 - Posição dos sensores óticos.

A força de aperto realizada pelas pinças robóticas também necessita ser monitorizada. Os fios não se podem libertar da pinça enquanto são agarrados, como também a força não pode ser demasiado elevada que possa danificar os fios. Esta força facilmente seria monitorizada através da implementação de um sensor resistivo de reduzida espessura na parte interna das pinças. No entanto, este sensor é desnecessário pois é também possível monitorizar indiretamente esta força através da medição da corrente como foi explicado anteriormente na descrição dos atuadores.

Outra força a ser monitorizada, é a força que o manipulador faz para inserir um terminal no conector e posteriormente a força que verifica se o mesmo se encontra corretamente inserido (Figura 29). Para esta situação, também não é necessário nenhum tipo de sensor visto que os motores e controladores anteriormente escolhidos possuem um modo de controlo de binário que permite monitorizar esta força.

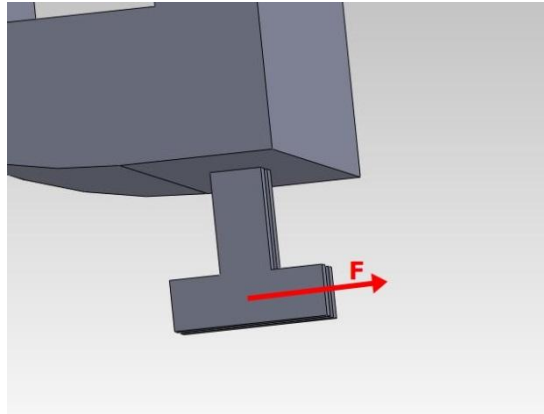


Figura 29 - Representação da força de inserção.

Quer para os servomotores como também para o motor DC é obrigatório utilizar algum tipo de sensor que indique suas posições angulares. Os sensores eleitos para realizar esta função foram os encoders óticos por serem uma solução simples, de confiança e de baixo custo. Os motores escolhidos já possuíam estes sensores.

3.4. Nota conclusiva

Neste capítulo, inicialmente foi apresentada uma descrição detalhada do sistema automatizado visando expor o seu funcionamento como também os vários componentes físicos que o constituem. De seguida, foram analisadas todas as estruturas passíveis de algum tipo de atuação ou sensorização de modo a definir os atuadores e sensores que melhor satisfazem as necessidades do nosso sistema automatizado. Assim, ao longo desta análise foram apresentadas as várias tecnologias de atuadores e sensores existentes no mercado e suas aplicações.

4. Sistema de Controle

4.1. Dispositivo de controle do sistema

Após serem especificados no capítulo anterior os componentes atuadores e sensores do sistema automatizado, procura-se neste capítulo desenvolver um sistema para controlar esses dispositivos. Será então feita uma breve introdução sobre sistemas de controle e sobre o sistema escolhido para controlar este sistema em particular.

Um sistema de controle é uma interconexão de componentes, que formam uma configuração do sistema, e que este por sua vez fornece uma resposta desejada. Atualmente, o uso de sistemas de controle é disseminado: desde uma simples bóia que controla o nível de um tanque de água até os sistemas digitais das aeronaves mais sofisticadas. A base para a análise de um sistema é o princípio que assume uma relação causa-efeito para os componentes do sistema. Portanto, um componente ou processo a ser controlado pode ser representado por um diagrama de blocos como representado na Figura 30. A relação entrada-saída representa a relação causa-efeito do processo, que por sua vez representa o processamento do sinal de entrada para dar um sinal de saída variável, frequentemente com potência amplificada.

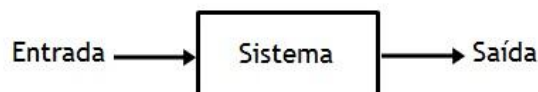


Figura 30 - Esquema básico de um sistema de controle.

Existem dois tipos principais de sistema de controle: malha aberta e malha fechada. Um sistema de controle em malha aberta usa um controlador e um atuador para obter a resposta desejada. Um sistema em malha aberta é um sistema sem realimentação. Em contraste, o controle de malha fechada usa uma medida adicional da saída atual para comparar a saída atual com a resposta de saída desejada [20].

Os controladores também podem ser classificados de acordo com o tipo de controle utilizado. Os quatro tipos mais comuns encontrados em processos são os controladores: On/Off, proporcional, integral e derivativo. Atualmente, na indústria, a implementação destes controladores é feita através de Controladores Lógicos Programáveis (CLP), também conhecidos como PLC (*Programmable Logic Controller*).

Os PLC são dispositivos eletrônicos que executam funções lógicas que antigamente eram realizadas por sistemas eletromecânicos (relés) (Figura 31). O projeto da maioria dos PLC é similar a um computador, no entanto são utilizados para controlo e operação em ambiente industrial.

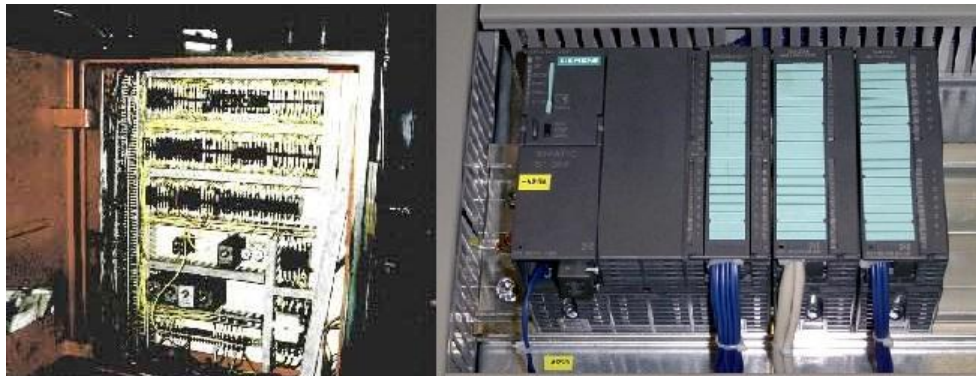


Figura 31 - Painel de relés em analogia ao PLC.

Um PLC consiste numa unidade de processamento central (CPU) que contém um programa aplicativo e módulos de interface de entrada e saída, que se encontram diretamente conectados aos dispositivos de entrada e saída (Figura 32).



Figura 32 - Estrutura básica de um PLC.

Durante a operação, a CPU realiza três operações: (1) leitura das entradas, (2) execução do programa residente na memória, (3) escrita ou atualização das saídas e memórias de acordo com a execução do programa (3). Este processo é realizado de maneira cíclica, denominado *scan* ou varrimento.

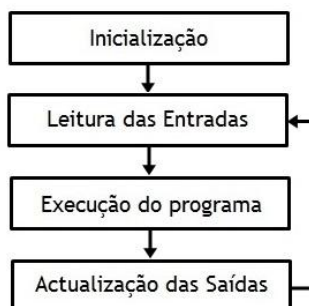


Figura 33 - Ciclo de varrimento de um PLC.

Uma das grandes vantagens dos PLC são as características de programação que oferecem facilidade e flexibilidade para alterar programas, que podem ser armazenados em memória para replicação em outro sistema ou ser guardado como sistema de reserva (*backup*) e, em caso de defeito, sinalizadores visuais no PLC informam ao programador a parte do sistema que se encontra defeituosa. Possuem também outras características importantes, tais como: requerem pouco espaço; têm baixos consumos de energia; capacidade de controlar processos remotos (através de comunicação); possuem uma arquitetura modular que permite flexibilidade de instalação e expansibilidade; e possuem um grande variedade de interfaces de entrada/saída o que permite controlar uma variedade de dispositivos [21].

4.1.1. Características do PLC

Escolher um PLC para controlar este processo é extremamente importante porque reforça a otimização de custos. Após terem sido apresentados os conhecimentos básicos sobre PLC, serão apresentados de seguida vários critérios que ajudam a escolher um PLC. Tomar decisões de acordo com os critérios seguintes implica saber exatamente as necessidades da aplicação e quantas entradas e saídas são necessárias para o presente e para o futuro.

4.1.1.1. Tipos de PLC

Os PLC podem ser classificados em compactos e modulares de acordo com a disposição dos seus elementos constituintes. PLC compactos possuem incorporados em uma única unidade: a fonte de alimentação, a CPU e os módulos de Entrada/Saída, ficando o utilizador com acesso somente aos conectores do sistema de Entrada/Saída. Esse tipo de estrutura normalmente é empregue para PLC de pequeno porte e destinados ao controlo de aplicações simples e com reduzido uso de entradas/saídas. PLC modulares são compostos por vários módulos que executam uma determinada função. Podem coexistir processador e memória num único módulo com fonte separada ou então as três partes juntas numa única unidade. O sistema de entradas/saídas é decomposto em módulos de acordo com suas características. Estes são colocados em posições predefinidas (*racks*), formando uma configuração de médio e grande porte. Devido à grande disponibilidade de uma vasta gama de módulos, estes PLC possuem a vantagem de proporcionar uma montagem com uma ampla gama de opções.

Esta característica dos PLC modulares é extremamente importante para este sistema em causa, visto que as estruturas onde se encontram os fios e os conectores devem ser escaláveis (ou, expansíveis). Assim, basta acrescentar ou substituir os módulos de entrada/saída conforme as necessidades.

4.1.1.2. Dispositivos discretos e analógicos

Outra característica importante é determinar quantos dispositivos discretos e analógicos o sistema possui. O número e o tipo de dispositivos que o sistema inclui está diretamente relacionado com a quantidade de entradas/saídas necessárias ao sistema. Assim, o PLC

escolhido deve suportar os requisitos de entrada/saída ou ter módulos que suportem os vários tipos de sinais.

4.1.1.3. Módulos especiais ou características de aplicação específica

Funções especiais não se encontram necessariamente disponíveis num controlador CPU ou em módulos de entrada/saída standard. Compreender as funções especiais que o sistema deve desempenhar ajuda a determinar a necessidade de adquirir módulos especiais adicionais. Estas características especiais incluem contadores de alta velocidade, motores servo/passos, relógios de tempo-real, programação BASIC, entre outros.

4.1.1.4. Requisitos da CPU

Uma das características mais importantes é determinar os requisitos da CPU, isto é: quantidade de memória necessária; o tamanho do programa e o tipo de instruções que deve incluir; e o quão rápido o tempo de varrimento precisa ser.

A memória de dados é referida como a quantidade de memória necessária para manipulação dinâmica de dados e armazenamento no sistema. Por exemplo, instruções de contadores e temporizadores tipicamente usam a memória para guardar pontos de ajuste, valores correntes e outro código interno (*flags*). Se a aplicação requer retenção do historial de dados como os valores medidos em dispositivos por grandes períodos de tempo, o tamanho das tabelas de dados requerido pode determinar o modelo da CPU escolhida. A memória do programa é a quantidade de memória necessária para armazenar a sequência de instruções do programa que foi selecionada para desempenhar a aplicação. Cada tipo de instruções requer uma quantidade específica de memória do programa, tipicamente definida no manual de programação. Para aplicações que basicamente são de natureza sequencial, pode-se estimar a memória do programa através da regra empírica do dispositivo de entrada/saída (5 palavras de memória para cada dispositivo discreto e 25 para dispositivos analógicos); aplicações complexas são mais difíceis de avaliar.

Se o tempo de varrimento é importante para a aplicação, deve-se considerar a velocidade do processador bem como a velocidade de execução das instruções. Algumas CPU são rápidas em lógica booleana mas lentas com instruções de manipulação de dados. Se funções especiais são necessárias, como por exemplo funções PID, a CPU selecionada deve executar facilmente estas funções.

4.1.1.5. Localização das entradas/saídas

Se subsistemas são necessários a grandes distâncias da CPU, é preciso um controlador que suporte entradas/saídas remotas. É preciso também determinar se as distâncias remotas e velocidades suportadas são adequadas para a aplicação. Hardware de entrada/saída baseado em Serial e Ethernet são as duas escolhas tipicamente disponíveis para a grande parte dos sistemas. Este tipo de entrada/saída é também conhecido como entradas/saídas distribuídas e podem requerer um protocolo de comunicação particular, como por exemplo o Modbus.

4.1.1.6. Comunicação

As portas de comunicação (outras para além da porta de programação) nem sempre são incluídas com um controlador. Conhecer o número e o tipo de portas de comunicação do sistema, ajuda a escolher uma CPU que suporte os requisitos de comunicação ou módulos de comunicação adicionais se necessário. Por exemplo, para a comunicação com uma HMI (*Human-Machine Interface*) deve ser considerada uma porta RS232.

4.1.1.7. Programação

Certos controladores podem não suportar todos os tipos de instruções. É preciso escolher um modelo que suporte todas as instruções necessárias à aplicação específica. Por exemplo, funções PID são mais fáceis de usar do que escrever o próprio código para desempenhar o controlo de processos de malha fechada. Tipicamente, instruções como os temporizadores, contadores, entre outros, encontram-se disponíveis na maior parte dos controladores.

4.2. Programação

O PLC escolhido foi o SIMATIC S7-1200 da Siemens (Figura 34) por satisfazer grande parte das características apresentadas no subcapítulo 4.1.1 e por este se encontrar disponível nos laboratórios do Departamento de Engenharia Eletromecânica da Universidade da Beira Interior. Assim, foi possível testar o funcionamento do programa desenvolvido e as simulações apresentadas mais adiante no capítulo 5. O software utilizado para a sua programação foi o *Totally Integrated Automation Portal* (TIA Portal) da Siemens (Figura 35), pelo que toda a programação apresentada neste trabalho constitui trechos de código concebidos neste software. O TIA Portal suporta vários tipos de linguagem de programação, como a lógica ladder (LAD), diagramas de blocos de funções (FBD) e linguagem de controlo estruturada (SCL). A lógica ladder foi a linguagem escolhida para a programação.



Figura 34 - SIMATIC S7-1200.

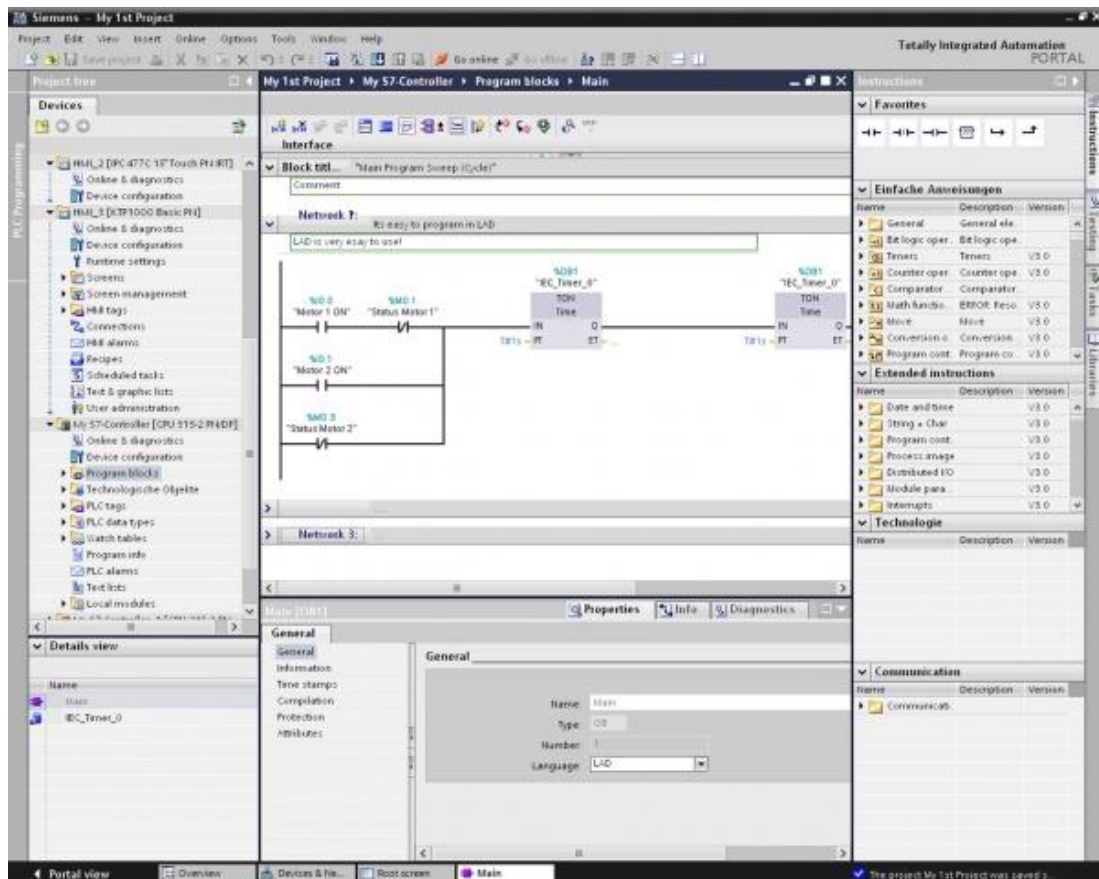


Figura 35 - Visão geral do ambiente de trabalho do TIA Portal.

A CPU do S7-1200 suporta vários tipos de blocos de código que permitem criar um programa com uma estrutura eficiente e organizada. Os tipos de blocos de código são: (1) os blocos organizacionais (OB), que definem a estrutura do programa que têm um comportamento predefinido e são acionados por certos eventos; (2) blocos funcionais (FC); (3) funções (FB) que contém o código do programa correspondente a tarefas específicas e combinações de parâmetros; e (4) blocos de dados (DB) que são usados para guardar dados usados pelos blocos do programa. A Figura 36 representa um esquema da estrutura do programa desenvolvido para controlo do sistema que relaciona os vários tipos de blocos de código enunciados anteriormente.

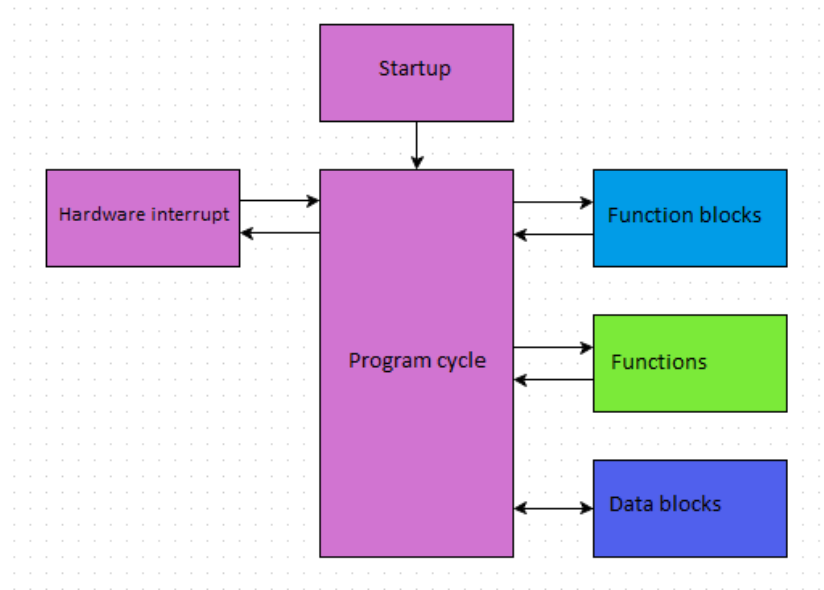


Figura 36 - Esquema da estrutura do programa.

A programação do S7-1200 permite a criação de vários tipos de OB, dentro dos quais, o *Startup* OB e o *Hardware interrupt* OB que têm um papel relevante do ponto de vista da elaboração do programa de controlo. O bloco *Startup* é executado uma única vez sempre que a CPU transita do modo de operação STOP para RUN. Após completar este bloco, inicia-se a execução do ciclo do programa MAIN (principal). O bloco *Startup* é particularmente útil para ativar certas funções do programa ou para carregar valores iniciais predefinidos que são essenciais para uma correta execução do programa do autómato. O bloco *Hardware interrupt* interrompe a execução normal de um ciclo do programa em resposta a um sinal desencadeado por um evento do equipamento. Ou seja, quando ativado, a CPU pára a execução de qualquer instrução (com exceção de certos casos), regressando a este ponto após completar a execução do bloco. Os outros tipos de blocos organizacionais não serão mencionados, por não serem utilizados pelo programa desenvolvido.

O acesso à memória global da CPU é feito através de uma variedade de áreas de memória especializadas (ver Tabela 3). Cada diferente localização da memória possui um endereço único. O programa do utilizador usa estes endereços para ter acesso à informação da memória nessas localizações. O endereço absoluto consiste nos seguintes elementos:

- Identificador da área da memória (tal como, I, Q ou M, correspondendo respetivamente a Imagem do processo de entradas, Imagem do processo de saídas, ou Memória de bits);
- Tamanho dos dados a serem acedidos (“B” para Byte, “W” para Word ou “D” para Doubleword);
- Endereço de início dos dados (tal como Byte 3 ou Word 3).





Tabela 3 - Áreas da memória.

Area da Memoria	Descrição
I Imagem do processo de entradas	Copiado a partir das entradas físicas no início do ciclo de varrimento.
Q Imagem do processo de saídas	Copiado para as saídas físicas no início do ciclo de varrimento.
M Memória de bits	Memória de controlo e de dados.
L Memória temporária	Dados temporários para um bloco local a este bloco.
DB Blocos de dados	Memória de dados e também memória de parâmetros para FBs.

A maioria das instruções no programa opera com “tags”. Uma *tag* é uma variável usada no programa que pode assumir diferentes valores. *Tags* têm a vantagem de poderem alterar centralmente um endereço usado no programa. Sem o endereçamento simbólico proporcionado pelas *tags*, um endereço usado várias vezes no programa teria de ser alterado em variados pontos do programa cada vez que se alterava a configuração das entradas e saídas do PLC.

A lógica ladder é muito eficaz para manipulação de lógica Booleana. Para criar a combinações lógicas podem ser utilizadas chaves (ou contactos) (ver Tabela 4) normalmente abertos ou fechados que, conectados em série formam uma rede lógica AND e conectados em paralelo formam uma rede lógica OR. O contato normalmente aberto (NA) encontra-se fechado (conduz energia) quando o valor do bit atribuído é igual a 1 e o contato normalmente fechado (NF) encontra-se fechado quando o valor do bit atribuído é 0.

Tabela 4 - Contatos.

Contato/bloco ladder	Descrição
"IN" 	Contato normalmente aberto.
"IN" 	Contato normalmente fechado.
"IN"  "M_BIT"	O estado deste contato é “Verdade” quando uma transição positiva é detetada no bit atribuído “IN”.
"IN"  "M_BIT"	O estado deste contato é “Verdade” quando uma transição negativa é detetada no bit atribuído “IN”.

Como representado na Figura 37, os contatos A e C são normalmente abertos e B é normalmente fechado. A e C encontram-se ligados em paralelo formando uma combinação lógica OR, que por sua vez formam uma combinação lógica AND com B. Matematicamente, a combinação ilustrada representa a seguinte expressão booleana $(A + C) \bar{B}$.

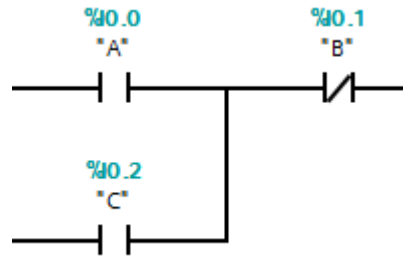


Figura 37 - Contactos NA e NF em paralelo e em série.

Para atribuir um valor a um determinado bit de saída são usadas as instruções bobines de saída (ver Tabela 5). Os sinais de saída que controlam os atuadores encontram-se ligados aos terminais Q da CPU. Assim, se um bit de saída especificado usa o identificador de memória Q, então a CPU transforma o bit de saída num sinal “On/Off”, sendo o estado do fluxo de energia definido pelo estado do bit especificado.

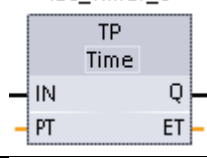
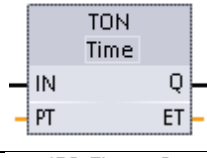
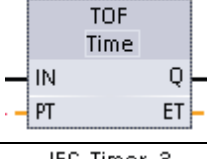

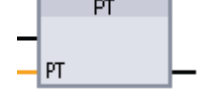

Tabela 5 - Bobines de saída.

Contato/bloco ladder	Descrição
"OUT" —()—	Se existe fluxo de energia que atravessa a bobine é atribuído o valor 1 ao bit de saída, caso contrário é atribuído o valor 0.
"OUT" —(/)—	Se existe fluxo de energia que atravessa a bobine é atribuído o valor 0 ao bit de saída, caso contrário é atribuído o valor 1.
"OUT" —(S)—	Quando ativado, o valor dos dados do endereço OUT é colocado a 1. Quando não se encontra ativado, o valor é inalterado.
"OUT" —(R)—	Quando ativado, o valor dos dados do endereço OUT é colocado a 0. Quando não se encontra ativado, o valor é inalterado.
"OUT" —(SET_BF)— "n"	Quando ativado, o valor dos dados começando no endereço OUT para “n” bits é definido a 1. O valor permanece inalterado quando desativado.
"OUT" —(RESET_BF)— "n"	Quando ativado, o valor dos dados começando no endereço OUT para “n” bits é definido a 0. O valor permanece inalterado quando desativado.
"OUT" —(P)— "M_BIT"	O valor do bit OUT é 1 apenas quando é detetada uma transição positiva no fluxo de energia que atravessa a bobine.
"OUT" —(N)— "M_BIT"	O valor do bit OUT é 1 apenas quando é detetada uma transição negativa no fluxo de energia que atravessa a bobine.

Além dos contactos e das bobines, existem outros conjuntos de instruções que permitem a programação do autómato S7-1200. São apresentadas em seguida outras instruções úteis do ponto de vista da elaboração do programa de controlo. As instruções de temporizadores (Tabela 6) são usadas para criar atrasos de tempo predefinidos. O número de

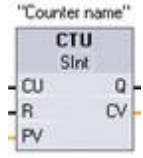
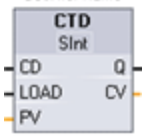
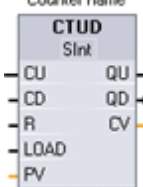
temporizadores que podem ser usados é apenas limitado pela quantidade de memória da CPU.

Tabela 6 - Temporizadores.

Bloco ladder	Descrição
<p>IEC_Timer_0</p> 	O temporizador TP gera um pulso com uma largura de tempo predefinido.
<p>IEC_Timer_1</p> 	O temporizador TON coloca a saída Q a ON após um determinado atraso de tempo predefinido.
<p>IEC_Timer_2</p> 	O temporizador TOF limpa a saída Q para OFF após um determinado atraso de tempo predefinido.
<p>IEC_Timer_3</p> 	O temporizador TONR coloca a saída Q a ON após um determinado atraso de tempo predefinido. O tempo decorrido é acumulado ao longo de múltiplos períodos de tempo antes que a entrada R seja usada limpar o tempo decorrido.
	O bloco PT carrega um novo valor de tempo predefinido num temporizador especificado.
	O bloco RT reinicia um temporizador especificado.

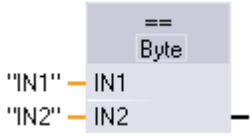


As instruções de contadores (Tabela 7) são usadas para contar eventos internos do programa ou eventos externos de processos.

Tabela 7 - Contadores.

Bloco ladder	Descrição
	O CTU é um contador ascendente.
	O CTD é um contador descendente.
	O CTUD é um contador ascendente e descendente.

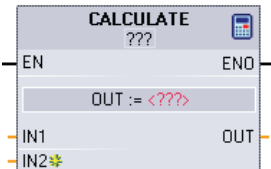
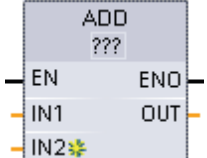
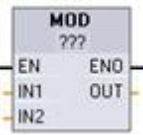
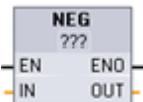

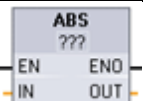


As instruções de comparação (Tabela 8) comparam valores do mesmo tipo.

Tabela 8 - Instruções de Comparação.

Bloco ladder	Descrição
	Quando a comparação é verdadeira, o contato é ativado.
	Testa se um valor se encontra dentro ou fora de um intervalo de valores especificado. Se a comparação é verdadeira, o bloco é ativado.
	

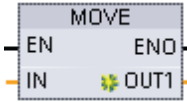
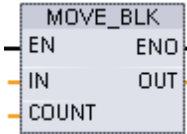
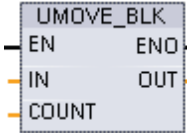
O autómato possui também várias instruções que realizam operações matemáticas (Tabela 9), tais como: a cálculo de funções definidas pelo utilizador, adição, subtração, multiplicação, divisão, módulo, negação, incremento e decremento, valor absoluto, valores máximo e mínimo, limite, entre outras.

Tabela 9 - Instruções matemáticas.

Bloco ladder	Descrição
	Permite criar uma função matemática que opera as entradas (IN1, IN2, ... INn) e produz o resultado em OUT, de acordo com a equação definida.
	Soma as entradas (IN1, IN2, ... INn) e devolve o resultado em OUT.
	Devolve o resto inteiro de uma divisão. O valor em IN1 é dividido pelo valor de IN2 e o resultado produzido em OUT.
	Inverte o sinal aritmético de um valor no parâmetro IN e guarda o resultado em OUT.
	Incrementa o valor de um número inteiro com ou sem sinal.
	Calcula o valor absoluto de um número inteiro com sinal ou de um número real.
	Compara os valores do parâmetro IN e atribui o menor desses valores ao parâmetro OUT.
	Testa se o valor do parâmetro IN se encontra dentro de um determinado intervalo de valores. Se não se encontra, fixa o valor em MIN ou em MAX.


A instrução Move (ver Tabela 10) permite copiar elementos de dados para um novo endereço de memória e converter de um tipo de dados para outro. Os dados de origem não são alterados pelo processo Move.

Tabela 10 - Instruções Move.

Bloco ladder	Descrição
	Copia elementos de dados guardados num endereço especificado para um novo endereço ou múltiplos endereços.
	Move interrompível que copia um bloco de elementos de dados para um novo endereço.
	Move ininterrompível que copia um bloco de elementos de dados para um novo endereço.

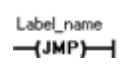
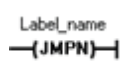

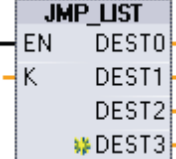

Para o correto funcionamento de um programa é necessário garantir que os tipos de dados que servem de parâmetros de entrada a uma determinada instrução sejam idênticos. Para isso, a utilização da instrução de conversão (Tabela 11) torna-se muito útil visto que converte os dados de um tipo para outro tipo.

Tabela 11 - Instrução de conversão.

Bloco ladder	Descrição
	Converte elementos de dados de um tipo para o outro.

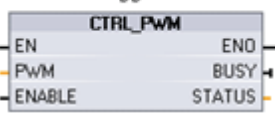
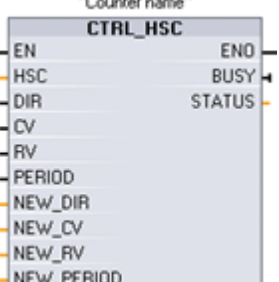
As instruções *jump* e *switch* (Tabela 12) são uma forma de controlo do fluxo do programa, criando saltos para instruções de destino marcadas.

Tabela 12 - Instruções de controlo do fluxo do programa.

Bloco ladder	Descrição
	Se existe fluxo de energia na bobine, então a execução do programa continua com a execução da primeira instrução seguida pela marcação especificada (Label).
	Se não existe fluxo de energia na bobine, então a execução do programa continua com a execução da primeira instrução seguida pela marcação especificada (Label).
	Marcação de destino (Label) para uma instrução jump JMP ou JMPN.
	Age como um distribuidor de saltos do programa para controlar a execução de secções do programa. Dependendo do valor da entrada K, o salto é dado para o Label correspondente.
	Também age como um distribuidor de saltos do programa. Dependendo do resultado da comparação entre o valor de K e os valores de entrada de comparação, o salto ocorre para o label onde a primeira comparação de teste é verdadeira.

As instruções CTRL_PWM e CTRL_HSC (Tabela 13) fazem parte de um conjunto de instruções especiais que permitem o controlo de funções específicas dos autómatos programáveis. O uso deste tipo de instruções requer ativação e configuração de certas propriedades do autómato. É ainda de salientar, que estas instruções possuem entradas e saídas dedicadas no autómato e que após sua ativação apenas podem ser usadas para efeitos relacionados com essas funções [22].

Tabela 13 - Instruções de tecnologias.

Bloco ladder	Descrição
	A instrução CTRL_PWM liga e controla um gerador de pulsos com um tempo de ciclo fixo mas com um ciclo de trabalho variável.
	O high-speed counter (HSC) conta eventos que ocorrem mais depressa do que a taxa de execução do ciclo de varrimento. A instrução CTRL_HSC permite ao programa do utilizador alterar alguns parâmetros do HSC.

Após expor todas as características de programação do PLC escolhido, torna-se apropriado falar do código produzido para o sistema automatizado em questão que se encontra no Anexo I.

4.3. Interface gráfico do utilizador

Outro elemento fundamental de um sistema de controlo é o componente do sistema responsável por interagir com o utilizador. Existem vários tipos de dispositivos capazes de desempenhar esta função, no entanto, o mais utilizado na automação é o interface homem-máquina, ou abreviadamente HMI (*Human-Machine Interface*). O objetivo destes dispositivos é criar um interface para o utilizador que torne fácil, eficiente e agradável operar a máquina de maneira a produzir um determinado resultado.

De modo a evitar constrangimentos, a HMI deve ser compatível com o autómato programável. Por isso, a HMI selecionada foi a SIMATIC HMI KTP600 da Siemens (Figura 38). Uma das vantagens do TIA Portal é permitir a programação simultânea do PLC e da HMI no mesmo projeto. Portanto, tal como para a programação do S7-1200, a programação da HMI também foi desenvolvida através deste software.



Figura 38 - SIMATIC HMI KTP600.

Embora um processo seja maioritariamente controlado pelo PLC, o utilizador deve usar a HMI para monitorizar o processo ou intervir no processo em execução. Portanto, um sistema HMI representa o interface entre o utilizador e um processo. A HMI permite operar e monitorizar máquinas e instalações através das seguintes funções: (1) Exibição dos processos; (2) Operação dos processos; (3) Alarmes de saída; (4) Administração dos parâmetros do processo e de “recipes”.

O interface do utilizador criado numa HMI apenas consiste em vários “screens” (ou telas; ver Figura 39) interconectadas. São estes que permitem operar e monitorizar uma

instalação e são o elemento principal de um projeto. Os screens são exibidos no dispositivo HMI e são constituídos por vários objetos configuráveis, tais como:

- Objetos operáveis, como por exemplo janelas de alarmes, botões ou campos de entrada e saída;
- Objetos que exibem valores, tal como vistas de tendências e barras;
- Objetos de informação usados para descrever outros objetos e screens, como por exemplo campos de texto ou campos gráficos.

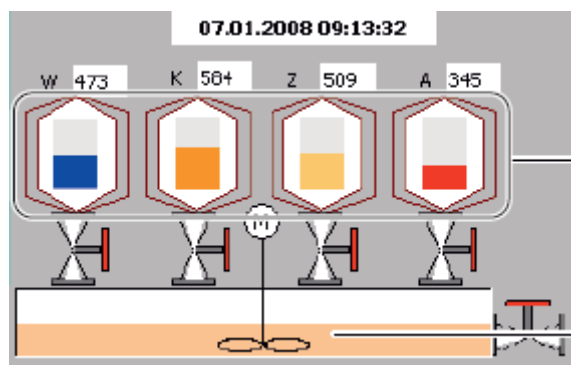


Figura 39 - Exemplo de um screen com vários tipos de objetos.

Portanto, os objetos são elementos gráficos que são usados para desenhar os screens de um projeto. Podem ser arrastados a partir da caixa de ferramentas e largados diretamente para um screen. A caixa de ferramentas no TIA Portal que contém os objetos possui as seguintes divisões:

- “**Basic objects**” - Inclui objetos gráficos básicos (Tabela 14);
- “**Elements**” - Inclui elementos de controlo básico (Tabela 15);
- “**Controls**” - Fornecem funções avançadas. Também representam operações de processos de forma dinâmica, como por exemplo a “Vista de tendência” e a “Vista de recipes” (Tabela 16);
- “**Graphics**” - São elementos gráficos que podem ser colocados em screens ou em outros objetos como os botões e os campos I/O;
- “**Libraries**” - Os objetos guardados nas bibliotecas só precisam de ser configurados uma vez. Depois o objeto pode ser usado repetidamente quantas vezes o for necessário. Os objetos da biblioteca (*library*) ampliam o número de objetos disponíveis para os screens e aumentam a eficácia durante a configuração através do uso de múltiplos objetos prontos a usar.

Tabela 14 - Basic objects.







Ícone	Objeto	Instruções
	“Linha”	-
	“Elipse”	-
	“Círculo”	-
	“Retângulo”	-
	“Campo de texto”	Uma ou mais linhas de texto. O tipo e tamanho de letra são ajustáveis.
	“Gráfico”	Exibe gráficos a partir de programas gráficos externos e insere objetos OLE.

Tabela 15 - Elements.












Ícone	Objeto	Instruções
	“Campo I/O”	Mostra o valor de uma tag e/ou escreve o valor da tag.
	“Botão”	Executa uma lista de funções ou um script conforme configurado.
	“Campo simbólico I/O”	Mostra o valor de uma tag e/ou escreve o valor da tag. Um texto é exibido a partir de uma lista de texto, em relação ao valor da tag.
	“Campo gráfico I/O”	Mostra o valor de uma tag e/ou escreve o valor da tag. Um gráfico é exibido a partir de uma lista de gráficos, em relação ao valor da tag.
	“Campo de data/tempo”	Exibe a data e tempo do sistema ou o tempo e data de uma tag. Isto permite ao operador introduzir novos valores.
	“Barra”	A barra representa um valor a partir do PLC na forma de um gráfico de barras escalável.
	“Interruptor”	Alterna entre 2 estados definidos. Pode ser rotulado com texto ou um gráfico.

Tabela 16 - Controls.

Ícone	Objeto	Descrição
	“Vista de alarme”	Mostra alarmes atualmente pendentes ou eventos do “alarm buffer” ou “alarm log”.
	“Vista de tendência”	Representa curvas múltiplas com valores do PLC ou de um registo.
	“Vista do utilizador”	Permite um administrador gerir os utilizadores da HMI.
	“Vista de recipes”	Exibe registos de dados e permite que sejam editados.

O mapeamento do sistema e a exibição dos processos pelo dispositivo HMI são alcançados pela dinamização dos objetos. A dinamização dos objetos pode ser implementada através de animações ou eventos. As animações encontram-se predefinidas no TIA Portal e são adaptadas aos requisitos do projeto. Os objetos operáveis também reagem a certos eventos, como por exemplo o clique do rato. Cada objeto pode ser configurado com uma lista de funções com as funções permitidas pelo sistema num evento. Assim, a lista de funções é processada em resposta ao evento que a desencadeou. Por exemplo, a

interligação entre screens é habitualmente realizada através de eventos configurados em certos objetos como é o caso dos botões.

A HMI possui também outras duas funções fundamentais, como é o caso dos alarmes e dos “recipes”. O sistema de alarme permite visualizar e registar estados de operação ou falhas que ocorrem ou estão presentes no dispositivo HMI. O sistema de alarme processa uma variedade de tipos de alarme que podem ser divididos em: (1) alarmes definidos pelo utilizador que são usados para monitorizar um processo e, (2) alarmes definidos pelo sistema que monitorizam o próprio dispositivo HMI. Os eventos de alarme detetados são exibidos na HMI. O acesso direcionado aos alarmes combinado com informações complementares sobre alarmes individuais permite que as falhas sejam localizadas e eliminadas rapidamente. É de salientar ainda que existem dois tipos de alarmes definidos pelo utilizador: (1) alarmes analógicos que são usados para monitorizar violações de limites e, (2) alarmes discretos usados para monitorizar estados.

Dados relacionados ou dados de produção, como por exemplo os parâmetros que são atribuídos a uma máquina e que são necessários para converter a produção numa diferente variedade do produto, são combinados em *recipes*. Um *recipe* contém registos de dados e têm uma estrutura de dados fixa que é definida na sua configuração. Portanto, diferem em termos de valores, mas não na sua estrutura. Os *recipes* são guardados no dispositivo HMI e são sempre completamente transferidos entre a HMI e o PLC num único passo. Um exemplo prático da utilidade dos *recipes* é: quando a transferência de um *recipe* para uma misturadora altera os rácios de mistura, o que resulta na produção de néctar em vez de sumo [23].

4.4. Nota conclusiva

Neste capítulo foi realizada uma breve introdução sobre os tipos de sistemas de controlo de modo a justificar e apresentar o sistema de controlo escolhido para integrar o sistema automatizado descrito nesta dissertação. Seguidamente, foram apresentadas as suas características de programação e outros aspetos funcionais relevantes. Por fim foi também exposto uma interface que permite ao utilizador controlar o sistema, bem como as respetivas ferramentas que permitem criar uma interface eficiente e fácil de usar pelo utilizador.

5. Protótipo do Sistema Automatizado

5.1. Introdução

Embora inicialmente prevista a concepção de um protótipo para testar as funcionalidades e desempenho do sistema projetado, apenas foi possivelmente trabalhar com uma parte dos componentes que constituem o sistema devido à impossibilidade em adquirir o restante material. Assim, o sistema onde foi possível realizar alguns testes é constituído pelo servomotor AC síncrono SER 397/4L3S da Berger Lahr montado no eixo portal LM-P404R-AT5 e controlado pelo Twin Line Servodrive TLD132F (Figura 40) da Berger Lahr, que por sua vez, é controlado pelo PLC SIMATIC S7-1200 e pela HMI SIMATIC KTP600 da Siemens. Estes componentes apenas constituem uma pequena parte do sistema desenvolvido neste trabalho, mas permitiram testar e aprimorar um programa de controlo posicional e de binário, sendo uma das principais características e funções do sistema automatizado desenvolvido nesta dissertação.

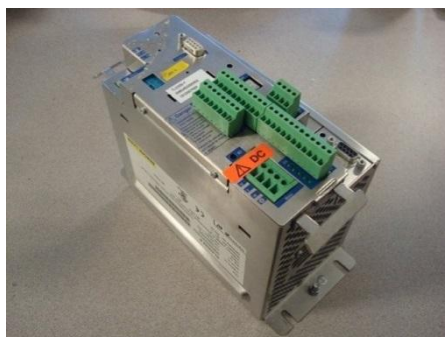


Figura 40 - Twin Line Servodrive TLD132F da Berger Lahr.

Para melhor entender como foi implementado o controlo é necessário falar sobre algumas características do servocontrolador utilizado. O Twin Line servodrive possui um modo de operação manual e vários modos de operação automático dependendo dos módulos instalados. Neste caso, o servodrive testado apenas possui os modos de controlo de velocidade e controlo de corrente em modo de operação automático. Embora não possua um modo de controlo posicional como seria desejado, foi possível implementá-lo através da leitura posicional do encoder pelo PLC como explicado mais adiante. Em modo manual, o controlador opera em modo de controlo de velocidade movendo-se apenas a duas velocidades previamente configuradas mediante sinais de entrada. Em controlo de velocidade e controlo de corrente no modo automático, o motor move-se a diferentes velocidades e correntes configuráveis. Para isto, o controlador lê periodicamente uma

entrada de $\pm 10V$ e calcula o seu valor com uma resolução de 12 bit, movendo-se imediatamente a velocidade ou corrente padronizada pelo valor lido da entrada $\pm 10V$. Este servocontrolador possui também uma função importante chamada *Quick-Stop*. *Quick-Stop* é uma função de travagem rápida que pára o motor caso ocorra uma falha. Esta função pode ser acionada por: (1) uma falha de operação que torna um procedimento de travagem rápida necessário; (2) O sinal de entrada STOP e; (3) interruptores de referência ou de limite. A função *Quick-Stop* tem de ser confirmada através do sinal de entrada FAULT_RESET quando ocorre. Se o motor é parado pelo sinal STOP, este tem de ser restabelecido antes de ser confirmada a falha e caso seja acionada pelos sinais LIMN e LIMP dos interruptores de limite, a unidade móvel tem de ser movida de volta para intervalo de movimento permitido em modo manual [24].

O controlador comunica através de linhas de interface de sinais, como é o caso de alguns dos sinais anteriormente descritos. A Tabela 17 representa todos os sinais que constituem esse interface.

Tabela 17 - Significado das ligações do interface de sinais do controlador [24].

Pino	Sinal	Ativo	Significado	I/O
1-11	-	-	Não atribuído	-
12	FUNCT_OUT	Alto	Sem erros ou velocidade zero	O
13	RDY_TSO	Alto	Pronto para operação, ativo nos estados de operação 4 a 7	O
14	ALARM	Baixo	Erro ou mensagem de alerta	O
15	ACTIVE_CON	Alto	Motor sobre corrente	O
16	ACTIVE_0V	Alto	Potencial de referência de ACTIVE_CON	O
17	ANALOG_IN+	-	Entrada de controlo analógico $\pm 10V$	I
18	ANALOG_IN-	-	Entrada de controlo analógico 0V, potencial de referência do pino 17 ANALOG_IN+	I
19	MAN_P	Alto	Movimento do modo manual, rotação do motor no sentido horário	I
20	MAN_N	Alto	Movimento do modo manual, rotação do motor no sentido anti-horário	I
21	MAN_FAST	Alto	Seleção da velocidade baixa ou elevada no modo de operação manual	I
22	FAULT_RESET	Alto	Limpa mensagens de erros	I
23	-	-	Não atribuído	-
24	FUNCT_IN1	Baixo	Escolhe parâmetros 1 (nível baixo) ou 2 (nível Alto)	I
25	FUNCT_IN2	Baixo	Muda modo de operação	I
26	LIMP	Baixo	Sinal do interruptor de limite da rotação do motor no sentido horário	I
27	LIMN	Baixo	Sinal do interruptor de limite da rotação do motor no sentido anti-horário	I
28	STOP	Baixo	Pára o motor	I
29	AUTOM	Alto	Modo automático (alto) ou modo manual (baixo)	I
30	ENABLE	Alto	Liga (alto) ou desliga (baixo) a corrente do motor	I

Os sinais que indicam a posição atual do motor são emitidos pelo encoder de quadratura e modelados pelo módulo ESIM do controlador. Os sinais são constituídos por dois sinais de fase deslocada (A/B) e um pulso “index”. Os sinais A/B são gerados e enviados pelo

módulo do encoder do motor. O pulso índice é gerado pelo módulo ESIM. A posição inicial do pulso índice é baseada na posição zero absoluto do motor e pode ser configurada. O valor do encoder é mostrado em incrementos com uma tolerância de ± 2 incrementos.

5.2. Esquema de montagem do sistema

A Figura 41 mostra o esquema de montagem e de ligações do sistema.

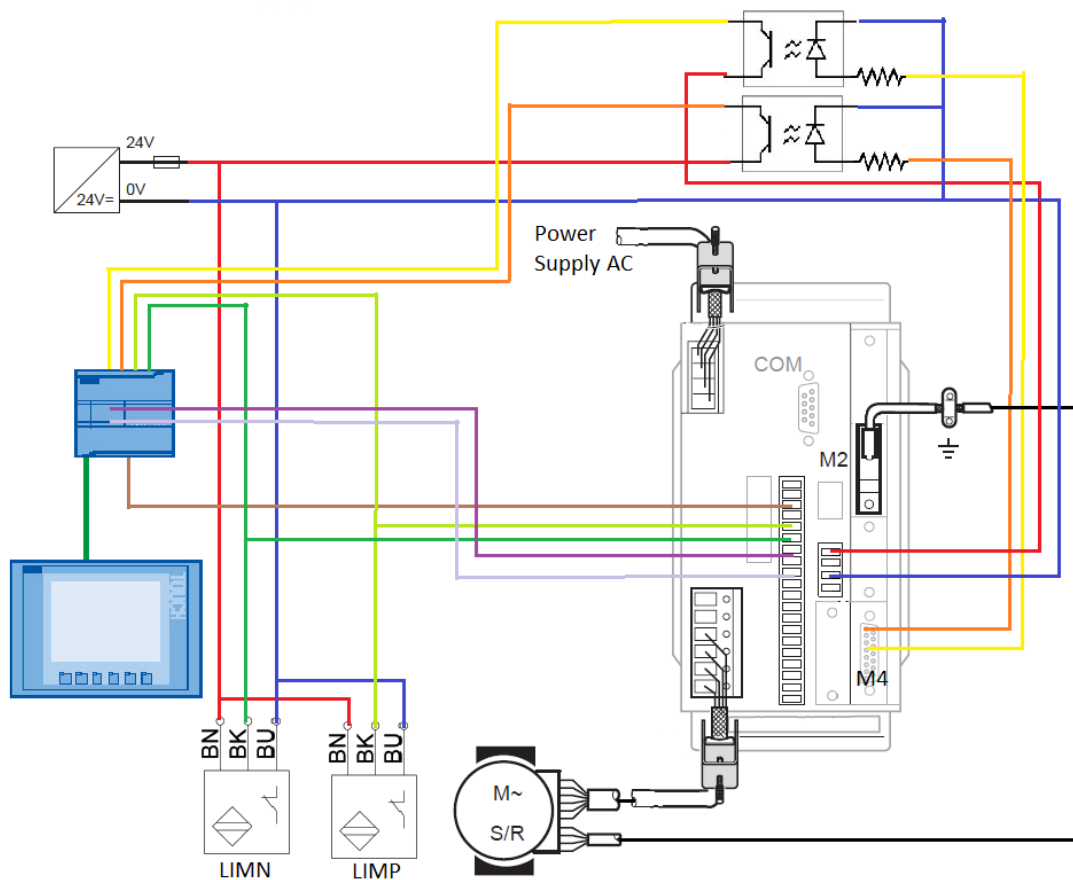


Figura 41 - Esquema de ligações do circuito elétrico do sistema.

A maioria dos dispositivos que compõe este sistema opera através de tensão elétrica contínua a 24V. Então ligou-se o controlador, a HMI e os interruptores de limite a uma fonte de alimentação de 24V. O controlador também tem de estar ligado a uma fonte de corrente alternada para poder estabelecer a conexão de 3 fases com o motor. O encoder do motor encontra-se ligado ao módulo HIFA-C (módulo M2) do controlador. O feedback posicional transmitido ao PLC pelo controlador é feito pelo pino 1 (sinal A) e pino 12 (sinal B) do módulo ESIM1-C (M4) do controlador. Teoricamente, a amplitude do sinal A/B é de 24V. No entanto, por motivos desconhecidos, verificou-se que a amplitude era apenas de 10V. Então foi necessário amplificar estes sinais de modo a serem detetados pelo PLC. Isto

foi conseguido através de condicionamento do sinal feito por optoacopladores. Estes componentes foram utilizados por serem de fácil implementação e por possuírem uma frequência de resposta elevada, seguindo a montagem ilustrada na Figura 41. O sinal proveniente dos interruptores de limite alimenta tanto o interface de sinais do controlador como o PLC. Os sinais de controlo enviados do PLC são enviados através das saídas digitais e da placa de sinal analógico para o interface de sinais do controlador. O PLC e a HMI comunicam pelo protocolo PROFINET através de um cabo Ethernet. A Figura 42 mostra pormenorizadamente através de cores quais os pinos que se encontram conectados no interface de sinais do controlador com outros dispositivos. Os pinos de cor castanha encontram-se ligados às diferentes saídas do PLC, os pinos com cor verde estão ligados aos interruptores de limite e os pinos violeta estão ligados à placa de sinal analógico do PLC.

9	-
10	-
11	-
12	FUNCT_OUT
13	RDY_TSO
14	ALARM
15	ACTIVE_CON
16	ACTIVE_GND
17	ANALOG_IN+
18	ANALOG_IN-
19	MAN_P
20	MAN_N
21	MAN_FAST
22	FAULT_RESET
23	-
24	FUNCT_IN1
25	FUNCT_IN2
26	LIMP
27	LIMN
28	STOP
29	AUTOM
30	ENABLE

Figura 42 - Código de cores que ilustra as ligações ao interface de sinais do controlador.

5.3. Programa elaborado

Neste capítulo é elaborado um programa que propõe implementar as seguintes funções no sistema: (1) reagir a comandos básicos (como por exemplo, ligar e desligar a corrente do motor); (2) quando um dos limites é atingido, o motor pára o movimento e volta para o intervalo movimentos permitidos; (3) realizar movimento de posicionamento relativo; (4) calibrar um modo de posicionamento absoluto para poder executar uma rotina de posicionamento absoluto e; (5) executar também uma rotina de sequências de posicionamento absoluto.

Antes de se descrever a programação em linguagem ladder, explica-se sucintamente através da ajuda de fluxogramas, o funcionamento das principais rotinas que realizam as funções anteriormente enunciadas.

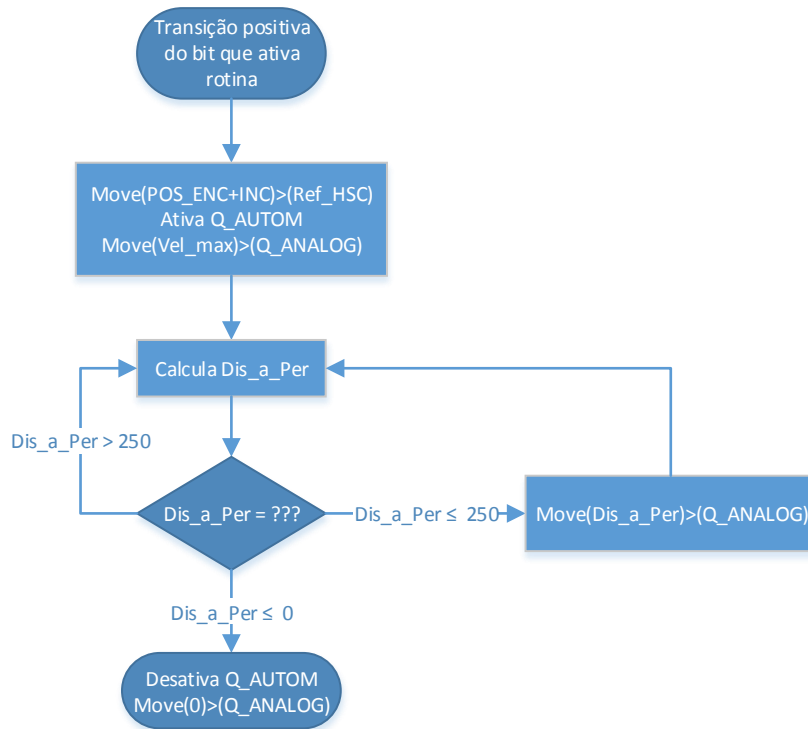


Figura 43 - Fluxograma exemplificativo da rotina de posicionamento relativo.

O fluxograma apresentado na Figura 43 representa um esquema da rotina de posicionamento relativo. Esta rotina é ativada através de um bit de memória, que imediatamente após sua ativação, calcula o valor da posição a atingir. Esse valor é constituído pela posição atual (POS_ENC) do encoder mais o valor dos incrementos a dar (INC), que deve ser carregado para a memória do valor de referência do HSC (Ref_HSC). Assim, o HSC vai gerar uma interrupção quando atingir esta posição. Logo de seguida, é também ativada a saída que liga o modo automático (Q_AUTOM) de controlo de velocidade e carrega um valor de velocidade máxima configurada para a saída analógica (Q_ANALOG) que controla a velocidade do motor. Depois, esta rotina calcula constantemente o valor da distância que falta percorrer (Dis_a_Per) a cada ciclo de varrimento. Se esta distância é maior do que 250 incrementos, nada se altera. Se a distancia for menor do que 250 incrementos, a velocidade é gradualmente reduzida à medida que se aproxima da posição final, igualando a distância a percorrer ao valor da saída analógica, visto que esta distância vai diminuindo à medida que se aproxima da posição final. Quando a posição é atingida, é gerada uma interrupção pelo HSC que desativa o modo automático para que o motor permaneça estático em modo manual na posição pretendida, e por motivos de segurança, é carregado o valor zero para a saída analógica.

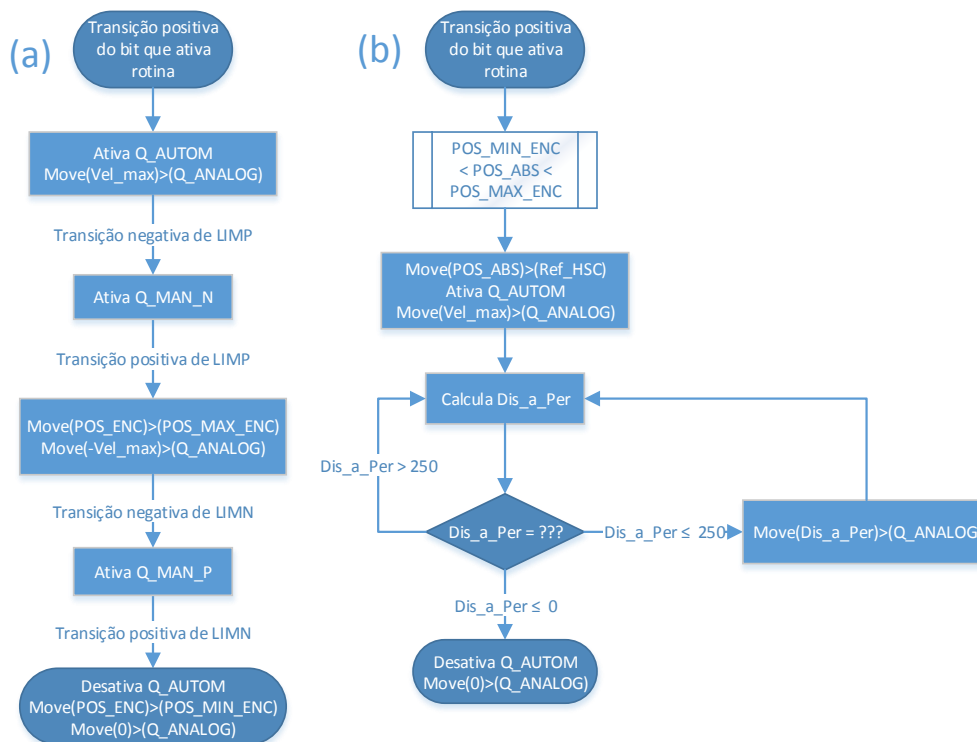


Figura 44 - Rotina de calibração e de posicionamento absoluto.

No fluxograma exposto na Figura 44 estão representadas duas rotinas relativas à função de posicionamento absoluto. A primeira rotina (rotina a) é responsável por calibrar a função de posicionamento absoluto, limitando o intervalo de movimentos do motor a uma posição mínima (POS_MIN_ENC) e máxima (POS_MAX_ENC) do encoder. Para isto, o motor é colocado a rodar a uma velocidade constante até atingir o limite positivo. Quando atinge o limite positivo, altera o seu movimento para o modo manual e no sentido contrário até entrar novamente no intervalo de movimentos permitidos pela unidade móvel. Quando reentra nesse intervalo, memoriza a posição atual do encoder como a posição máxima do motor e recomeça rodar novamente a uma velocidade constante mas em direção ao limite negativo. Quando atinge o limite negativo procede da mesma maneira que no limite positivo e memoriza a posição do encoder como a posição mínima do motor. Esta rotina tem de ser executada pelo menos uma vez sempre que o controlador ou o PLC é ligado, pois estas posições que se encontram em memória sofrem alterações cada vez que um destes dispositivos é desligado. Quanto ao funcionamento da rotina de posicionamento absoluto propriamente dita (rotina b), funciona de forma semelhante a rotina de posicionamento relativo com exceção da origem do valor que é carregado para o HSC e que é constituído pelo valor da posição final do encoder (POS_ABS), que neste caso é o valor da posição final lido pelo encoder menos o módulo do valor da posição mínima do encoder.

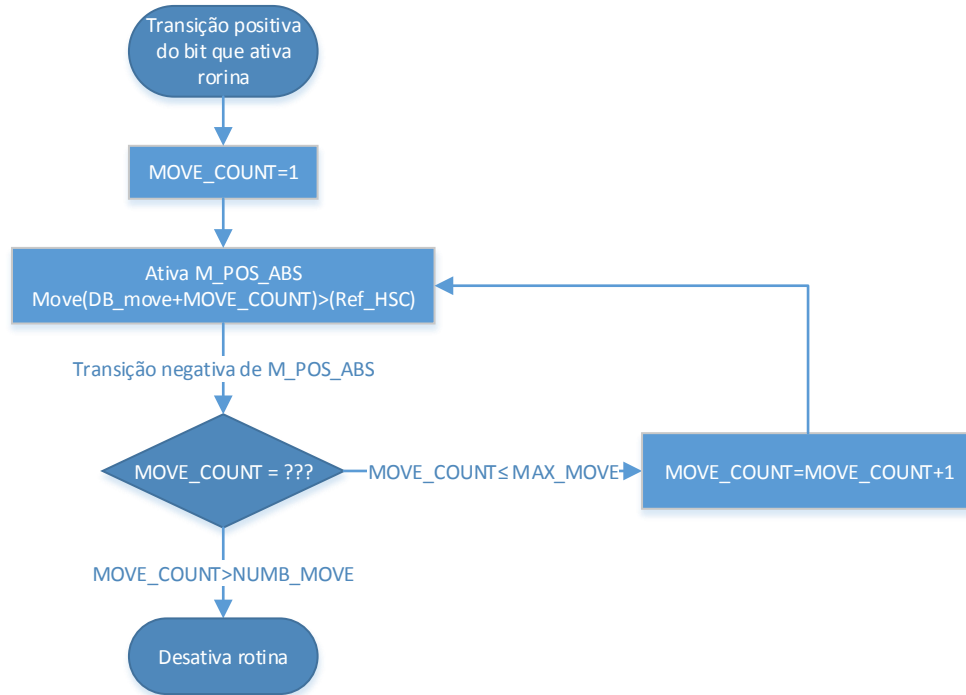


Figura 45 - Rotina que realiza seqüências de posicionamento absoluto.

O fluxograma exposto na Figura 45 apresenta um esquema de controlo da função que permite realizar seqüências de posições absolutas. Esta rotina trabalha em conjunto com a rotina de posicionamento absoluto. Quando esta rotina é ativada, é inicializada uma variável de controlo (MOVE_COUNT) que indica o número da posição da seqüência a alcançar. Depois é enviado o valor correspondente da posição a atingir que se encontra no bloco de dados para a rotina de posicionamento absoluto e é então ativada essa mesma rotina. Quando o bit que ativa a rotina de posicionamento absoluto (M_POS_ABS) é desativado, significa que a posição é atingida, e portanto, a variável de controlo é incrementada e é novamente ativado e enviado um novo valor para esta rotina, até que seja atingido um número máximo de movimentos (MOVE_COUNT>NUMB_MOVE).

De seguida, é então apresentado o código desenvolvido em linguagem ladder, começando pelas instruções que constituem o bloco *Hardware interrupt* (ver Figura 46). Este bloco é ativado pelo HSC sempre que o valor atual do HSC é igual ao valor de referência. Assim, sempre que este bloco é chamado a saída Q_AUTOM e o bit que ativa a rotina de posicionamento absoluto (M_POS_ABS) são desativados e é movido o valor 0 para a saída analógica do PLC. Estas instruções possuem um contacto normalmente fechado de um bit de controlo à sua frente, para evitar que estas instruções sejam executadas quando o programa realiza a rotina de calibração.

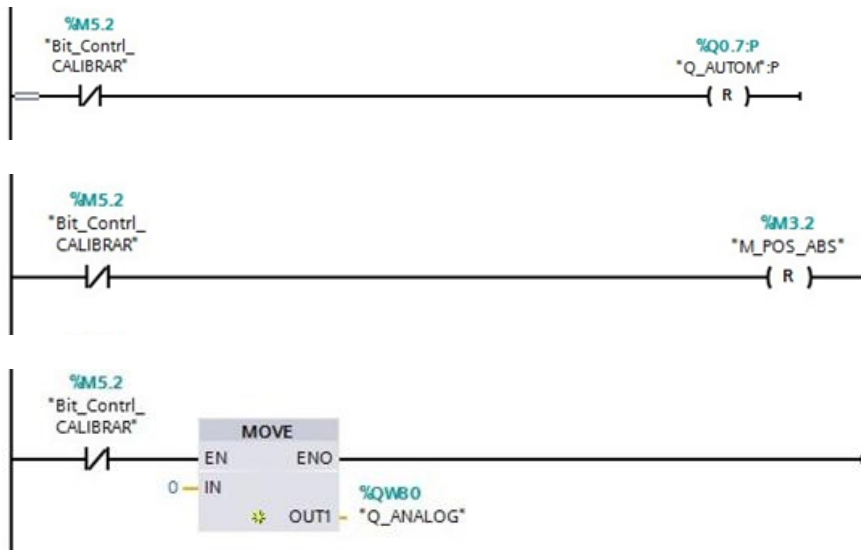
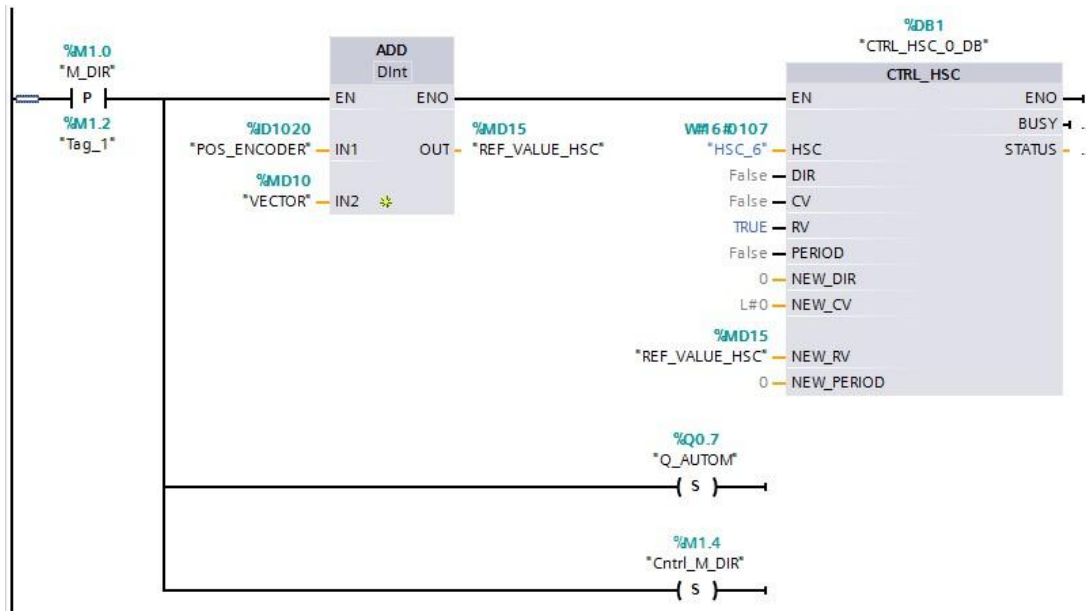


Figura 46 - Instruções do bloco hardware interrupt.

As instruções expostas na Figura 47 pertencem ao bloco (Block_1) responsável por executar a rotina de posicionamento relativo. Assim, a primeira instrução carrega um valor de referência para o HSC e ativa a saída AUTOM e um bit de controle que sinaliza que estas instruções foram executadas. Estas instruções são acionadas por dois bits, que no caso de ser pretendido andar para a direita, o valor carregado é a soma da posição do encoder com os incrementos a dar (VECTOR) e para a esquerda, é uma subtração.



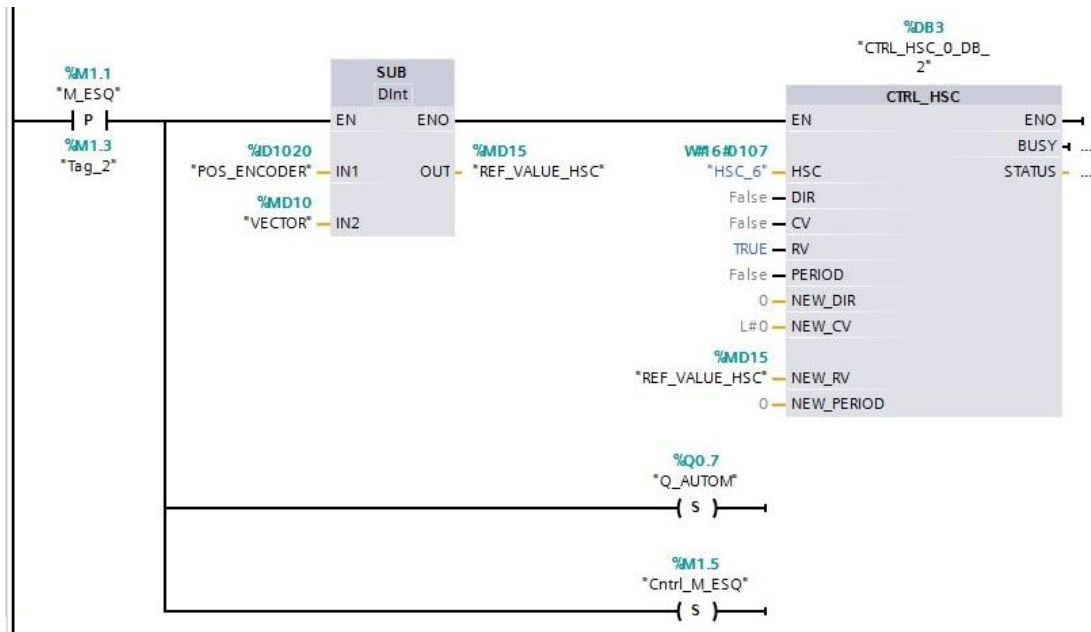


Figura 47 - Instruções do block_1, parte 1.

Portanto, depois destas instruções é calculada a distância que falta percorrer, que é a subtração do valor de referência do HSC com a posição atual do encoder (ver Figura 48). Como explicado anteriormente na Figura 43, se esta distância é maior do que 250 incrementos do encoder, um valor de velocidade máxima é enviado para a saída analógica. Caso contrário, a velocidade é igualada a esta distância. Embora não seja necessário, estas instruções encontram-se seguidas de um bloco limite no código apresentado. Este bloco limite tem o papel importante de corrigir erros que possam ocorrer quando ainda se testava o funcionamento deste programa.

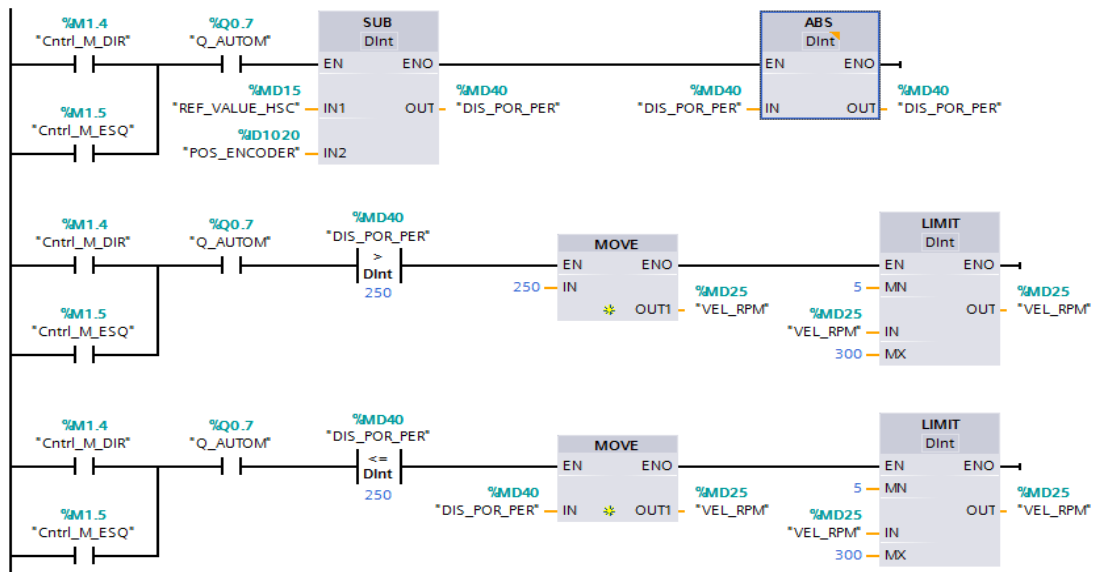


Figura 48 - Instruções do block_1, parte 2.

As instruções expostas na Figura 49 representam o envio propriamente dito da velocidade real enviada pela saída analógica que é acompanhada de um fator de multiplicação. A velocidade real do motor pode ser calculada através da Equação 2.

$$Vel.\ real = \frac{vel.\ max.\ configurada\ no\ controlador}{Escala\ máxima\ da\ saída\ analógica\ (27648)} \times fator\ de\ multiplicação \times VEL_RPM \quad (2)$$

É de salientar, que quando a unidade móvel se desloca para a esquerda a velocidade tem de ser negativa (ver Figura 49).

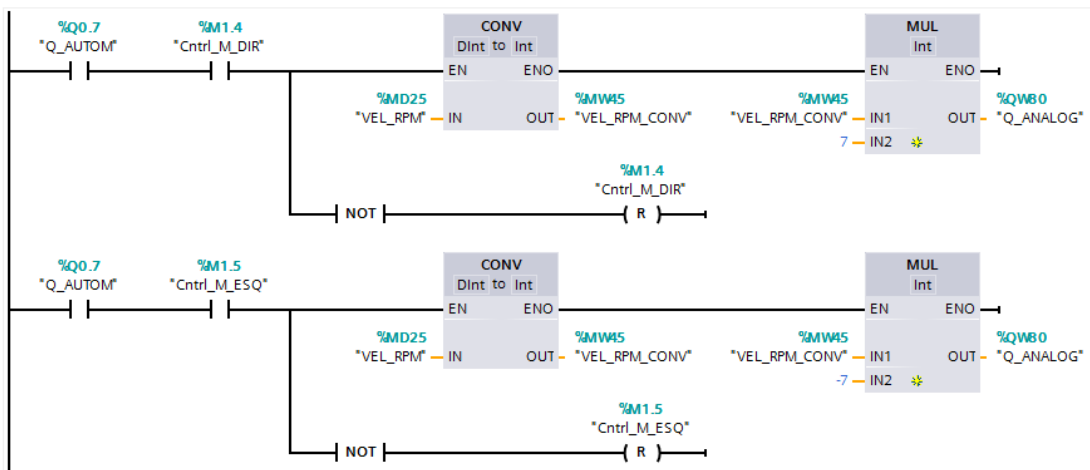


Figura 49 - Instruções do block_1, parte 3.

A rotina de posicionamento absoluto que constitui o block_3 (ver Figura 50), funciona de forma semelhante a rotina de posicionamento relativo, tal como foi dito anteriormente. Faz uso do mesmo conjunto de instruções apresentadas anteriormente, à exceção da instrução que envia o valor de referência para o HSC, como se encontra ilustrado na Figura 50. Este valor é a posição absoluta que se pretende atingir menos o módulo do valor da posição mínima do encoder previamente calibrado. O valor desta posição encontra-se compreendido entre um valor mínimo e máximo de posição do encoder. Calcular os valores destas várias posições pelo PLC é importante para que estes valores possam ser exibidos pela HMI como parâmetros de monitorização.

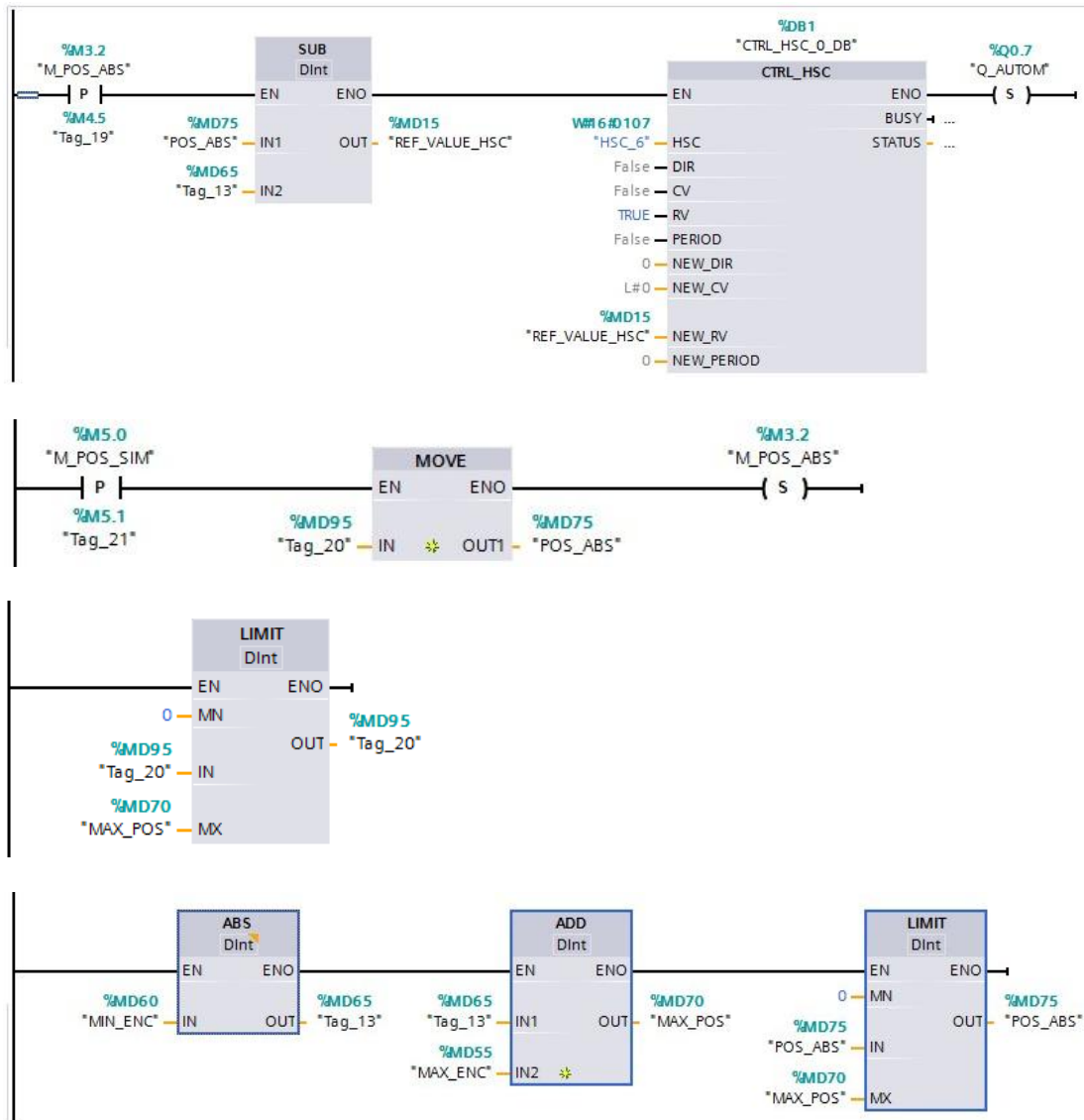


Figura 50 - Instruções do block_3.

O block_4 exposto na Figura 51 é a rotina que realiza as sequências de posicionamento absoluto. Tal como ilustrado na Figura 45 quando esta rotina é ativada por um bit, é inicializada uma variável com o valor 1, é carregado o valor da posição para POS_ABS e é ativado o bit da rotina de posicionamento absoluto e a saída AUTOM.

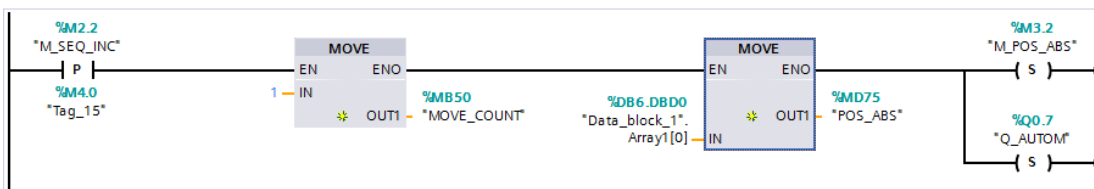


Figura 51 - Instruções do block_4, parte 1.

Depois, cada vez que o bit M_POS_ABS transita do estado 1 para 0, a variável MOVE_COUNT é incrementada e mediante o seu valor, é novamente enviado um novo valor para POS_ABS e ativado o bit M_POS_ABS. Se a variável MOVE_COUNT for maior do que NUMB_MOVE, o bit que inicia esta rotina é desativado, o que marca o final de execução desta rotina (ver Figura 52).

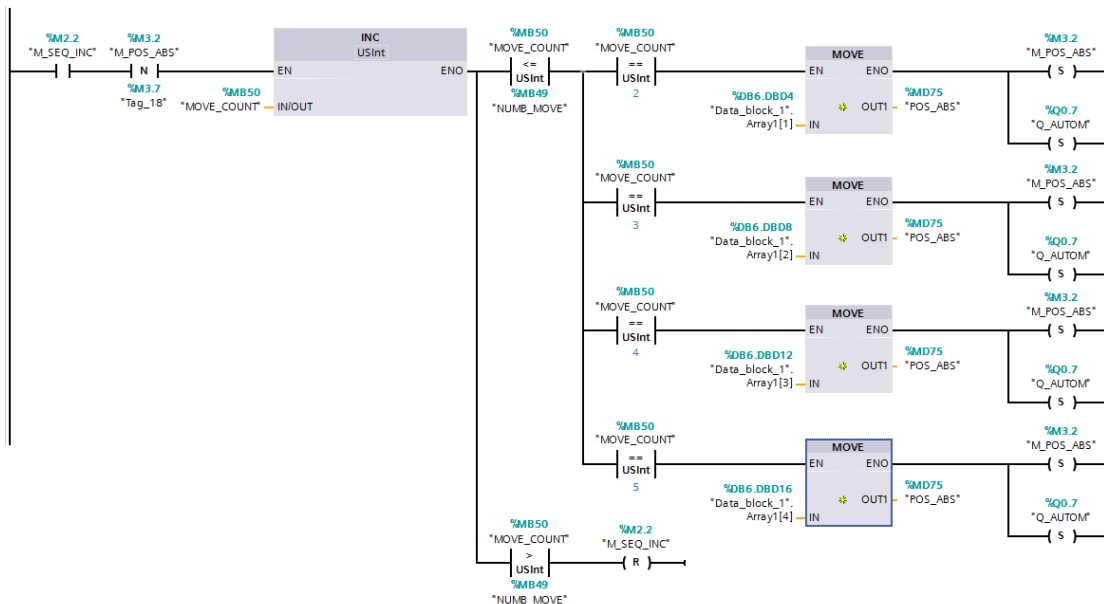
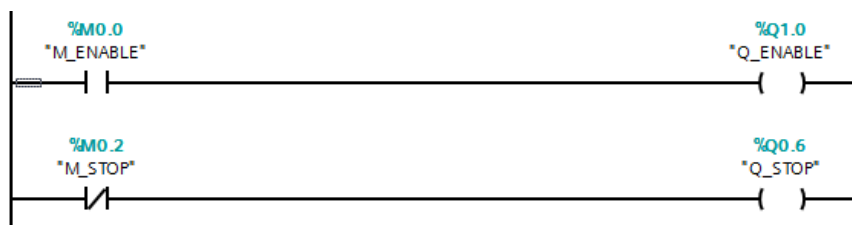


Figura 52 - Instruções do block_4, parte 2.

O conjunto de instruções expostas na Figura 53 faz parte do bloco principal (bloco MAIN). É neste bloco que são implementadas alguns comandos básicos, estruturas de controlo e colocados os blocos com as rotinas anteriormente descritas. Por exemplo, os comandos básicos implementados são as saídas que controlam os sinais ENABLE e STOP, que são controladas por dois bits diferentes, e o sinal FAULT_RESET que é dado por um bit ou quando um dos limites é atingido.



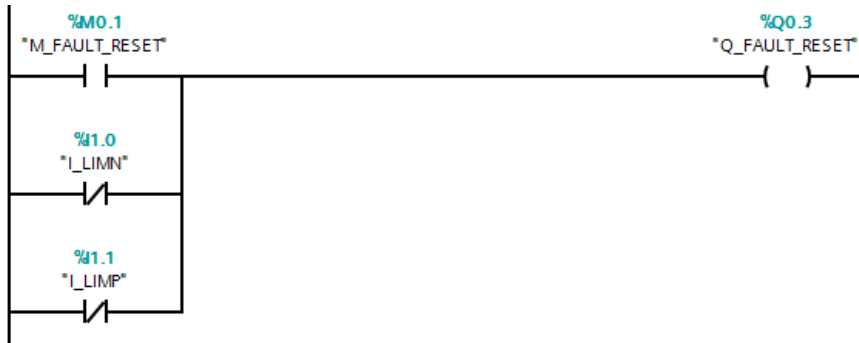


Figura 53 - Instruções do bloco Main, parte 1.

Quando um dos limites é atingido, o sinal AUTOM é desativado, de modo a parar a unidade móvel e permitir que ela se possa movimentar apenas no modo manual. No entanto, foi necessário adicionar um temporizador para criar um ligeiro atraso de tempo, para que não sejam logo ativadas as saídas do modo de operação manual quando um dos limites é atingido (ver Figura 54). Isto porque, ao testar o programa, constatou-se que a mudança muito rápida destes sinais resultavam num erro para o controlador, fazendo com que este não se movimentasse mais em nenhum dos modos de operação.

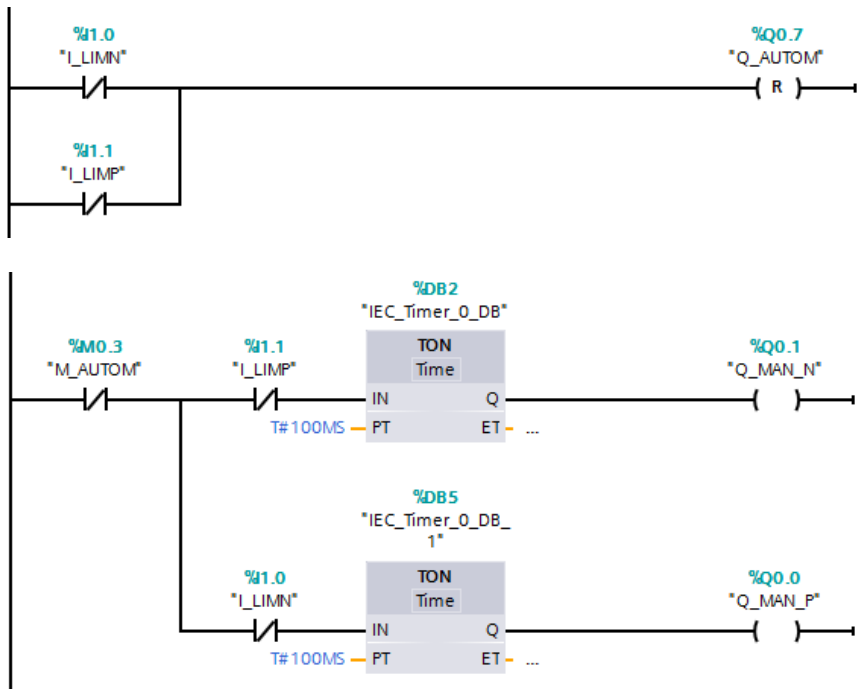


Figura 54 - Instruções do bloco Main, parte 2.

Depois, quando os sinais que controlam o modo manual são desativados, significa que a unidade móvel se encontra dentro do intervalo de movimentos permitidos. Por este motivo, devem ser memorizadas estas posições do encoder (ver Figura 55). Se for o MAN_N, a posição do encoder devem ser memorizada como a posição máxima permitida, no caso de ser o MAN_P, é a posição mínima. Isto também se pode suceder devido a uma ordem de calibração em que se pôs o motor a rodar para a direita em modo de controlo de velocidade, em que depois de ter sido memorizado a posição máxima, o motor é novamente colocado a rodar mas para a esquerda de modo a atingir o outro limite. Para isto acontecer apenas quando a ordem de calibração é dada, é utilizado um bit auxiliar chamado Bit_contrl_CALIBRAR.

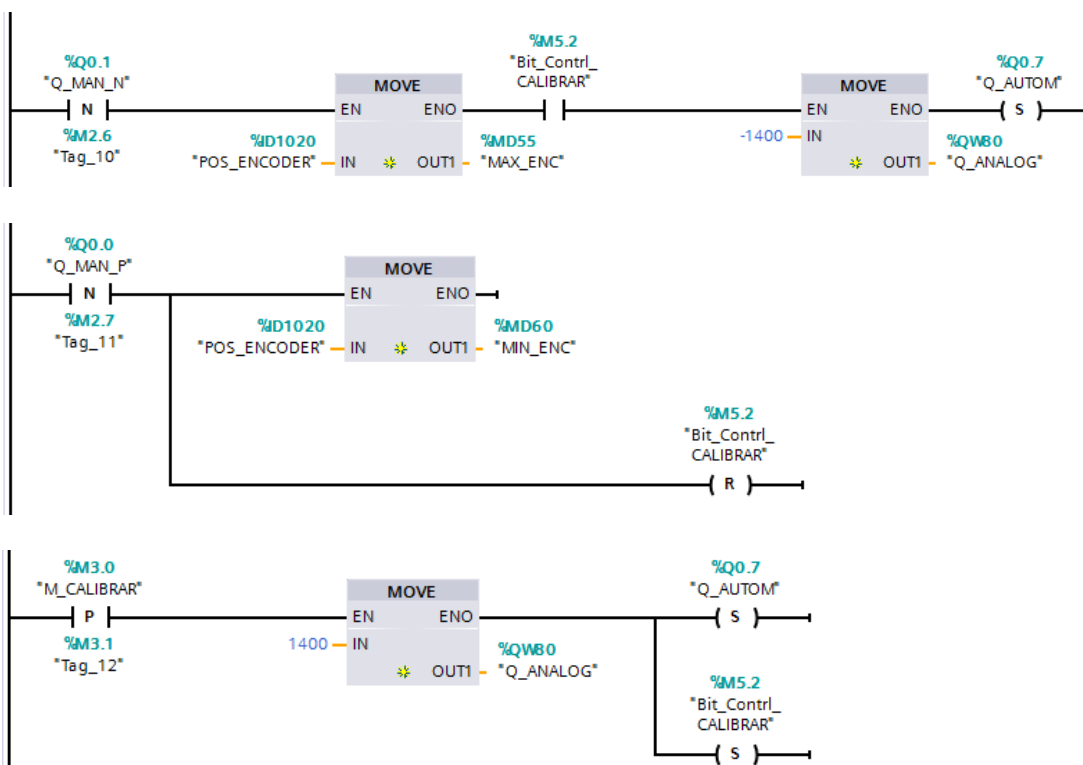


Figura 55 - Instruções do bloco Main, parte 3.

De seguida, apenas falta descrever os blocos com as rotinas de posicionamento relativo e absoluto criadas anteriormente. Alguns contactos precedem estes blocos para que não sejam executados indevidamente. Nenhum destes blocos deve ser executado quando o sistema se encontra em calibração, o posicionamento relativo deve ser parado quando atinge um dos limites e ainda, apenas um tipo de posicionamento pode funcionar de cada vez.

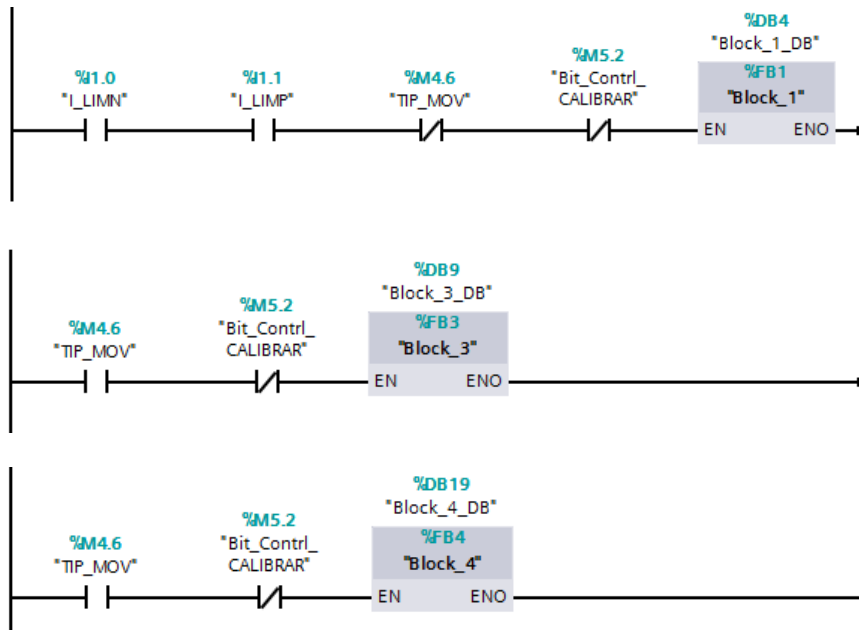


Figura 56 - Instruções do bloco Main, parte 4.

No Anexo I encontra-se um outro conjunto de rotinas desenvolvidas que completam o programa de controlo do sistema de posicionamento.

5.4. Interface gráfico criado

Para controlar e monitorizar as funções desempenhadas pelo PLC, é apresentado neste capítulo um interface capaz de interagir com o programa criado anteriormente. Este interface é composto por 4 screens (ver Figura 57):

- (1) Main Screen - screen onde é possível escolher uma das funções a desempenhar pelo PLC;
- (2) Screen 1 - screen relacionada com o posicionamento relativo;
- (3) Screen 2 - screen de posicionamento absoluto;
- (4) Screen 3 - screen que realiza as sequências de posicionamento absoluto.

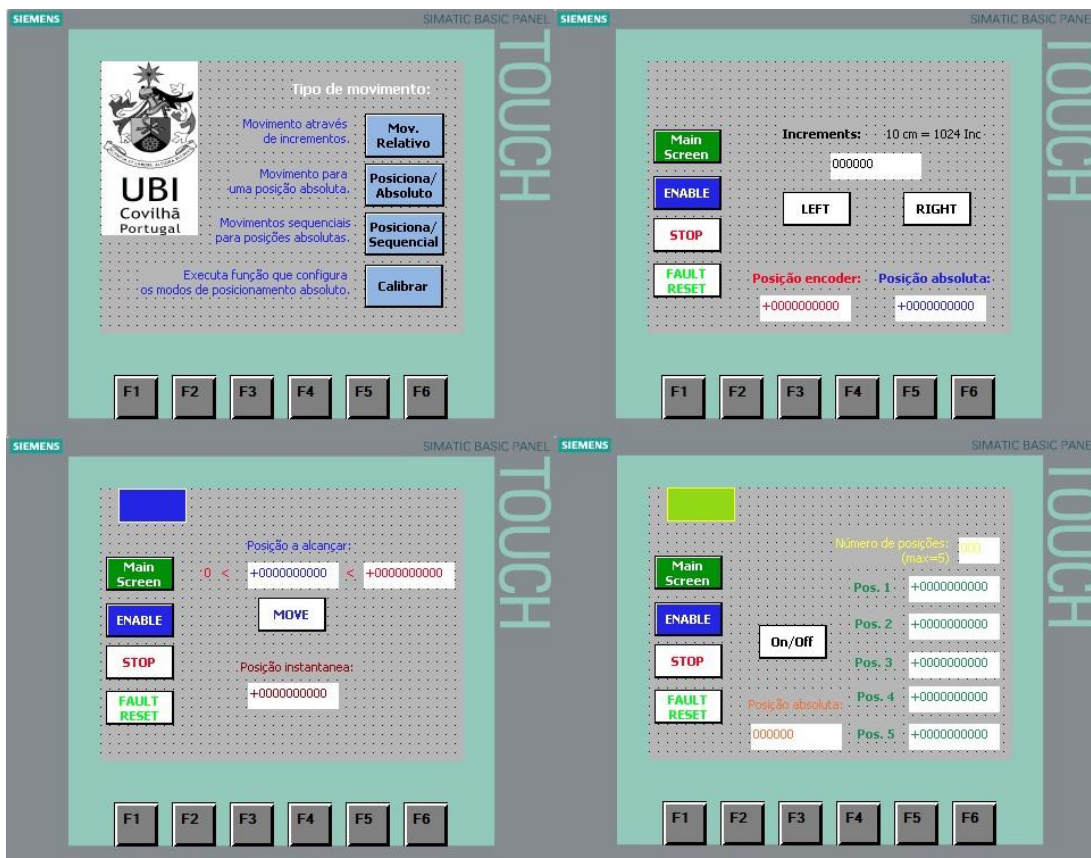


Figura 57 - (1) Main screen (2) Screen 1 (3) Screen 2 (4) Screen 3

O Main screen é o screen inicializado quando a HMI é ligada. Este screen é também aquele que interliga todos os screens, pois, a partir dele é possível mudar para um dos outros screens, mas estando outro screen ativo apenas é possível voltar ao Main Screen. A Figura 58 ilustra a interligação entre os 4 screens.

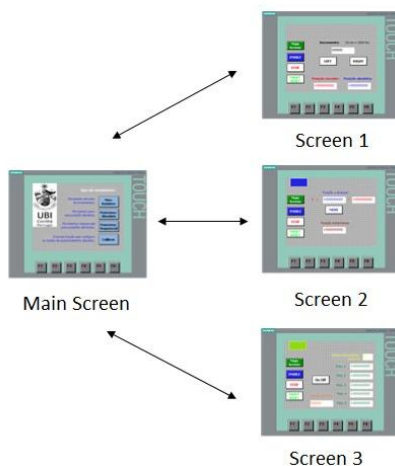


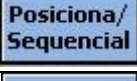



Figura 58 - Interconexão entre screens.





O Main Screen é composto por um campo gráfico e vários campos de texto que descrevem a função dos objetos que se encontram do seu lado, nomeadamente botões (ver Tabela 18).

Tabela 18 - Botões do Main screen.

Botões	Função
	Ativa Screen 1 e coloca o bit TIP_MOV a 0.
	Ativa Screen 2 e coloca o bit TIP_MOV a 1.
	Ativa Screen 3 e coloca o bit TIP_MOV a 1.
	Coloca o bit M_CALIBRAR a 1 enquanto pressionado.

Os Screens 1, 2 e 3 possuem 4 botões idênticos com funções generalizadas. A Tabela 19 descreve suas funções.

Tabela 19 - Botões comuns dos Screens 1, 2 e 3.

Botões	Função
	Ativa a Main Screen.
	Inverte o bit M_ENABLE que controla o sinal ENABLE responsável por ligar e desligar a corrente do motor.
	Coloca o bit M_STOP a 1 enquanto pressionado. Ou seja, envia o sinal STOP ao controlador.
	Coloca o bit M_FAULT_RESET a 1 enquanto pressionado. Ou seja, envia o sinal FAULT_RESET ao controlador.

Os Screens 1, 2 e 3 possuem também outros tipos de objetos com funções diversificadas, como apresentado na Tabela 20.

Tabela 20 - Outros objetos dos Screens 1, 2 e 3.

Objeto	Descrição
	Campo I/O da Screen 1. Permite visualizar ou alterar o valor da tag VECTOR.
	Botão da Screen 1 que coloca o bit M_ESQ a 1 enquanto pressionado.
	Botão da Screen 1 que coloca o bit M_DIR a 1 enquanto pressionado.
	Campo gráfico do Screen 2 que se movimenta horizontalmente mediante o valor da posição do encoder (tag_22).
	Campo I/O da Screen 2. Permite visualizar ou alterar o valor da posição pretendida (tag_20).
	Campo I/O da Screen 2. Permite visualizar o valor da tag MAX_POS.
	Botão da Screen 2 que coloca o bit M_POS_SIM a 1 enquanto pressionado.
	Campo gráfico do Screen 3 que se movimenta horizontalmente mediante o valor da posição do encoder.
	Campo I/O da Screen 3. Permite visualizar ou alterar o valor da tag NUMB_MOVE.
	Campos I/O da Screen 3. Permite visualizar ou alterar o valor da tag Data_block_1_Array[...].
	Botão do Screen 3 que inverte o bit M_SEQ_INC.

No Anexo II encontra-se a descrição pormenorizada do funcionamento da HMI desenvolvida.

5.5. Nota conclusiva

Após uma breve introdução sobre as características e modos de operação do controlador do motor (principal elemento de controlo do protótipo), é apresentado um circuito elétrico de um sistema que permita controlar este dispositivo. De seguida, é elaborado um programa para o PLC que envia os sinais de controlo ao controlador em linguagem ladder e que através de fluxogramas permita ao sistema desempenhar as funções que se pretendem analisar mais adiante. É também apresentado um interface gráfico que permite controlar o PLC através da HMI.

6. Análise e Discussão dos Resultados

6.1. Otimização do controlador

A estrutura do controlador corresponde ao controlo clássico em cascata de um controlo de malha posicional com um controlador de corrente, um controlador de velocidade e um controlador de posição. Os controladores são regulados uns após os outros de “dentro” para “fora” na sequência de controlo de corrente, velocidade e de posição, como é mostrado na Figura 59 [24]. Esta estrutura é generalizada para os controladores da série TLD13x, mas no caso do controlador utilizado não existe controlo de posição devido à falta de instalação de um módulo como já foi referido anteriormente.

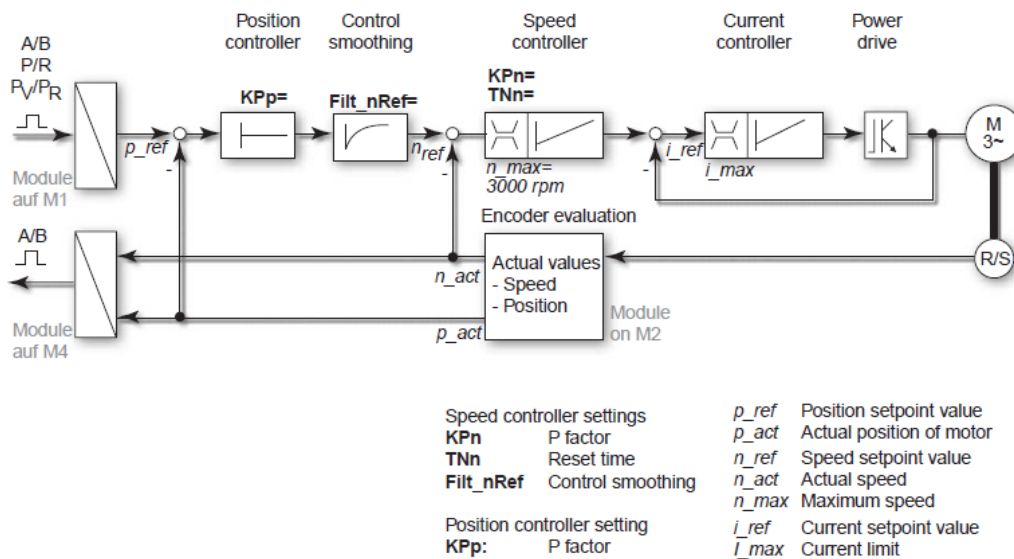


Figura 59 - Estrutura do controlador [24].

O motor e o controlador precisam de ser ajustados um com outro no sistema em preparação ao modo de movimento. Uma série de fatores, como a inércia dos componentes do sistema em movimento ou a rigidez dos componentes com fluxo de força, afetam as características de operação do motor e do controlador quando estão em uso operacional. O software *Twin Line Comissioning Tool* (TLCT) em comunicação com o controlador fornece funções para otimizar o seu funcionamento: (1) mostra os circuitos de controlo em malha aberta e fechada; (2) altera os parâmetros de controlo; e (3) permite visualizar dados internos do dispositivo durante o movimento.

A Figura 60 mostra o circuito de controlo de malha aberta obtido no TLCT quando o controlador se encontra em controlo de corrente. Como é possível visualizar na Figura 60, em controlo de corrente não existem parâmetros de controlo e, portanto, o valor da corrente de referência (i_{ref}) é igual a corrente atual do motor (i_{act}).

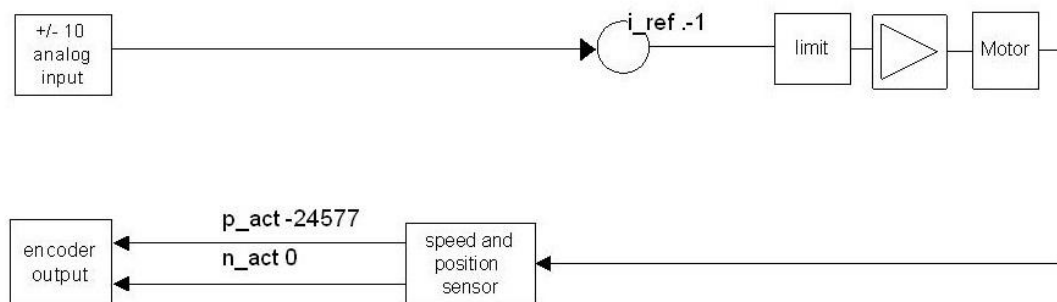


Figura 60 - Diagrama de blocos do controlador em controlo de corrente.

A Figura 61 expõe o circuito de controlo de malha fechada obtido no TLCT quando o controlador se encontra em controlo de velocidade. Esta malha de controlo é essencialmente constituída por um controlador PID que possui vários parâmetros de controlo configuráveis (ver Tabela 21).

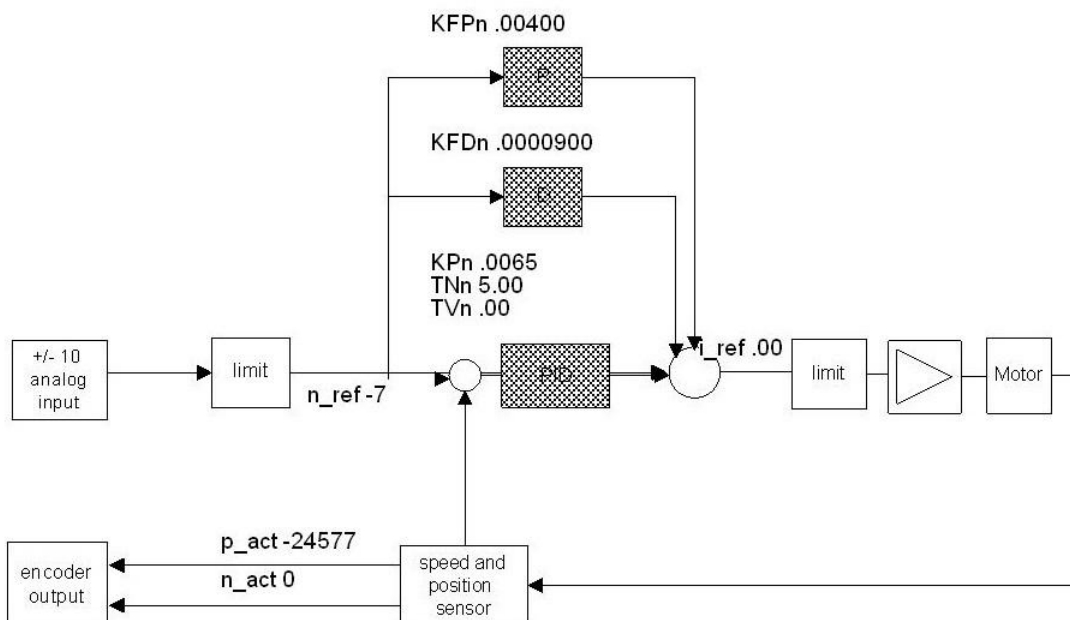


Figura 61 - Diagrama de blocos em controlo de velocidade.

Tabela 21 - Parâmetros de controlo do controlador de velocidade.

Parâmetro	Descrição
KPn	Fator Proporcional do controlador de velocidade
TNn	Fator Integral de tempo do controlador de velocidade
TVn	Fator Derivativo de tempo do controlador de velocidade
KFPn	Fator Proporcional de pré-controlo do controlador de velocidade
KFDn	Fator Derivativo de pré-controlo do controlador de velocidade

Como a função transferência do processo que se pretende controlar não é conhecida, obter uma configuração ótima dos parâmetros do sistema de controlo mecânico requer experiência prática com procedimentos de configuração e ajuste com o equipamento de controlo. O manual do controlador propõe três procedimentos experimentais de configuração para sistemas mecânicos de um baixo nível de complexidade, como é o caso deste sistema. O procedimento utilizado foi o método de Ziegler-Nichols, por ser um método de fácil execução e que não requer o uso de cargas, como é o caso dos outros procedimentos.

Ziegler e Nichols [25] propuseram regras para determinar os valores de ganho proporcional, K_p , tempo integral, T_i , e tempo derivativo, T_d , baseado nas características da resposta transiente de um dado processo. Existem dois métodos de ajuste destes parâmetros chamados Ziegler-Nichols: o primeiro método e o segundo método [26]. O segundo método foi o método utilizado para ajustar os parâmetros do controlador e é apresentado de seguida. No segundo método, coloca-se $T_i = \infty$ e $T_d = 0$. Usando apenas a ação de controlo proporcional (ver Figura 62), aumenta-se o K_p começando em 0 até um valor crítico K_{cr} onde se exibem oscilações sustentáveis à saída. Assim, determina-se experimentalmente o ganho crítico K_{cr} e o correspondente período crítico P_{cr} (ver Figura 63).

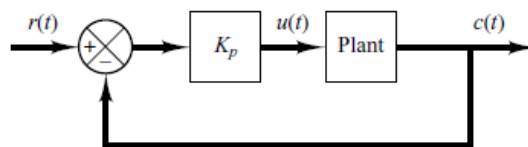


Figura 62 - Sistema de malha fechada com controlador proporcional [26].

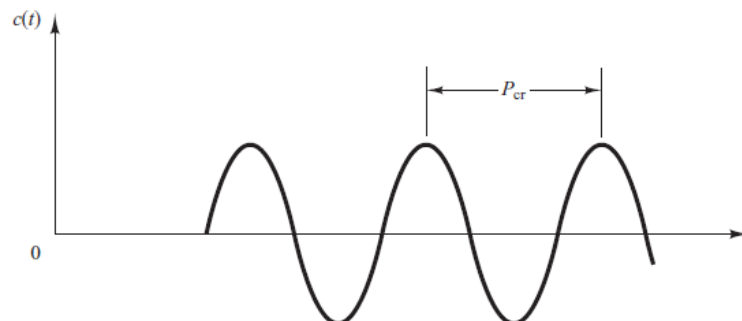


Figura 63 - Oscilações sustentáveis com o período P_{cr} [26].

De seguida, os valores dos parâmetros de K_p , T_i e T_d são determinados de acordo com as expressões descritas na Tabela 22. As fórmulas usadas foram as recomendadas pelo manual do controlador em vez das fórmulas sugeridas por Ziegler e Nichols. Esta consideração advém deste método depender da experiência prática no ajuste dos parâmetros para cada controlador, algo que é fornecido pelo manual do controlador.

Tabela 22 - Fórmulas para o ajuste dos parâmetros baseado no ganho K_{cr} e período crítico P_{cr} .

K_p	T_i
$0,35 \times K_{cr}$	$0,94 \times P_{cr}$

6.1.1. Resultados Obtidos

Os dados apresentados de seguida foram obtidos através da ferramenta do TLCT que permite visualizar os dados internos do controlador durante o movimento. Estes dados são adquiridos a cada 250 μ s para uma entrada constante de 100 rpm.

Segundo o método apresentado anteriormente, colocou-se $T_{Nn} = 327,67$ e $T_{Vn} = 0$ que correspondem, respetivamente a T_i e T_d . Colocaram-se também os restantes parâmetros, K_{Fp} e K_{Fd} , a 0 e aumentou-se gradualmente o valor de K_{Pn} (K_p) até obter uma resposta com oscilações sustentáveis. A Figura 64 mostra a resposta do sistema de posicionamento tendo em consideração os valores definidos para os parâmetros anteriores e para diferentes valores de K_{Pn} .

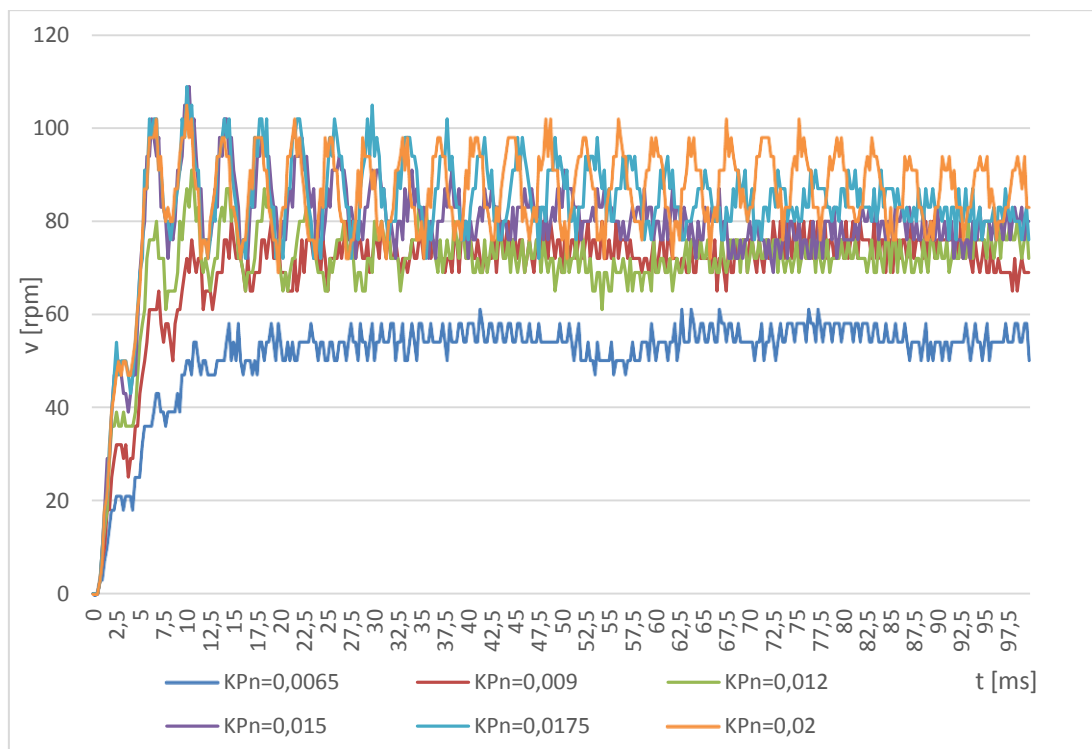


Figura 64 - Resposta obtida para diferentes valores de K_{Pn} .

Analisando o gráfico da Figura 64, conclui-se que o ganho crítico K_{cr} é 0,02 e o respectivo período crítico P_{cr} é aproximadamente 4 ms. Calculando os novos parâmetros através das fórmulas apresentadas na Tabela 22 obtém-se: $K_{Pn} = 0,35 \times 0,02 = 0,007$ e $T_{Nn} = 0,94 \times 4 = 3,76$.

A Figura 65 mostra a resposta obtida para os parâmetros calculados anteriormente, ou seja, $K_{Pn} = 0,02$, $T_{Nn} = 3,76$, $K_{FPn} = 0$, $K_{FDn} = 0$ e $T_{Vn} = 0$. Analisando pormenorizadamente os dados do gráfico, é possível retirar algumas características da resposta obtida, tal como: o tempo de subida, $t_r = 7$ ms, o tempo de pico, $t_p = 13,75$ ms, o sobre-sinal, $S = 49$ rpm, e o tempo de estabelecimento, $t_s = 38$ ms.

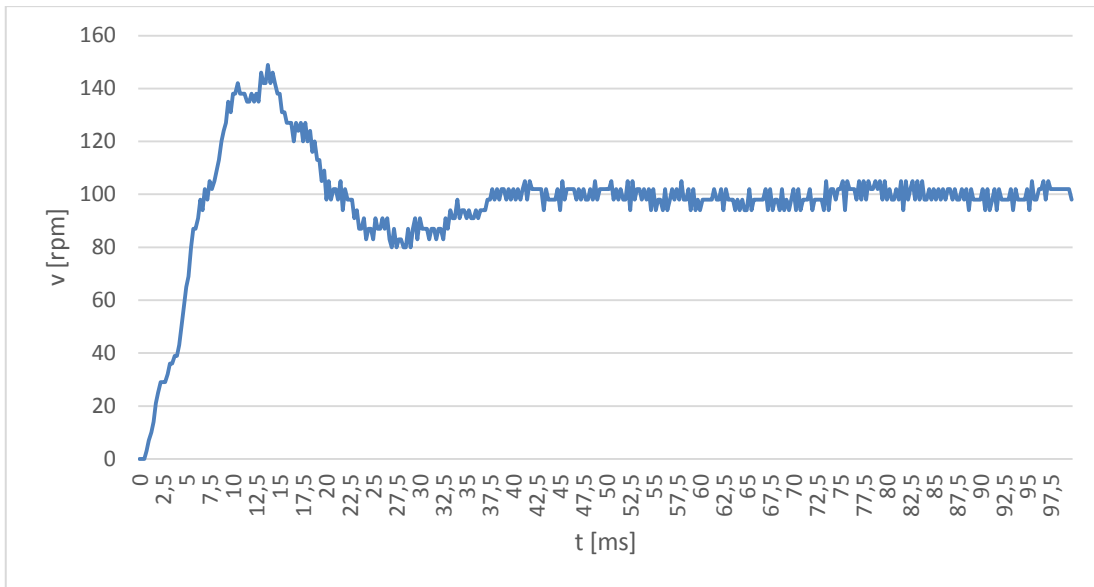


Figura 65 - Resposta obtida para os valores de $K_{Pn}=0,02$, $T_{Nn}=3,76$, $K_{FPn}=0$, $K_{FDn}=0$ e $T_{Vn}=0$.

A resposta obtida na Figura 65 é bastante satisfatória, no entanto investigou-se também o efeito da variação dos restantes parâmetros com o objetivo de melhorar ainda mais a resposta. A Figura 66 mostra o gráfico das respostas obtidas para diferentes valores de K_{FPn} .

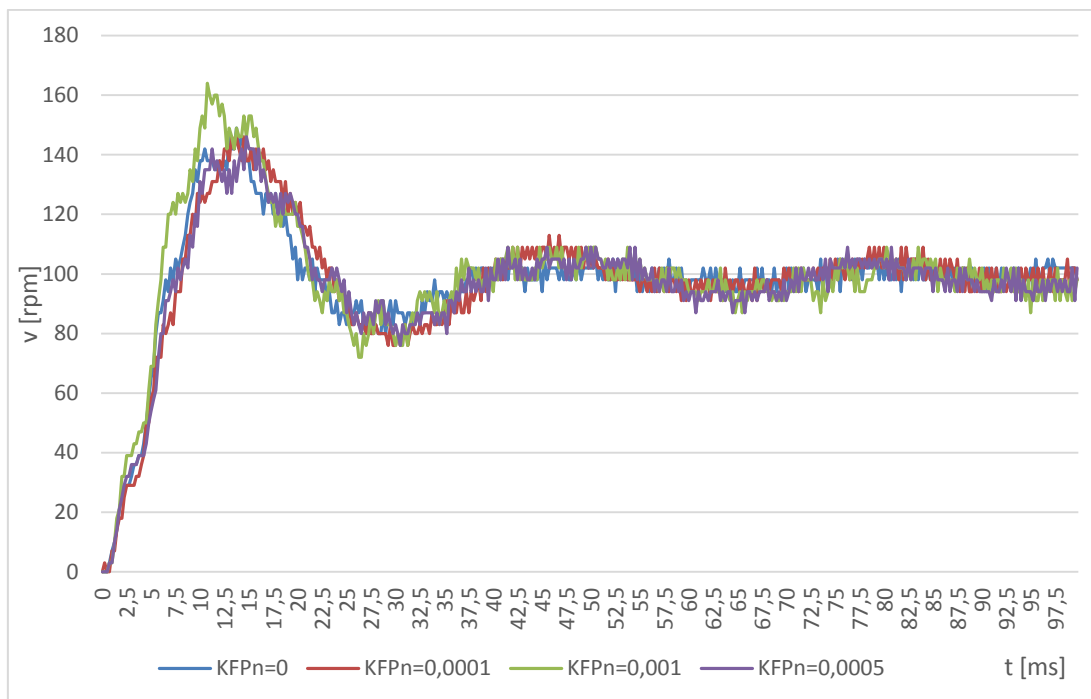


Figura 66 - Resposta para diferentes valores de KFPn.

Para melhor analisar as diferenças entre as respostas obtidas no gráfico da Figura 66, a Tabela 23 resume as características de cada resposta.

Tabela 23 - Características das respostas obtidas para diferentes valores de KFPn.

	t_r [ms]	t_p [ms]	S [%]	t_s [ms]
KFPn = 0	7,00	13,75	49	38,00
KFPn = 0,0001	8,00	13,75	46	39,75
KFPn = 0,0005	7,75	14,75	46	37,50
KFPn = 0,001	6,00	10,75	64	37,00

Analisando os valores da Tabela 23 e embora não seja uma tendência linear, pode mesmo assim afirmar que à medida que o valor de KFPn aumenta, os tempos de subida, pico e estabelecimento diminuem e o sobre-sinal aumenta.

Procedeu-se de forma semelhante para diferentes valores KFDn e os resultados obtidos são mostrados na Figura 67 e na Tabela 24.

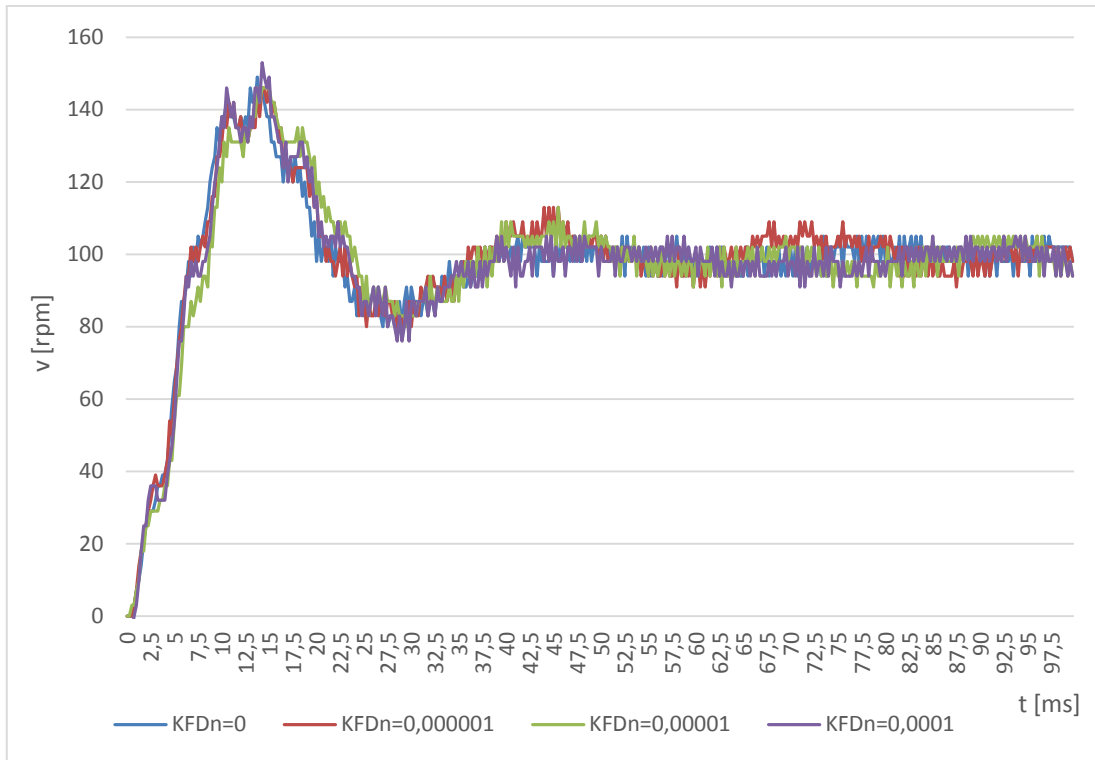


Figura 67 - Resposta obtida para diferentes valores de KFDn.

Tabela 24 - Características das respostas obtidas para diferentes valores de KFPn.

	t_r [ms]	t_p [ms]	S [%]	t_s [ms]
KFDn = 0	7,00	13,75	49	38,00
KFDn = 0,000001	6,75	13,75	46	36,00
KFDn = 0,00001	8,75	13,75	46	36,25
KFDn = 0,0001	8,50	14,25	53	35,25

Analisando os valores da Tabela 24, verifica-se que apenas para o valor de $KFDn = 0,000001$ se conseguiu uma melhoria da resposta, onde se verificou uma diminuição dos tempos de subida, de pico e de estabelecimento. Para os restantes valores de $KFDn$, a resposta piorou. Pode-se concluir, que apenas para valores bastante baixos de $KFDn$ se consegue uma melhoria da resposta do controlador.

Tentando conjugar as características proporcionadas por cada parâmetro, obteve-se uma melhoria da resposta do sistema para os valores de $KPn = 0,02$, $TNn = 3,76$, $KFPn = 0,0001$, $KFDn = 0,000001$ e $TVn = 0$, como mostrado na Figura 68. A resposta obtida para estes parâmetros possui as seguintes características: o tempo de subida, $t_r = 6,5$ ms, o tempo de pico, $t_p = 13,5$ ms, o sobre-sinal, $S = 53$ %, e o tempo de estabelecimento, $t_s = 36,75$ ms.

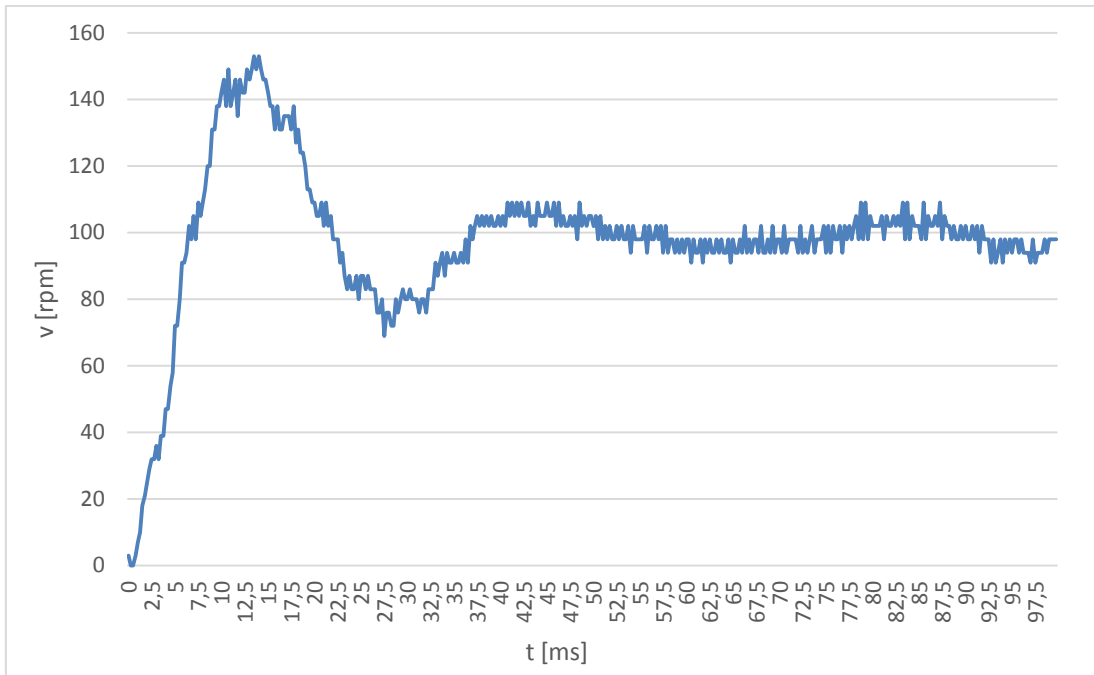


Figura 68 - Resposta obtida para os valores de $KP_n=0,02$, $TN_n=3,76$, $KFP_n=0,0001$, $KFD_n=0,000001$ e $TV_n=0$.

Portanto, os parâmetros ótimos de operação deste sistema obtidos para o controlador são os valores de $KP_n = 0,02$, $TN_n = 3,76$, $KFP_n = 0,0001$, $KFD_n = 0,000001$ e $TV_n = 0$. A Figura 69 mostra a instalação experimental onde foram realizados todos os testes apresentados na dissertação.



Figura 69 - Instalação experimental onde foram realizados os testes.

6.2. Análise do desempenho do sistema

Surgiram várias dificuldades de execução dos testes de funcionamento do sistema projetado. Inicialmente, como já foi dito, foi necessário amplificar os sinais A/B do módulo ESIM do controlador, porque estes não apresentavam a amplitude necessária para serem detetados pelo PLC. Entretanto, surgiu outro problema: quando o controlador se encontrava num dos modos de operação automático, enviando 0V de tensão para a entrada analógica do controlador, o motor rodava a uma pequena velocidade, desenvolvendo binário em vez de permanecer estático. Tentando descartar possíveis causas do problema, com a ajuda de um multímetro, mediu-se a tensão na entrada analógica do controlador enquanto se enviava 0V de tensão através da saída analógica do PLC. Efetivamente, verificou-se que existia uma pequena tensão residual causadora do problema. Acredita-se que isto acontece porque quando é carregado o valor 0 para a saída analógica do PLC, a placa de sinal analógico é desligada, o que permite o surgimento desta tensão. Uma solução prática que evita a produção de um circuito de condicionamento do sinal para este problema residiu em desligar o modo de operação automático sempre que é pretendido que o motor permaneça estático. Por este motivo, no programa apresentado anteriormente, desliga-se sempre o modo automático quando se pretende que o motor permaneça estático.

Quanto ao funcionamento do programa, pode dizer-se que reagiu de modo esperado, desempenhando eficientemente as funções que foram propostas. A redução gradual da velocidade quando o motor se aproxima de uma posição pretendida, permite que o motor pare sempre na posição desejada. No entanto, devido à vibração transmitida pelo motor, verificou-se através do encoder, oscilações na posição de ± 1 incremento quando o motor se encontrava estático. Esta consequência não representa um problema trabalhando no modo de posicionamento absoluto, visto que a posição é corrigida sempre que é iniciado o movimento. Contudo, no modo de posicionamento relativo, este é um erro cumulativo ao longo dos movimentos realizados. Assim, seria necessário corrigir ou calibrar a posição após a realização de determinado número de movimentos no modo de posicionamento relativo, de maneira a evitar que este erro afetasse o desempenho do sistema. Outro efeito adverso da oscilação da posição enquanto o motor se encontra parado, é relativo à constante ativação do bloco *hardware interrupt* por causa do valor de referência do HSC estar a igualar o valor atual do HSC. Esta condição tem consequências no programa elaborado, fazendo com que o novo valor de referência do HSC tivesse de ser carregado antes de ser ativada a rotina de posicionamento absoluto, quando se executa a rotina de sequências de posicionamento absoluto. Pois, caso contrário, corre-se o risco de a rotina de posicionamento absoluto ser desativada antes de ter sido carregado o novo valor de referência do HSC, provocando uma função desajustada do programa.

6.3. Nota conclusiva

Neste capítulo é apresentada a estrutura do controlador do motor, onde é proposto um método para otimizar a resposta do mesmo. De seguida, fez-se uma análise do desempenho do sistema referindo o seu comportamento face às características que possui como também as alterações que foram efetuadas ao circuito elétrico e ao programa para corrigir alguns aspetos funcionais do sistema.

7. Conclusões

7.1. Análise do desempenho

A produção manual de cablagens é um procedimento moroso, que possui um certo grau de complexidade e que se encontra demasiado exposto ao erro humano. Por estes motivos, na presente dissertação propõe-se o desenvolvimento de um sistema automatizado para inserção de terminais em conectores. O sistema desenvolvido é delineado sobre algumas especificações de maneira satisfazer certas necessidades, apresentando as seguintes características: é autónomo, flexível, expedito, programável e escalável. Inicialmente, definiu-se a estrutura física do sistema que resultou num manipulador robótico cartesiano que executa várias tarefas consecutivas para inserir os terminais nos conectores. De seguida, são analisados as características de vários tipos de atuadores e sensores de modo escolher os componentes que melhor satisfazem as necessidades do sistema robotizado. No capítulo seguinte, controlo do sistema, é proposto um PLC para controlar e interagir com os variados componentes do sistema. São enunciadas suas propriedades mais importantes de programação e é apresentado um programa em anexo para controlar os componentes anteriormente escolhidos como atuadores e sensores. Ainda no mesmo capítulo, é feita a mesma abordagem para uma HMI responsável por criar um interface gráfico que permite ao utilizador do sistema manuseá-lo com extrema facilidade e de modo intuitivo.

Para complementar o trabalho, foi construído um protótipo que é parte do sistema projetado. O protótipo é constituído por um servomotor e um sistema de controlo. Embora não seja um protótipo integral do sistema projetado nesta dissertação, permitiu simular as funções mais importantes do sistema, visto que o sistema consiste basicamente num manipulador robótico cartesiano. Assim, permitiu simular o movimento de um dos eixos que constitui o sistema robótico cartesiano de posicionamento da ferramenta de acoplamento de terminais em conectores. O posicionamento foi implementado através do modo automático de controlo de velocidade do controlador do servomotor e da realimentação do encoder do motor. Assim, o motor era colocado a rodar a uma velocidade inicial constante e quando se aproximava de uma posição desejada, a velocidade era gradualmente reduzida até parar o motor nessa posição. Desta maneira, implementaram-se várias rotinas: (1) uma rotina de posicionamento relativo, que movia o motor baseado na posição inicial do encoder mais os incrementos a dar; (2) uma rotina de posicionamento absoluto, que movia o motor para um determinado valor do encoder; e (3) uma rotina que realizava sequências de posições absolutas. Como o posicionamento absoluto requeria calibração do eixo, não se verificaram erros associados ao posicionamento contínuo do motor. Em contraste, o posicionamento relativo não possuía calibração mas estava sujeito a propagação de um erro posicional de ± 1 incremento cada vez que realizava um novo movimento. No entanto, como seria desejado para o sistema

projetado neste trabalho o posicionamento absoluto, podemos dizer que o objetivo inicial deste protótipo foi alcançado com sucesso.

7.2. Sugestões de trabalhos futuros

No decorrer do trabalho elaborado foram realizadas opções que determinaram um rumo a seguir. Outras opções poderiam ter sido tomadas que certamente levariam a resultados diferentes e novas perspectivas se abriam. Assim, como esta dissertação não representa um fim do projeto, mas antes uma parte do mesmo, são feitas algumas sugestões de trabalho a desenvolver que visam não só complementar o trabalho realizado, mas também como abrir novos caminhos de investigação.

Assim, seria de grande interesse elaborar o protótipo integral do sistema aqui apresentado de modo a avaliar o desempenho do sistema como um todo e identificar possíveis lacunas que não foram exibidas pelo sistema aqui testado.

Este sistema destina-se a uma aplicação muito particular, no entanto, possui características capazes de satisfazer outras aplicações, ainda que devam ser efetuadas algumas alterações. Por isso, seria de grande utilidade analisar o desempenho deste sistema desempenhando funções semelhantes, para além daquela para que foi concebido.

Como a tecnologia se encontra em constante evolução, em que todos os dias aparecem novos materiais e componentes capazes de melhorar ou desempenhar novas funções, seriam importante fazer um estudo do impacto provocado no desempenho do sistema pela utilização de outros componentes como é o caso de diferentes tipos de atuadores e de sensores.

8. Referências bibliográficas

- [1] “komax Holding,” Komax Holding AG, [Online]. Available: <http://www.komaxgroup.com>. [Acedido em Outubro 2012].
- [2] “TE Connectivity,” Tyco Electronics Corporation, a TE Connectivity Ltd. company, [Online]. Available: <http://www.te.com>. [Acedido em Outubro 2012].
- [3] Aravind, Rajparthiban e Tiffany, “Development of Semi-Automatic Pick and Place Robot for Material Handling Systems,” em *5th International Colloquium on Signal Processing & Its Applications*, Kuala Lumpur, 2009.
- [4] G.-S. Kim, “Development of a three-axis gripper force sensor and the intelligent gripper using it,” *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 137, nº 2, pp. 213-222, 2007.
- [5] A. Pettersson, S. Davis, J. Gray, T. Dodd e T. Ohlsson, “Design of a magnetorheological robot gripper for handling of delicate food products with varying shapes,” *Journal of Food Engineering*, vol. 98, nº 3, pp. 332-338, 2010.
- [6] E. Brown, N. Rodenberg, J. Amend, A. Mozeika, E. Steltz, M. R. Zakin, H. Lipson e H. M. Jaeger, “Universal robotic gripper based on the jamming of granular material,” *Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)*, vol. 107, nº 44, pp. 18809-18814, 2010.
- [7] X. Li e T. Kagawa, “Development of a new noncontact gripper using swirl vanes,” *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 29, nº 1, pp. 63-70, 2013.
- [8] T. Fischer, “Sensor system for controlling a multifingered gripper on a robot arm,” em *Conference on Intelligent Robots and Systems*, Victoria, BC, 1998.
- [9] B.-J. Yi, H.Y. Ra, J.H. Lee, Y.S. Hong, J.S. Park, S.-R. Oh, I.H. Suh e W.K. Kim, “Design of a Parallel-Type Gripper Powered by Pneumatic Actuators,” em *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Takamatsu, 2000.
- [10] P. S. Sánchez e F. R. Cortés, “Cartesian Control for Robot Manipulators,” em *Robot Manipulators Trends and Development*, InTech, 2010.
- [11] T. M. Khan, M. Arshad e M. A. Choudhry, “Modeling and Control of Cartesian Robot Manipulator,” em *9th International Multitopic Conference, IEEE INMIC 2005*, Karachi,

- 2005.
- [12] P.-L. Yen e C.-C. Lai, "Dynamic modeling and control of a 3-DOF Cartesian parallel manipulator," *Mechatronics*, vol. 19, pp. 390-398, 2009.
- [13] R.-J. Wang, J.-W. Zhang, J.-M. Xu e H.-Y. Liu, "The Multiple-Function Intelligent Robotic Arms," em *Fuzzy Systems, 2009. FUZZ-IEEE 2009. IEEE International Conference on*, Jeju Island, 2009.
- [14] A. Yamamoto, T. Nishijima, T. Higuchi e A. Inaba, "Robotic Arm using Flexible Electrostatic Film Actuators," em *Industrial Electronics, 2003. ISIE '03. 2003 IEEE International Symposium on*, 2003.
- [15] G.-S. Huang, H.-C. Lin e P.-C. Chen, "Robotic arm grasping and placing using edge visual detection system," em *Control Conference (ASCC)*, Kaohsiung, 2011.
- [16] J. Awrejcewics e Z. Koruba, "Advances in Mechanics and Mathematics," em *Classical Mechanics: Applied Mechanics and Mechatronics*, Springer, 2012, pp. 15-26.
- [17] I. R. Sinclair, *Sensors and Transducers*, Newnes, 2001.
- [18] M. J. Mataric, "Arms, Legs, Wheels, Tracks, and What Really Drives Them: Effectors and Actuators," em *The robotics primer*, The MIT Press, 2007, pp. 29-45.
- [19] R. H. Bishop, *Mechatronic Systems, Sensors, and Actuators: Fundamentals and Modeling*, Boca Raton : Taylor & Francis, 2008.
- [20] Corporation Omron, "Omron," [Online]. Available: http://industrial.omron.eu/en/products/catalogue/motion_and_drives/servo_systems/rotary_servo_motors/accurax_g5/default.html. [Acedido em Outubro 2013].
- [21] Corporation Omron, "Omron," [Online]. Available: http://industrial.omron.eu/en/products/catalogue/motion_and_drives/servo_systems/servo_drives/accurax-g5/default.html. [Acedido em Outubro 2013].
- [22] BERGER LAHR, *Twin Line Drive 13x*, 2004.
- [23] USA, Hitec RCD, "Hitec Multiplex," [Online]. Available: <http://hitecrcd.com/products/servos/micro-and-mini-servos/analog-micro-and-mini-servos/hs-225mg-metal-gear-mighty-mini-servo/product>. [Acedido em Outubro 2013].
- [24] SMC Corporation of America, "SMC Manufacturing Pneumatics Worldwide," [Online]. Available: <http://www.smcusa.com/top-navigation/cad-models.aspx/36627/LZ>. [Acedido em Outubro 2013].
- [25] SMC Corporation of America, "SMC Manufacturing Pneumatics Worldwide," [Online]. Available: <http://www.smcusa.com/top-navigation/cad-models.aspx/36636/LC3F2->

- Directional-Control-Driver-for-LZBLZC. [Acedido em Outubro 2013].
- [26] Pololu Corporation, “Pololu Robotics and Electronics,” [Online]. Available: <http://www.pololu.com/catalog/category/115>. [Acedido em Outubro 2013].
- [27] Balluff Limited, “Balluff sensors worldwide,” [Online]. Available: http://www.balluff.com/balluff/MGB/en/products/catalogue/products_details.jsp?id=BES0341-124729. [Acedido em Outubro 2013].
- [28] Metrolog, [Online]. Available: <http://www.metrolog.net/transdutores/lvdt/gcd.php?lang=ptbr>. [Acedido em Outubro 2013].
- [29] Festo, “Festo,” [Online]. Available: http://www.festo.com/cat/pt_pt/products_050502. [Acedido em Outubro 2013].
- [30] R. C. Dorf e R. H. Bishop, *Modern Control Systems*, Singapore: Pearson Prentice Hall, 2008.
- [31] L. A. Bryan e E. A. Bryan, *Programmable controllers : theory and implementation*, Atlanta: Industrial Text Company, 1997.
- [32] Siemens AG, *S7-1200 Programmable controller System Manual*, Nürnberg, 2009.
- [33] Siemens AG, *WinCC Basic V11.0 SP1 System Manual*, Nürnberg, 2011.
- [34] J. G. Ziegler e B. Nichols, “Optimum Settings for Automatic Controllers,” *ASME*, vol. 64, pp. 759-768, 1942.
- [35] K. Ogata, “Ziegler-Nichols rules for tuning PID controllers,” em *Modern Control Engineering*, Prentice Hall, 2010, pp. 568-577.
- [36] Schneider Electric, “Schneider Electric,” [Online]. Available: <http://www2.schneider-electric.com/sites/corporate/en/products-services/former-brands/berger-lahr.page>. [Acedido em Outubro 2013].

9. Anexos

9.1. Anexo I - Programa do sistema automatizado.

Seguidamente é apresentado o programa do sistema automatizado em linguagem ladder. Este programa não foi testado, apenas foi construído para operar segundo as especificações dos atuadores e sensores escolhidos neste trabalho. Assim, apresentam-se vários blocos funcionais responsáveis por atuar em elementos específicos do sistema. De modo a evitar uma repetição do código, não serão apresentados os blocos que operam os motores ou um exemplo de uma rotina que sequencie um conjunto de operações. Pois, código semelhante foi produzido no capítulo 5.3 (Programa elaborado) e este pode ser importado para desempenhar tais funções com ligeiras alterações.

O primeiro bloco funcional é o block_1, que controla os atuadores da Figura 21. Estes dois atuadores são controlados por dois controladores através de três sinais de comando: direção, seleção de “thrust” e a saída on/off. O sinal de direção indica se o movimento do atuador é no sentido positivo (=0) ou negativo (=1), a saída on/off liga e desliga o motor do atuador e o sinal thrust é sempre colocado a 1 quando o motor é ligado para que não desenvolva demasiado binário. Para controlar estes dois atuadores apenas é necessário um bit de memória que, quando este transita para 1, o atuador 1 vai agarrar o conector e quando transita para 0, o atuador 1 liberta-se do conector e de seguida o atuador 2 empurra o conector e volta para a sua posição inicial. A Figura 70 mostra as instruções que ativam o atuador 1 que, quando o contato “interruptor1” é fechado, ativa o motor em direção ao seu limite positivo, mas esta ativação depende do estado sensor ótico 1 (indica a presença de um conector) e que o atuador 2 não se encontre em movimento. Quando atinge o limite positivo o motor é desligado.

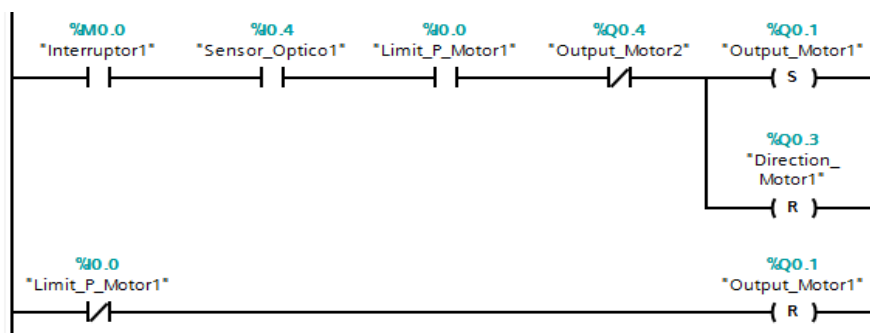


Figura 70 - Instruções do block_1, parte 1.

As instruções da Figura 71 mostram como o atuador 1 se liberta do conector, isto é, quando o bit transita para 0 é ativado o motor em direção ao limite negativo e quando este é atingido o motor 1 é desligado.

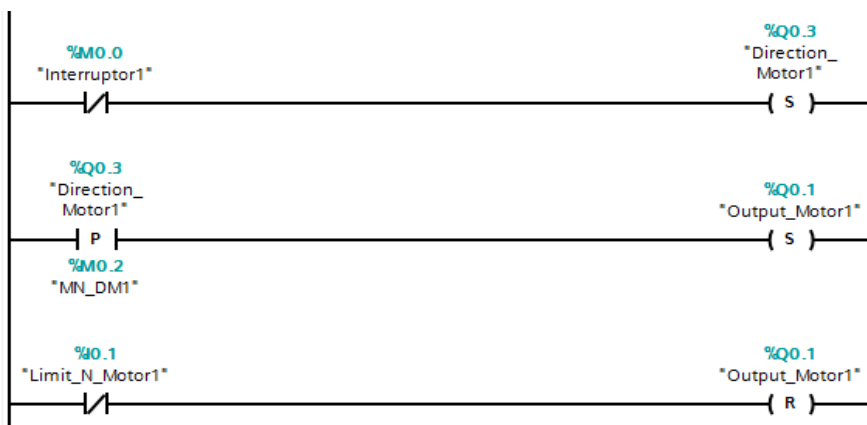


Figura 71 - Instruções do block_1, parte 2.

Quando o atuador 1 atinge o limite negativo, é ativado o atuador 2 em direção ao limite positivo e quando este limite é atingido, a direção é invertida até atingir o limite negativo, momento em que é desativado este atuador, como mostrado na Figura 72.

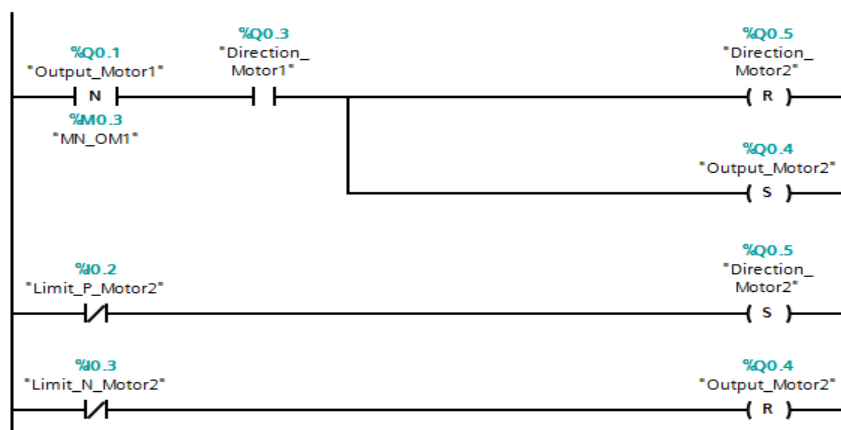


Figura 72 - Instruções do block_1, parte 3.

As instruções do block_2 (Figura 73 e Figura 74) controlam a abertura e o fecho das pinças através de sinais PWM. Deste modo, quando o *duty cycle* do sinal é 0, as pinças encontram-se abertas e à medida que este valor aumenta, elas fecham-se progressivamente até ao valor máximo 100. Cada pinça é controlada por um bit de memória que, quando se encontra a 1, incrementa o valor do *duty cycle* a cada ciclo de varrimento do PLC até o sensor analógico de corrente ultrapassar um determinado valor calibrado para a força com

que se pretende agarrar os fios. Quando o bit se encontra a 0, o valor do duty cycle é decrementado a cada ciclo de varrimento até o valor 0 (pinça completamente aberta).

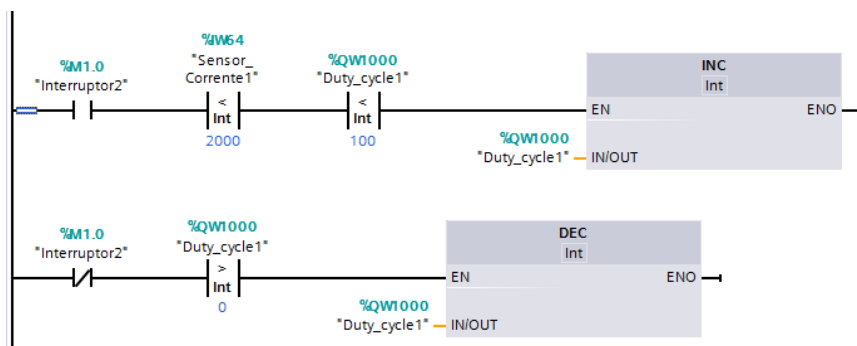


Figura 73 - Instruções que controlam a abertura e o fecho da pinça 1 (block_2).

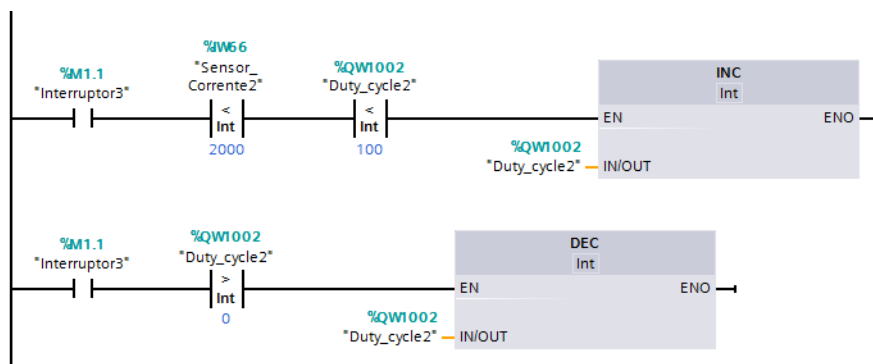


Figura 74 - Instruções que controlam a abertura e o fecho da pinça 2 (block_2).

O block_3 controla o motor que enrola os fios (ver Figura 23). Este atuador é ativado por um bit que alguns milissegundos após a sua ativação comanda a abertura da pinça 2 de modo a permitir que o fio seja enrolado (Figura 75). O número de voltas que são dadas é armazenado numa variável (HSC_Turns) que é incrementada por um bloco *hardware interrupt* que, por sua vez, é ativado por um dos HSC cada vez que é dada uma volta. Quando esta variável atinge um número máximo de voltas o atuador é desligado (Figura 76).

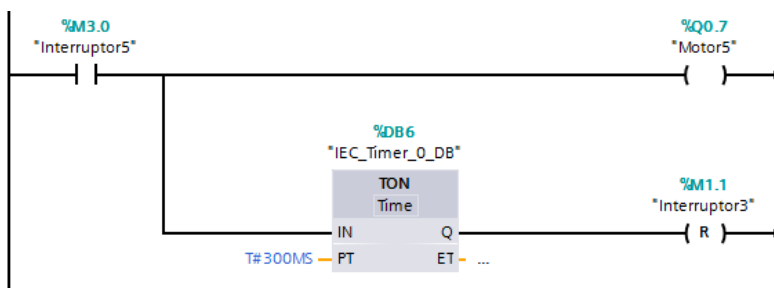


Figura 75 - Instruções do block_3, parte 1.

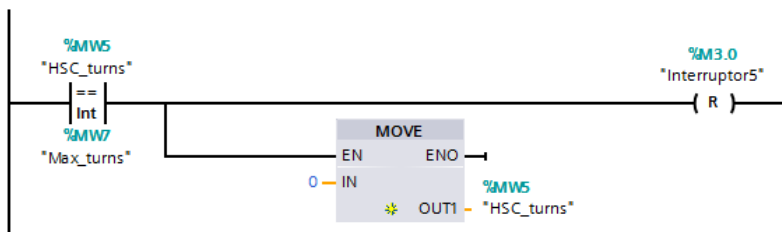


Figura 76 - instruções do block_3, parte 2.

As instruções do block_4 controlam o atuador que avança e recua a pinça 2 (movimento representado pelo segundo manipulador da Figura 22). Um bit aciona o movimento deste atuador em direção ao limite positivo. Quando o limite positivo é atingido, o atuador pára nessa posição e ativa o bit que comanda a abertura e o fecho da pinça 2, para que o fio seja agarrado (Figura 77). Quando fio é agarrado (sinal dado pelo sensor analógico de corrente) o atuador é ativado em direção ao limite negativo, parando nessa posição quando o limite é atingido (Figura 78).

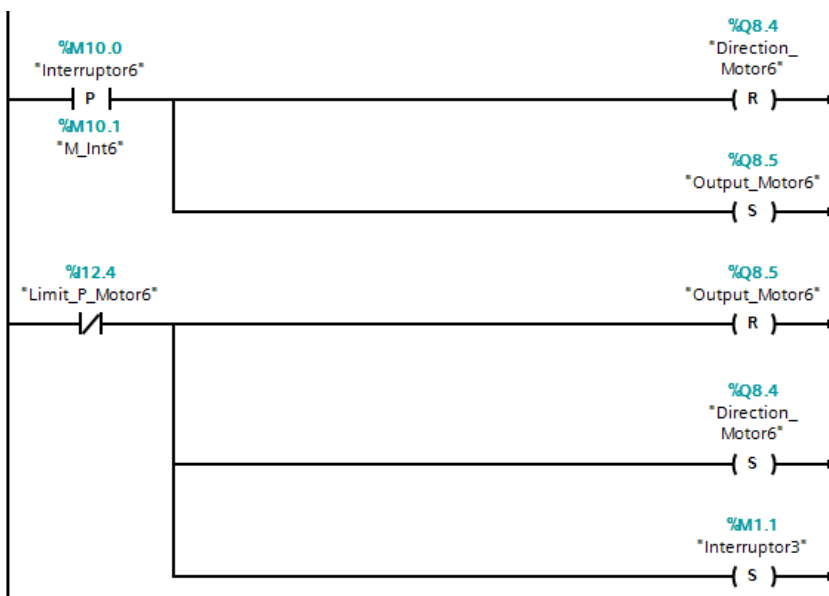


Figura 77 - Instruções do block_4, parte 1.

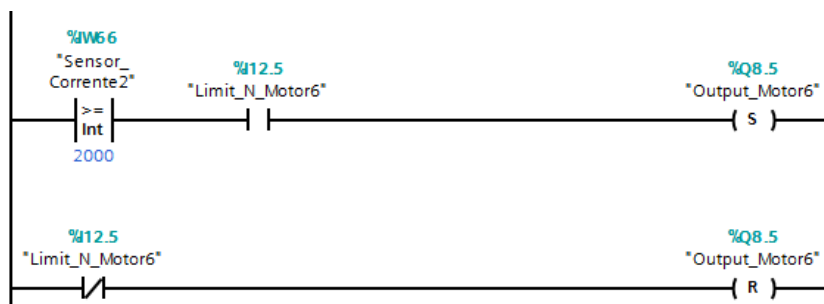


Figura 78 - Instruções do block_4, parte 2.

O block_5 contém as instruções dos atuadores que libertam o fio enrolado do manipulador robótico (Figura 24). Estes atuadores são ativados um após o outro em que depois de libertar o fio enrolado, regressam simultaneamente as suas posições iniciais. Assim, um bit aciona o primeiro atuador em direção ao limite positivo e quando este é atingido, é acionado o segundo atuador também em direção ao seu limite positivo (Figura 79). Depois de o segundo atuador atingir o limite positivo, os dois atuadores são acionados em direção aos seus limites negativos, onde param quando são atingidos (Figura 80).

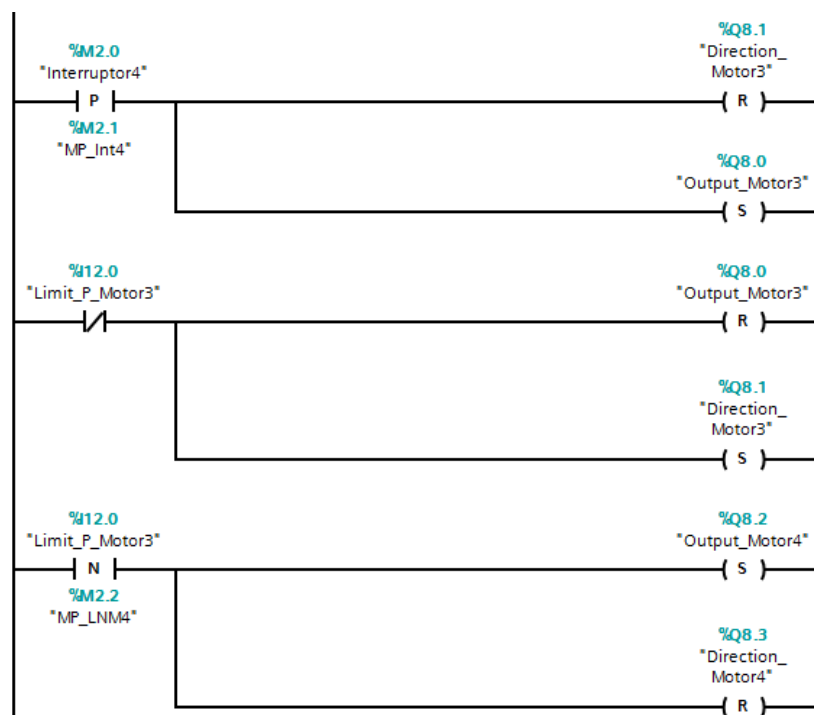


Figura 79 - Instruções do block_5, parte 1.

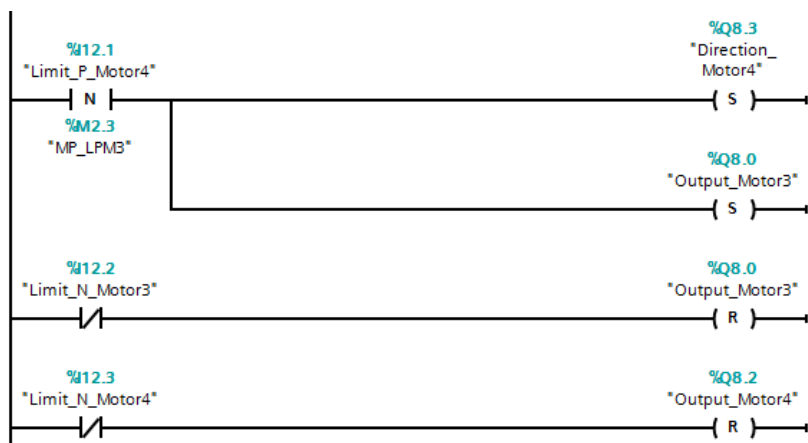


Figura 80 - Instruções do block_5, parte 2.

9.2. Anexo II - Interface gráfico do sistema automatizado.

Tal como para o programa do sistema automatizado apresentado no Anexo I, este interface gráfico também não foi testado, nem possui uma ligação direta com esse programa. O interface gráfico apenas representa uma visão geral das características pretendidas para o interface do sistema apresentado nesta dissertação.

O interface gráfico é constituído 4 screens (Screen 1, 2, 3 e 4) como mostrado na Figura 81.

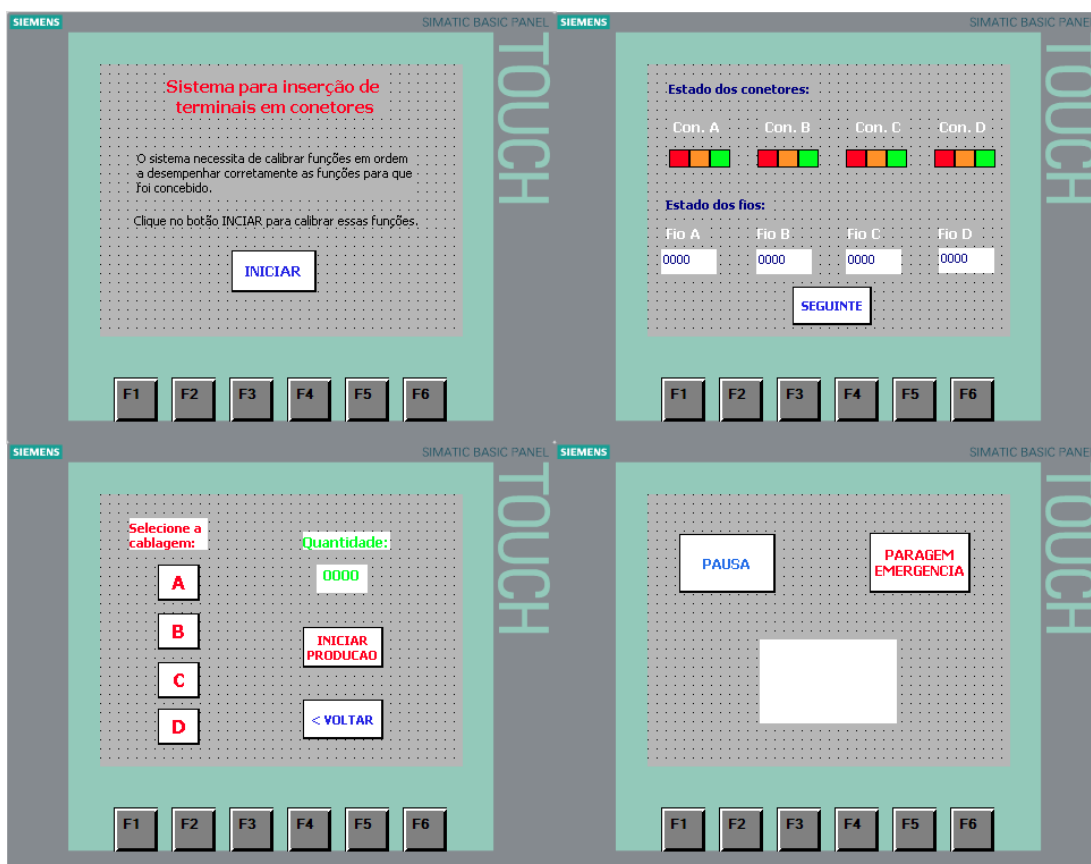


Figura 81 - Screens do interface gráfico.

O Screen 1 é o screen inicializado quando a HMI é ligada. Este screen apresenta alguns campos de texto que descrevem o funcionamento do sistema e um botão que inicializa funções, calibra o sistema e transita para o Screen 2. No Screen 2 é mostrada a quantidade de conetores e fios que se encontram carregados na máquina. Possui também um botão que ativa o Screen 3. No Screen 3 encontram-se objetos que permitem escolher um tipo de cablagem a produzir, a quantidade de cablagens a produzir e dois botões: um que inicia o processo de produção de uma cablagem e ativa o Screen 4; e outro que ativa o Screen 2. O Screen 4, possui um campo gráfico que exhibe várias imagens consoante o estado atual de

produção de uma cablagem e dois botões: um botão que pára e reinicia a produção de cablagens; e outro que aborta completamente a produção das cablagens e ativa o Screen 3. A Figura 82 mostra a interligação entre os vários screens.

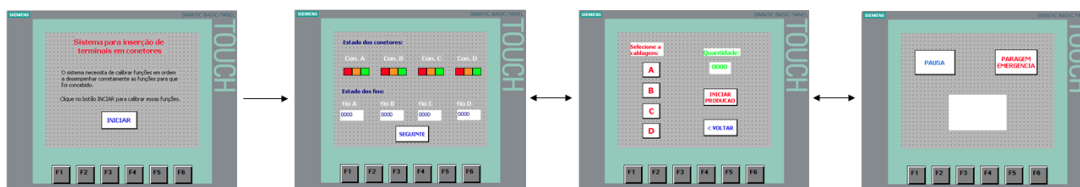


Figura 82 - Interligação entre os screens.

Na Tabela 25 é feita uma descrição pormenorizada dos objetos que constituem estes screens.

Tabela 25 - Objetos dos vários screens.

Objeto	Descrição
	Botão do Screen 1. Ativa Screen 2 e ativa outras funções iniciais e de calibração, como por exemplo, a calibração dos eixos do sistema.
	Mostra o estado dos conetores. Verde significa que se encontram acima do nível mínimo, laranja quando estão abaixo desse nível e vermelho quando não existe nenhum conetores.
	Campo do Screen 2 que exhibe a quantidade de um determinado tipo de fio.
	Botão do Screen 2 que ativa a Screen 3.
	Botões do Screen 3 que permitem selecionar uma determinada cablagem.
	Campo I/O do Screen 3 que permite introduzir o número de cablagens a produzir de uma só vez.
	Botão do Screen 3 que inicia a produção das cablagens e ativa o Screen 4.
	Botão do Screen 3 que ativa o Screen 2.
	Botão do Screen 4 que pára e reinicia a produção de cablagens por breves momentos.
	Botão do Screen 4 que aborta completamente a produção das cablagens e ativa o Screen 3.
	Campo gráfico do Screen 4 que exhibe imagens ou texto consoante a função que o sistema se encontra a executar.