



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Marco Alexandre Costa Fernandes da Cruz

Transportador Linear Industrial



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Marco Alexandre Costa Fernandes da Cruz
Transportador Linear Industrial

Dissertação de Mestrado
Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao Grau de
Mestre em Engenharia Eletrónica Industrial e Computadores

Trabalho efetuado sob a orientação de
Professor Doutor Manuel João Sepúlveda Mesquita de
Freitas
Engenheiro Rui Filipe da Cunha Castro

Resumo

Esta dissertação apresenta o desenvolvimento de um transportador linear com propulsão eletromagnética, com recurso a um motor linear síncrono. Do ponto de vista académico é uma tecnologia bastante explorada pelo que pode ser encontrado um elevado número de estudos teóricos sobre esta tecnologia. Do ponto de vista de aplicação, têm vindo a surgir cada vez mais projetos que demonstram bem as suas potencialidades como é o caso do comboio de levitação magnética - Maglev ou, mais recentemente, do elevador sem cabos – Multi. Trata-se, portanto, de uma tecnologia que está em clara expansão e afirmação no mundo.

O recurso aos motores lineares oferece a perspetiva de simplificação do projeto em relação aos sistemas acionados com motores rotativos, devido à inexistência de um sistema de conversão do movimento de rotação em movimento linear.

Esta investigação surge no âmbito de um projeto que está a ser desenvolvido pela empresa Preh Portugal, apresentando-se assim como uma investigação com uma forte componente de aplicação, isto é, cumpre o claro objetivo de obter uma solução funcional capaz de ser aplicada no mundo industrial contribuindo assim para o desenvolvimento do estado da arte. Do ponto de vista prático, a empresa visa a substituição dos habituais transportadores de cargas. O transportador em estudo será desenvolvido de forma modular, isto é, cada módulo terá que incorporar os enrolamentos do motor linear bem como, toda a eletrónica necessária ao seu funcionamento e controlo. Esta metodologia modular possibilita ainda modificar o *layout* do transportador sem a necessidade da alteração do hardware ou software. Será também estudada a possibilidade de o transportador se adaptar a diferentes pesos de cargas em simultâneo.

O resultado do desenvolvimento deste projeto será uma forte alternativa aos tradicionais transportadores o que o tornará um sistema com grande potencial de mercado.

Este trabalho foi organizado de modo a explicitar com a maior clareza o enquadramento, as motivações, os processos e os resultados obtidos com este projeto.

Numa primeira fase introduzir-se-á o tema onde serão exploradas as motivações e o enquadramento do projeto.

Posteriormente são abordadas e analisados alguns sistemas existentes no mercado que também recorrem a motores lineares, fazendo referência às suas características, princípios de funcionamento, vantagens e desvantagens.

De seguida são apresentados os fundamentos teóricos que estão na base das tecnologias utilizadas no desenvolvimento e implementação deste projeto.

Depois é apresentado o trabalho prático, descrevendo o equipamento adquirido, frisando as motivações que estiveram na base da sua aquisição e em que medida são essenciais para o desenvolvimento do projeto. É, ainda, explicada a ideia de controlo e de como esta foi implementada.

Em seguida é feita uma comparação direta entre o sistema desenvolvido e um dos sistemas que se tenciona substituir. Os resultados obtidos nessa comparação são depois analisados, interpretados e discutidos.

Em conclusão, destaca-se a pertinência e as vantagens da implementação deste tipo de sistema na indústria. Finalmente são apontados as próximas ações para a continuação do desenvolvimento deste projeto.

Abstract

This paper presents the development of a linear conveyor with electromagnetic propulsion, using a synchronous linear motor. On the academic point of view is a technology rather exploited, therefore there is a large number of theoretical studies on this regard. On the other hand, from the application point of view, lately has emerged a growing number of projects that clearly demonstrate their potential such as the magnetic levitation train - Maglev or, more recently, the elevator without cables - Multi. For all that has been said, this is a technology which is in plain expansion and is claiming it's place in the world.

The use of linear motors offers the prospect of simplifying the design of systems operated with rotary engines, due to the absence of a conversion system of rotational motion into linear motion

This research comes as part of a project that is being developed by the company Preh Portugal presenting itself as an investigation with a strong application component. In other words, meets the clear objective of obtaining a functional solution that can be applied in the industrial world thereby contributing to the growth of the art. From the practical point of view, the company intends to replace the usual load carriers. The linear motor in study is designed in a modular shape, which means, that each module will have to incorporate the linear motor windings as well as all the electronics necessary for its operation and control. This modular approach enables further modifications of the conveyor layout without changing the hardware or software. It will also be studied the ability of the carrier to adapt to different weight loads simultaneously.

The outcome of this project will be a strong alternative to traditional carriers which will make a system with great market potential.

This document has been structured in order to clearly explain the general framework, motivations, processes and results of this assignment.

Firstly, we have the introduction in which will be explored and explained the motivations and general framework of this project.

Secondly, the systems in the market nowadays, which are based in linear motors, will be studied and analysed emphasising their characteristics, working principals, advantages and disadvantages.

Thirdly, will be described the theoretical foundations of the technologies used in this project's developing and implementation.

Then, the practical work is presented, describing the acquired equipment, highlighting the motivations behind its acquisition, and how essential it is for the development of this project. Moreover, it is explained the control's idea and its implementation.

Next, a comparison is established between the developed system and the ones that it intends to replace. The results of this comparison are then analysed, interpreted and discussed.

In conclusion, it is exceeded the pertinence and advantages of the implementation of this kind of system for the industry. Finally, the next actions to further develop this work are pointed out.

Agradecimentos

Durante o decorrer desta dissertação, varias pessoas e entidades tiveram um papel fundamental no sentido de tornar possível e facilitar a sua realização e conclusão.

Começo por agradecer à minha família em especial aos meus pais, Rosa Viegas e Domingos Cruz por todo o apoio que me deram ao longo desta longa caminhada que culmina com este projeto.

À Clara Pinto, um agradecimento especial pela dedicação, compreensão e companheirismo constantes, principalmente nos momentos menos bons, ao longo de toda esta caminhada.

Aos meus amigos, particularmente ao Paulo Santos, João Cunha, Tiago Teixeira, Romeu Gonçalves, Vítor Pacheco e Miguel Martins por estarem sempre presentes e disponíveis para a partilha e entreaajuda, nos momentos que assim o exigiam.

Ao meu orientador, Professor João Sepúlveda, pela confiança depositada em mim para realizar este projeto e pela disponibilidade demonstrada. Por me ajudar a encarar os desafios com maturidade e a certeza do seu apoio.

À direção de curso, por estabelecer vias de comunicação com as empresas incentivando-as a propor projetos industriais para que os alunos os pudessem integrar.

À empresa Preh Portugal. A sua cooperação com a Universidade do Minho proporcionou-me uma experiência de desenvolvimento do projeto de dissertação num ambiente industrial, o que permitiu um maior crescimento e enriquecimento enquanto profissional.

Ao meu orientador da empresa, Rui Castro, que encontrou sempre o tempo e os meios para me ajudar e orientar, apesar da sua agenda preenchida. A sua contribuição foi essencial para o sucesso deste projeto.

Aos engenheiros José Costa, Nuno Silva e Armindo Rocha por colocarem à minha disposição todo o seu conhecimento e disponibilidade, tendo estado sempre presentes durante todas as fases deste projeto.

Às empresas que, através dos seus departamentos comerciais e dos seus departamentos de apoio técnico, tiveram um papel fundamental no desenvolvimento deste

projeto nomeadamente na resolução de problemas. À empresa EPL, representante da Yamaha em Portugal, de forma mais concreta ao Filipe Carrondo e ao Carlos Marques. À empresa Bresimar, representante da Beckhoff em Portugal, concretamente ao André Miguel e ao Nils Rumke.

Foi a conjugação de todas as pessoas e entidades que tornou possível a realização desta dissertação.

Um muito obrigado a todos.

Índice

Resumo.....	I
Abstract.....	III
Agradecimentos.....	V
Índice.....	VII
Índice de figuras.....	XI
Índice de tabelas.....	XIII
<i>Capítulo 1 - Introdução</i>	1
1.1 Enquadramento	1
1.2 Motivação	2
1.3 Objetivos	2
1.4 Organização do documento	3
<i>Capítulo 2 - Estado da Arte</i>	5
2.1 Elevador MULTI.....	5
2.2 Maglev.....	7
2.2.1 Transrapid.....	8
2.2.2 HSST (<i>High Speed Surface Transport</i>).....	9
2.2.3 L0 Series.....	10
2.2.4 Hyperloop.....	11
2.3 Sistemas de transporte Industriais	14
2.3.1 MagneMover LITE.....	14
2.3.2 QuickStick	15
2.3.3 XTS (eXtended Transport System)	16
2.3.4 iTRACK.....	19
<i>Capítulo 3 - Fundamentos Teóricos</i>	23

3.1	Ímanes permanentes.....	23
3.2	Eletromagnetismo	25
3.2.1	Lei de Gauss para a eletricidade	27
3.2.2	Lei de Gauss para o magnetismo	27
3.2.3	Lei de Faraday.....	27
3.2.4	Lei de Ampère	28
3.3	Motores Eléctricos Rotativos.....	29
3.4	Motores Eléctricos Lineares.....	31
	Motores Lineares Síncronos (MLS)	34
3.5	Protocolos de Comunicação	38
3.5.1	Ethernet/IP	39
3.5.2	EtherCAT	44
3.5.3	RS-232C.....	49
3.6	PLC (<i>Programmable Logic Controller</i>)	52
<i>Capítulo 4 - Motor Linear Yamaha LCM100</i>		55
4.1	Escolha do motor	55
4.2	Módulo LCM100	58
4.2.1	Montagem.....	60
4.2.2	Consumos.....	63
4.3	Controlador LCC140	64
4.3.1	Análise	64
4.3.2	Inicialização.....	68
4.4	Beckhoff Embedded PC CX9020	72
4.4.1	Análise	73
4.4.2	Sistema de terminais EtherCAT.....	75
4.4.3	Bloco EtherCAT	76

<i>Capítulo 5 -</i>	Sistema de Controlo	83
5.1	Sistema de controlo com recurso ao PLC CX9020	83
5.1.1	Configuração da rede Ethernet/IP	85
5.2	Sistema de Controlo em aplicação C#	93
5.2.1	Configuração do sistema de controlo.....	94
5.2.2	Aplicação Cliente TCP e protocolo definido	97
5.2.3	Aplicação “Sistema de Controlo”	98
<i>Capítulo 6 -</i>	Resultados Obtidos e Discussão	113
6.1	Transportador TS4plus	113
6.2	Resultados	116
6.3	Discussão de resultados	119
<i>Capítulo 7 -</i>	Conclusão e Trabalho Futuro	121
7.1	Conclusões	121
7.2	Trabalho Futuro.....	122
	Referências Bibliográficas	125
Anexo	Lista de Custos.....	129

Índice de figuras

Figura 1 – Elevador MULTI [1]	6
Figura 2 - Demonstração da movimentação do MULTI (adaptada de [1])	6
Figura 3 – Transrapid em Shanghai [3].....	8
Figura 4 - Sistema de levitação Eletromagnética (EMS) (adaptada de [4])	8
Figura 5 - Alimentação por módulos [7].....	9
Figura 6 – High Speed Surface Transport [7]	9
Figura 7 - LO Series [8]	10
Figura 8 – Sistema de levitação Eletrodinâmica (EDS) (adaptada de [4]).....	11
Figura 9 – Hyperloop [9].....	12
Figura 10 - Sistema de levitação por indução (Inductrack) (adaptado de [4])	12
Figura 11 – Sistema de levitação Inductrack	13
Figura 12 - MagneMover LITE [11]	14
Figura 13 – QuickStick [11]	15
Figura 14 - XTS (eXtended Transport System) [12]	17
Figura 15 - Modulo e mover do XTS [12].....	17
Figura 16 - Módulos curvos do XTS [12].....	17
Figura 17 - Exemplo de uma configuração do XTS [12].....	18
Figura 18 - Fixação dos movers ao carril [12]	18
Figura 19 - Trabalho sobre o XTS [12].....	18
Figura 20 - Sistema iTRACK da Rockwell [13].....	20
Figura 21 - Mover do sistema iTRACK [13].....	21
Figura 22 - Configurações de operação do iTRACK [13].....	22
Figura 23 - Curva de magnetização	24
Figura 24 - Regra da mão direita [15]	28
Figura 25 - Onda eletromagnética	29
Figura 26 - Funcionamento de um motor elétrico	30
Figura 27 - Principais tipos de motores elétricos.....	31
Figura 28 - Demonstração da transformação de um motor tradicional num motor linear	32
Figura 29 - Figura ilustrativa do entreferro de um motor linear	33
Figura 30 - Figura ilustrativa do movimento de um MLS (adaptado de [4])	35
Figura 31 - MLS com face simples e face dupla (adaptado de [19])	36

Figura 32 - Configurações de MLS para diferentes finalidades (adaptado de [19])	37
Figura 33 - Arquitetura industrial clássica [20]	39
Figura 34 - Logotipo Ethernet/IP [22].....	39
Figura 35 - Logotipo da ODVA [22].....	40
Figura 36 - Comunicação entre os nós Ethernet/IP	41
Figura 37 - Trama Ethernet e trama Ethernet/IP	41
Figura 38 - Arquitetura Ethernet/IP [21].....	43
Figura 39 - EtherCAT Technology Group.....	44
Figura 40 - EtherCAT na trama Ethernet.....	46
Figura 41 - Transferência de dados EtherCAT	47
Figura 42 - Determinar o atraso do tempo de execução [12].....	49
Figura 43 - Exemplo de um PLC [12]	53
Figura 44 - Motor linear Simotics L-1FN3 [27].....	56
Figura 45 - Motor Linear IndraDyn-L [28]	56
Figura 46 - Módulo LCM100	58
Figura 47 - Distribuição dos motores ao longo do Modulo LCM100-4M	59
Figura 48 - Slider do LCM100	60
Figura 49 – Bloco de conexão.....	60
Figura 50 - Ilustração de como unir dois módulos	60
Figura 51 - Cabo de ligação entre dois módulos	61
Figura 52 - Modulo terminal esquerdo e direito	61
Figura 53 - Guias de inserção e remoção dos sliders	61
Figura 54 - Cabo de alimentação e cabo de controlo	62
Figura 55 - Ligação entre o módulo LCM100 e o controlador LCC140	62
Figura 56 - Exemplo de uma operação de um sistema com 6 módulos.....	64
Figura 57 - Controlador LCC140	65
Figura 58 - Conetor de alimentação	66
Figura 59 – Entrada do circuito de emergência	66
Figura 60 - Cabo de ligação de controladores LCC140	67
Figura 61 - Conetor terminal	67
Figura 62 - Comutadores rotacionais presentes em cada LCC140	68
Figura 63 - Consola HPB e software POPCON	69

Figura 64 - Extrato da lista de parâmetros do motor no software POPCON	69
Figura 65 - Movimento manual no POPCON	71
Figura 66 - Programa no software POPCON	72
Figura 67 - Beckhoff Embedded PC CX9020	73
Figura 68 - Método de ligação do terminal ao PLC.....	75
Figura 69 - Bloco EtherCAT construído	76
Figura 70 - Terminal EterCAT EL1809.....	77
Figura 71 - Terminal EterCAT EL2809.....	78
Figura 72 - EL6652 Ethernet IP master terminal	79
Figura 73 - Terminador de E-bus EL9011.....	79
Figura 74 - Fonte de Alimentação.....	80
Figura 75 - Sistema de controlo final	84
Figura 76 - Sistema de controlo inicial.....	85
Figura 77 - Rede Ethernet/IP definida entre o PLC e o controlador	86
Figura 78 - Definição do IP do LCC140	86
Figura 79 – Configuração do escravo.....	87
Figura 80 - Configuração do mestre	87
Figura 81 - Parâmetros de comunicação retirado do Ficheiro EDS do LCC140.....	88
Figura 82 - Cycle Time Multiplier retirado do EDS file	89
Figura 83 - Tamanho dos dados de saída	89
Figura 84 - Configuração da comunicação entre o CX9020 e o LCC140 no TwinCAT2	90
Figura 85 - Ligação estabelecida entre o PLC e o controlador	91
Figura 86 - Variável de estado do escravo.....	92
Figura 87 - Interceção da comunicação entre o PLC e o controlador	93
Figura 88 - Conceito de linha de produção com gestão caótica	95
Figura 89 - Diagrama do sistema de controlo desenvolvido.....	95
Figura 90 - Interface da aplicação cliente	97
Figura 91 - Estrutura das estações.....	98
Figura 92 - Distribuição das estações ao longo do motor	98
Figura 93 - Estrutura "peca"	99
Figura 94 - Estrutura "Sequencia"	99
Figura 95 - Estrutura dos slider	100

Figura 96 - Fluxograma do algoritmo para estabelecer ligações entre os clientes e o servidor .	101
Figura 97 - Estrutura de pedidos	101
Figura 98 - Preenchimento da lista de pedidos	102
Figura 99 - Fluxograma do algoritmo de validação de pedidos	102
Figura 100 - Fluxograma do algoritmo de gestão da lista de pedidos.....	103
Figura 101 - Verifica se existem pedidos e se a comunicação serie está aberta	104
Figura 102 - Copia do primeiro pedido da lista de pedidos.....	104
Figura 103 - Fluxograma do algoritmo para responder a um pedido.....	105
Figura 104 - Verifica se o estado do pedido é "Done"	106
Figura 105 - Pergunta ao controlador a posição do slider 1	106
Figura 106 - Comandos para seleção e movimentação do slider para a estação de origem	106
Figura 107 – Comando para manter o slider parado durante 3 segundos.....	106
Figura 108 - Movimento para a estação destino	107
Figura 109 – Atualização dos estados e da sequência.....	107
Figura 110 - Verificação da execução do comando	108
Figura 111 - Parâmetros da comunicação RS232 com o LCC140.....	108
Figura 112 - Configuração da porta serie na aplicação C#	109
Figura 113 - Interface da aplicação do sistema de controlo.....	110
Figura 114 - Transportador TS4plus.....	114
Figura 115 - Detalhe ilustrativo do sistema de propulsão do TS4plus	114
Figura 116 – Modulo TS4plus em funcionamento na Preh Portugal.....	115
Figura 117 - Esquema da linha de produção com o TS4plus	116
Figura 118 - Sistema de controlo futuro	124

Índice de tabelas

Tabela 1 - Classificação dos diferentes tipos de Maglev	13
Tabela 2 - Características do MagneMover LITE.....	14
Tabela 3 - Características do QuickStick	16
Tabela 4 - Características do sistema XTS	19
Tabela 5 - Características dos módulos do iTRACK	20
Tabela 6 - Características dos <i>movers</i> do iTRACK	21
Tabela 7 - Tabela comparativa dos sistemas de transporte Industriais	22
Tabela 8 - Resumo dos tipos de comunicação para rede Ethernet IP	43
Tabela 9 - Sinais do padrão RS-232 num conector DB9	50
Tabela 10 - Características do LCM100.....	58
Tabela 11 - Consumos do LCC140	63
Tabela 12 - Características do CX9020 da Beckhoff	74
Tabela 13 - Características da fonte de alimentação	80
Tabela 14 - Características do sistema TS4plus.....	115
Tabela 15 - Resumo da comparação entre os dois sistemas	119

Lista de abreviaturas

- CA – Corrente Alternada
- CC – Corrente Continua
- EDS – *Electrodynamic Suspension*, Suspensão Eletrodinâmica
- EMS - *Electromagnetic Suspension*, Suspensão Eletromagnética
- EUA - Estados Unidos da América
- HSST - *High Speed Transit System*, Sistema de deslocação de alta velocidade
- LED - *Light Emitting Diode*, Diodo Emissor de Luz
- MLI - Motor de Indução Linear
- MLS - Motor Linear Síncrono
- Maglev - *Magnetic Levitation*, Levitação Magnética
- PM - *Permanent Magnets*, Imanes Permanentes
- MC – *Moving Coils*, Enrolamentos móveis
- MM – *Moving Magnets*, Imanes móveis
- PC – *Personal Computer*, Computador pessoal
- IDE – *Integrated Development Environment*, Ambiente de desenvolvimento integrado
- RPM – Rotações por minuto
- FIFO – First In First Out, Primeiro a entrar primeiro a sair
- TCP/IP - Transmission Control Protocol/Internet Protocol, Protocolo de controlo de transmissão/Protocolo de Internet

Capítulo 1 - Introdução

Neste primeiro capítulo será feita a introdução ao tema da dissertação, as motivações que estiveram na base do desenvolvimento deste projeto e ainda a identificação dos objetivos a atingir. Para uma mais fácil compreensão deste documento, será ainda descrita a organização do mesmo.

1.1 Enquadramento

No panorama atual de grande competitividade industrial, a busca por conseguir fazer mais, em menos tempo e de forma mais eficiente está presente no quotidiano de todas as empresas. A otimização de recursos, segurança, eficiência e competitividade são fundamentais para que as empresas prosperem.

Baseando-se nesta premissa básica, a empresa Preh Portugal, empresa do ramo automóvel, situada na Trofa, cujos níveis de produtividade e competitividade se destacam no mercado europeu, propôs-se a traçar o caminho da inovação, com vista na eficiência e otimização de recursos. Assim, esta multinacional Alemã encimou um projeto de substituição das linhas de montagem baseadas em movimentos mecânicos, as chamadas linhas tradicionais, por linhas de montagem com recurso a motores lineares. Foi então proposto como tema de

dissertação o desenvolvimento de um sistema de transporte de cargas com recurso a motores lineares.

1.2 Motivação

A escolha deste tema prendeu-se com o facto de se tratar de uma solução inovadora e uma verdadeira alternativa aos sistemas tradicionais de transporte de cargas em ambientes industriais. A tecnologia envolvida está presente em projetos de grande desenvolvimento tecnológico mundial. O facto de ter sido um projeto proposto por uma empresa, possibilitará um contacto próximo com o mundo empresarial o que o torna um projeto muito estimulante e enriquecedor.

Esta dissertação apresenta o desenvolvimento de um transportador linear com propulsão eletromagnética, com recurso a um motor linear síncrono com um funcionamento por módulos.

O transportador a ser desenvolvido apresenta-se como uma forte alternativa aos transportadores tradicionais uma vez que dentro das suas características pode-se destacar a manutenção reduzida, baixos consumos, grande fiabilidade e flexibilidade e baixa geração de ruído audível.

A empresa tenciona substituir os atuais transportadores presentes nas suas linhas de montagem pela solução a ser desenvolvida, equacionando ainda a sua comercialização. É assim imperativo, que este projeto evidencie as potencialidades, vantagens/desvantagens dos motores lineares face aos motores rotativos para que a sua implementação seja equacionada e eventualmente aceite.

1.3 Objetivos

O projeto visa o desenvolvimento de um transportador linear de propulsão eletromagnética com recurso a um motor linear síncrono.

Os objetivos deste trabalho serão definidos tendo em conta os requisitos da empresa e as especificidades do tema em estudo.

De facto, a empresa definiu o desenvolvimento modular para permitir que a alteração do layout da linha de produção não pressuponha nenhuma alteração no *software* e *hardware* do sistema. Por conseguinte, cada um dos módulos passará a incorporar o motor linear assim como toda a eletrónica necessária ao seu funcionamento e controlo.

Numa fase inicial, é necessário fazer um estudo de mercado para que, de entre a oferta de motores lineares disponível, escolher aquele que mais se adequa às necessidades deste projeto.

Em simultâneo, terá que ser escolhido um dispositivo capaz não só de controlar o motor linear, mas também de o interligar com outros dispositivos num sistema de controlo abrangente e apto a promover uma gestão eficiente.

A escolha do protocolo de comunicação a ser usado no sistema de controlo será definida pelas especificidades da comunicação exigidas pelo motor linear.

Para além dos objetivos acima descritos, desenha-se como principal objetivo proposto, o desenvolvimento de um sistema capaz de controlar o movimento do motor linear, receber *inputs* de outros equipamentos e decidir quais os comandos a transmitir ao motor, de modo a que as tarefas sejam cumpridas da forma mais eficaz possível.

Inerente ao sistema de controlo advém a necessidade de desenvolver um algoritmo para determinar, constantemente, a posição da parte móvel do motor.

O projeto em estudo terá de ser desenvolvido e implementado com especial atenção ao desempenho fazendo sempre uma boa gestão dos custos.

1.4 Organização do documento

Neste ponto, será descrita a estrutura e organização do documento, resumindo os temas abordados e explorados em cada capítulo.

Após o término do presente capítulo, segue-se o capítulo dois, onde será explorado o estado da arte, isto é, onde serão apresentadas algumas soluções tecnológicas usadas atualmente, que se relacionam com os temas em estudo no desenvolvimento deste projeto. Dentro desta linha de pensamento, serão apresentados sistemas que recorrem a motores lineares com diferentes aplicações, ajudando assim a perceber a flexibilidade destes motores.

No capítulo três serão apresentados os fundamentos teóricos que apresentam maior relevância para o entendimento do projeto em desenvolvimento. Estes fundamentos serão explorados e aplicados em diversas partes deste projeto.

O quarto capítulo versará sobre o motor linear LCM100 da Yamaha, motor escolhido para o desenvolvimento do sistema. Este capítulo justificará a seleção deste motor pela exposição das suas características mais relevantes. Será também apresentado o controlador associado ao motor linear da Yamaha. O LCC140 da Yamaha será apresentado em detalhe uma vez que toda a comunicação entre o sistema de controlo e o motor passará por este controlador. Por fim será apresentado o PLC escolhido, onde serão abordadas as motivações por detrás da escolha do PLC Beckhoff Embedded PC CX9020 tendo este a função de englobar todos os componentes do projeto num sistema de controlo central.

No capítulo cinco dar-se-ão a conhecer as características e será descrita a implementação do sistema de controlo idealizado, onde irão ser abordadas as razões que levaram à necessidade de ter que se encontrar uma alternativa ao uso do PLC como elemento central no sistema de controlo.

No capítulo seis proceder-se-á à apresentação e discussão dos resultados obtidos com a realização deste projeto, focando as vantagens deste sistema em relação aos tradicionais.

O último capítulo apresentará as conclusões mais importantes que o desenvolvimento deste projeto permitiu apurar. Serão também referidos os passos mais imediatos no processo de continuidade deste projeto, bem como alguns exemplos de aplicações para o sistema industrial final.

Capítulo 2 - Estado da Arte

Uma das tarefas iniciais mais importantes para o desenvolvimento de qualquer projeto é o estudo do estado da arte, isto é, a realização de uma pesquisa e estudo exaustivo de soluções desenvolvidas ou em desenvolvimento que de alguma forma recorram à tecnologia de motores lineares para o transporte de cargas. A informação que foi recolhida no âmbito desta pesquisa será apresentada ao longo deste capítulo.

2.1 Elevador MULTI

O elevador MULTI [Figura 1], solução desenvolvida pela *thyssenkrupp* [1], recorre à tecnologia da utilização de motores lineares para o transporte de cargas. Apesar de ser uma solução ainda recente, o reconhecimento da sua utilidade face às novas realidades está a ser muito grande. Prova desse mesmo reconhecimento, é a certeza de que irá ser aplicado nos 12 maiores arranha-céus construídos a partir de 2017.

Este sistema de elevadores tem como objetivo substituir os sistemas tradicionais, apresentando, à partida, a vantagem de não ser necessário o recurso a cabos para garantir a elevação e sustentação das cabines.



Figura 1 – Elevador MULTI [1]

Para além da exclusão dos cabos, acrescenta a possibilidade de efetuar movimento horizontal, o que abre portas para o desenho e construção de novas configurações de edifícios nunca antes pensadas. Os edifícios tornar-se-ão pequenas cidades, e os elevadores assemelhar-se-ão aos metropolitanos.

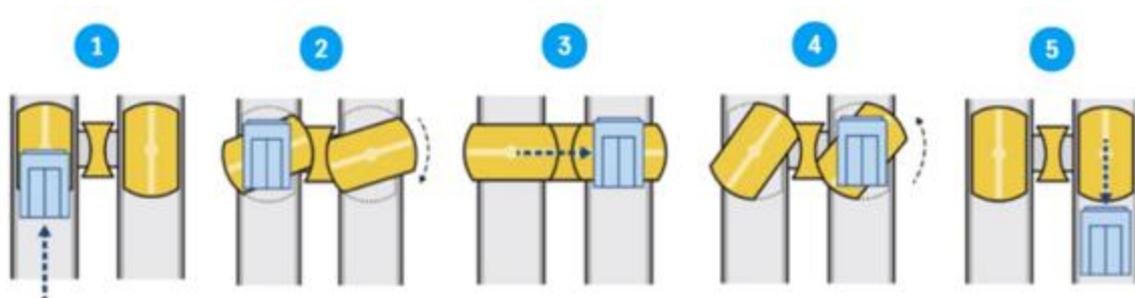


Figura 2 - Demonstração da movimentação do MULTI (adaptada de [1])

Por dia no planeta Terra, mais de 12 milhões de elevadores fazem 7 milhares de milhão de viagens e transportam cerca de 1 milhar de milhão de pessoas. [1]

Um estudo efetuado pela Columbia University afirma que durante ano de 2010, os trabalhadores dos escritórios de Nova Iorque gastaram 16,6 anos à espera de elevadores e 5,9 anos a viajar nos elevadores. Este estudo demonstra a importância de se aumentar a disponibilidade e eficiência dos sistemas de elevadores. [1]

Com a capacidade da utilização de múltiplas cabines em simultâneo e com movimentos independentes em cada poço, é afirmado pelos seus fabricantes que os utilizadores esperarão apenas entre 15 a 30 segundos por um elevador. A sua velocidade de deslocamento é de 18m/s. Os elevadores tradicionais mais rápidos conseguem uma velocidade de deslocamento de 10m/s.

Tem a sua primeira aplicação num edifício de 246 metros de altura a ser construído na cidade de Rottweil na Alemanha com abertura prevista para o final de 2016. [1]

2.2 Maglev

A tecnologia presente no afamado comboio de levitação e propulsão magnética é um assunto incontornável para o estado da arte deste projeto. Recorre diretamente à tecnologia abordada, representa uma das maiores conquistas da humanidade e demonstra as possibilidades da tecnologia associada aos motores lineares.

O nome Maglev surge da expressão “*Magnetic Levitation*” que traduzido significa levitação magnética. Esta característica é uma das mais carismáticas sendo imagem de marca de todos os sistemas implementados. O facto de o comboio não ter contacto físico com as partes metálicas que compõem a linha ferroviária, traduz-se em consumos mais baixos, menor ruído, maior segurança e melhores desempenhos, quando comparado com os comboios tradicionais. Para além de acelerações e desacelerações significativamente superiores, são capazes de atingir grandes velocidades. Recentemente, um dos modelos de Maglev desenvolvido no Japão, suplantou o seu predecessor, e atingiu os 603km/h.

A Alemanha e o Japão são os países que mais têm apostado nesta tecnologia. O modelo alemão denomina-se Transrapid enquanto o Japão apresenta dois modelos distintos: o MLX-01 e o HSST. Mais recentemente, nos Estados Unidos, o carismático Elon Musk [2], decidiu apostar nesta tecnologia, e assim nasceu o Hyperloop. Apesar de apresentar semelhanças com os sistemas Alemão e Japoneses, apresenta uma particularidade que o transporta para uma nova era: Circular num módulo tubular de vácuo. Com a já conseguida eliminação do atrito proveniente da ausência de contacto mecânico, através da levitação, com este tubo de vácuo, o atrito do ar é removido tornando os valores de aceleração/desaceleração e velocidades teoricamente ilimitados. Os valores de aceleração e desaceleração estão sempre limitados pelo que o ser humano consegue aguentar. [3]

Todos estes sistemas de Maglev mencionados são, na realidade, compostos por dois sistemas independentes: Sistema de Levitação e o Sistema de Propulsão. O primeiro garante levitação e o segundo garante propulsão do comboio.

2.2.1 Transrapid

O sistema Transrapid é um sistema Maglev desenvolvido na Alemanha pela empresa Transrapid International GmbH e teve a sua primeira aplicação comercial em Shanghai, China num troço com cerca de 30km inaugurado em 2003. Com uma velocidade máxima de 501km/h e aliado à grande capacidade de aceleração e desaceleração, permite que complete os 30km de troço em apenas sete minutos e vinte segundos.



Figura 3 – Transrapid em Shanghai [4]

O sistema de levitação presente neste modelo recorre ao método de levitação EMS (Suspensão Eletromagnética). As principais características deste método são o recurso a eletroímãs fixos ao comboio que através de forças magnéticas de atração entre estes eletroímãs e a estrutura do carril providenciam a levitação como ilustrado na Figura 4.

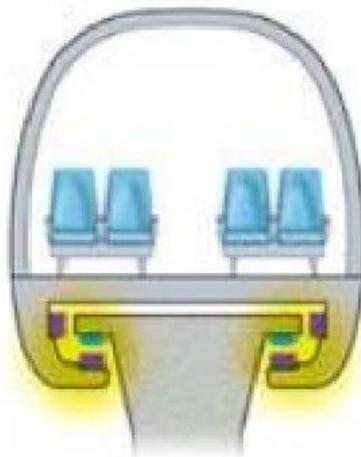


Figura 4 - Sistema de levitação Eletromagnética (EMS) (adaptada de [5])

De salientar também a presença de eletroímãs laterais para manter o comboio estável e centrado ao longo do trajeto. O sistema de controlo deste modelo é complexo devido essencialmente às variações de velocidade e inclinação.

No que diz respeito à propulsão, o *Transrapid* recorre a motores lineares síncronos trifásicos. À semelhança do que acontece com os motores lineares síncronos, o estator está disposto ao longo do carril e o rotor passa ser uma superfície plana disposta ao longo do comboio. Ao alimentar os enrolamentos desta superfície plana com uma tensão trifásica com um desfasamento de 120° entre fases, geram campos magnéticos, que fazem com que o comboio se desloque linearmente ao longo do carril. A velocidade do comboio pode ser controlada pela variação da frequência da corrente alternada. [6]

Outra característica deste sistema é facto de o estator ou carril, estar dividido por módulos. Isto permite poupar energia uma vez que, qualquer que seja a distância a percorrer, somente o módulo onde o comboio está a passar é alimentado, ao contrário do que acontece nos sistemas tradicionais, em que todo o carril é alimentado durante o todo o trajeto. Isto aumenta consideravelmente a eficiência do sistema [Figura 5]. [7]

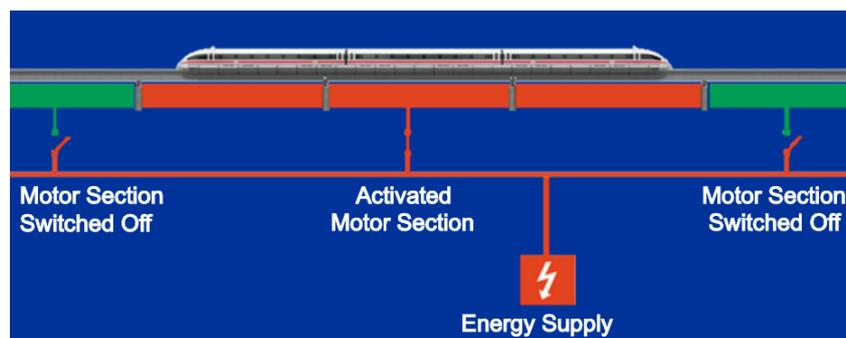


Figura 5 - Alimentação por módulos [8]

2.2.2 HSST (*High Speed Surface Transport*)

O HSST partilha o método de levitação com o *Transrapid*, ou seja, o método de suspensão eletromagnética.



Figura 6 – High Speed Surface Transport [9]

A grande diferença entre o HSST e o Transrapid reside no facto de o sistema de levitação e o sistema de direção do HSST não serem independentes. Isto é possível porque, este sistema foi projetado para operar em velocidades relativamente baixas, quando comparado com os outros sistemas Maglev. [6]

Para o sistema de propulsão, o HSST recorre a motores lineares de indução que são em tudo semelhantes aos motores de indução tradicionais. São gerados campos magnéticos no estator, que vão induzir uma força eletromotriz no rotor, fazendo com que este se mova. Como se trata de um motor linear o movimento do rotor é igualmente linear.

2.2.3 L0 Series

O sistema L0 Series é também desenvolvido no Japão, mas ao contrário do HSST, o seu principal objetivo são as viagens de alta velocidade.



Figura 7 - L0 Series [10]

O princípio de levitação é denominado de EDS (Suspensão Eletrodinâmica). Este difere do EMS, descrito anteriormente, uma vez que os usa bobinas supercondutoras em vez de eletroímãs e estas estão colocadas carril como ilustrado na Figura 8. Usa forças de repulsão magnéticas para conseguir levitação.

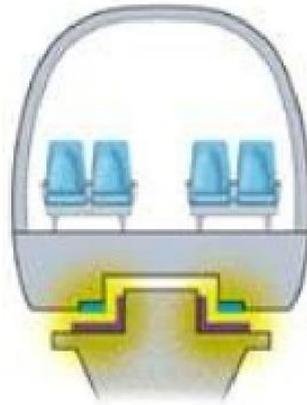


Figura 8 – Sistema de levitação Eletrodinâmica (EDS) (adaptada de [5])

As bobinas supercondutoras garantem um fluxo magnético mesmo depois de deixarem de ser alimentadas. A grande desvantagem deste sistema de levitação é o facto de que para velocidades abaixo dos 100km/h não consegue gerar levitação o que obriga ao uso de rodas metálicas como um comboio tradicional. [3]

Tal como o Transrapid, apresenta eletroímãs laterais para manter o comboio estável e centrado ao longo do trajeto.

Para sistema de propulsão, este modelo recorre a motores lineares síncronos trifásicos. Os enrolamentos do estator estão dispostos ao longo do carril enquanto que no comboio existem bobinas supercondutoras para a excitação. O sucesso deste modelo ficou bem demonstrado quando em 21 de Abril de 2015 se tornou o comboio mais rápido do mundo, ao atingir 603km/h. [7]

2.2.4 Hyperloop

Apoiado pelo carismático empresário Elon Musk, o Hyperloop é uma ideia para um comboio supersónico capaz de atingir os 1.223km/h, viajando no interior de uma espécie de cápsula tubular em vácuo o que teoricamente permite completar 600 km em apenas meia hora. Teve a primeira apresentação pública, num deserto próximo de Las Vegas onde acelerou dos zero aos 85km/h em apenas um segundo. Estes valores de aceleração não podem ser utilizados para transporte de passageiros mas para o transporte de cargas de grande volume a grandes distancias e sem a intervenção direta do ser humano podem.

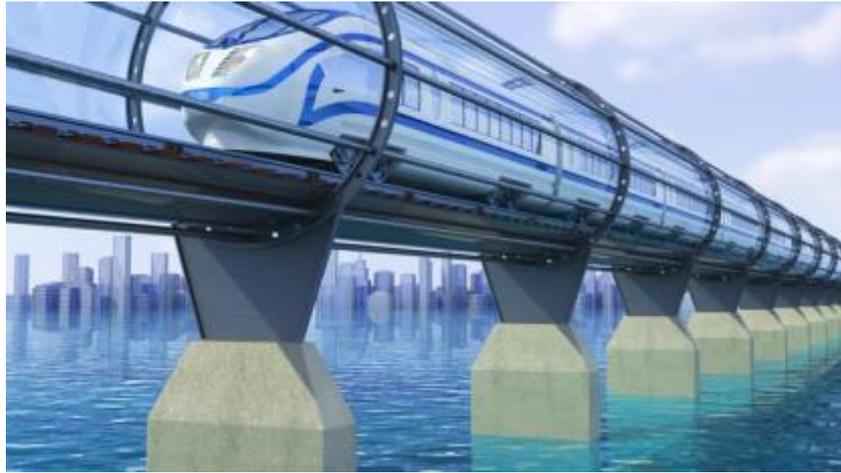


Figura 9 – Hyperloop [11]

Recorre ao método de levitação por indução eletromagnética, que é semelhante ao método eletrodinâmico presente no L0 Series japonês. A grande diferença introduzida pelo Hyperloop está na substituição dos supercondutores por ímanes permanentes e na utilização de bobinas como elementos passivos.

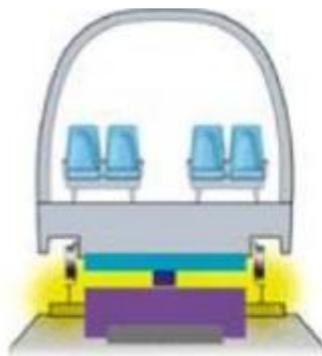


Figura 10 - Sistema de levitação por indução (Inductrack) (adaptado de [5])

Tal como no L0 Series, este também precisa de rodas tradicionais para se mover a baixas velocidades sendo a levitação apenas conseguida a partir de uma determinada velocidade. [12]

Este modelo baseia-se na junção de dois elementos principais. O primeiro elemento constituído pelos ímanes permanentes, fixos ao comboio e dispostos num *Halbach array* gerando um campo magnético. O segundo constituído pelo carril que é composto por pequenos circuitos fechados (enrolamentos passivos), conhecidos também por *Levitation Circuits* que vão ser induzidos pelo campo magnético dos ímanes permanentes presentes no comboio [Figura 11].

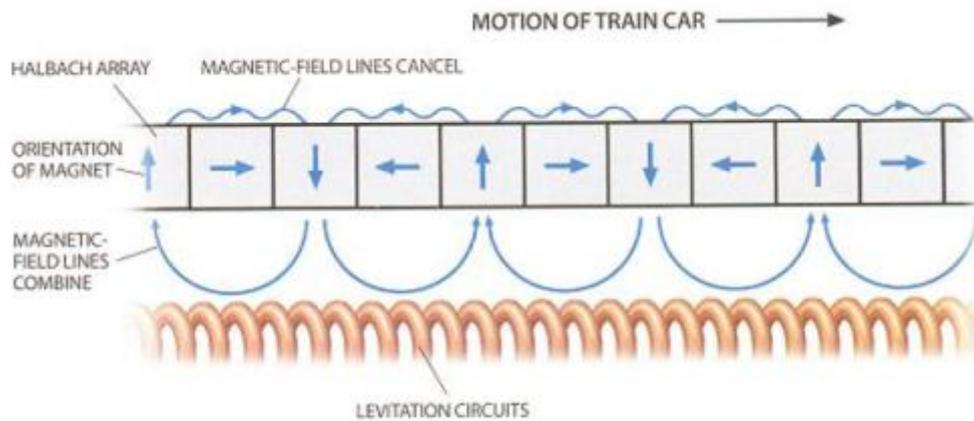


Figura 11 – Sistema de levitação Inductrack

Quando o comboio está em movimento os ímãs permanentes produzem um campo magnético que será induzido nos circuitos de levitação. Quando o comboio atinge a velocidade mínima de levitação a força repulsora gerada será suficiente para fazer levantar o comboio.

Esta topologia apresenta vantagens em relação aos modelos de Maglev referidos anteriormente das quais se destacam: a obtenção do campo magnético sem a necessidade do uso de bobinas supercondutoras ou eletroímãs que apresentam normalmente um custo elevado; o facto de não consumir energia no processo de gerar forças magnéticas de repulsão para garantir a levitação do comboio; e ainda o peso associado aos ímãs permanentes é relativamente menor quando comparado com as bobinas e ou eletroímãs.

Sendo os ímãs permanentes elementos passivos, este método é também conhecido por levitação magnética passiva.

Na Tabela 1 é feita uma comparação entre os principais tipos de Maglev apresentados.

Tabela 1 - Classificação dos diferentes tipos de Maglev

Tipo	Características			
	Sistema	Transrapid	HSST	LO Series
Levitação	EMS	EMS	EDS	PM EDS
Propulsão	LSM	LSM	LIM	LSM
Velocidade máxima	501km/h	100km/h	603km/h	1223km/h
Instalações	Shangai	Nagoya	Tokyo	Protótipo

2.3 Sistemas de transporte Industriais

Em seguida são apresentadas algumas das soluções existentes no mercado que recorrem à utilização da mesma tecnologia e apresentam funcionamento semelhante ao pretendido com o desenvolvimento deste projeto. De referir que, devido aos elevados custos associados à tecnologia de levitação magnética, estes sistemas de transportadores industriais, apresentam apenas propulsão eletromagnética. Esse custo está associado ao aumento significativo da complexidade dos sistemas de controlo e ao custo de todo o *hardware* necessário. Como este tipo de sistemas está normalmente associado ao transporte de cargas com peso reduzido o ganho pela falta de atrito conseguido através dos sistemas de levitação magnética não justifica o custo associado.

2.3.1 MagneMover LITE

O MagneMover LITE, solução desenvolvida pela MagneMotion Inc, tem como objetivo a substituição dos sistemas de transporte de cargas tradicionais. Trata-se de um sistema modular, o que permite uma fácil adaptabilidade às necessidades do comprador. Tem como pontos fortes a precisão e a sua propulsão é assegurada por módulos de motores lineares síncronos. O valor de massa máximo que suportam é 1kg.



Figura 12 - MagneMover LITE [13]

Como as partes mecânicas são reduzidas, o seu rendimento é elevado e os custos de manutenção e funcionamento reduzidos. Na

Tabela 2 são apresentadas as características mais relevantes do sistema MagneMover.

Tabela 2 - Características do MagneMover LITE

Características do sistema	MagneMover LITE
Número máximo de transportadores	9 (por cada metro)
Carga nominal	1kg
Velocidade máxima	2m/s
Aceleração	0,2 G
Comprimento dos transportadores	60mm
Sistema de localização e identificação	RFID
Precisão do posicionamento	$\pm 0,10\text{mm}$
Comprimento das seções retas e curvas	1m ou 0,25m
Classe de proteção	IP65
Cerificações	CE

É um sistema dotado de grande flexibilidade devido à sua constituição segmentada que pode ser integrado em variadas combinações permitindo deslocamento horizontal, vertical e invertido. Cada veículo é identificado sendo sempre possível saber onde se encontra no transportador. Por cada metro de pista este sistema pode conter até 9 veículos. Possui um sincronismo externo o que permite a utilização combinada com, por exemplo, braços robóticos. [13]

2.3.2 QuickStick

O QuickStick é uma outra solução de transporte de cargas também desenvolvida pela MagneMotion Inc. Recorre a um motor linear síncrono para cada módulo, sendo alimentado através de um barramento de corrente contínua. Em todos os módulos está presente a eletrónica necessária ao seu funcionamento.



Figura 13 – QuickStick [13]

Os veículos movem-se ao longo do modulo através da combinação se forças de atração e repulsão entre os polos gerados no enrolamento do motor e os imanes permanentes presentes na parte móvel. A disposição dos imanes na parte móvel pode ser normal ou *Halbach array*. A segunda opção permite obter maior força de propulsão mas torna-se menos económica.

É comercializado em módulos de meio metro ou um metro, podendo ser seleccionados consoante o tipo de aplicação. São sistemas capazes de conseguirem acelerações de 1G e atingirem velocidades de 2,5m/s. É significativo na medida em que os sistemas de transporte tradicionais atingem velocidades dez vezes inferiores. [13]

Na Tabela 3 são apresentadas as principais características do sistema QuickStick.

Tabela 3 - Características do QuickStick

Características do sistema	QuickStick
Força máxima	1000N
Força nominal	20N
Carga	2Kg até 100Kg
Velocidade máxima	2,5m/s
Aceleração	1G
Número de transportadores	5 (por cada metro)
Precisão do posicionamento	±0,5mm
Comprimentos do módulo	1m ou 0,5m
Comprimento máximo do sistema	12m
Classe de proteção	IP65
Certificações	CE, UL
Resistência à vibração/choque	Em conformidade com: EN 60068-2-6/EN 60068-2-27
EMC imunidade/Emissão	Em conformidade com: EN 61000-6-2/En 61000-6-4

2.3.3 XTS (eXtended Transport System)

O sistema XTS (eXtended Transport System) é uma solução desenvolvida pela empresa Alemã Beckhoff Automation. É composto por dois elementos principais: os módulos representando a parte fixa onde se encontram os enrolamentos do motor [Figura 15 à esquerda]; e os *movers* representando a parte móvel do motor, compostos por imanes

permanentes e por rolamentos de baixo atrito para permitir que estes se desloquem ao longo do carril [Figura 15 à direita].



Figura 14 - XTS (eXtended Transport System) [14]

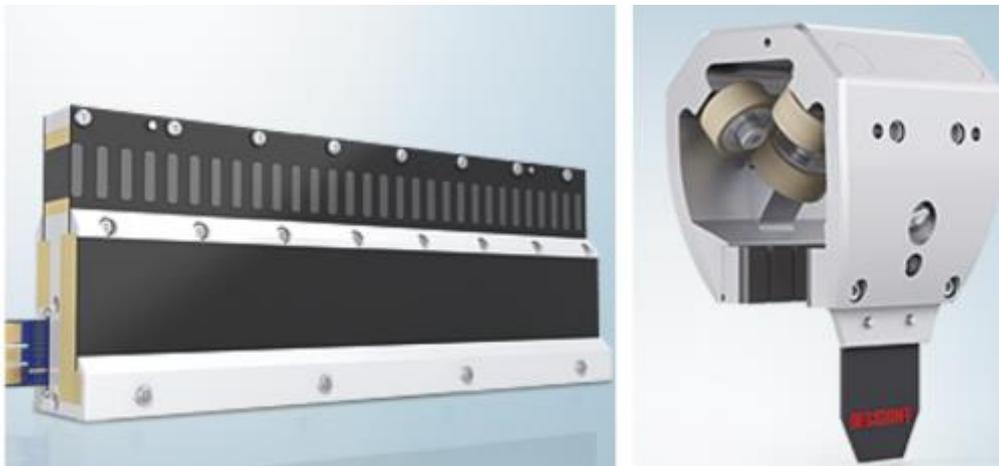


Figura 15 - Módulo e mover do XTS [14]

A tecnologia presente neste sistema permite o controlo independente de diversos *movers* em simultâneo na linha. Porém, a característica mais inovadora neste sistema é a existência de módulos em curva [Figura 16] o que permite um sistema circular totalmente fechado em alternativa aos sistemas onde apenas se consegue construções em linha reta.



Figura 16 - Módulos curvos do XTS [14]

Os módulos em curva estão disponíveis em quatro amplitudes: $\pm 22.5^\circ$ e $\pm 45^\circ$, e o seu desenvolvimento confere uma enorme flexibilidade ao sistema podendo a linha tomar qualquer configuração pretendida evitando ainda os sistemas de extração e injeção de *movers* necessários nas configurações em circuito aberto.



Figura 17 - Exemplo de uma configuração do XTS [14]

Para a fixação e estabilização dos *movers*, ao longo de toda a linha, e a delimitar o rebordo dos módulos, existe um carril guia onde os rolamentos do *mover* vão encaixar e rodar, garantindo assim fixação e estabilidade ao *mover* demonstrado na Figura 18.



Figura 18 - Fixação dos movers ao carril [14]

A robustez da fixação do *mover* ao módulo, garantindo sempre uma distância constante entre o *mover* e o módulo do motor linear, permite que o trabalho a efetuar nas peças a circular na linha de produção, possa ser efetuado diretamente sobre o próprio *mover* sem a necessidade de estas serem retiradas como se pode ver na Figura 19.

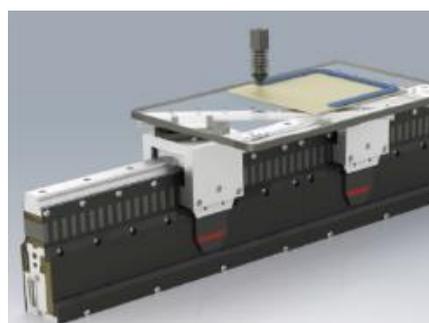


Figura 19 - Trabalho sobre o XTS [14]

Das características mais importantes deste sistema destaca-se a velocidade de 4m/s à força nominal de 30N. Apresenta uma força máxima de 100N e 0,15mm de precisão. Na Tabela 4 é feito um sumário das características mais importantes do sistema XTS.

Tabela 4 - Características do sistema XTS

Características do sistema	XTS
Força máxima	100N
Força nominal	30N
Velocidade máxima	4m/s
Aceleração	10G
Precisão do posicionamento	±0,15mm
Comprimento máximo do sistema	10m
Comprimento do mover	50mm
Peso do mover	410g
Temperatura de operação	0 a 50°C
Classe de proteção	IP65
Certificado	CE
Resistência à vibração/choque	Em conformidade com: EN 60068-2-6/EN 60068-2-27
EMC imunidade/Emissão	Em conformidade com: EN 61000-6-2/En 61000-6-4

2.3.4 iTRACK

O sistema iTRACK é uma solução desenvolvida pela empresa Americana Rockwell Automation, com diversas semelhanças ao sistema XTS da Beckhoff. Tal como o sistema XTS, este é também composto por dois elementos fundamentais: a parte fixa denominada de módulo onde está toda a eletrónica de potência necessária ao funcionamento do motor, e a parte móvel denominada de *mover*. Tal como no XTS a parte móvel apresenta-se como elemento passivo.

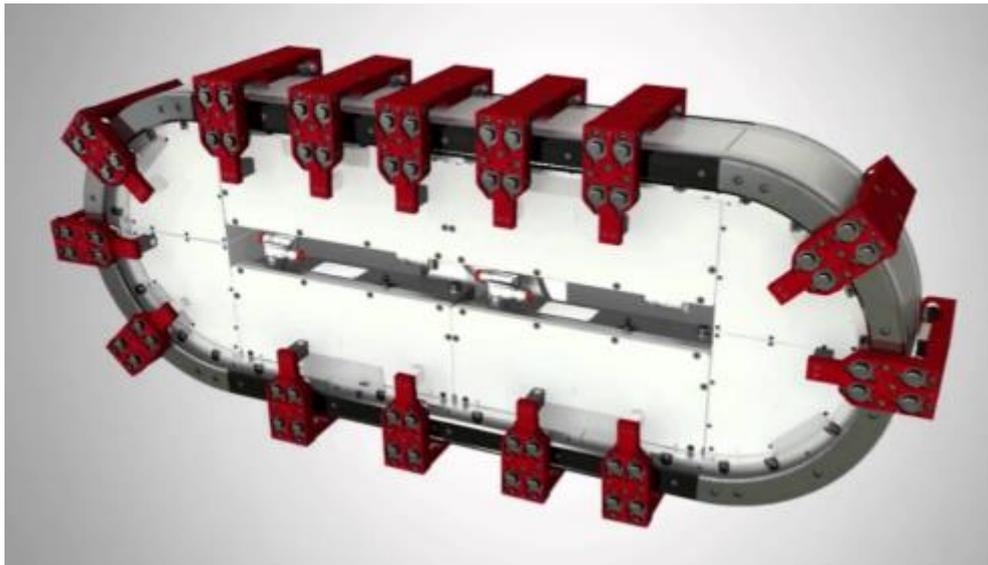


Figura 20 - Sistema iTRACK da Rockwell [15]

O módulo apesar de apenas ser comercializado no comprimento de 400mm não apresenta grande diferença em relação ao sistema XTS. Na Tabela 5 são apresentados as principais características dos módulos do sistema iTRACK.

Tabela 5 - Características dos módulos do iTRACK

Características do sistema	iTrack
Força máxima	100N
Força nominal	30N
Velocidade máxima	4m/s
Aceleração	10G
Precisão do posicionamento	+/- 0,15mm
Comprimento do módulo	400mm
Comprimento máximo do sistema	12m
Classe de proteção	IP65
Certificações	CE, UL
Resistência à vibração/choque	Em conformidade com: EN 60068-2-6/EN 60068-2-27
EMC imunidade/Emissão	Em conformidade com: EN 61000-6-2/En 61000-6-4

A grande diferença deste sistema está associada à parte móvel. O *mover* deste sistema é um componente muito mais robusto apresentando dois pontos de contacto ao carril: um superior e um inferior. [Figura 21]



Figura 21 - Mover do sistema iTRACK [15]

Isto, associado a um carril relativamente largo, confere uma robustez que permite a este sistema apresentar capacidades de transporte de cargas até 40kg em cada *mover*.

Outra vantagem dos *movers* deste sistema é que são disponibilizados com três dimensões possíveis. Podem ter 50mm, 100mm e 150mm apresentando cada um deles diferentes compromissos entre velocidade e força.

Tabela 6 - Características dos *movers* do iTRACK

Tamanho do <i>mover</i>	Velocidade máxima	Força máxima
50mm	5m/s	264N
100mm	4m/s	529N
150mm	2,75m/s	793N

Diferentes tipos de *movers* poderão coexistir dentro de um mesmo sistema a transportar cargas com diferentes pesos e a velocidades diferentes.

Este sistema também apresenta módulos em curva mas apenas curvas com 90° limitando assim as configurações possíveis, [Figura 22] quando comparado com o sistema XTS. Ainda assim, a robustez associada possibilita que o sistema possa ser montado com ângulos de 90° em relação a uma superfície plana.

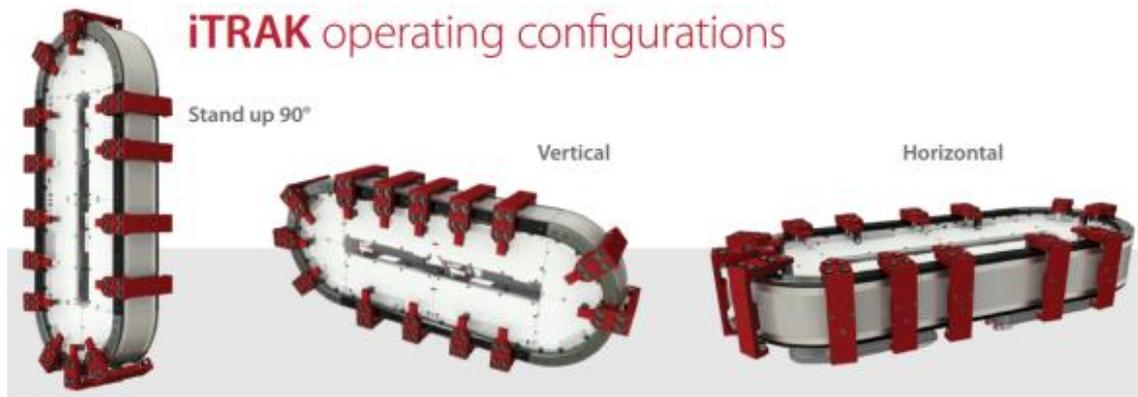


Figura 22 - Configurações de operação do iTRACK [15]

Na Tabela 7 é feita uma comparação das principais características dos sistemas de transporte de cargas industriais estudados.

Tabela 7 - Tabela comparativa dos sistemas de transporte Industriais

	MagneMover LITE	QuickStick	XTS	iTRACK
Velocidade máxima	2m/s	2,5m/s	4m/s	4m/s
Força nominal	5N	25N	30N	50N
Força máxima	20N ou 2kg	1000N	100N	793N
Aceleração	0,2G	1G	100G	10G

Do estudo do estado da arte surge a conclusão de que, de todos os sistemas estudados, o XTS e o iTrack aqui apresentados, são os sistemas que partilham mais pontos em comum com o sistema a ser desenvolvido.

Capítulo 3 - Fundamentos Teóricos

O desenvolvimento deste projeto implicou o conhecimento e domínio de diferentes áreas. Este capítulo serve para introduzir conceitos que vão, de alguma forma, ser usados ao longo do desenvolvimento deste projeto.

3.1 Ímanes permanentes

Os ímanes permanentes são essencialmente constituídos por materiais ferromagnéticos e caracterizam-se por produzirem um campo magnético à sua volta. A classificação de permanentes advém da sua elevada capacidade de manterem o seu campo magnético por tempo indeterminado e sem que para isso tenham a necessidade de utilizar energia elétrica. O campo magnético é causado pelo movimento dos eletrões que se encontram no interior do material.

Um íman é um dipolo, tem sempre dois polos, "norte" e "sul". Por definição, o polo sul de um íman é atraído pelo polo norte magnético da Terra. Os polos de um íman não podem ser separados. Se um íman for dividido ao meio, obtêm-se dois ímanes menores, cada um com um polo norte e um polo sul.

Os materiais ferromagnéticos caracterizam-se por uma curva de magnetização ou curva B-H. Esta curva descreve o processo de magnetização de um material metálico antes de este adquirir propriedades ferromagnéticas.

A Figura 23 apresenta uma curva B-H genérica de um material ferromagnético. Na curva a densidade do fluxo magnético (B) é apresentado em função do campo magnético (H). Isto para um material ferromagnético sujeito a uma saturação. A histerese está representada pela curva azul enquanto a curva laranja representa a magnetização inicial. De referir que a unidade do sistema internacional para a densidade do fluxo magnético B é o Tesla (T) e para o campo magnético H é Ampère por metro (A/m).

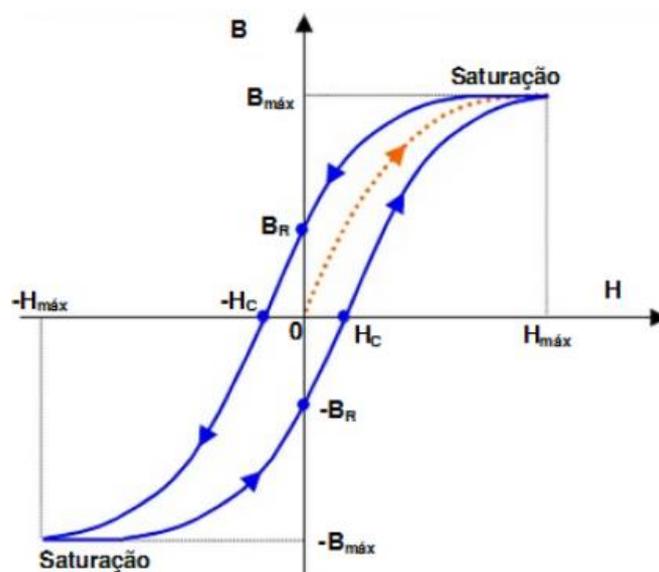


Figura 23 - Curva de magnetização

A relação entre a densidade do fluxo magnético e o campo magnético não é linear para todos os valores de H, uma vez que o aumento do campo magnético só provoca um aumento do fluxo magnético até a saturação magnética ser atingida. É nesta fase que se dá a magnetização de um dos polos do metal.

A curva de magnetização descrita pelo aumento do campo magnético não coincide com a curva de magnetização descrita com a diminuição do mesmo. O efeito de histerese consiste no hiato entre estas duas curvas.

No ponto B_R não há nenhuma corrente de magnetização ($H = 0$) mas o valor de B não é nulo o que significa uma magnetização residual no metal com valor B_R . Para anular essa magnetização residual é necessário aplicar um campo coercivo.

Se se continuar a diminuir o campo magnético do material chega-se ao ponto de saturação negativa, mas com a orientação magnética contrária à anterior. Aumentando o campo magnético até zero obtém-se agora um valor de magnetismo residual negativo ($-B_r$), sendo necessário aplicar novamente um campo magnético em sentido contrário (positivo) para anular o magnetismo residual com valor $-B_r$. Continuando-se a aumentar o campo magnético H o material chega novamente ao ponto de saturação positivo completando o ciclo de histerese magnética.

Para um íman permanente, é desejável que possua um valor de campo magnético residual B_r e um valor de campo coercitivo H_c elevados o que impede que o íman seja facilmente desmagnetizado.

3.2 Eletromagnetismo

O eletromagnetismo é o nome da teoria unificada estudada por James Maxwell e que explica a relação entre a eletricidade e o magnetismo. Esta teoria baseia-se no conceito de campo eletromagnético. O campo eletromagnético é um fenómeno que envolve o campo elétrico e o campo magnético variando no tempo.

O primeiro passo foi dado em 1800 por Alessandro Volta com a descoberta da bateria o que permitiu a realização de experiências com corrente contínua.

Apesar de alguma controvérsia é assumido que Gian Domenico Romagnosi, em 1802, foi o primeiro a relacionar a eletricidade e o magnetismo. Confirmou que a proximidade de uma bateria com uma bússola causava um desvio na agulha. Contudo as descobertas de Gian não tiveram um grande reconhecimento e só cerca de 18 anos depois, em 1820, Hans Christian Orsted, testou e confirmou a relação da eletricidade com o magnetismo. Fazendo uma corrente percorrer um fio condutor conseguia afetar a agulha de uma bússola que se encontrasse nas proximidades do fio condutor. A grande diferença entre as experiências de Romagnosi e Orsted foi que o segundo, usou corrente elétrica para afetar o magnetismo tendo Orsted um reconhecimento muito maior do que Romagnosi. [16]

Apoiado nas experiências de Orsted surgiu depois André-Marie Ampère mostrando que de entre muitas outras experiências e descobertas no domínio do eletromagnetismo provou que

dois fios em paralelo podiam atrair-se ou repelir-se dependendo do sentido da corrente que os percorria.

Em 1830 Michael Faraday mostrou que da mesma maneira que a eletricidade influencia o campo magnético, o inverso também é verdade. Descobriu como produzir eletricidade a partir do magnetismo. Passou um íman num aro feito de um material condutor e conseguiu gerar corrente elétrica. Faraday plantou uma grande semente ao imaginar um campo elétrico invisível a rodear o íman. O problema foi que Faraday não foi capaz de tornar estas ideias em teorias completas.

Maxwell, em 1850, tentou provar matematicamente as experiências de Faraday e os seus antecessores mas vários empregos e ocupações foram atrasando Maxwell do seu percurso original. Só em 1864 é que ele conclui a sua teoria do eletromagnetismo. Matematicamente, ele descreveu como a eletricidade e o magnetismo estão ligados e como se movem de forma concertada para formar uma onda eletromagnética.

A sua teoria foi recebida com enorme descrença e ceticismo pelos seus pares. Um grande problema apontado à sua teoria era o facto de ele não explicar como as ondas eletromagnéticas se moviam pelo espaço, para além de ser muito complexa. Originalmente eram 20 equações simultâneas com 20 variáveis.

Foi então que Oliver Heaviside, apesar de não ter formação académica superior, foi dos poucos que na altura foi capaz de reconhecer a grandeza do trabalho de Maxwell. Foi ele que conseguiu simplificar as complicadas equações de Maxwell nas 4 equações que hoje se conhecem. [16]

As equações de Maxwell demonstram que os campos elétricos e magnéticos são manifestações de um só campo eletromagnético. Além disso, descrevem a natureza ondulatória da luz, mostrando-a como uma onda eletromagnética.

$$\nabla \cdot D = \rho \quad (3.2.1)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (3.2.2)$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (3.2.3)$$

$$\nabla \times H = -\frac{\partial D}{\partial t} + J \quad (3.2.4)$$

3.2.1 Lei de Gauss para a eletricidade

Carl Friedrich Gauss (1777-1855) foi um importante matemático alemão que fez descobertas na área da geometria e das probabilidades, tendo também dado contribuições em astronomia e na medição do tamanho e formato do planeta Terra.

Esta é a primeira das quatro equações de Maxwell, e foi proposta originalmente por Gauss em 1835 é o equivalente à lei de Coulomb em situações estáticas. A lei de Gauss não contém nenhuma informação que não esteja contida na lei de Coulomb, tanto que, é possível obter a lei de Coulomb a partir da lei de Gauss e vice-versa. Ela relaciona os campos elétricos e suas fontes, às cargas elétricas, e pode ser aplicada mesmo para campos elétricos variáveis com o tempo. Por outras palavras, estabelece a relação entre o fluxo de campo elétrico que passa através de uma superfície fechada com a carga elétrica que existe dentro do volume limitado por esta superfície.

3.2.2 Lei de Gauss para o magnetismo

Esta lei é equivalente à primeira, mas aplicável aos campos magnéticos e evidenciando ainda a impossibilidade de existir apenas um polo isolado, isto é, um polo norte tem sempre que ter um polo sul associado. De acordo com essa lei, as linhas de campo magnético são contínuas, ao contrário das linhas de um campo elétrico que se originam em cargas elétricas positivas e terminam em cargas elétricas negativas.

3.2.3 Lei de Faraday

Michael Faraday (1791 - 1867) foi um físico e químico inglês. É considerado um dos cientistas mais influentes de todos os tempos. As suas contribuições mais importantes e os seus trabalhos mais conhecidos tratam dos fenômenos da eletricidade, da eletroquímica e do magnetismo.

A terceira das equações de Maxwell, também conhecida por lei da indução eletromagnética, descreve como um campo magnético que varia com o tempo cria, ou induz, um campo elétrico. Campos magnéticos variáveis no tempo dão origem a campos elétricos rotacionais. Por outras palavras, a variação temporal da indução magnética produz um campo

elétrico induzido. Esta lei descreve o princípio funcionamento de motores elétricos, transformadores e geradores.

3.2.4 Lei de Ampère

André-Marie Ampère (Lyon, 20 de janeiro de 1775 – Marselha, 10 de junho de 1836) foi um filósofo, matemático cientista e físico francês que teve grandes contribuições para o estudo do eletromagnetismo.

A lei de Ampère descreve a relação entre um campo magnético e a corrente elétrica que o origina. Ela define que um campo magnético é sempre produzido por uma corrente elétrica ou por um campo elétrico variável. Essa segunda maneira de se obter um campo magnético foi uma correção à lei de Ampère original introduzida pelo próprio Maxwell, com base na simetria de natureza: se um campo magnético variável induz uma corrente elétrica, e consequentemente um campo elétrico variável, então um campo elétrico variável deve induzir um campo magnético variável.

Com esta lei surge a regra da mão direita [Figura 24], que nos indica o sentido da corrente e do campo que esta gera. Agarrando um condutor com a mão direita e com o polegar a apontar para o sentido da corrente os restantes dedos da mão indicam o sentido do campo magnético.

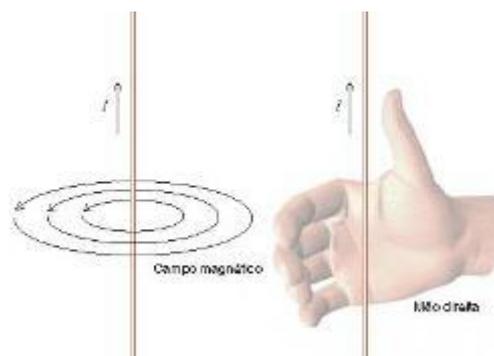


Figura 24 - Regra da mão direita [17]

O campo magnético pode ser idealizado como circunferências concêntricas ao fio condutor e, o valor do campo magnético, varia de forma inversamente proporcional com a distância perpendicular ao fio condutor. Dito de outra forma o campo magnético é superior próximo do condutor e vai diminuindo com o afastamento ao fio condutor.

As equações de Maxwell comprovam a existência de ondas eletromagnéticas que percorrem o espaço vazio. A velocidade medida através de experiências para estas ondas coincide com a velocidade da luz tendo Maxwell entendido a relação entre a luz e eletromagnetismo afirmando que a luz é uma forma de onda eletromagnética e unificando duas áreas distintas da física: a ótica e o eletromagnetismo. [16] [17]

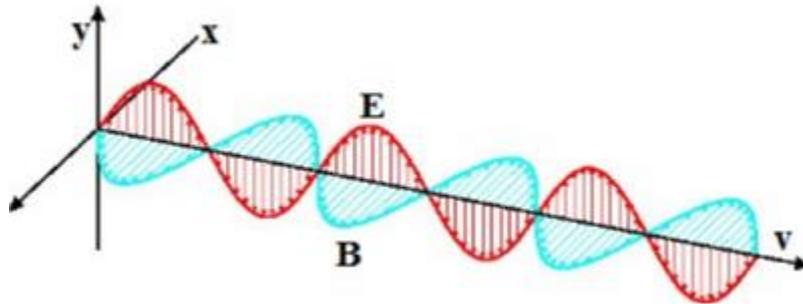


Figura 25 - Onda eletromagnética

A onda eletromagnética é composta pelo campo elétrico (E) e o campo magnético (B) perpendiculares e a deslocar-se no espaço à velocidade da luz.

Foi graças à descoberta das propriedades dessas ondas que, hoje em dia existe televisão, radio, micro-ondas, Internet, telemóveis e muitas outras coisas.

3.3 Motores Elétricos Rotativos

Uma vez que os motores lineares derivaram diretamente de motores elétricos rotativos, é importante fazer uma abordagem aos motores elétricos rotativos, antes de abordar os motores elétricos lineares. Os motores elétricos rotativos são sistemas eletromecânicos uma vez que recebem energia elétrica, na forma de corrente contínua (CC) ou corrente alternada (CA), transformando-a depois em trabalho mecânico. A transformação de energia referida, não apresenta uma eficiência de 100% [Figura 26] sendo que a perdas ocorrem devido ao aquecimento dos condutores quando atravessados por uma corrente elétrica (efeito de Joule), e ao atrito existente entre o movimento das partes mecânicas.

Nos motores alimentados por corrente alternada, para além das perdas referidas surgem ainda perdas por histerese e por correntes parasitas.

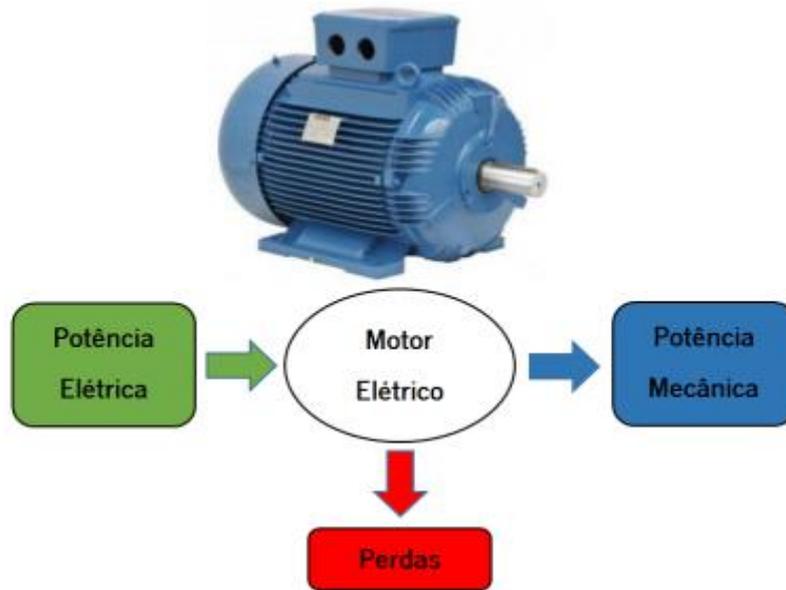


Figura 26 - Funcionamento de um motor elétrico

O princípio de funcionamento de todos os tipos de motores elétricos é semelhante. Um motor é composto por enrolamentos que são percorridos por uma corrente que fará criar uma força perpendicular ao condutor e ao campo magnético. Essa força é descrita pela Lei de Lorentz [equação (3.3.1)] onde l é o comprimento do condutor, \vec{I} representa a intensidade da corrente no condutor, e \vec{B} a densidade do fluxo magnético.

$$\vec{F} = l \cdot \vec{I} * \vec{B} \quad (3.3.1)$$

Estima-se que de 70% a 80% da energia consumida pelo conjunto de todas as indústrias seja transformada em energia mecânica através de motores elétricos, sendo a grande maioria motores elétricos rotativos. Porém, com o aparecimento dos motores lineares e as vantagens que lhes são inerentes, em determinadas situações, estes começam a ter a sua representação no mundo industrial.

Do ponto de vista eletromagnético, uma máquina elétrica rotativa é constituída, fundamentalmente, por duas partes distintas: o indutor e o induzido. No indutor é gerado o campo magnético de excitação, e no induzido processam-se os fenómenos eletromagnéticos. Uma das partes é fixa e a outra é móvel. À parte fixa dá-se o nome de estator, e à parte móvel, de rotor. O espaço existente entre estas duas partes designa-se por entreferro.

Nas ranhuras presentes na carcaça do motor, é onde estão posicionados os enrolamentos do estator. O rotor é suportado por rolamentos, para garantir a distância denominada por entreferro, e tem um movimento rotativo em torno de um eixo.

O que diferencia os tipos de motores existentes é a forma como é gerado o campo magnético. É assim normal, dividir os motores elétricos em dois grupos principais: Motores de Corrente Contínua e Motores de Corrente Alternada.

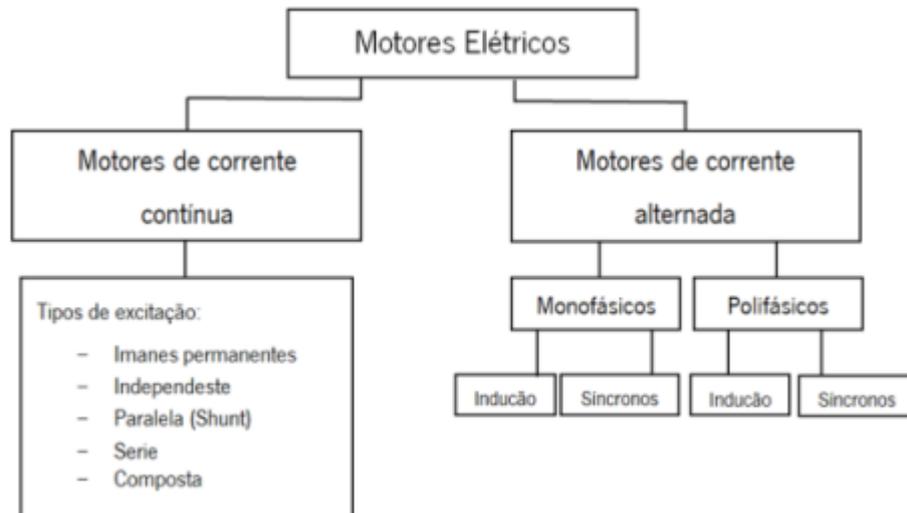


Figura 27 - Principais tipos de motores elétricos

Os motores elétricos de corrente contínua podem ser diferenciados quanto ao tipo de excitação (estator). Existe assim excitação, por ímanes permanentes, independente, paralela (shunt), serie e composta.

Os motores elétricos de corrente alternada podem ser divididos tendo em conta o número de fases que os alimenta (monofásicos e polifásicos). Dentro destas duas divisões os motores de corrente alternada podem ainda ser de indução ou síncronos.

3.4 Motores Elétricos Lineares

Motores elétricos lineares, tal como os motores elétricos rotativos, são máquinas elétricas que convertem a energia elétrica em energia mecânica, mas a particularidade destes motores é que essa energia mecânica que produzem, traduz-se sob a forma de um movimento linear sem o auxílio de dispositivos para a conversão de movimento. Este conceito tem mais de 170 anos. A primeira teoria foi apresentada em Fevereiro de 1841 por *Wheatstone* e por Werner von Siemens e o primeiro motor linear foi patenteado em 24 de Dezembro de 1866 por Samuel Alfred Varley [18]. Contudo os elevados custos associados a este conceito, nunca permitiu que conseguissem espaço de mercado em relação aos motores rotativos.

Esta tecnologia de motores elétricos apresenta os mesmos princípios estruturais dos motores elétricos rotativos. A grande diferença está no facto de que, tanto a parte móvel como a parte fixa, são planas ficando numa disposição linear como demonstra a Figura 28.

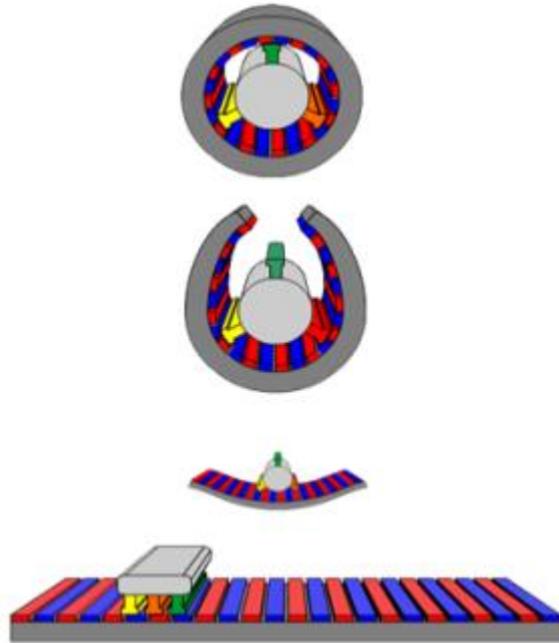


Figura 28 - Demonstração da transformação de um motor tradicional num motor linear

À semelhança do que acontece com os motores elétricos convencionais, nos motores lineares, a parte móvel tem que estar a uma determinada distância da parte fixa, para garantir o seu funcionamento e a ausência de contactos entre as duas partes. A esta distância dá-se o nome de entreferro e varia consoante as topologias e características dos motores. Nos motores rotativos, a parte móvel é suportada por partes mecânicas com rolamentos para permitir o seu movimento e, no caso dos motores lineares, em aplicações mais simples, e seguindo o mesmo princípio, são usadas guias ou carris que combinados com sistemas de rolamentos vão garantir essa distância. Tem a desvantagem de que esses pontos de contacto vão produzir atrito e provocar perdas no sistema. Para contornar este fator, em aplicações onde é crucial a obtenção do melhor desempenho do motor linear, recorre-se a sistemas de levitação magnética que garantem a sustentação da parte móvel à distância pretendida da parte fixa.

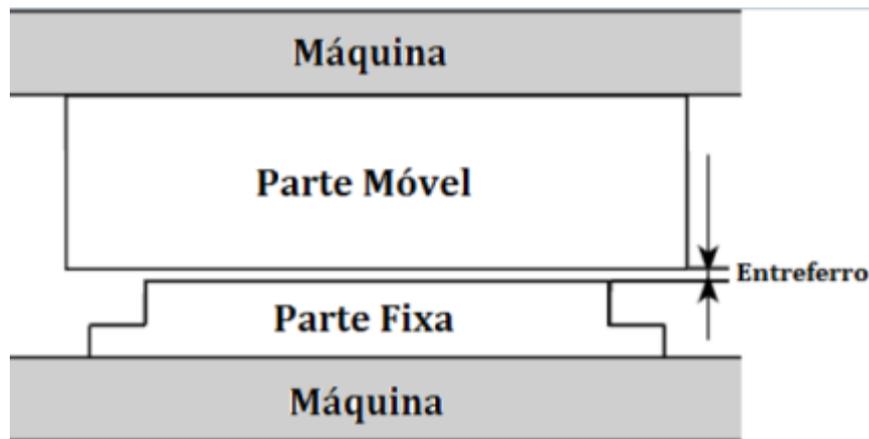


Figura 29 - Figura ilustrativa do entreferro de um motor linear

Nos motores rotativos os parâmetros de referência são a velocidade angular e o binário, enquanto nos motores lineares são a força e velocidade de translação. Outra diferença importante é que ao alimentar-se os motores rotativos obtém-se um campo magnético girante na parte fixa enquanto nos motores lineares este campo magnético girante passa a denominar-se campo magnético viajante. [19]

Os motores lineares podem ter duas configurações físicas distintas. A primeira caracteriza-se por ter uma parte móvel passiva, o que reduz significativamente o peso e a eletrónica de potência associada a este elemento. Gerar o fluxo magnético necessário através do recurso a ímanes permanentes permite que a parte móvel não consuma energia. Em contrapartida a parte fixa desta topologia necessita de inversores de potência para gerar o campo viajante e controlar o movimento do elemento móvel. A segunda caracteriza-se pelo facto de que o elemento gerador do campo magnético viajante ser a parte móvel o que implica que a energia terá que ser transferida constantemente para esse elemento móvel e terá que acomodar toda a eletrónica de potência capaz de controlar o movimento nomeadamente o controlo da tensão e frequência para aplicar aos enrolamentos. Uma vez que a parte fixa tem sempre maior dimensão do que o conjunto das partes moveis associado, por exemplo, ao custo de ímanes permanentes, poderá transparecer que esta abordagem é uma solução mais barata do que a primeira mas na realidade isso não se verifica. O elemento móvel necessita de eletrónica de potência adicional o que o torna mais pesado e conseqüentemente um agravamento do consumo. Se a isto se adicionar a necessidade do fornecimento de energia constante ao elemento móvel ao longo de toda a extensão do seu movimento acresce uma complexidade que se apresenta como desvantagem em relação á opção onde a parte móvel é passiva. [20]

Os motores lineares são normalmente divididos nas seguintes topologias:

- Motores lineares de indução (MLI);
- Motores lineares de corrente contínua;
- Motores lineares síncronos (MLS);
- Motores lineares de relutância variável;
- Motor linear síncrono supercondutor (MLS-SC).

Uma vez que o desenvolvimento deste projeto recorre a um motor linear síncrono em seguida é aprofundado o estudo sobre os motores lineares síncronos.

Motores Lineares Síncronos (MLS)

No caso do motor rotativo síncrono de ímanes permanentes, o indutor, isto é, a parte responsável pelo fluxo de excitação da máquina, situa-se no rotor. Este fluxo de excitação é conseguido graças à presença dos ímanes permanentes. Por sua vez, o induzido situa-se no estator, e é constituído pelo enrolamento trifásico e responsável pela geração do campo magnético girante.

Como o campo magnético do rotor é independente do campo magnético do estator, quando o campo magnético do rotor tenta alinhar-se com o campo magnético girante do estator, o rotor adquire velocidade proporcional à frequência da alimentação do estator e acompanha o campo magnético girante estabelecido, sendo por este motivo denominado síncrono. O aumento ou diminuição da carga não afeta sua velocidade. Se a carga ultrapassar os limites nominais do motor, este pára definitivamente.

O motor linear síncrono (MLS), tal como o motor síncrono rotativo, é um motor em que o movimento da parte móvel, se encontra em sincronismo com o campo viajante gerado pelo elemento fixo, isto é, a velocidade do elemento móvel é a mesma que a velocidade do campo viajante gerada na parte fixa.

De uma forma mais concreta a velocidade da parte móvel está diretamente relacionada com a frequência da corrente alternada aplicada aos enrolamentos da parte fixa. Os enrolamentos, ao conduzirem uma corrente alternada de determinada frequência vão dar origem a um campo magnético viajante de uma determinada velocidade. O campo magnético produzido pela parte móvel irá alinhar-se com campo magnético viajante fazendo com que a parte móvel se desloque.

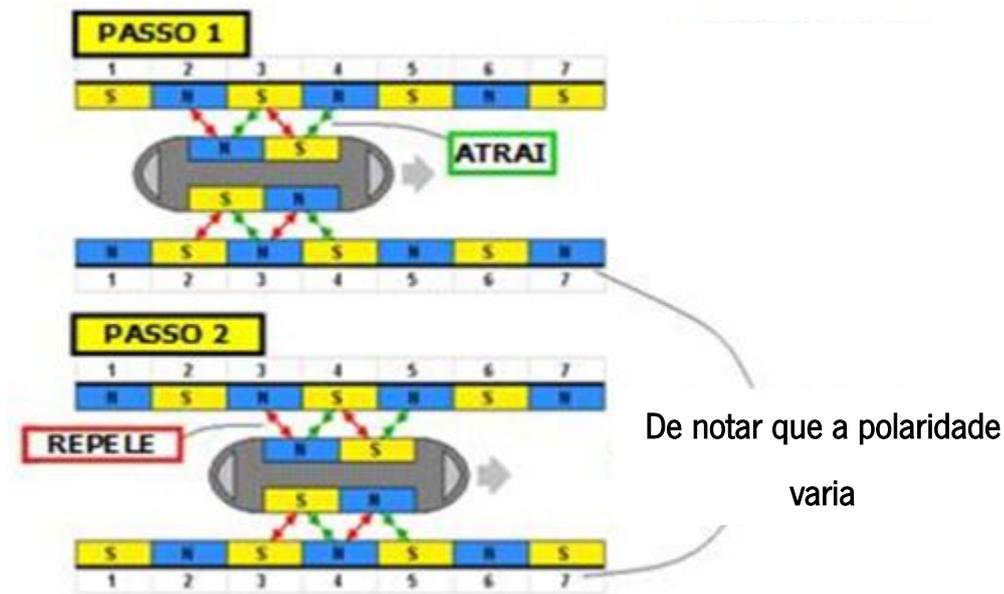


Figura 30 - Figura ilustrativa do movimento de um MLS (adaptado de [5])

Nos motores elétricos rotativos, a parte que produz o campo magnético girante é sempre a parte fixa e a parte que produz o fluxo magnético que vai seguir esse campo girante é sempre a móvel. No caso dos motores lineares síncronos, este pressuposto perde toda a validade, uma vez que, se a parte que está a produzir o campo viajante estiver livre e a parte que estiver a seguir o campo viajante estiver fixa temos que, a parte que se vai mover é a parte que está a produzir o campo viajante. Deste facto advém que os termos estator e rotor deixam de ter sentido quando aplicados aos motores lineares síncronos. Passam a existir os termos armadura e sistema de excitação de campo. [1]

Quanto à sua estrutura, os MLS podem ser:

- Planos ou tubulares
- Face simples ou face dupla
- Com ou sem ranhuras
- Núcleo de ar ou de ferro
- Fluxo transversal ou longitudinal

Na Figura 31 podem-se observar dois exemplos de estruturas de MLS. A primeira apresenta um MLS com estrutura plana, de face simples, com ranhuras, núcleo de ferro e fluxo transversal. A segunda apresenta um MLS plano, de face dupla, com ranhuras, núcleo de ferro e fluxo transversal. Esta são as estruturas mais comuns nos motores lineares síncronos.



Figura 31 - MLS com face simples e face dupla (adaptado de [21])

Estas configurações podem ser invertidas. Fixando a parte que contém os ímãs permanentes e deixando livre a parte com os enrolamentos. Assim, a parte móvel passa a ser a parte dos enrolamentos, ou seja, o elemento que gera o campo magnético viajante, e a parte fixa passa a ser o elemento com os ímãs permanentes, isto é, a parte geradora de fluxo magnético.

Quando os enrolamentos do motor estão situados na parte móvel, dá-se o nome de tecnologia *moving coils* (enrolamentos móveis), quando são os ímãs permanentes a estarem na parte móvel dá-se o nome de tecnologia *moving magnets* (ímãs móveis). Ambas as configurações apresentam particularidades diferenciadoras.

A configuração de face dupla apresenta dificuldade no controlo de posição e problemas na construção de secções em curva. Como vantagem esta configuração apresenta uma armadura mais compacta para os mesmos valores de força de propulsão.

A configuração de face simples pode ter um entreferro na vertical ou na horizontal o que se apresenta como uma vantagem na implementação do controlo da posição, ainda mais em situações onde se verifica o deslize da parte móvel ao longo de armaduras de vários motores. Esta solução também simplifica o desenvolvimento de curvas.

A parte fixa (armadura) e a parte móvel (sistema de excitação) podem ter diferentes aspetos mediante a finalidade pretendida. Na Figura 32 são apresentadas duas configurações distintas. A primeira para velocidades elevadas e a segunda para forças elevadas.

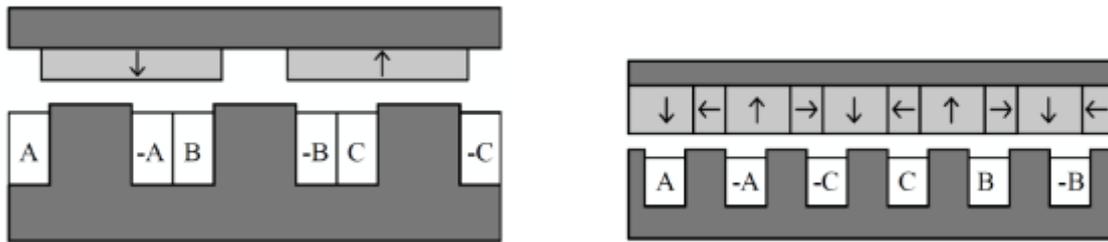


Figura 32 - Configurações de MLS para diferentes finalidades (adaptado de [21])

Para se conseguir velocidades elevadas recorre-se à configuração normal de ímanes permanentes (Figura 32 à esquerda). De salientar que a distância entre os dois ímanes permanentes é superior, o que permite minimizar o efeito da indutância dos enrolamentos possibilitando assim velocidades mais elevadas.

Para premiar a força recorre-se a um *Halbach array*. Como num *Halbach array* a distância entre os ímanes é muito reduzida faz com que o campo magnético seja superior, o que possibilita correntes mais elevadas de forma a diminuir os efeitos da resistência. Como se pode ainda verificar, a parte fixa também sofre alterações. (Figura 32 à direita)

Os motores lineares síncronos podem ainda ser divididos mediante os seguintes sistemas de excitação:

- Ímanes permanentes na parte móvel;
- Ímanes permanentes na parte fixa;
- Eletromagnético (com enrolamentos).

3.4.1.1 Ímanes permanentes na excitação

Este sistema de excitação é caracterizado por ter os enrolamentos dentro das ranhuras da armadura e os ímanes permanentes na parte móvel dentro de um material permeável ao campo magnético, para facilitar a condução do fluxo magnético reduzindo assim a o fluxo de dispersão.

3.4.1.2 Ímanes permanentes na parte fixa

Este sistema de excitação é caracterizado por ter os enrolamentos na parte móvel e os ímanes permanentes na armadura do motor. Apresenta, à partida, uma desvantagem significativa que é o facto de, uma vez que a parte fixa (armadura) é normalmente longa o número de ímanes permanentes necessários é elevado.

3.4.1.3 Sistema de excitação eletromagnético (com enrolamento)

O sistema de excitação eletromagnético de um MLS é semelhante ao rotor de polos salientes de um motor síncrono rotativo. O sistema apresenta polos salientes com enrolamentos de excitação. Este sistema apresenta desvantagem quando o sistema de excitação se encontra na parte móvel pois necessita do fornecimento de corrente aos enrolamentos. Este fornecimento pode ser efetuado através da ajuda de escovas e barras de contacto ou mesmo transformadores em que o primário se situa no carril e o secundário do transformador no motor.

3.5 Protocolos de Comunicação

O padrão TCP/IP surgiu no meio industrial há cerca de 16 anos, mas só 4 anos depois é que começou a ser amplamente adotado e comercializado.

A sua grande utilidade deve-se à necessidade de interligar todos os níveis da rede envolvendo um único e exclusivo padrão de rede, o TCP/IP. Assim o nível de administração das empresas teria acesso ao chão da fábrica (sensores ou atuadores) em tempo real, dando uma grande agilidade na produção e aumentando-a significativamente.

Logo cedo, o padrão TCP/IP singrou no nível administrativo das empresas, contudo o nível de “chão de fábrica” possuía outros protocolos denominados Fieldbuses.

Alguns exemplos de padrões de Fieldbuses que foram surgindo no seguimento da necessidade de unificar a hierarquia industrial são: Profibus, Devicenet, CAN, Fieldbus Foundation, Modbus, AS-i, Sercos, entre outros.

Estes protocolos foram-se difundindo, devido ao custo benefício de se ter uma rede industrial comparável a uma rede tradicional.

Porque cada um destes protocolos possuía a sua maneira de enviar dados do “chão de fábrica” para os níveis mais altos da hierarquia industrial, surgiu a necessidade de uniformizar o “chão de fábrica” e foi assim que nasceu a Ethernet Industrial. [22] [23]

Na hierarquia industrial existem basicamente três níveis diferentes: o nível do dispositivo (nível de elementos de campo - sensores e atuadores), o nível do controlo (nível de controlo de processo – PLC's ou PC's industriais) e o nível de informação (nível de informação ao utilizador – administração). A Figura 33 demonstra esses mesmos níveis.

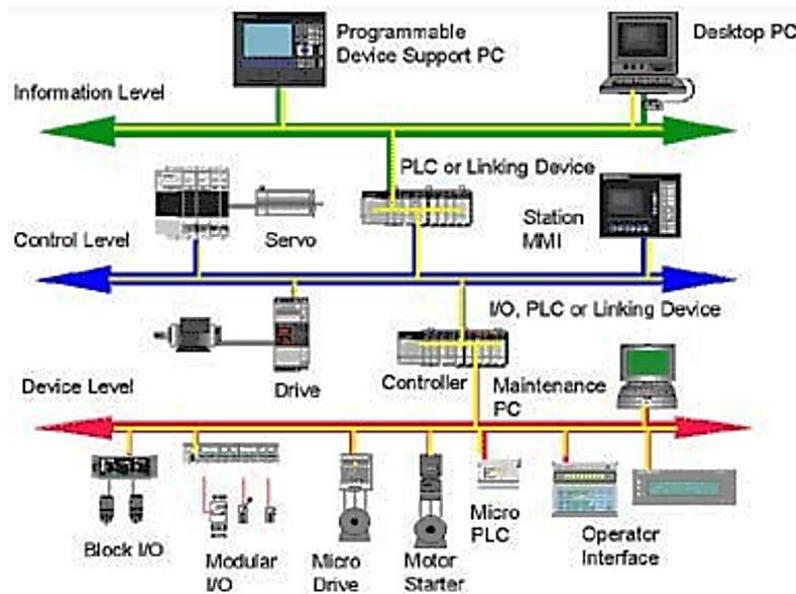


Figura 33 - Arquitetura industrial clássica [22]

Inicialmente, vários fabricantes criaram os seus próprios padrões de redes Ethernet industriais, cada um com diferentes aplicações e com recurso a camadas distintas de TCP/IP. Alguns destes padrões que foram sendo desenvolvidos recorriam até a *hardware* do próprio fabricante o que os torna pouco competitivos em aplicação industrial. É então que, com o intuito de simplificar e uniformizar as comunicações das indústrias, surgem protocolos como o exemplo o Ethernet/IP e o EtherCAT.

3.5.1 Ethernet/IP

O protocolo de comunicação Ethernet/IP foi apresentado em 2001 e hoje em dia apresenta-se como a solução mais desenvolvida, completa e comprovada dentro das redes Ethernet industriais para a indústria da automação apresentando grandes capacidades em Tempo-Real.



Figura 34 - Logotipo Ethernet/IP [24]

Foi inicialmente desenvolvida pela Rockwell Automation e é hoje gerida Open DeviceNet Vendors Association (ODVA). Fundada em 1995, é uma organização global em que os seus membros estão as empresas líderes mundiais em tecnologia de automação.



Figura 35 - Logotipo da ODVA [24]

Ethernet/IP é a principal rede de Ethernet Industrial no mundo. A sua presença é mais acentuada nos continentes Americano e Asiático e a prova do seu sucesso é o facto de ter sido escolhida pela *General Motors*, uma das maiores empresas mundiais, para ser implementada em todos os seus edifícios espalhados pelo mundo. Ethernet/IP está referida no standard internacional IEC 61158 e os dispositivos são certificados pela ODVA para interoperabilidade e conformidade. [24]

Ethernet/IP é o nome dado quando o Common Industrial Protocol (CIP), é implementado sobre o standard Ethernet (IEEE 802.3 e o protocolo TCP/IP).

EtherNet/IP™, DeviceNet™, ControlNet™ e CompoNet™ são as mais importantes redes presentes na associação ODVA e todas elas estão relacionadas com o protocolo CIP. Trata-se de um protocolo orientado ao objeto e baseado na conexão, desenhado essencialmente para aplicações de automação. Engloba um grande número de serviços de comunicação para aplicações de automação nomeadamente controlo, segurança, sincronização, movimento, configuração e informação. Possibilita aos utilizadores integrar estas aplicações com a rede de Ethernet dos níveis mais altos da hierarquia industrial.

3.5.1.1 Princípio de funcionamento

Ethernet/IP pertence à classe de protocolos de Ethernet Industrial que fazem uso de hardware Ethernet padrão e das camadas TCP/IP e UDP/IP para a comunicação. Abaixo da camada CIP, a comunicação entre os nós, usa um modelo de produtor-consumidor. Uma mensagem destinada a um nó é transmitida para todos os nós. Apesar disso, quando a mensagem é recebida pelos nós, é filtrada, e só chega ao nó a que se destina [Figura 36].

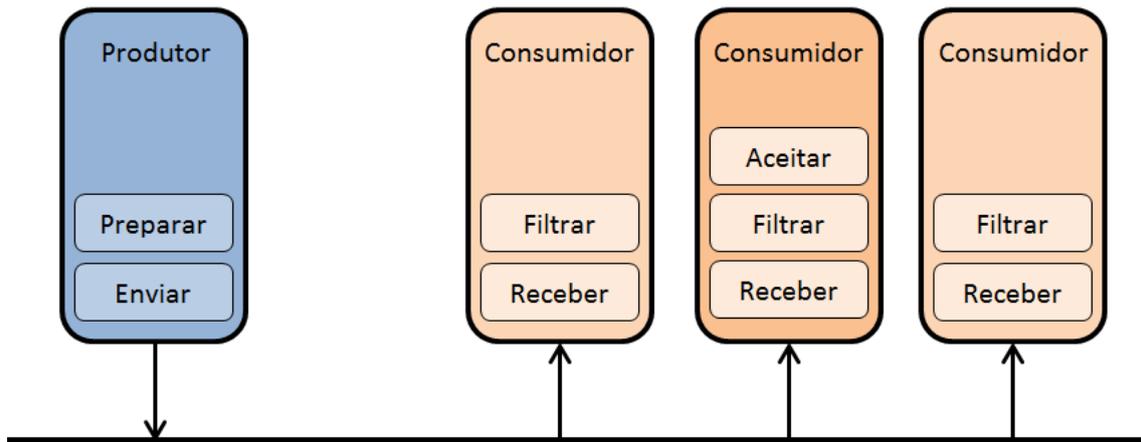


Figura 36 - Comunicação entre os nós Ethernet/IP

Apesar de este modelo ser muito eficaz em comunicação escravo para escravo requer difusão e filtragem em cada nó. Além disso, durante a transmissão, os interruptores não têm qualquer papel específico, a não ser transmitir todos os pacotes de entrada, comportando-se como repetidores. [25]

3.5.1.2 Estrutura das tramas

As tramas Ethernet/IP são semelhantes às tramas Ethernet apresentando apenas algumas características adicionais. Apresentam um preâmbulo de 7 bytes em vez dos 8 bytes na trama Ethernet. O bit de sobra é usado para um delimitador de partida da trama, SFD. O campo de 2 bytes *Tipo* é substituído pelo campo *Comprimento* também com 2 bytes. Finalmente o campo CRC (Cyclic Redundancy Check) de 4 bytes é substituído pelo campo de também de 4 bytes FCS (Frame Check Sequence) [Figura 37].

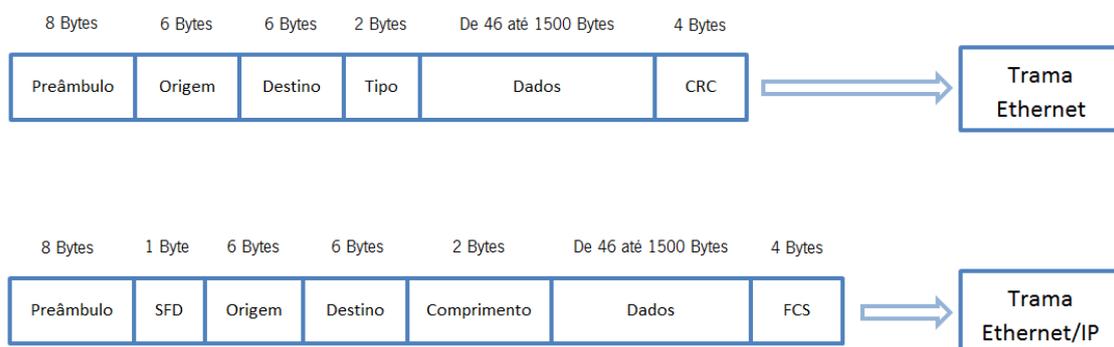


Figura 37 - Trama Ethernet e trama Ethernet/IP

- O **Preâmbulo** apresenta 7 bits em vez de dos 8 na trama Ethernet. Este campo é utilizado pelo recetor para estabelecer a sincronização de bit e estabelecer as condições de transmissão.

- O campo **SFD** (Start Frame Delimiter) é um byte que indica o início da trama através da sequência 10101011.
- O campo **origem** indica o endereço físico (endereço MAC) do dispositivo de origem da trama e ocupa 6 bytes.
- O campo **destino** indica o endereço físico (endereço MAC) do dispositivo de destino da trama e ocupa 6 bytes.
- **Comprimento** é um campo de 2 bytes que indica o tamanho dos dados. Substitui o campo tipo da trama Ethernet.
- O campo de **dados** representa a informação útil a ser enviada numa trama Ethernet/IP e pode ter um comprimento entre 56 até 1500 bytes
- O campo **FCS** (Frame Check Sequence) serve para detetar erros que possam ocorrer durante a transmissão. Nestes 4 bytes é aplicado um algoritmo que apresentará o mesmo resultado na receção se a mensagem for recebida sem erros. Apresenta-se como uma melhoria na técnica de deteção de erros em relação ao Ethernet.

3.5.1.3 Sincronização

Sincronização em Ethernet/IP é conseguida através da sincronização CIP - fazendo uso do standard IEEE 1588 e do protocolo de relógio distribuído. Sincronização CIP pode atingir uma precisão melhor do que 500ns se não se considerarem atrasos causados pelos protocolos das camadas.

IEEE 1588 é um método para a sincronização com precisão temporal adaptado às exigências de sistemas de medição e de controlo distribuído. No entanto, na prática, tem sido verificado que os tempos de processamento limitam a precisão no caso de implementações de *software* puro, e, portanto, para obter melhores resultados, o tempo fixo por hardware é necessário. Esta funcionalidade pode ser implementada no MAC (Media Access Controls), nas camadas físicas ou soluções integradas.

O termo IP em Ethernet IP significa "Industrial Protocol. Apesar do Ethernet/IP seguir exatamente o modelo TCP/IP é válido assumir que existem dois modos distintos de operação. O primeiro modo é utilizar o modo TCP. O segundo método é utilizar o UDP para o transporte até ao CIP (Control Information Protocol). O facto de Ethernet/IP usar o standard Ethernet e tecnologia TCP/IP confere-lhe compatibilidade como outras aplicações e protocolos.

Ethernet/IP, tal como qualquer outra rede CIP, segue o modelo OSI (Open Systems Interconnection) que define a estrutura para implementar protocolos de comunicação em sete camadas.

A Figura 38 ilustra a divisão em camadas da rede Ethernet/IP.

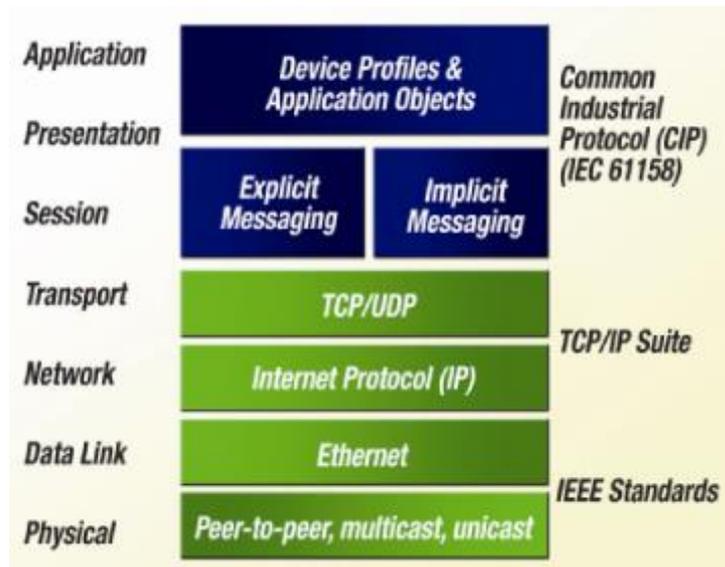


Figura 38 - Arquitetura Ethernet/IP [23]

Ethernet/IP implementa o protocolo CIP nas camadas de sessão e superiores e adapta-o para a tecnologia Ethernet/IP específica nas camadas de transporte e inferiores.

O recurso a comunicação TCP ou a UDP depende da solução a ser implementada. Tendo em conta o recurso a TCP ou UDP as transmissões podem ser:

Explícitas: Utiliza o TCP e a camada CIP da ODVA. Aplicado em comunicação entre PLC's e IHM's (tempo de ciclo superior a 0,1s) ou para configuração de elementos da rede a longa distância. Essas tarefas são caracterizadas por um baixo tempo de processamento. [23]

Implícitas: Utiliza o UDP e a camada CIP da ODVA. Usado para comunicações entre I/O's quando o tempo de resposta precisa de ser o menor possível. Essa tarefa deve ser cíclica, requerendo um baixo tempo de processamento. [23] [25]

Na Tabela 8 é feito um resumo dos tipos de comunicação para rede Ethernet IP.

Tabela 8 - Resumo dos tipos de comunicação para rede Ethernet IP

Tipo de Mensagens	Protocolo de transporte	Tipo de comunicação	Uso típico	Exemplo
Explícitas	TCP/IP	Trocas de Pedidos/respostas	Transferência de informação com tempo não crítico	Ler / escrever parâmetros de configuração

Implícitas	UDP/IP	Transferência de dados I/O	Dados I/O em tempo-real	Troca de dados em tempo real entre dois processadores
------------	--------	----------------------------	-------------------------	---

O Ethernet/IP pode ser configurado para operar tanto como mestre / escravo como arquitetura de controlo distribuído, usando comunicação ponto a ponto.

O Ethernet/IP suporta transmissão de mensagens cíclicas e não-cíclicas e foi originalmente desenvolvido para ligar controladores. Atualmente, está cada vez mais a ser utilizado no nível de chão-de-fábrica abaixo dos controladores (PLC). As estruturas mais típicas são as topologias em estrela, em anel e linear.

3.5.1.4 Vantagens e desvantagens

O protocolo Ethernet/IP apresenta como principal vantagem o facto de usar as camadas Ethernet (TCP e UDP).

As principais desvantagens são o facto de poder saturar uma rede com mensagens UDP mesmo quando configurado corretamente, havendo a necessidade de recorrer a *switches* para gerir estes problemas. [25]

3.5.2 EtherCAT

EtherCAT (Ethernet for Control Automation Technology) é uma tecnologia para comunicação em tempo real baseada em Ethernet, introduzida inicialmente em 2003 pela Beckhoff. Em 2007, foi integrada na norma IEC 61158. O EtherCAT Technology Group (ETG), formado por 168 empresas, promove a tecnologia EtherCAT e é responsável por seu desenvolvimento contínuo. [14]



Figura 39 - EtherCAT Technology Group

É uma rede aberta em tempo real baseada no meio físico Ethernet 100BASE-TX. O barramento EtherCAT é composto por um mestre e até a um máximo de 65535 escravos, ligados com cabo Ethernet

Existem inúmeras abordagens distintas que tentam fornecer capacidade de tempo-real para Ethernet: por exemplo, o procedimento de acesso CSMA/CD desativa camadas de protocolo de nível superior, e substitui por técnicas de divisão de tempo ou *polling*. Outras soluções usam comutadores especiais que distribuem mensagens Ethernet em tempos precisamente controlados. Embora estas soluções sejam capazes de transportar pacotes de dados com mais ou menos rapidez e precisão para o nó Ethernet ligado, a eficiência da utilização da largura de banda é muito baixa, em particular para os dispositivos de automação típicos, uma vez que, mesmo para quantidades muito pequenas de dados tem que ser enviada uma trama Ethernet completa. Além disso, os tempos necessários para o redireccionamento para as saídas ou controladores de acionamento e para a leitura dos dados de entrada dependem fortemente da implementação.

3.5.2.1 Transporte

O protocolo EtherCAT pode ser transportado diretamente em tramas Ethernet ou inserido em datagramas UDP / IP.

A versão UDP é usada em situações onde os segmentos EtherCAT são endereçados através de routers.

A versão onde o transporte é feito em tramas Ethernet consiste em inserir diversas mensagens EtherCAT numa trama Ethernet padrão.

Os dados são inseridos diretamente numa trama Ethernet sem alterar a sua estrutura fundamental. Quando o mestre e o dispositivo escravo estão na mesma sub-rede, o protocolo EtherCAT apenas substitui o Protocolo de Internet (IP) na trama Ethernet normal tal como está ilustrado na Figura 40.

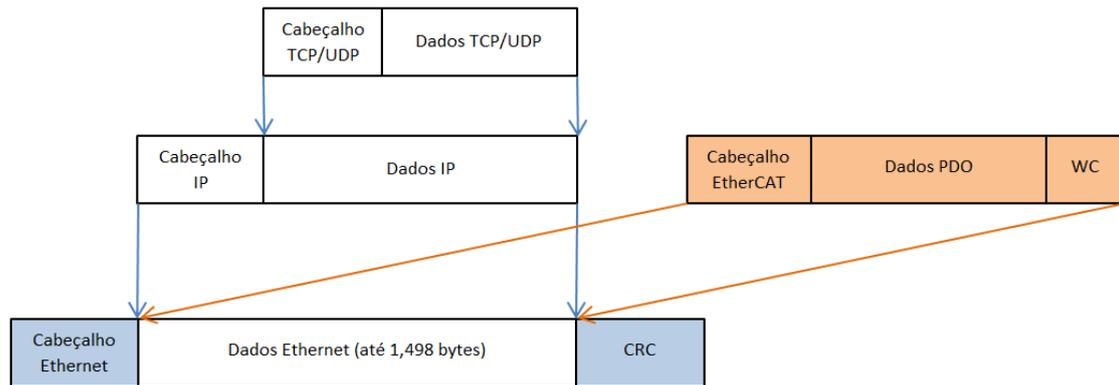


Figura 40 - EtherCAT na trama Ethernet

A comunicação de dados entre o mestre e os escravos é feita na forma de objetos de processamento de dados (Process Data Objects - PDOs). Cada PDO tem um endereço para um escravo em particular ou para múltiplos escravos, e essa combinação de “dados e endereços” (mais o trabalho de validação), constitui uma mensagem EtherCAT.

Uma trama Ethernet pode conter múltiplas mensagens EtherCAT, e múltiplas tramas podem ser necessárias para garantir todas as mensagens requeridas para um ciclo de controlo.

3.5.2.2 Transferência de dados

Com a tecnologia EtherCAT, as limitações verificadas em outras soluções Ethernet são superadas. O processo não apresenta etapas consecutivas para receber e interpretar mensagens e copiar os dados do processo. Para melhorar o desempenho da rede, em vez de enviar uma mensagem Ethernet de cada vez para cada nó, a rede EtherCAT funciona de forma diferente, utilizando um princípio de funcionamento chamado *Ethernet On-the-fly*. A mensagem, que contém dados de diversos escravos, é enviado pelo mestre para o primeiro escravo na rede. O escravo processa a mensagem Ethernet diretamente, extraindo e/ou inserindo os dados relevantes para ele, e transferindo a mensagem para o próximo escravo EtherCAT, sem a necessidade de esperar todo o telegrama ser recebido. O processo está implementado por *hardware* no controlador escravo e é, portanto, independente dos tempos de execução do software da pilha de protocolos ou do poder do processador. O último escravo do barramento retorna a mensagem já processada para o mestre, contendo os dados enviados por cada escravo [Figura 41], fazendo uso da comunicação *Ethernet full duplex*. Este sistema faz com que a atualização de dados entre mestre e escravos seja feita de maneira rápida e determinística, adequada para aplicações como o controlo de máquinas. [25]

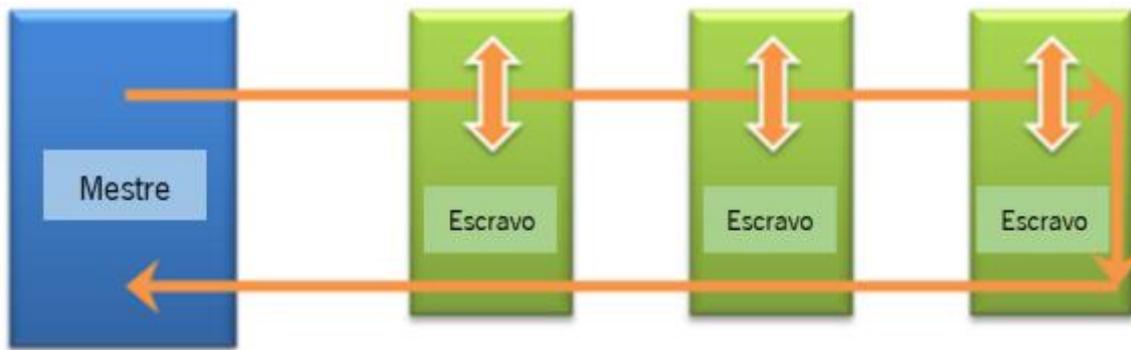


Figura 41 - Transferência de dados EtherCAT

De um ponto de vista Ethernet, um segmento de bus EtherCAT é simplesmente um único dispositivo Ethernet grande que recebe e envia tramas Ethernet. No entanto, o "dispositivo" não contém um controlador Ethernet único, mas sim um grande número de escravos EtherCAT. Tal como para qualquer outro dispositivo Ethernet, pode ser estabelecida uma comunicação direta sem um interruptor, criando assim um sistema EtherCAT puro.

3.5.2.3 Desempenho

O EtherCAT é projetado para atender aplicações com grande quantidade de canais e atingir um alto desempenho para aplicações de ponto a ponto como uma malha de controlo. Como o escravo poder ler e escrever na mesma trama, a estrutura da mensagem EtherCAT é otimizada para E/S descentralizadas. Além disso, o processamento completo do protocolo acontece em *hardware* e, portanto, independente do tempo de execução da pilha do protocolo, desempenho do CPU ou implementação de *software*. Por exemplo, com acesso direto a memória (DMA), os dados podem ser transferidos entre a placa de rede e o processador mestre ou escravo utilizando o mínimo de recursos do CPU. Os escravos, e não o mestre, estão incumbidos de mapear as mensagens apropriadas para eles, reduzindo a complexidade do mestre e libertando os seus recursos.

O tempo de atualização para dados de 1000 E/S distribuídas é de apenas 30 μ s. Podem ser trocados até 1486 bytes de dados do processo com uma única trama Ethernet. Isto é equivalente a quase 12.000 E/S digitais. A transferência desta quantidade de dados leva apenas 300 μ s.

Com o EtherCAT, está disponível uma tecnologia de comunicação que corresponde à capacidade de computação superior de PCs industriais modernos.

Os benefícios deste desempenho são transversais aos controladores com capacidade de computação relativamente moderada. O ciclo EtherCAT é tão rápido que pode ser executado entre dois ciclos de controlo, portanto, sempre que o controlador tem dados de entrada disponíveis, as saídas são abordadas com um atraso mínimo. O tempo de resposta do controlador é melhorado significativamente, sem aumentar a capacidade de computação

3.5.2.4 Topologia

Em linha, em árvore ou estrela: O EtherCAT suporta quase qualquer topologia. Permite ainda que as estruturas bus ou linha conhecidas das redes *Fieldbus*, fiquem também disponíveis para rede Ethernet.

A flexibilidade da cablagem permite o recurso a uma grande variedade de cabos podendo ser escolhidos os que adequam melhor às necessidades do sistema.

Uma vez que podem ser ligados até 65535 dispositivos, o tamanho da rede é praticamente ilimitado. [14]

3.5.2.5 Relógio distribuído

Outro fator importante para conceção de redes determinísticas é a responsabilidade do controlador mestre de sincronizar todos os dispositivos escravos ao mesmo tempo.

Um exemplo da necessidade desta sincronização precisa é verificado em aplicações onde vários eixos robóticos necessitam de realizar movimentos coordenados simultaneamente.

A abordagem mais poderosa para sincronização é o alinhamento preciso de relógios distribuídos. Em contraste com a comunicação totalmente síncrona, onde a qualidade de sincronização sofre imediatamente no caso de uma falha de comunicação, com relógios distribuídos, tem-se um elevado grau de tolerância a possíveis atrasos relacionados com a falha no sistema de comunicação.

Uma vez que a comunicação utiliza uma estrutura lógica em anel, o "relógio mestre" pode determinar o atraso do tempo de execução para os "relógios escravos" e vice-versa, individualmente e de forma simples e precisa. [Figura 42] Os relógios distribuídos são ajustados com base neste valor, o que significa uma base de tempo para toda a rede muito precisa. [14]

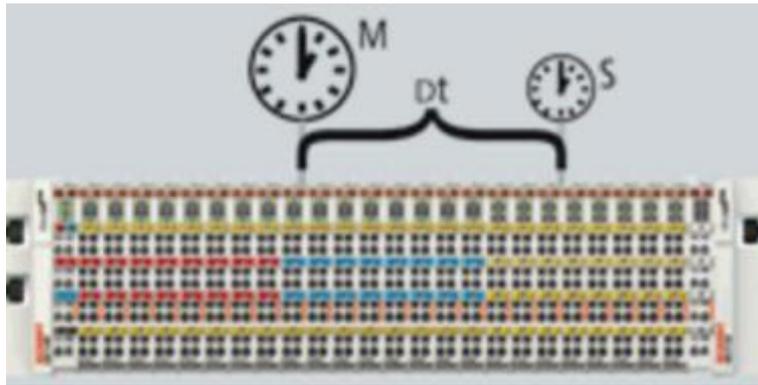


Figura 42 - Determinar o atraso do tempo de execução [14]

3.5.2.6 Vantagens e desvantagens

O protocolo de comunicação EtherCAT apresenta como principais vantagens ser um protocolo industrial Hard Real-Time e apresentar uma comunicação extremamente simples e eficiente.

Como desvantagens destacam-se o facto de endereçar apenas em *Hard Real-Time* e não ser desenvolvido para pacotes padrões TCP/IP. [25]

3.5.3 RS-232C

Antes do padrão RS-232 ter sido criado, a comunicação de dados entre dois dispositivos compreendia a troca de dados digitais entre um computador central (*mainframe*) e terminais de computador remoto, ou entre dois terminais remotos sem o envolvimento do computador central. Tais dispositivos eram ligados através de linha telefónica, e conseqüentemente necessitavam de um *modem* em cada lado para fazer a decodificação dos sinais.

Em 1962 um comité que atualmente é conhecido como EIA, Electronic Industries Association introduziu um *standard* para transmissão de dados entre dispositivos. O RS-232C (RS – “*Recommended Standard*”) é um padrão para troca de dados entre equipamentos e especifica as tensões, temporizações, funções dos sinais, protocolos para troca de informações e as especificações mecânicas. [26]

O ponto de afirmação desta interface está associado ao lançamento, pela IBM, de computadores com a porta RS-232 mantendo-se como padrão utilizado em grande escala mundial ao final dos anos 90. A importância da comunicação série começou a diminuir

gradualmente com o aparecimento e desenvolvimento das redes de alta velocidade com por exemplo Ethernet.

Uma ligação por RS-232 é uma conexão ponto a ponto feita entre um dispositivo DTE (Data Terminal Equipment) e um dispositivo DCE (Data Communications Equipment).

3.5.3.1 Características elétricas do RS-232C

O padrão RS-232C define, 2 níveis lógicos, contudo as entradas têm definições diferentes das saídas. Nas saídas, o sinal é considerado no estado “1”, quando a tensão no circuito de transferência, se encontra entre $-5V$ e $-15V$, em relação ao sinal de *ground* (terra). O sinal é considerado no estado “0”, quando a tensão se encontrar num valor entre $+5V$ e $+15V$, também em relação ao sinal de *ground* (terra). A região compreendida entre $-5V$ e $+5V$ é definida como região de transição. Para as entradas, o sinal é considerado no estado “1”, quando a tensão no circuito de transferência, está entre $-3V$ e $-15V$, em relação ao sinal *ground* (terra). O sinal é considerado no estado “0”, quando a tensão está entre $+3V$ e $+15V$, também em relação ao sinal *ground* (terra). A região compreendida entre $-3V$ e $+3V$ é definida como região de transição. [26]

3.5.3.2 Conectores

O padrão especifica 20 sinais diferentes contudo a maioria desses sinais não são necessários e são ignorados pela maioria dos dispositivos. Como consequência, e para poupar espaço, a maioria dos fabricantes opta pela utilização do conector em D de 9 pinos (DB9) tendo este passando a ser o conector padrão.

Tabela 9 - Sinais do padrão RS-232 num conector DB9

Pino (conector DB9)	Sinal	Significado
1	CD	Carrier Detect (Detecção da portadora)
2	RXD	Receive Data (Receção de dados)
3	TXD	Transmit Data (Transmissão de Dados)
4	DTR	Data Terminal Ready (Terminal de Dados Pronto)
5	SG	Signal Ground (Sinal de Terra)
6	DSR	Data Set Ready (Conjunto de Dados Pronto)
7	RTS	Request To Send (Requisição para Enviar)

8	CTS	Clear To Send (Pronto a enviar)
9	RI	Ring Indicator (Indicador de Chamada)

São utilizados conectores machos e fêmeas sendo que os conectores machos estão normalmente presentes nos cabos e os conectores fêmeas estão normalmente presentes nos dispositivos.

3.5.3.3 Configurações

No protocolo de comunicação RS-232, os caracteres são enviados um a um como um conjunto de bits. A codificação mais usada é o "start-stop assíncrono" que usa um bit de início, seguido por oito bits de dados, um ou nenhum bit de paridade, e um ou dois bits de paragem sendo então necessários pelo menos 10 bits para enviar um único carácter.

O método utilizado por RS-232 para comunicação permite uma simples conexão de três fios: TXD, RXD, e SG. No entanto, para os dados serem transmitidos, existem alguns parâmetros como a velocidade, os bits de paridade e os bits de paragem que devem ser configurados.

A velocidade é a quantidade de bits transmitidos por segundo (*baudrate*) sendo que os valores mais comuns são 300, 1200, 2400, 9600, 19200, etc. Ambos os dispositivos têm que apresentar a mesma velocidade de transmissão.

A paridade pode ser nula, par ou ímpar. A paridade modifica um dos bits, normalmente o mais ou o menos significativo, para garantir que o byte transmitido seja par ou ímpar permitindo ao recetor verificar se ocorreram erros na transmissão.

Os bits de paragem são enviados no final do byte com o intuito de permitir que o recetor do sinal se sincronize.

Mesmo que este método seja o suficiente para a maioria das aplicações, ele é limitado em responder a problemas como por exemplo o recetor estar sobrecarregado. É aqui que o *handshaking* pode ajudar. Existem 2 métodos principais de *Handshaking*: por *software*, e por *hardware*.

O *Handshaking* por *software* (XON/XOFF) utiliza bytes de dados reais como caracteres de controlo. As linhas necessárias continuam a ser o TX, RX, e SG e os caracteres de controlo são enviados como dados regulares. Os caracteres de controlo, "XON" e "XOFF", são enviados

pelo recetor dos dados para o transmissor parar a comunicação caso o buffer do recetor estiver a ficar cheio.

O *Handshaking* por *hardware* (RTS/CTS) tal como as linhas TX e RX, as linhas RTS/CTS e DTR/DSR trabalham com uma sendo uma saída e a outra a entrada. O primeiro conjunto de linhas são RTS (Request to Send) e CTS (Clear to Send). Quando um recetor está pronto para dados, ele declara a linha RTS indicando que está pronto para receber os dados. Este é, então, lido pelo dispositivo transmissor na entrada CTS, indicando que ele está livre para enviar os dados. Com esta informação sempre disponível o recetor consegue controlar o fluxo de dados.

3.5.3.4 Vantagens e desvantagens

As principais vantagens associadas a este protocolo de comunicação são: as ligações e conexões são simples, tem um custo reduzido, mesmo o processador mais simples apresenta esta interface e o *software* de implementação é simples.

As principais desvantagens são: a velocidade está limitada a 115kbps e limita o comprimento dos cabos (Um máximo de 15 metros a um taxa de transmissão de 9600bps); está sujeita a interferências de ruído; e existem demasiados protocolos por *software*. [27]

3.6 PLC (*Programmable Logic Controller*)

Um PLC, ou em português CLP (controlador lógico programável), como se mostra na Figura 43, é um dispositivo eletrónico digital que tem como principal função automatizar sistemas industriais através do controlo de máquinas e processos. Os PLCs permitem reduzir os custos de materiais, de mão-de-obra, de instalação e de localização de falhas. Apresentam ainda uma robustez e uma fiabilidade superior aos dispositivos utilizados anteriormente (contadores, temporizadores, microcontroladores, PCs industriais, etc) tendo ganho rapidamente uma grande aceitação no panorama industrial.



Figura 43 - Exemplo de um PLC [14]

Este dispositivo possui uma capacidade de processamento interno que a partir da conjugação de determinadas entradas digitais ou analógicas (*inputs*) e comandos de programação internos, é capaz de controlar um conjunto de saídas que também podem ser digitais ou analógicas (*outputs*). No panorama industrial, os *inputs* de um PLC são normalmente fornecidos através de sensores. Estes são dispositivos capazes de converter as condições físicas em sinais elétricos. Por outro lado os *outputs* do PLC são convertidos em sinais elétricos capazes de executar alguma tarefa.

O funcionamento do PLC pode ser dividido em três grandes fases. A primeira fase consiste em realizar um registo de entrada. Nesta fase o CPU (Unidade Central de Processamento) do PLC possui uma rotina interna que lê todos os sinais de entrada e armazena, na sua memória, o seu conteúdo numa tabela de dados. A segunda fase consiste em ler e executar o programa que está gravado na sua memória principal utilizando os parâmetros das entradas obtidos na primeira fase. A terceira e última fase consiste em atualizar os sinais de saída do PLC e recomeça novamente este ciclo.

As combinações de I/O são referenciadas a uma lógica de controlo (Programa Principal), que é carregado na memória do PLC (RAM, EPROM ou EEPROM) através de um terminal de programação (PC). Toda essa combinação lógica e sequencial é ciclicamente executada pelo CPU numa ordem pré-determinada, denominada de varrimento ou *scan*. A grande variedade de módulos discretos e analógicos, módulos de comunicação, módulos de rede, diagnóstico de falhas que simplificam a expansão e a manutenção do sistema, faz dos PLCs uma excelente opção para projetos de Automação Industrial e até mesmo de Automação Predial.

Para que o PLC execute as tarefas pretendidas é necessário uma programação prévia seguindo uma linguagem de programação. Segundo a norma internacional IEC61131-3 estas linguagens pode ser: diagrama de blocos de funções; diagrama Ladder; sequential function chart (SFC); lista de instruções; texto estruturado.

Dentro de todas elas o diagrama Ladder é a linguagem de programação mais usada na programação de PLC's estando obviamente disponível para um grande número de PLC's no mercado como por exemplo o BC9120 comercializado pela Beckhoff. [14] [28]

Capítulo 4 - Motor Linear Yamaha LCM100

Neste capítulo vai ser apresentado o motor linear que foi selecionado para a realização deste projeto. Serão abordadas as motivações que estiveram na origem desta escolha, e apresentadas as características e particularidades deste motor. Tendo em conta as particularidades deste projeto, foi implementado um conceito de controlo em que o motor linear surge como elemento final, uma vez que transforma os *inputs* dados pelo sistema de controlo em movimentos no meio físico.

O motor linear apresenta-se como um dos elementos centrais deste projeto, como tal, será apresentado em detalhe ao longo deste capítulo.

4.1 Escolha do motor

Depois de ter sido efetuado um extenso estudo de mercado sobre a oferta existente de motores lineares síncronos surgiram diversas possibilidades que, de certa forma, se enquadravam nas necessidades deste projeto. Foram contactadas as empresas responsáveis pela comercialização desses motores e solicitadas reuniões, nas quais, cada empresa teve a oportunidade de apresentar o motor que comercializava salientando as suas vantagens e de que forma se poderiam integrar no sistema.

Os motores lineares com tecnologia *moving coils*, em que a alimentação é efetuada pela parte móvel, apesar de apresentarem preços mais baixos em relação aos motores lineares com tecnologia *moving magnets*, onde a alimentação é feita pela parte fixa, têm como grande desvantagem a necessidade de cabos estendidos em todo o comprimento da linha que, com as velocidades normalmente associadas, sofrem um enorme esforço mecânico durante os movimentos do motor. Um exemplo desse tipo de motores lineares é o SIMOTICS L-1FN3 da Siemens ilustrado na Figura 44, ou o IndraDyn-L da RexRoth ilustrado na Figura 45.



Figura 44 - Motor linear Simotics L-1FN3 [29]

O preço destes motores com tecnologia *moving coils* é, como já foi referido anteriormente, mais baixo quando comparado com os motores lineares com tecnologia *moving magnets*. Uma parte móvel do motor linear Simotics L-1FN3 com força nominal de 1010N e uma velocidade de 4,5m/s tem um preço associado de 1490€ e cada 450 milímetros de parte fixa custa 251€.



Figura 45 - Motor Linear IndraDyn-L [30]

Cada parte móvel do motor linear IndraDyn-L com força nominal de 3465N e uma velocidade de 3m/s tem um preço associado de 2664€ e cada 450 milímetros de parte fixa custa 878€.

Tomada a decisão de que o motor linear a ser adquirido teria de ter tecnologia *moving magnets*, excluíram-se todos os motores com tecnologia *moving coils*. Numa fase final, a decisão recaía sobre três motores de tecnologia *moving magnets*: O XTS da Beckhoff, o iTrack da Rockwell, (ambos apresentados no Capítulo 2 -) e o LCM100 da Yamaha.

Apesar de todos eles, do ponto de vista técnico, serem possibilidades viáveis para este projeto, fatores de origem pragmática determinaram a eleição do motor LCM100 da Yamaha. Apesar de os dois motores excluídos poderem até ser considerados tecnologicamente mais avançados, o preço mais elevado e o facto de as empresas que os comercializam não se mostrarem abertas para uma venda do motor independente da solução final que apresentam foram fatores preponderantes na sua eliminação.

O motor LCM100 da Yamanha vem com preços associados de 10549€ para o módulo (parte fixa) e de 1375€ para cada slider (parte móvel).

O motor XTS, apesar da Beckhoff, não fornecer valores apenas para o motor linear, foi capaz de apresentar um preço para uma solução final. Um circuito fechado, ao qual dão o nome de “small starter kit”, composto por dois módulos curvos (90°) e quatro módulos retos de 250mm cada, e com todo o sistema de controlo associado tem um custo aproximado de 27000€.

O motor iTRACK da Rockwell traz um preço associado de 12500€ para cada 500 milímetros de parte fixa e cada mover (parte móvel) tem um custo de 2500€.

A Preh Portugal projeta diversas aplicações para este projeto e um sistema de controlo aberto que se possa adaptar conforme as necessidades das diferentes aplicações era um fator de grande peso nesta escolha. Outro motivo importante foi que a EPL, representante da Yamaha em Portugal, cedo percebeu as potencialidades deste projeto e, durante toda a fase de escolha do motor, mostrou-se muito solícita e disponível. Isso ficou bem demonstrado quando, apesar de terem surgido alguns problemas com o transporte até Portugal, a EPL foi capaz de entregar o motor dentro da data prevista. Outra prova disso mesmo é o facto de o motor ter sido cedido à Preh Portugal à consignação.

4.2 Módulo LCM100

O motor linear da Yamaha [Figura 46] consiste, na verdade, em módulos lineares que podem ter 400mm, 480mm e 640mm e que podem ser acoplados uns aos outros de forma a aumentar o comprimento total do sistema. Para o projeto em estudo nesta dissertação foram utilizados três módulos LCM100-4M com 640mm cada, o que perfaz um comprimento total de 1920mm. Foram também utilizados dois *sliders*.



Figura 46 - Módulo LCM100

O número de módulos é limitado, podendo ser ligados 16 módulos em simultâneo o que faz com que o comprimento máximo possível seja de 10240mm.

Apresenta a tecnologia de *moving magnets*, é plano e de face simples. A parte móvel é equipada com ímanes permanentes e os enrolamentos são montados na parte fixa. Desta forma a parte móvel torna-se passiva e não consome energia elétrica. A parte fixa define todo o comprimento do transportador e é alimentada para gerar o campo magnético viajante que vai ser seguido pelo campo magnético da parte móvel conseguindo assim o movimento transversal pretendido. Na Tabela 10 são apresentadas as principais características do motor linear LCM100.

Tabela 10 - Características do LCM100

Modelo	LCM100		
	LCM100-4M	LCM100-3M	LCM100-2MT
Tipo	Motor linear com núcleo plano com tecnologia <i>moving magnets</i>		

Precisão de posicionamento	$\pm 0,015\text{mm}$		
Velocidade máxima	3m/s		
Peso máximo	15kg por slider		
Força nominal	48N		
Tamanho total do módulo	640mm	480mm	400mm
Número máximo de sliders	16 (quando existirem 16 módulos ligados)		
Distância mínima entre sliders	420mm		
Peso do módulo	12,5kg	9,4kg	7,6kg
Peso do slider	2,4kg		
Tamanho do cabo	3 ou 5m		
Controlador	LCC140		

Internamente, cada módulo LCM100-4M que foi usado, é na verdade composto por 4 motores onde cada motor tem aproximadamente 160mm de comprimento.

Esses 4 motores estão distribuídos ao longo do módulo LCM100 em 4 áreas distintas que estão ilustradas na Figura 47.

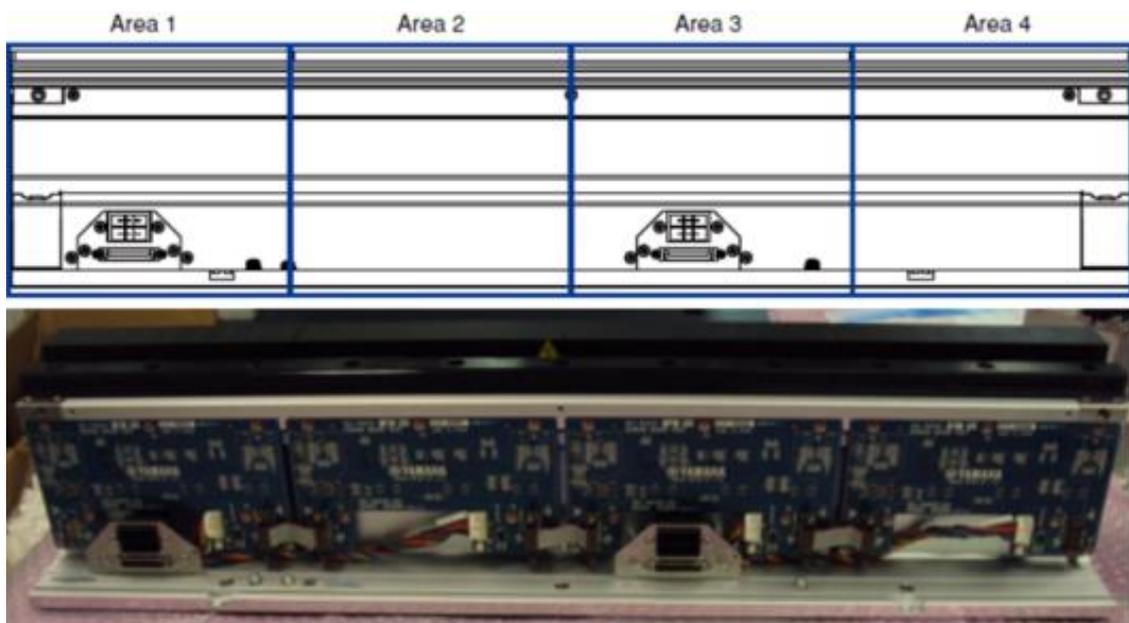


Figura 47 - Distribuição dos motores ao longo do Módulo LCM100-4M

A parte móvel, neste motor, é denominada de *slider* [Figura 48] e pode existir apenas um slider por cada módulo LCM100 podendo contudo existir mais módulos do que sliders.



Figura 48 - Slider do LCM100

Como é normal nas linhas de montagem de hoje as peças circulam desde o início até ao fim da linha fixas numa palete de transporte. O *slider* vem preparado de forma que a fixação dessa palete seja feita de uma forma simples com recurso a 10 parafusos.

4.2.1 Montagem

A união de dois módulos LCM100-4M é efetuada com recurso a um bloco de conexão ilustrado na Figura 49.



Figura 49 – Bloco de conexão

Trata-se de uma peça metálica robusta que com ajuda de 5 parafusos (2 M4 e 3 M5) garantem que, tanto o carril como a parte ativa do motor, sejam unidas, garantindo que não ocorram desvios laterais entre os dois módulos.

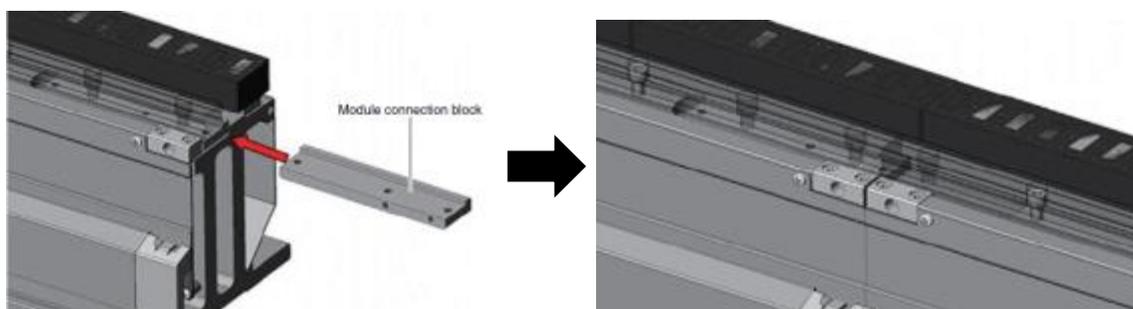


Figura 50 - Ilustração de como unir dois módulos

A estrutura metálica para o suporte e elevação do sistema, complementa este componente conferindo um alinhamento e fixação extra a todos os módulos do sistema.

Existe ainda um cabo de conexão elétrica que possibilita ao sistema saber que existe mais um módulo ligado. Esse cabo e a forma de o ligar estão ilustrados na Figura 51.



Figura 51 - Cabo de ligação entre dois módulos

Para que o sistema funcione corretamente são ainda necessários dois módulos terminais que vão definir o limite esquerdo e o limite direito do sistema [Figura 52].



Figura 52 - Módulo terminal esquerdo e direito

Para além da função de delimitarem as extremidades do controlador é também nestes terminais que são colocados as guias de inserção e remoção de *sliders* [Figura 53]. Estas guias tratam-se de pequenas extensões da guia do módulo LCM100 que, por se estenderem ligeiramente para fora do módulo, facilitam a inserção manual de *sliders* no motor.



Figura 53 - Guias de inserção e remoção dos sliders

Finalmente, para concluir todo o *hardware* associado aos módulos LCM100 falta apenas fazer referência ao cabo [Figura 54] que vai ligar o módulo, ou módulos, aos respetivos controladores LCC140.



Figura 54 - Cabo de alimentação e cabo de controlo

Pode ser adquirido com três ou cinco metros e é na verdade composto pelo cabo de alimentação composto por 6 fases e cabo de proteção de terra e o cabo de controlo com revestimento à prova de ruído eletromagnético. Desta forma o sistema pode operar em ambientes onde o ruído eletromagnético não pode ser evitado como é muitas vezes o caso do ambiente industrial.

Cada módulo LCM100 necessita sempre de um controlador LCC140 associado. Para a ligação destes dois dispositivos são necessários dois destes cabos, uma vez que cada um deles alimenta e controla dois dos quatro motores presentes no módulo LCM100. Na Figura 55 temos assinalado a vermelho as portas de alimentação e a verde as portas de comando dos pares de motores 1 - 2 e 3 - 4.



Figura 55 - Ligação entre o módulo LCM100 e o controlador LCC140

Como a alimentação de cada um dos motores do módulo LCM100 é trifásica, cada cabo de alimentação apresenta seis fases (três para cada motor) e um cabo para proteção de terra para ser apertado ao chassi de ambos os dispositivos (módulo e controlador). As 12 fases necessárias

ao funcionamento dos quatro motores presentes no módulo LCM100 são geradas pelo controlador LCC140 consoante a necessidade

4.2.2 Consumos

Como já foi referido anteriormente, os consumos associados a este tipo de motores, quando comparados com os sistemas rotativos, são significativamente mais baixos. Na discussão de resultados será efetuado um estudo comparativo, baseado em medições reais, entre este sistema e um sistema tradicional equivalente de forma a inferir concretamente o ganho real associado quer aos baixos consumos destes sistemas, quer à diminuição de desgaste associado a peças de contacto mecânico.

Na Tabela 11 apresentam-se os consumos teóricos fornecidos pelo fabricante.

Tabela 11 - Consumos do LCC140

Tipo de módulo	Número de motores	Consumos			Perdas
		Controlo	Com o slider parado	Durante o movimento do slider	Durante o movimento
LCM100-4M	4	35 W	60 W	350 W	20 W

Os valores mencionados na Tabela 11 representam valores máximos sendo garantido que esses valores nunca são ultrapassados. Devido às características de operação do motor é possível assumir que os valores de consumo numa operação real estarão entre 1/4 e 1/3 dos valores máximos.

4.2.2.1 Exemplo de um cálculo de consumo de uma instalação:

O consumo do sistema pode ser calculado da seguinte forma:

$$\text{Consumo} = SM * CSM + (NM - SM) \times CSP \quad (4.2.1)$$

Onde:

- SM: Número de *sliders* em movimento
- CLM: Consumo com *sliders* em movimento
- NM: Número de módulos LCM100 no sistema
- CSP: Consumo com *sliders* parados

Para um sistema composto por 6 módulos se forem movidos 4 *sliders* em simultâneo [Figura 56] o consumo é:

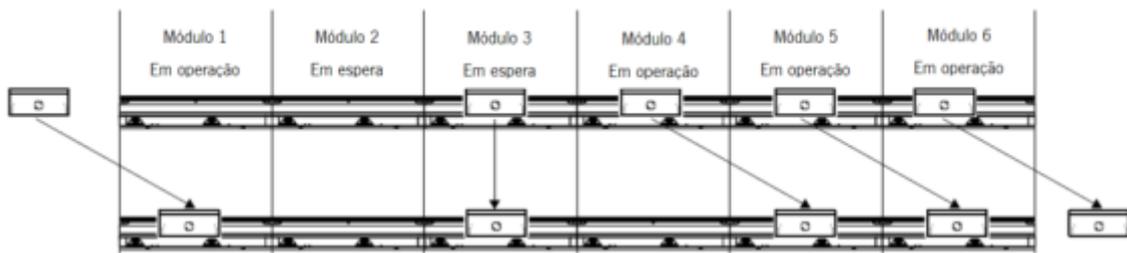


Figura 56 - Exemplo de uma operação de um sistema com 6 módulos

$$\text{Consumo} = 4 \times 350W + (6 - 4) \times 60W = 1520W$$

4.3 Controlador LCC140

Cada um dos módulos LCM100 do sistema tem sempre associado um controlador LCC140. O papel deste elemento no conceito geral do sistema de controlo é fazer a ligação entre o sistema de controlo e o motor linear. Vai receber e enviar dados ao sistema de controlo e ao motor. Aqui os *inputs* recebidos do sistema de controlo são transformados em grandezas físicas (tensão e frequência) e os *outputs* do motor são transformados em grandezas não-físicas e enviadas para o sistema de controlo. Cada módulo LCM100 tem que ter sempre associado um e só um controlador LCC140.

4.3.1 Análise

Cada controlador LCC140 [Figura 57] tem que ser alimentado por uma fonte de tensão sinusoidal com valor eficaz entre 200 e 230V podendo esta ter 50 ou 60Hz de frequência e ser capaz de fornecer 6A de corrente.

Apresenta-se como a primeira interface entre os módulos LCM100 e o utilizador. Todos os comandos de controlo terão que passar por este controlador que entre outras coisas verifica as condições de segurança antes de os executar.

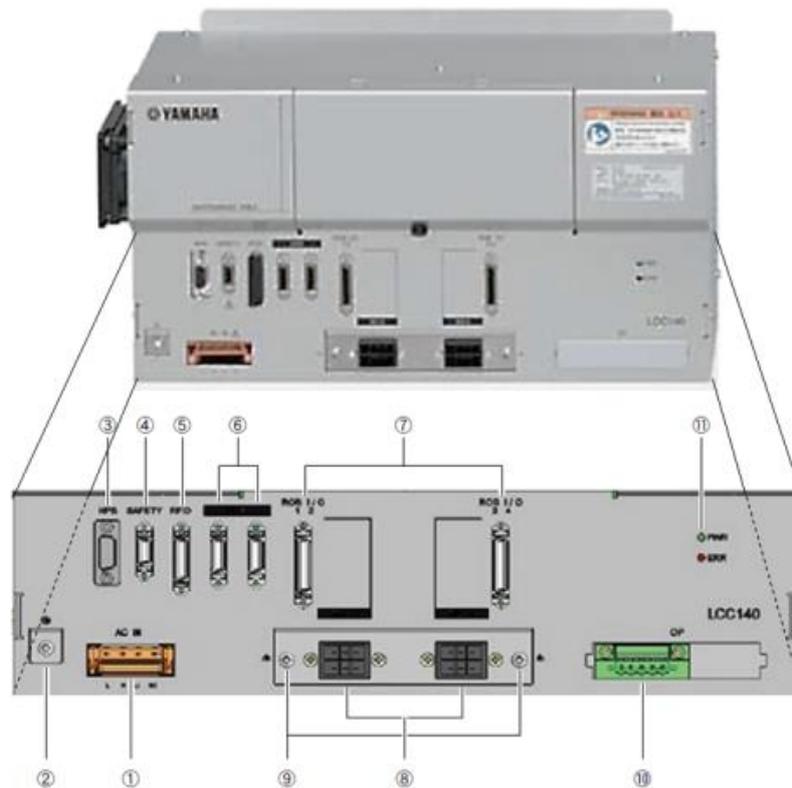


Figura 57 - Controlador LCC140

1. Entrada de alimentação;
2. Proteção de terra da alimentação principal;
3. Porta RS232;
4. Entrada para o circuito de proteção exterior;
5. Entrada RFID (opção não utilizada);
6. Portas para a ligação de módulos em serie;
7. Controlo dos motores;
8. Alimentação dos motores;
9. Proteção de terra da alimentação dos motores;
10. Placa Ethernet/IP;
11. LEDs de diagnóstico;

Apresenta uma alimentação do sistema de controlo independente da alimentação para a movimentação do motor o que possibilita que, em caso de falha na alimentação principal, o sistema de controlo continue a funcionar. A Figura 58 apresenta o conector de alimentação do LCC140 onde N e L representam a alimentação principal do motor e N1 e L1 representam a alimentação do sistema de controlo.

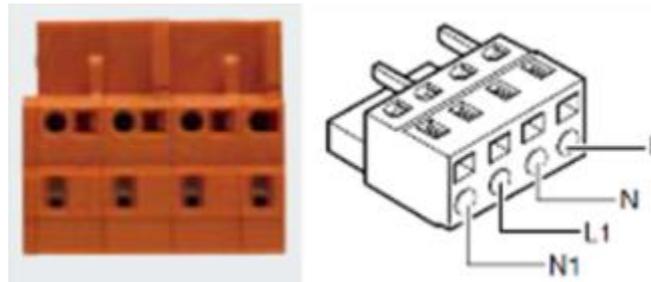


Figura 58 - Conetor de alimentação

Este conetor será ligado ao ponto 1 assinalado na Figura 57.

Este controlador vai alimentar cada motor do módulo LCM100 com 3 fases fornecendo em cada uma delas uma tensão variável entre os 0 e os 230V e uma frequência também variável entre os 0 e os 333Hz com uma corrente nominal de 1,6A por motor.

Apresenta uma entrada para as medidas de segurança externas. Essa entrada serve para aplicar uma paragem de emergência através de um circuito externo de segurança do sistema. O controlador precisa ver garantido que nesta porta os pinos 11 e 12 e 13 e 14 estão estejam fechados [Figura 59].

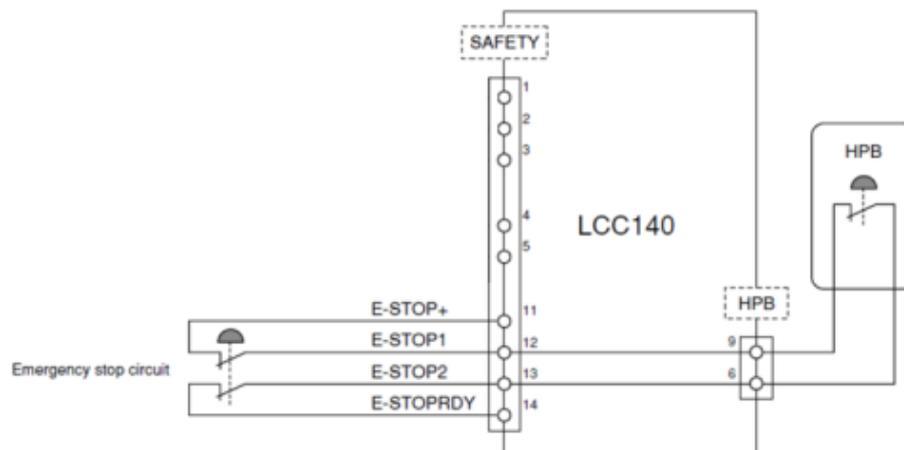


Figura 59 – Entrada do circuito de emergência

Numa fase mais avançada o circuito externo de emergência será implementado mas nesta fase inicial o que foi feito, com recurso a um conetor *dummy*, soldar diretamente o pino 11 ao pino 12 e o pino 13 ao pino 14 simulando um circuito de emergência com as seguranças desativadas.

Apesar do LCC140 possuir quatro protocolos de comunicação. O RS232, o Ethernet/IP, o CC-Link e o DeviceNet, os controladores utilizados para este projeto apresentam apenas a comunicação Ethernet/IP e RS232. Diretamente associados à comunicação RS232 com o

controlador, está a consola HPB e o programa POPCON. Um é redundante relativamente ao outro uma vez que as funcionalidades de um estão replicadas no outro.

Seja qual for o número de módulos LCM100 e controladores existentes, a comunicação para o controlo do sistema será efetuada apenas com primeiro controlador. Isto possibilita tratar um conjunto de controladores como se fosse apenas um. Para a ligação de dois ou mais controladores é necessário um cabo de ligação ilustrado na Figura 60.



Figura 60 - Cabo de ligação de controladores LCC140

Para quando se utiliza apenas um controlador ou para os dois controladores localizados nas extremidades do sistema composto por dois ou mais controladores é necessário recorrer a conetores terminais como os da Figura 61 para não deixar os terminais de ligação dos controladores em aberto.



Figura 61 - Conetor terminal

Para que cada controlador saiba o tamanho total do sistema e qual é a sua posição física dentro do sistema, cada um deles apresenta um compartimento, que pode ser facilmente aberto, onde se encontram quatro comutadores rotativos onde no primeiro par de comutadores se introduz o número total de controladores e no segundo par se introduz o número referente à posição desse mesmo controlador no sistema [Figura 62].

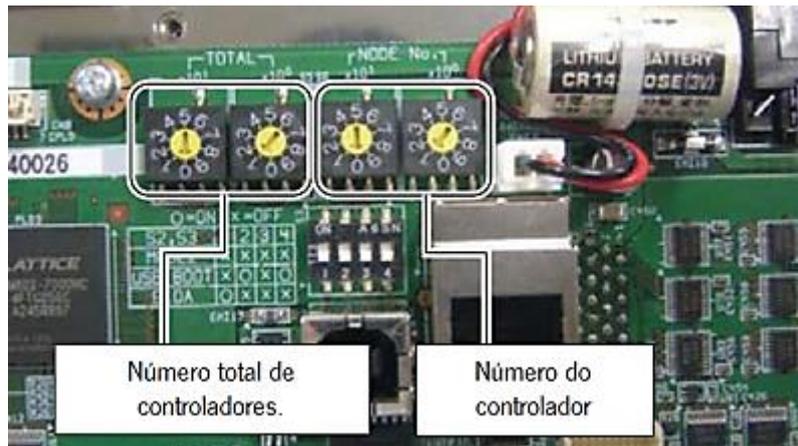


Figura 62 - Comutadores rotacionais presentes em cada LCC140

Por exemplo se se estiver a definir o controlador número cinco num sistema que apresente doze controladores no total, no primeiro par de comutadores fica "05" e no segundo par fica "12".

Este controlador apresenta a vantagem de que o controlo do motor linear LCM100 possa ser feito com uma maior abstração, isto é, o controlador traduz os comandos físicos e mais básicos a enviar ao motor, como, por exemplo o valor da tensão e frequência, para um nível mais intuitivo o que permite o desenvolvimento de sistemas de controlo mais complexos de uma forma rápida e eficiente.

Pode realizar operações através de programas gravados no próprio controlador ou pode executar comandos remotos vindos por exemplo de um PLC ou de um computador. Para além do controlo das entradas e saídas como movimento ou posicionamento consegue ainda controlar a inserção e remoção de *sliders* do sistema. Desta forma, quando se insere um novo *slider* no módulo, o controlador atualiza automaticamente o número de *sliders* existentes e numera-os de forma crescente.

4.3.2 Inicialização

Existem dois meios de comunicação pré-definidos para a comunicação com o LCC140. Através da consola HPB ou através do programa POPCON [Figura 63]. Ambas as soluções recorrem à comunicação RS232 para comunicar com o LCC140.



Figura 63 - Consola HPB e software POPCON

Cada vez que se constrói um novo sistema, ou se altera o número de pares módulo/controlador no sistema é necessário realizar uma inicialização aos parâmetros do sistema. Esses parâmetros são enviados para o controlador recorrendo à consola HPB ou ao programa POPCON ou através de comandos enviados por qualquer uma das comunicações que o controlador suporta. Durante o desenvolvimento deste projeto, sempre que existiu a necessidade de recorrer a uma das comunicações pré desenvolvidas, foi sempre usado o software POPCON pelo motivo de que apresenta um ambiente gráfico mais intuitivo e permite realizar as operações mais rapidamente que as outras opções uma vez que faz o carregamento de todos os parâmetros em simultâneo. Na Figura 64 pode ver-se um extrato da lista de parâmetros onde são ilustrados alguns dos parâmetros que merecem maior discussão.

Number	Value	Name	Range	Unit
PRM100	9002	robot type number	read only	
PRM110	1150	(+)soft limit	[-99999,99999]	[mm]
PRM111	130	(-)soft limit	[-99999,99999]	[mm]
PRM112	15	weight	[0,MAX]	[kg]
PRM113	100	acceleration	[1,200]	[%]
PRM114	100	deceleration	[1,100]	[%]
PRM115	40	positioning tole	[1,4000]	[pulse]
PRM116	100	position NEAR width	[1,9999]	[.01mm]
PRM117	1	OUT position	[0,20]	[mm]
PRM121	1	ORG search direction	0:normal 1:reverse	
PRM122	20	ORG search speed	[1,100]	[mm/s]
PRM193	42000	sliders pitch limit	[41900,99999]	[.01mm]
PRM198	26300	user palette size	[25000,99999]	[.01mm]
PRM200	30	max program speed	[1,100]	[%]
PRM204	0	max speed of slider insertion outside area	[101,MAX] 0:PGM speed	[mm/s]
PRM205	100	JOG base speed	[1,100]	[mm/s]
PRM210	10	point trace speed 1	[1,100]	[%]
PRM211	30	point trace speed 2	[1,100]	[%]

Figura 64 - Extrato da lista de parâmetros do motor no software POPCON

Deste extrato é importante salientar os parâmetros PRM110 e PRM111 que é onde são definidos o limite máximo e limite mínimo, em milímetros, do tamanho do motor linear. Estes dois parâmetros garantem que nenhum *slider* possa transpor os limites físicos do motor linear mesmo que tal comando seja dado. Se forem inseridos limites que ultrapassem o tamanho físico do motor linear e seja dado um comando para um *slider* transpor os limites, este consegue ejetar-se do motor linear se circular a velocidade suficiente, podendo causar danos ao módulo LCM100 e ao *slider*. De salientar que é necessário dar uma margem de cerca de 100mm em cada uma das extremidades para evitar que o *slider* fique fora da zona ativa do motor, isto é, fique numa zona onde o campo magnético viajante criado pelos enrolamentos não seja suficientemente forte para garantir a propulsão do *slider*.

O PRM112 é onde é definido o peso máximo que os sliders vão transportar. O valor máximo de peso para estes motores é de 15kg.

Outro parâmetro ao qual é importante fazer referência é o PRM200. Este parâmetro limita a velocidade uma vez que a velocidade do movimento do motor é determinada pela equação (4.3.1).

$$Velocidade = \frac{PRM200}{100} \times \frac{Velocidade\ definida\ no\ comando}{100} \quad (4.3.1)$$

Como não foi possível concluir o desenvolvimento da estrutura mecânica, este valor foi sempre mantido abaixo dos 50% garantindo que o motor não se movia a mais do que 2m/s. Isto porque a estrutura mecânica tem um papel determinante na fixação mais robusta dos módulos LCM100 e movimentos à velocidade máxima sem a devida fixação poderiam causar danos ao motor.

Mais dois parâmetros que merecem referência são o PR113 e o PR114 que definem a percentagem de aceleração e desaceleração do motor respetivamente. Se, no processo de transporte, uma peça não puder sofrer elevadas forças de aceleração e desaceleração, porque apresenta componentes que não se encontrem devidamente fixos na peça, estes parâmetros têm que ser alterados para valores que se adequem aos limites impostos pela peça. Como o sistema deve premiar a rapidez de processos, se a peça o permitir, estes parâmetros estarão definidos nos seus valores máximos.

Esta lista de parâmetros, depois de devidamente preenchida é carregada para o controlador. Podem ser alterados a qualquer altura e têm que ser atualizados sempre que se altera o *layout* do motor linear.

Para além da inicialização dos parâmetros, o POPCON permite o controlo manual do motor. Através de uma janela gráfica, Figura 65, é possível definir o número do *slider* a usar, definir a posição, em milímetros e a velocidade, em percentagem, bastando depois habilitar o motor no botão verde e iniciar o movimento no botão de *play*. Se o movimento não poder ser realizado uma mensagem de erro surgirá com a descrição do erro ocorrido caso contrário o movimento é executado.

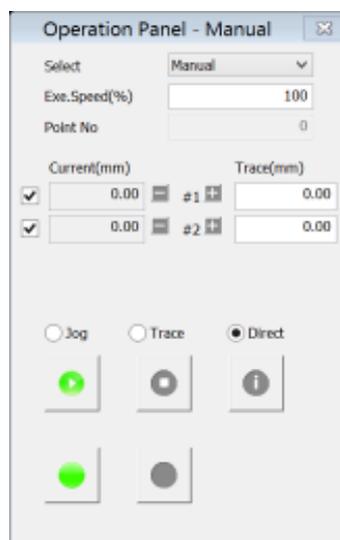


Figura 65 - Movimento manual no POPCON

Para um controlo mais avançado do motor o POPCON permite também o desenvolvimento de programas recorrendo à lista de comandos que controlador aceita. Este atributo permitiu não só o desenvolvimento de programas de controlo mais avançados mas também ter um primeiro contacto com a linguagem do controlador. Na Figura 66 está ilustrado um exemplo de um programa desenvolvido no POPCON para um movimento cíclico de dois sliders.

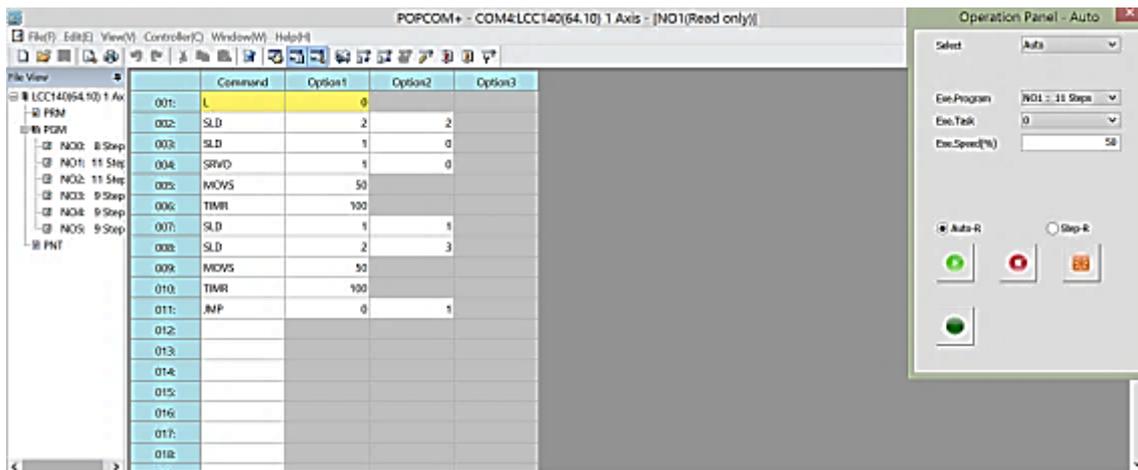


Figura 66 - Programa no software POPCON

Sequencialmente tem-se:

- Na linha 001 atribui-se o valor zero na variável L,
- Nas linhas 002 e 003 define-se que o *slider* “2” vai para a posição “2” e o *slider* “1” vai para a posição “0”.
- Na linha 004 habilita-se o motor.
- Na linha 005 executa os movimentos definidos a 50% da velocidade.
- Na linha 006 é atribuído um atraso de um segundo.
- Nas linhas 007 e 008 define-se que o *slider* “1” vai para a posição “1” e o *slider* “2” vai para a posição “3”.
- Na linha 009 os dois movimentos definidos são executados a 50% da velocidade.
- Na linha 010 é dado um atraso de um segundo
- Finalmente na linha 011, o programa faz um salto para o valor “0” no programa NO1 que é para a linha 001 tornando assim o programa cíclico.

De referir apenas que os pontos 0, 1, 2 e 3 são previamente definidos como posições em milímetros no motor linear.

O desenvolvimento de pequenos programas, nesta fase, permitiu fortalecer o conhecimento da linguagem do controlador nomeadamente os tipos de comandos a enviar e os tipos de respostas enviadas pelo controlador. Foi também importante para começar a testar as reais capacidades do motor. O desenvolvimento deste conhecimento revelou-se muito importante aquando do desenvolvimento do sistema de controlo.

4.4 Beckhoff Embedded PC CX9020

Tendo em vista a integração deste motor com outras máquinas e elementos industriais existe a necessidade de se ter um elemento que faça a ligação de todos eles num sistema de controlo abrangente. Em ambientes industriais, para a implementação deste tipo de controlo, a

escolha normalmente recai sobre um PLC uma vez que estes dispositivos que apresentam uma grande robustez, fiabilidade e durabilidade, que por exemplo, um computador pessoal não tem.

4.4.1 Análise

O PLC CX9020 da Beckhoff, ilustrado na Figura 67, foi o escolhido para a implementação do sistema de controlo neste projeto. Trata-se um dispositivo controlado por Ethernet, compacto que pode ser montado numa tradicional calha DIN e tem como elemento central um CPU de 1GHz ARM Cortex™ A8. A ligação de sistemas I/O da Beckhoff está diretamente integrada no CPU. Este sistema oferece uma identificação automática do sistema bus (K-bus ou E-bus) e comutadores independentes no modo correspondente. O CX9020 apresenta duas *slots* para cartões microSD, memória interna RAM e 128kB NOVRAM como memória não volátil. A configuração mais básica também inclui duas interfaces para Ethernet RJ45, quatro portas USB-2.0 e uma interface DVI-D. O sistema operativo é o Microsoft Windows Embedded Compact 7. O software TwinCAT 2 automation transforma o sistema CX9020 num poderoso PLC que pode ser operado sem o ambiente gráfico. A gama de temperaturas que este sistema pode operar é entre os -25° e os +60°. [14]



Figura 67 - Beckhoff Embedded PC CX9020

Na Tabela 12 estão esquematizadas as características mais importantes deste PLC.

Tabela 12 - Características do CX9020 da Beckhoff

Informações técnicas	CX9020
Processador	ARM CortexTM A8, 1GHz (TC3:30)
Memoria Flash	512 MB microSD (Expansível), 2 slots para cartões microSD
Memoria Interna principal	128KB NOVRAM integrated
Interfaces	2 × RJ45 (Ethernet, comutador interno) 10/100Mbps/s, DVI-D, 4 × USB 2.0, 1 × interface opcional
LEDs de diagnóstico	1 × Power, 1 × estado TC, 2 × acesso á flash, 2 × estado do bus
Relógio	Relógio com bateria interna para data e hora(bateria substituível)
Sistema Operativo	Microsoft Windows Embedded Compact 7, em Inglês
Software de controlo	TwinCAT 2 PLC runtime or TwinCAT 2 NC PTP runtime
Conexão I/O	E-bus or K-bus, reconhecidos automaticamente
Alimentação	24 V DC (-15 %/+20 %)
Corrente para o E-bus /K bus	2A
Máximo de perdas	5 W (incluindo o sistema de interfaces)
Dimensões (L×A×C)	84mm × 99mm × 91mm
Peso	590g
Tempertura de operação / armazenamento	-25 até +60 °C / -40 até +85 °C
Resistência à vibração/choque	Em conformidade com: EN 60068-2-6/EN 60068-2-27
Imunidade/emissão de ruído	Em conformidade com: EN 61000-6-2/EN 61000-6-4
Classe de proteção	IP 20

Através do E-bus, o PLC consegue reconhecer e comunicar com terminais conectados a esse bus através do protocolo EtherCAT.

Este PLC, por si só, não apresenta a capacidade de comunicar com equipamentos por Ethernet/IP como é o caso do controlador LCC140 da Yamaha. Portanto, em antecipação a um problema, em conjunto com o CX9020 foi também adquirida um terminal Ethernet/IP que ligada

ao E-bus confere ao CX9020 a capacidade de comunicar com dispositivos através do protocolo Ethernet/IP.

4.4.2 Sistema de terminais EtherCAT

O EtherCAT Terminal System, ou sistema de terminais EtherCAT, é um sistema de I/O modular que veio substituir o anterior sistema de terminais bus (K-bus) e que consiste em blocos terminais eletrónicos ligados em serie através de um E-bus. Neste novo sistema o protocolo EtherCAT mantém-se inalterado até ao terminal individual. Em adição, a retrocompatibilidade com o sistema anterior, bus Terminals, com ligação K-bus, Fica assegurada através de um EtherCAT Bus Coupler.

Um bloco EtherCAT consiste num PLC e ligados a ele, um determinado número de terminais. Uma vez que podem ser ligados 65635 dispositivos o tamanho da rede é praticamente ilimitada. No final é sempre necessário um terminador para definir o fim do bloco EtherCAT.

Os contactos entre os terminais são feitos quando o terminal encaixa na posição certa, sem que seja necessária nenhuma ação adicional [Figura 68]. Isto significa que cada um dos terminais pode ser trocado individualmente sem ser necessário a remoção completa de todo o sistema. O encapsulamento dos terminais EtherCAT apresenta uma organização clara, com LEDs para monitorar o estado dos canais que estão claramente identificados através de *labels*.

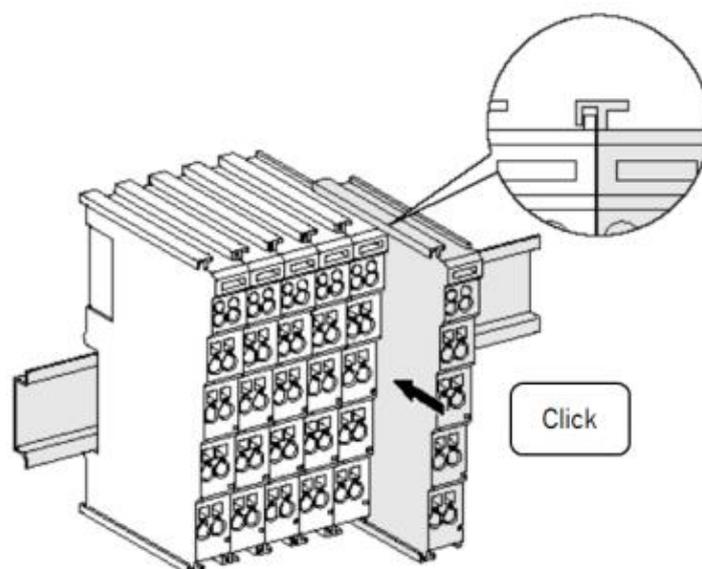


Figura 68 - Método de ligação do terminal ao PLC

Estão disponíveis Terminais EtherCAT para todos os tipos de sinais digitais e analógicos comuns encontrados no mundo da automação.

Os terminais EtherCAT digitais são concebidos como terminais de 2, 4, 8 ou 16 canais. Na variante de 16 canais, os sinais digitais de entrada e saída são dispostos de uma maneira ultracompacta.

Os terminais analógicos apresentam sinais padrão de ± 10 V, 0 até 10 V, 0 até 20 mA e de 4 mA até 20 mA e estão todos disponíveis como terminais de 1, 2, 4 e 8 canais. Todas as variantes apresentam o mesmo tipo de encapsulamento. Os terminais que recorrem ao E-bus são identificados pela nomenclatura ELxxxx.

4.4.3 Bloco EtherCAT

Para fazer face às necessidades do sistema de controlo em estudo nesta dissertação, foi construído um bloco EtherCAT constituído pelo PLC CX9020, um terminal EL1809, um terminal EL2809, um terminal EL6652 e um terminal EL9011 [Figura 69].

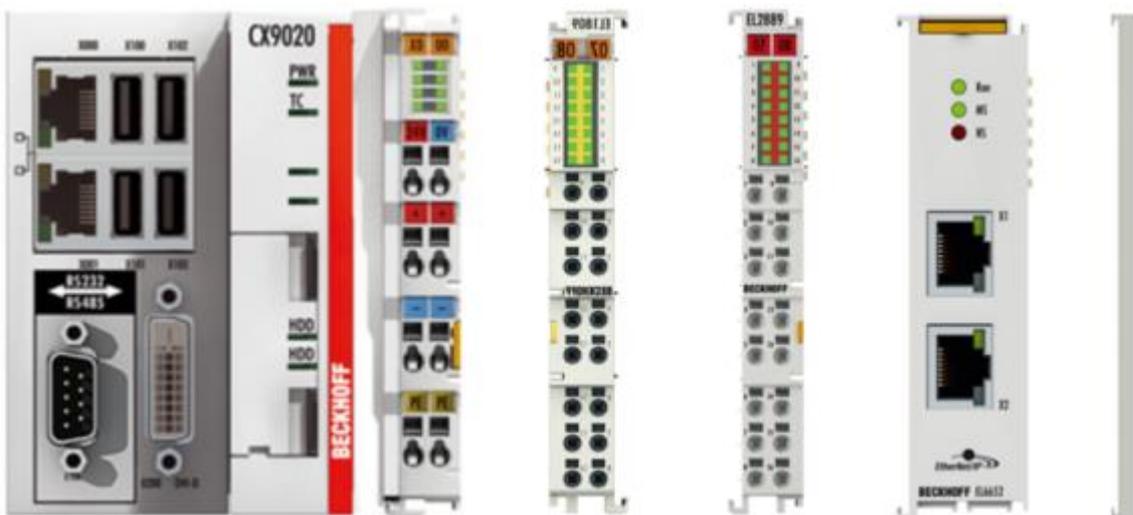


Figura 69 - Bloco EtherCAT construído

Graças a um sistema mecânico bem desenvolvido todos os terminais fixam-se e libertam-se do PLC ou do terminal adjacente de uma forma simples e rápida como é ilustrado na Figura 68.

4.4.3.1 Terminal EtherCAT EL1809

O EL1809 [Figura 70] trata-se de um terminal com 16 entradas digitais de 24V. O terminal adquire os sinais digitais de controlo do nível de processo e transmite-os, numa forma

elétrica isolada, para um nível mais elevado do dispositivo de automação. Contém 16 canais com o seu estado indicado por LEDs localizados na parte superior do terminal.



Figura 70 - Terminal EtherCAT EL1809

São particularmente interessantes para situações onde o espaço é reduzido como por exemplo em quadros de controlo. Comunica através do E-bus com recurso ao protocolo de comunicação EtherCAT. Os condutores podem ser ligados sem ferramentas.

A principal função deste dispositivo no sistema é expandir o número de portas de entradas disponíveis no PLC.

4.4.3.2 Terminal EtherCAT EL2809

O terminal EL2809 [Figura 71] liga os sinais binários de controlo provenientes do dispositivo de automação para os atuadores no nível de processo com isolamento elétrico. Está protegido contra polaridade reversa e proteção das saídas contra sobrecargas e curtos-circuitos.



Figura 71 - Terminal EterCAT EL2809

Dispõe de 16 canais que têm o seu estado indicado por LEDs. É atravessado pelos contactos de alimentação. Os canais de saída do EL2809 são alimentados pelos 24V dos contactos de alimentação que o atravessam. Os condutores podem ser ligados sem a necessidade de ferramenta usando a técnica de *plug-in*.

A principal função deste dispositivo no sistema é expandir o número de portas de saída disponíveis no PLC.

4.4.3.3 Terminal EL6652 Ethernet IP master

Uma vez que o PLC CX9020 não apresenta a capacidade de comunicar através de Ethernet/IP foi adquirido um terminal capaz de fazer a conversão da comunicação EtherCAT, utilizada pelo PLC, para a comunicação Ethernet/IP, usada pelo controlador LCC140.

O terminal Ethernet/IP *master* [Figura 72] tem uma conexão Ethernet composta por duas portas e pode assim ser operado numa linha com um ou mais nós Ethernet/IP. Os dados do processo são configurados por um mestre EtherCAT, permitindo diferentes dados de processo e diferentes tamanhos. A EL6652 suporta tanto conexões *multicast* como *unicast*. Podem existir até 16 dispositivos escravos Ethernet/IP simples ligados através de um único nó genérico. O EL6652 existe também na versão escravo. O terminal EL6652-0000 é mestre e o terminal L6652-0010 é escravo.



Figura 72 - EL6652 Ethernet IP master terminal

A principal função deste terminal é conferir ao PLC CX9020 a capacidade de comunicar com dispositivos que apresentem o protocolo de comunicação Ethernet/IP. No sistema em estudo este terminal faz a conversão da comunicação Ethernet/IP usada pelo controlador LCC140 para comunicação EtherCAT usada pelo PLC CX9020 no bloco EtherCAT.

4.4.3.4 Terminal EL9011

Cada bloco EtherCAT tem que ser fechado do lado direito com um terminal EL9011 tanto para proteção mecânica como elétrica [Figura 73].



Figura 73 - Terminador de E-bus EL9011

Todos os terminais EtherCAT, o PLC e a fonte de alimentação vêm preparados para um fixação a uma calha DIN o que confere ao bloco a facilidade de ser integrado num quadro de controlo.

4.4.3.5 Fonte de Alimentação

Como se pode verificar pelas suas características, o PLC CX9020 requer uma alimentação de 24V DC com a capacidade de fornecer 2A. Foi então necessário adquirir uma fonte de alimentação que cumprisse estas características para alimentar todo o bloco EtherCAT. Sendo a uniformização, uma das características da tecnologia de blocos EtherCAT e, dado que a empresa apresenta inúmeros blocos EtherCAT a funcionar nas suas instalações, existem, na mesma proporção, fontes de alimentação que cumprem as necessidades elétricas dos blocos EtherCAT existentes. A fonte selecionada e que foi adquirida foi a fonte de alimentação da Mean Well ilustrada na Figura 74.



Figura 74 - Fonte de Alimentação

Na Tabela 13 estão listadas as principais características desta fonte de alimentação.

Tabela 13 - Características da fonte de alimentação

Fabricante:	Mean Well
Categoria de produto:	Fonte de alimentação em calha DIN
Produto:	Switching Supplies
Tipo de entrada:	1-Phase / Single Phase
Potência de saída:	120 W
Tensão de entrada:	200 – 240 AC
Número de saídas:	1 Output
Tensão de saída-canal 1:	24 V

Corrente de saída-canal 1:	5 A
Marca:	Mean Well
Altura:	125.2 mm
Comprimento:	100 mm
Estilo de montagem:	DIN Rail
Embalagem:	Bulk
Série:	DR-120
Largura:	65,5 mm
Peso unitário:	790 g

De salientar os 24V de tensão de saída com capacidade de fornecer 5A de corrente tornam esta fonte elegível para alimentar o CX9020.

Capítulo 5 - Sistema de Controlo

Para que todos os dispositivos constituintes de uma linha de produção se consigam interligar e trabalhar de forma coordenada é necessário um sistema de controlo central que faça essa interligação.

5.1 Sistema de controlo com recurso ao PLC CX9020

O recurso a um PLC como dispositivo de controlo é uma prática comum em ambientes industriais, uma vez que o PLC confere uma robustez e fiabilidade ao sistema que, por exemplo, um computador pessoal não é capaz de conferir. Com o PLC o sistema de controlo apresenta a capacidade de, não só controlar o motor linear, mas também de integrar outros dispositivos, englobando tudo num sistema mais completo, garantindo assim a expansibilidade do sistema e uma grande flexibilidade e integrabilidade.

Numa fase posterior ao término desta dissertação, este projeto vai continuar a ser desenvolvido pela empresa. Numa fase mais avançada adicionar-se-ão ao sistema, outros dispositivos, como por exemplo braços robóticos, que vão tratar da transferência de peças dos

sliders para as estações da linha de produção e vice-versa, sendo estes também controlados pelo PLC através das suas portas I/O, idealizando assim, um sistema de controlo de uma linha de produção completa como ilustrado na Figura 75.

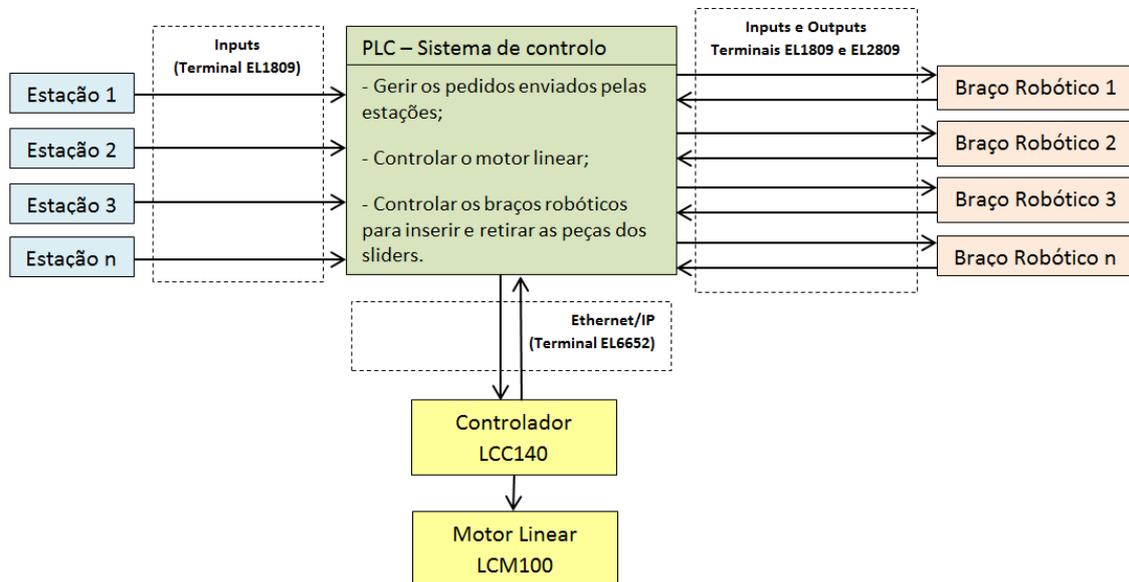


Figura 75 - Sistema de controlo final

Com esta dissertação pretende-se implementar, no PLC, um sistema de controlo capaz de receber *inputs* através do terminal EL1809. Esses *inputs* são gerados e enviados por cada uma das estações presentes na linha de produção. Cabe então ao sistema de controlo a interpretação dos *inputs* e a criação e envio de comandos para o motor linear, através do terminal EL6652. Por sua vez, o motor linear, executa os movimentos que vão responder a esses pedidos. Por exemplo se uma estação tem uma peça pronta para enviar para a estação seguinte, vai enviar um pedido que chegará ao PLC através de um *input* pelo terminal EL1809. Baseado nesse *input* o PLC irá gerar e enviar os comandos ao motor que os irá executar e desta forma responder a esse pedido.

No sistema de controlo terá que existir uma rotina que defina as prioridades de execução, garantindo que os pedidos sejam atendidos da forma mais rápida e eficaz possível.

Apesar de, a adição de braços robóticos ao sistema estar previsto para uma fase posterior ao término desta dissertação, é imperativo que o sistema de controlo esteja preparado para, através do terminal EL2809, enviar comandos para os braços robóticos executarem as transferências de peças e receberem *inputs* no final transferência. Acima de tudo, o sistema de controlo terá que ser capaz de controlar todos estes *inputs* e *outputs* de forma coordenada, garantindo a melhor

rapidez e eficácia, na passagem das peças por todas as estações de trabalho presentes na linha de produção.

Inicialmente procedeu-se à ligação dos três pares, módulo LCM100 e controlador LCC140, ao PLC CX9020. Importa salientar que o PLC se liga apenas ao primeiro controlador, através do terminal EL6652 como demonstra a Figura 76.

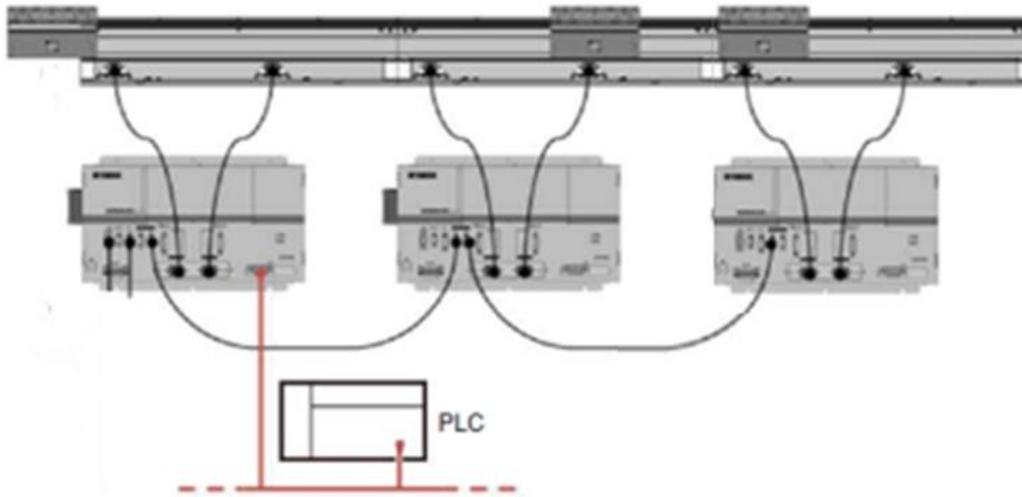


Figura 76 - Sistema de controlo inicial

O sistema de controlo comunica com o motor linear através de um cabo Ethernet que liga o terminal EL6652 à placa Ethernet/IP presente no primeiro LCC140. Uma vez que a comunicação entre o PLC e o motor só precisa ser estabelecida com o primeiro controlador, apenas esse controlador necessita de ter placa Ethernet/IP.

5.1.1 Configuração da rede Ethernet/IP.

Para que dois dispositivos possam comunicar através de Ethernet/IP é necessária a configuração da comunicação.

Depois de desenhar corretamente a rede Ethernet/IP a usar, onde foi definido como mestre o terminal EL6652 e como escravo o primeiro controlador LCC140, atribuiu-se a um e a outro, endereços IP da mesma gama [Figura 77].



Figura 77 - Rede Ethernet/IP definida entre o PLC e o controlador

A definição do IP, da máscara de rede e do *gateway* do LCC140 é feita através do programa POPCON já referido anteriormente. [Figura 78]

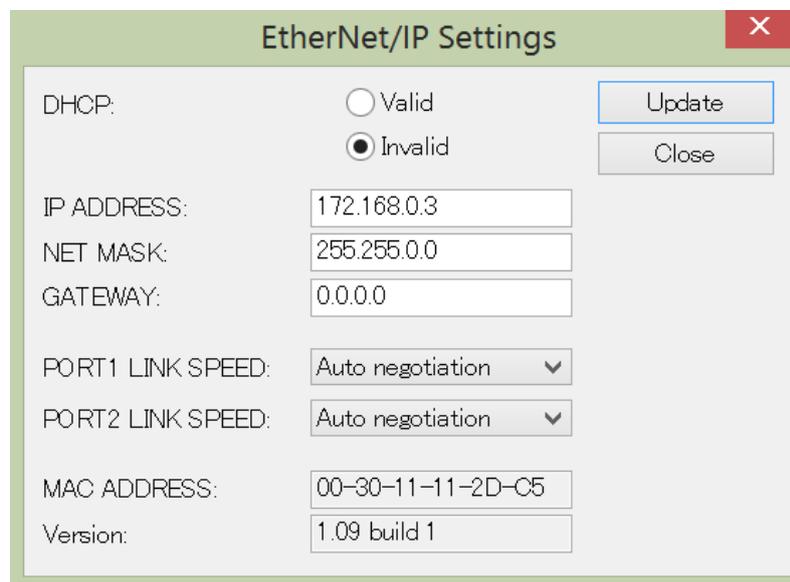


Figura 78 - Definição do IP do LCC140

A configuração dos elementos mestre e escravo do lado do PLC é feita com recurso ao programa TwinCAT 2. No System Manager do TwinCAT, depois de inserir o elemento mestre e o associar ao terminal físico EL6652, que é o terminal Ethernet/IP, o programa automaticamente insere um elemento escravo. Ambos os elementos necessitam de ser configurados. Na janela das configurações do escravo, insere-se o IP 173.168.0.3. [Figura 79]

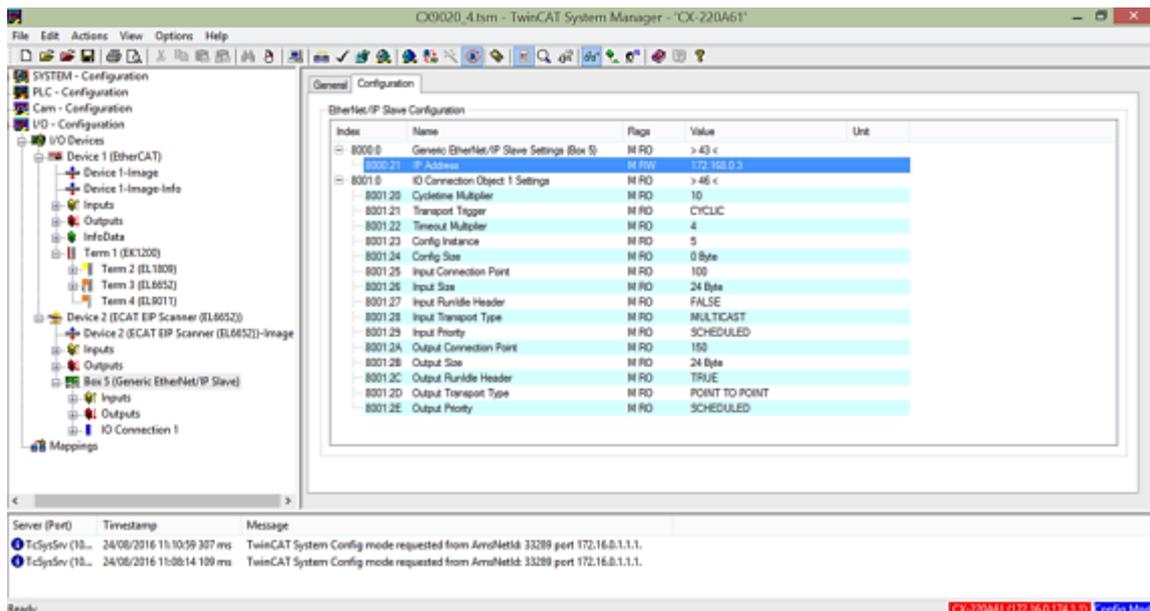


Figura 79 – Configuração do escravo

Analogamente ao processo do escravo, para o mestre, abre-se a janela das configurações e insere-se o IP definido que no caso é 172.168.0.2. No caso do mestre também é necessário definir a máscara de rede (255.255.0.0) e o endereço de *Gateway* (0.0.0.0) [Figura 80].

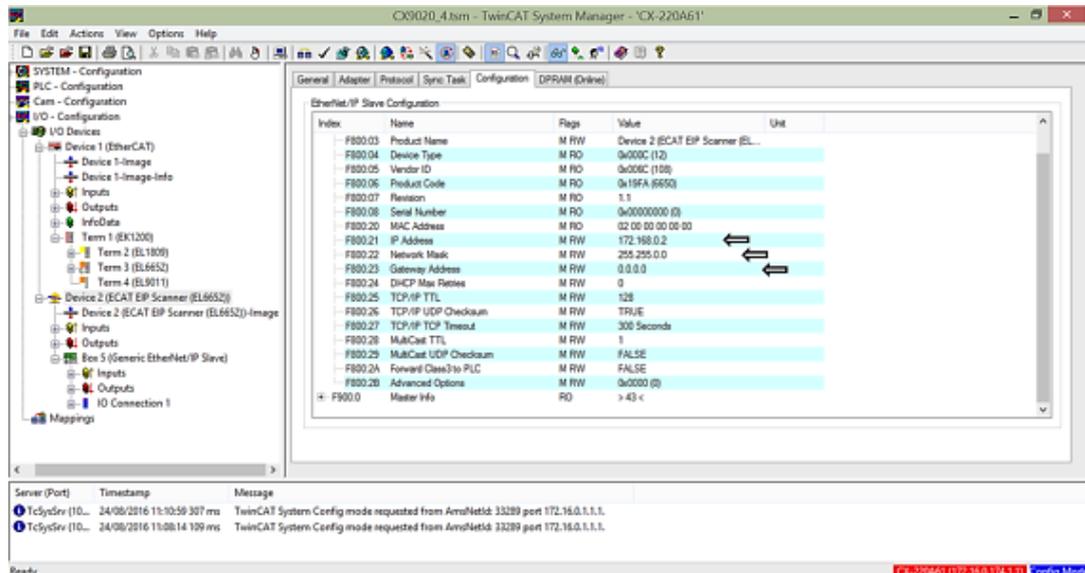


Figura 80 - Configuração do mestre

Para além de definir os endereços IP existem outras configurações necessárias para que a comunicação entre dispositivos por Ethernet/IP seja estabelecida.

O controlador LCC140 apresenta um ficheiro EDS onde os parâmetros necessários à configuração da comunicação são apresentados.

Estes ficheiros com a extensão EDS são construídos de tal forma, que o programa de configuração do dispositivo de controlo (PLC), os possa executar e automaticamente definir os parâmetros da comunicação e desta forma estabelecer a comunicação Ethernet/IP.

Contudo, programa recomendado para o PLC CX9020, o TwinCAT 2, não tem a capacidade de executar o ficheiro EDS do LCC140 de forma automática.

Posto isto, para o estabelecer da comunicação entre o PLC CX9020 e o controlador LCC140, foi necessário abrir o ficheiro EDS e extrair manualmente os parâmetros.

Depois ennumeros contactos, tanto com o suporte técnico da Beckhoff como com o suporte técnico da EPL, chegou-se á conclusão que dos 5 tipos de comunicações descritas no Ficheiro EDS a comunicação 1 era a indicada. Do extrato do ficheiro EDS ilustrado na Figura 81 é possível retirar:

Assinalados a vermelho:

- Config Instance: 5 em hexadecimal -> 5 em decimal
- Inputs Connection Point: 64 em hexadecimal -> 100 em decimal
- Outputs Connection Point: 96 em hexadecimal -> 150 em decimal

Assinalado a amarelo:

- Input / Output Transport Type: point-to-point / multicast or point-to-point
- Input / Output Priority: scheduled / scheduled

```

Connection1 =
    0x04030002,      $ trigger & transport
                    $ 0-15 = supported transport classes (class 1)
                    $ 16 = cyclic (1 = supported)
                    $ 17 = change of state (0 = not supported)
                    $ 18 = on demand (0 = not supported)
                    $ 19-23 = reserved (must be zero)
                    $ 24-27 = exclusive owner
                    $ 28-30 = reserved (must be zero)
                    $ 31 = client 0 / server = 1
    0x44640405,      $ point/multicast & priority & realtime format
                    $ 0 = 0=>T fixed (1 = supported)
                    $ 1 = 0=>T variable (0 = not supported)
                    $ 2 = T=>0 fixed (1 = supported)
                    $ 3 = T=>0 variable (0 = not supported)
                    $ 4-7 = reserved (must be zero)
                    $ 8-10 = 0=>T header (4 byte run/idle)
                    $ 11 = reserved (must be zero)
                    $ 12-14 = T=>0 header
                    $ 15 = reserved (must be zero)
                    $ 16-19 = 0=>T point-to-point
                    $ 20-23 = T=>0 connection type (multicast or point-to-point)
                    $ 24-27 = 0=>T scheduled
                    $ 28-31 = T=>0 scheduled
Param3,Param1,Assem150, $ 0=>T RPI,Size,Format
Param3,Param2,Assem100, $ T=>0 RPI,Size,Format
,, $ config part 1 (dynamic assemblies)
,, $ config part 2 (module configuration)
"Exclusive Owner", $ connection name
"$", $ Help string
"20 04 24 05 2C 96 2C 64"; $ exclusive output path

```

Figura 81 - Parâmetros de comunicação retirado do Ficheiro EDS do LCC140

Consultando a área do Param3 do ficheiro EDS retira-se o Cycle Time Multiplier assinalado a azul na Figura 82.

```

Param3 =
  0,          $ reserved, shall equal 0
  ,,         $ Link Path Size, Link Path
  0x0000,    $ Descriptor
  0xC8,      $ Data Type
  4,         $ Data Size in bytes
  "RPI Range", $ name
  "",        $ units
  "",        $ help string
  2000,3200000,10000, $ min, max, default data values
  ,,,,      $ mult, div, base, offset scaling
  ,,,,      $ mult, div, base, offset links
  ;         $ decimal places

```

Figura 82 - Cycle Time Multiplier retirado do EDS file

Cycle Time Multiplier: 10000ms -> 10s

Consultando a área do Param1 e do Param2 do ficheiro EDS retira-se o tamanho dos dados de *input* [assinalado a laranja na Figura 83] e *output*. [assinalado a verde na Figura 83]

```

Param2 =
  0,          $ first field shall equal 0
  ,,         $ path size,path
  0x0000,    $ descriptor
  0xC7,      $ data type : 16-bit Unsigned Integer
  2,         $ data size in bytes
  "Input Size", $ name
  "",        $ units
  "",        $ help string
  0,256,24,  $ min, max, default data values
  ,,,,      $ mult, dev, base, offset scaling not used
  ,,,,      $ mult, dev, base, offset link not used
  ;         $ decimal places

Param1 =
  0,          $ first field shall equal 0
  ,,         $ path size,path
  0x0000,    $ descriptor
  0xC7,      $ data type : 16-bit Unsigned Integer
  2,         $ data size in bytes
  "Output Size", $ name
  "",        $ units
  "",        $ help string
  0,256,24,  $ min, max, default data values
  ,,,,      $ mult, dev, base, offset scaling not used
  ,,,,      $ mult, dev, base, offset link not used
  ;         $ decimal places

```

Figura 83 - Tamanho dos dados de saída

Na Figura 84 pode-se observar a janela de configuração da comunicação no programa TwinCAT 2 com os parâmetros retirados do ficheiro EDS do LCC140.

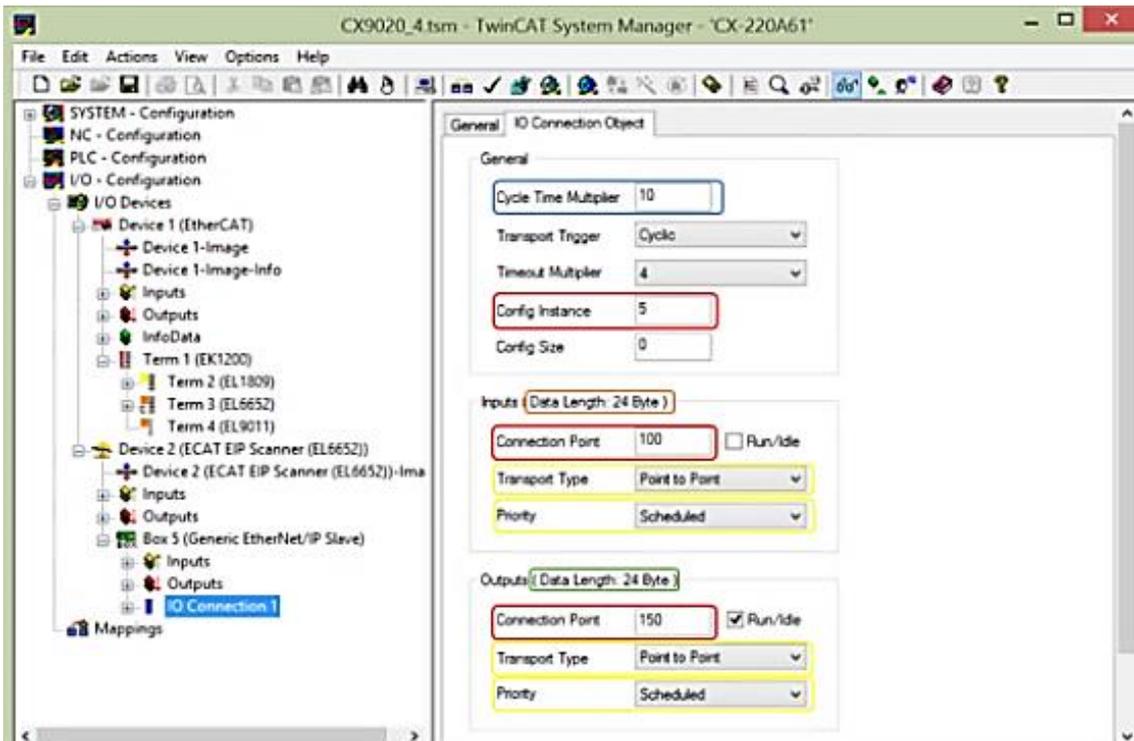


Figura 84 - Configuração da comunicação entre o CX9020 e o LCC140 no TwinCAT2

Os restantes parâmetros não são possíveis obter através do ficheiro EDS sendo que foram definidos segundo instrução do suporte técnico da Beckhoff.

Mesmo com constante contacto com os departamentos técnicos da Beckhoff (parte do PLC) e da Yamaha (parte do controlador), através de *e-mail* e telefonemas, não foi possível, em tempo útil, estabelecer a comunicação entre o PLC CX9020 e o controlador LCC140.

Com o PLC em Config Mode, consegue-se estabelecer a comunicação, facto que é comprovado, do lado do PLC, no programa TwinCAT2 [Figura 85], e comprovado, do lado do controlador, através dos dois LEDs de diagnóstico (NS e MS) presentes na placa de Ethernet/IP no controlador, que ficam acesos a verde indicando NS “Online. One or more connection is established.” E MS “Controlled by the scanner in the Run state”.

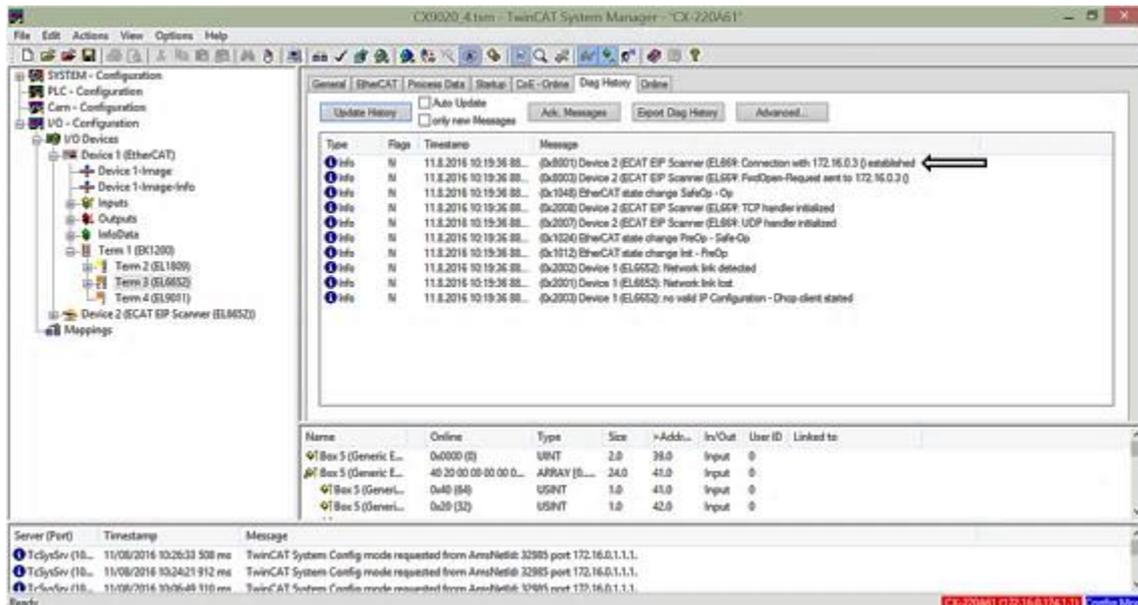


Figura 85 - Ligação estabelecida entre o PLC e o controlador

O problema surge quando se passa o PLC para Run Mode a comunicação falha surgindo o erro “One or more connection is time-out”. Esta informação é retirada também dos dois LEDs de diagnóstico (NS e MS). Quando o PLC é colocado em Run Mode o LED NS fica a piscar a vermelho indicando o erro acima mencionado e o LED MS fica a piscar a verde indicando “Setting is not made or scanner is in the idle state”.

Do lado do PLC, no programa TwinCAT2, existe uma variável de estado do escravo que informa que o erro é “Slave has no valid Assembly Object” [Figura 86] e é nesta premissa que o departamento técnico da Beckhoff se baseia para alegar que o problema está do lado do controlador e não do PLC. Insiste que o controlador necessita de dados de ativação e que só o fabricante poderá ajudar.

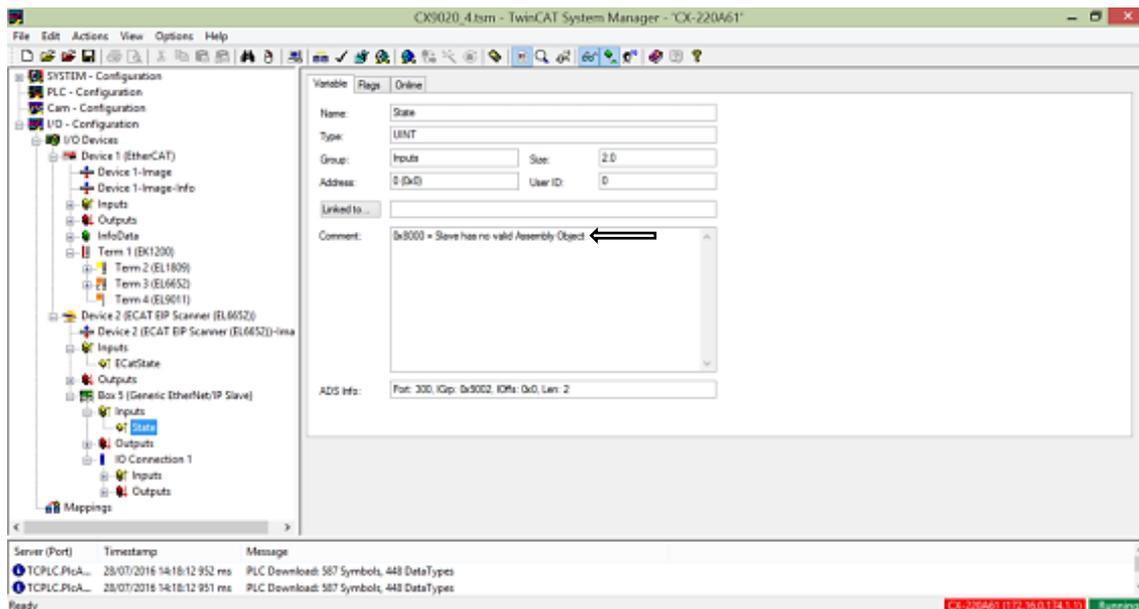


Figura 86 - Variável de estado do escravo

Por seu lado a EPL insiste que o controlador não necessita de qualquer ativação, mas não conseguem adiantar muito mais informação uma vez que também para eles o motor linear é um produto tão recente que estão a construir o conhecimento em paralelo num projeto que também eles começaram a desenvolver ao mesmo tempo.

Numa tentativa de tentar recolher informações adicionais sobre a comunicação entre o PLC e o LCC140 a comunicação foi interceptada através comutador com uma porta espelho que em combinação com o programa Wireshark o que torna possível o acesso às mensagens trocadas entre o PLC e o controlador.

Com este sistema foi possível confirmar que a comunicação Ethernet/IP não estava a acontecer uma vez que as mensagens detetadas entre um dispositivo e outro eram do tipo “ARP” quando deveriam ser do tipo “ENIP” [Figura 87].

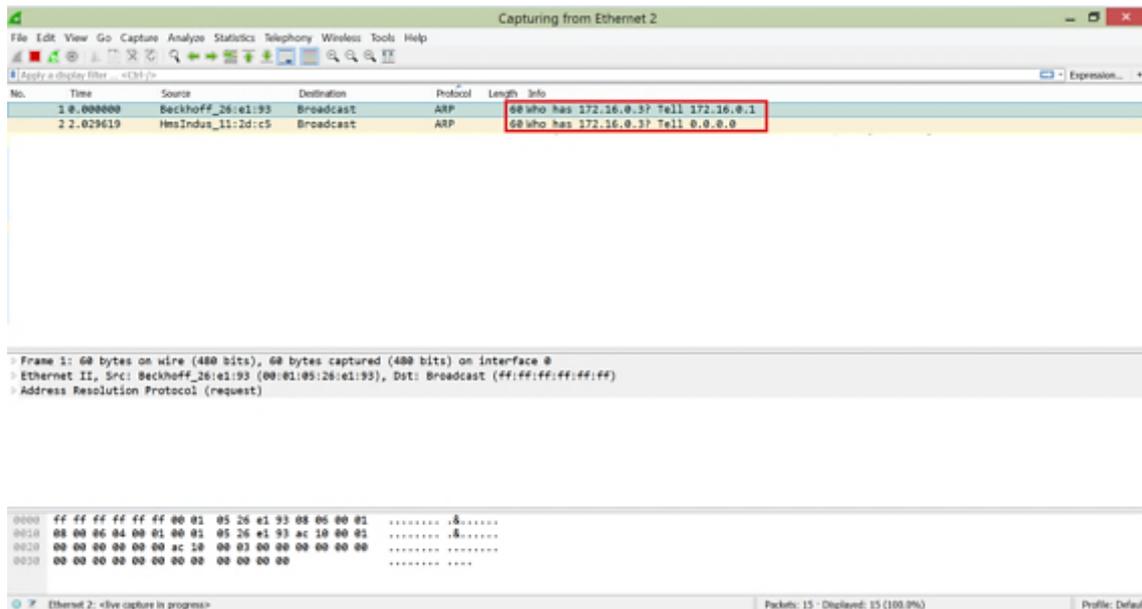


Figura 87 - Intercepção da comunicação entre o PLC e o controlador

Destas mensagens ARP interceptadas é possível retirar que existe algum problema com o IP do controlador. A primeira mensagem ARP indica que o PLC, com o IP 172.168.0.1, está a perguntar na rede quem é o 193.168.0.3. Até aqui nada de anormal, o problema surge na segunda mensagem ARP. Apesar de, como pode ser visto na Figura 78, a definição do IP no controlador ser simples e ter sido definido para 172.168.0.3, ele surge a perguntar quem é o 172.168.0.3 mas com o IP 0.0.0.0.

O facto de estes acontecimentos se terem desenrolado durante os meses de verão, traduziu-se em inúmeras quebras nas pontes de comunicação e numa grande rotatividade na assistência técnica, o que resultou numa anormal demora na resolução deste problema.

No início do mês de outubro, esta situação foi resolvida. Porém, esta dissertação não versará sobre esse desenvolvimento, uma vez que nessa data já se encontrava em fase de finalização. Assim, o problema da comunicação Ethernet/IP entre o controlador LCC140 e o PLC CX9020 foi resolvido e é agora possível continuar a avançar com este projeto.

5.2 Sistema de Controlo em aplicação C#

Uma vez que o recurso ao PLC para o controlo ficou no ponto descrito anteriormente, teve que se optar por uma alternativa no sentido de desenvolver e validar a ideia de controlo para o projeto. Foi no seguimento desta necessidade que, recorrendo á comunicação RS-232C

disponibilizada pelo controlador LCC140, se decidiu desenvolver um programa em linguagem C# que, de certa forma, substitua o PLC e imite o sistema de controlo pensado para este projeto.

5.2.1 Configuração do sistema de controlo

O recurso ao motor linear Yamaha LCM100 para além das vantagens diretas inerentes às características do próprio motor, trouxe também vantagens indiretas, nomeadamente o facto de permitir olhar para a aplicação final de uma forma completamente desapegada das aplicações existentes possuindo uma grande vertente de inovação.

Tradicionalmente, uma linha de produção apresenta um movimento sequencial onde as peças entram por uma extremidade, passam por todos os postos da linha de uma forma sequencial, para que cada um efetue a sua tarefa, e saem pela extremidade oposta.

O objetivo de se conseguir o melhor desempenho do sistema em conjugação com a necessidade constante de uma boa gestão de custos, fez surgir ideias que só são possíveis em projetos com grande teor de inovação onde é possível repensar sistemas de raiz e explorar todas as suas aplicações. Sem esta necessidade, de garantir a retrocompatibilidade dos sistemas existentes, surgiu um novo conceito para uma linha de produção.

Em vez do tradicional movimento circular sequencial, a ideia que surgiu no decorrer do desenvolvimento deste projeto, foi a de uma linha de produção com uma gestão “caótica”.

Esta nova ideia linha de produção apresenta o motor linear numa posição central e as estações a rodear o troço do motor [Figura 88]. Fazendo uso da elevada velocidade associada ao motor Yamaha LCM100, este deixa de funcionar como transportador, tal como foi originalmente desenhado pela Yamaha, e passa a funcionar como distribuidor, isto é, os *sliders* vão deslocar-se ao longo do motor linear onde vão receber e entregar peças às estações sem nunca saírem do distribuidor nem apresentarem algum tipo de movimento sequencial (é desta premissa que surge o termo “caótico” para definir o sistema de controlo). As estações vão enviar pedidos ao sistema de controlo central que por sua vez vai fazer a gestão destes pedidos privilegiando a rapidez de produção de peças. Este conceito de linha de produção é completamente revolucionário e abre um novo leque de ideias para melhorar o desempenho de uma linha de produção.

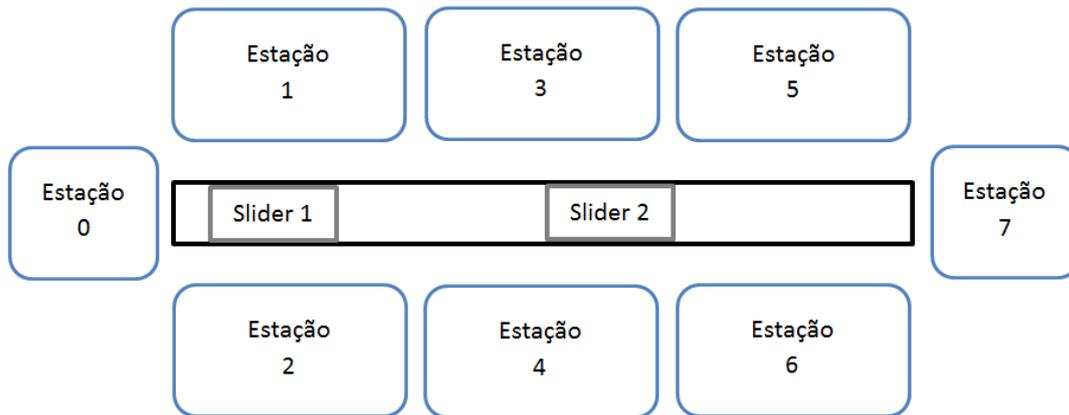


Figura 88 - Conceito de linha de produção com gestão caótica

Uma vantagem prática deste conceito, é a redução significativa do espaço físico ocupado pelas linhas de montagem que, em ambientes industriais em constante crescimento, é um bem cada vez mais valorizado. Outra vantagem que se espera conseguir é, através de um sistema de controlo bem implementado, um aumento significativo no número de peças produzidas. Numa linha de produção tradicional, enquanto uma estação está a realizar o trabalho, todas as peças ficam retidas na sequência. Este problema agrava-se se o tempo de trabalho numa estação for muito elevado. Neste novo conceito esta situação deixa de ser um problema, sendo expectável um aumento significativo do *output* da linha de produção quando comparado com o sistema tradicional.

A configuração do sistema implementado fica descrita pelo esquema da Figura 89 onde se pode verificar a posição central da aplicação “Sistema de Controlo”.

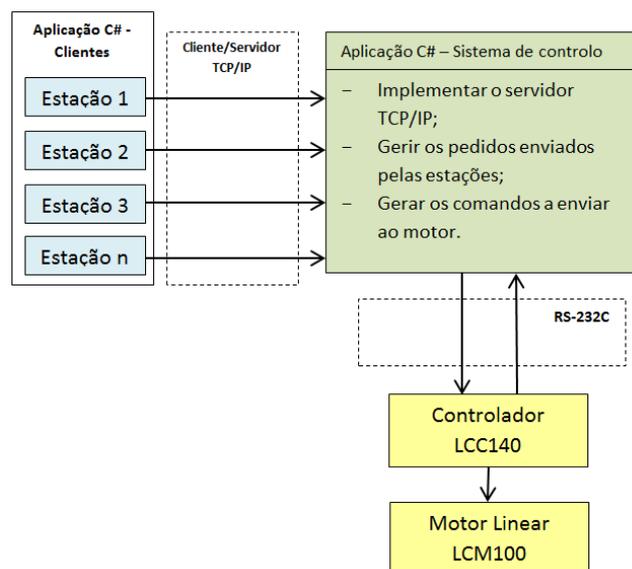


Figura 89 - Diagrama do sistema de controlo desenvolvido

Optou-se pela implementação de duas aplicações distintas. Uma aplicação para simular as estações, onde está implementado o cliente TCP/IP e permite o envio de pedidos, e uma aplicação principal chamada “Sistema de Controlo” onde está englobado o servidor TCP/IP para receber os pedidos das estações, converter esses pedidos em comandos a enviar ao motor linear implementando ainda a comunicação RS-232C que possibilita esse envio.

Para a comunicação entre as várias estações e o sistema de controlo, e ao encontro das metodologias já implementadas pela Preh Portugal nas suas linhas de montagem, desenvolveu-se um sistema cliente/servidor TCP/IP. A aplicação “Sistema de Controlo” apresenta-se como servidor TCP/IP e vai aceitar múltiplas conexões de clientes TCP/IP que na prática vão ser as diferentes estações da linha de produção.

A comunicação entre o sistema de controlo e o motor linear, mais concretamente com o primeiro controlador LCC140 do motor linear, será implementada com recurso à porta serie e ao protocolo RS-232C.

A aplicação “sistema de controlo” terá que ser capaz de, em simultâneo:

- Implementar a comunicação TCP do lado do servidor para receber e armazenar os pedidos provenientes das estações e estendê-los ao sistema de controlo;
- Tratar esses pedidos da forma mais eficiente, gerando os comandos correspondentes a enviar ao controlador;
- Implementar a comunicação via porta série entre o sistema de controlo e o controlador LCC140.

Uma vez que esta aplicação necessita de ter diversas tarefas em execução em simultâneo, o passo mais lógico foi o recurso a *threads*. Cada uma destas *threads* vai executar trechos de código garantindo o melhor desempenho do programa. Desta forma o programa pode ser dividido em 5 *threads* distintas.

- Uma *thread* por cada cliente ligado ao servidor, que vai receber os pedidos desse cliente, verificar se são validos e, caso afirmativo, inseri-los na “lista de pedidos”;
- Uma *thread* que está sempre disponível para receber uma ligação de um novo cliente;
- Uma *thread* para fazer a gestão dos pedidos, isto é, fazer a reorganização dos pedidos dentro da lista de pedidos tendo em vista a melhor eficácia na resposta a todos os pedidos;
- Uma *thread* para tratar dos pedidos que estão em lista de espera e gerar os comandos a enviar ao motor;

- Uma *thread* para tratar da comunicação entre o controlador e o sistema de controlo via porta série;

5.2.2 Aplicação Cliente TCP e protocolo definido

Foi desenvolvida uma aplicação “Cliente” para simular as estações e os pedidos que estas vão enviar à aplicação sistema de controlo. A comunicação entre cada aplicação Cliente e a aplicação sistema de controlo vai recorrer a um *socket* TCP/IP. Esta aplicação, apesar de poder correr na mesma máquina que a aplicação servidor, está em processos completamente distintos. De salientar que o programa está preparado para aceitar múltiplos clientes, podendo existir várias aplicações destas ligadas ao servidor e a enviar pedidos. Isto imita a situação real onde as várias estações da linha de produção enviam pedidos. A interface das diversas aplicações Cliente está ilustrada na Figura 90.

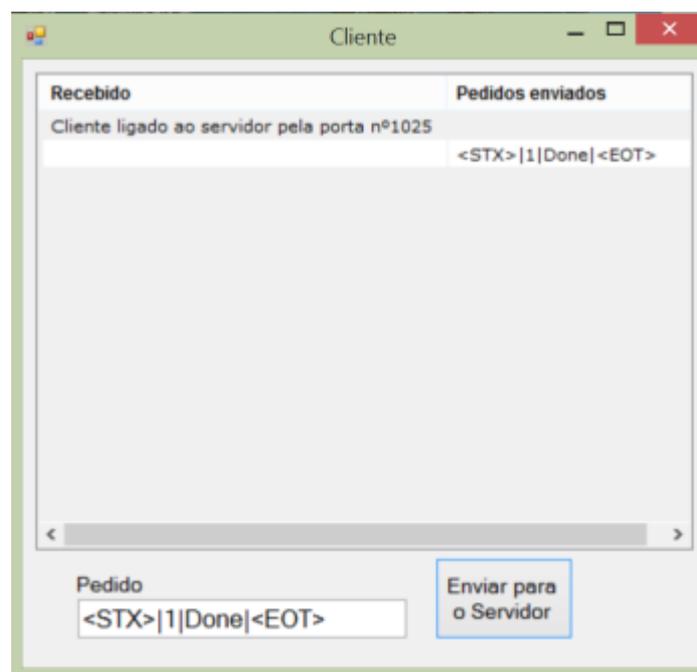


Figura 90 - Interface da aplicação cliente

5.2.2.1 Protocolo definido

Para o protocolo de comunicação entre os diversos clientes e o servidor definiu-se que cada cliente enviará pedidos onde constará a estação de origem do pedido, seguida da informação se já terminou o trabalho (*Done*) ou está em avaria (*Error*). Por exemplo no pedido “<STX>|1|Done|<EOT>” ilustrado na Figura 90 significa que a estação 1 terminou o trabalho e está pronta para libertar a peça para a estação seguinte. O pedido é enviado do cliente através

do *socket* TCP até ao servidor que vai receber informação e passá-la ao sistema de controlo onde está inserido. O recurso aos bytes “STX” no início de transmissão e “EOT” no fim da transmissão possibilita a interpretação das mensagens por parte do servidor.

5.2.3 Aplicação “Sistema de Controlo”

Uma vez que as estações são um elemento fundamental para a aplicação “Sistema de Controlo”, estas são representadas por uma estrutura com três campos e estão dispostas num *array* de estruturas. Os três campos são o estado, a posição e uma estrutura peça [Figura 91].

```
public struct Estacao
{
    public string posicao;
    public string estado;
    public Peca peca;
}

Estacao[] Estacoes;
```

Figura 91 - Estrutura das estações

Como cada estação real apresenta um comprimento de 600mm, e seguindo o princípio de linha de produção da Figura 88, consegue-se distribuir até um máximo de sete estações ao longo de um troço de motor linear que vai de 0 milímetros até 1920 milímetros (3 módulos e LCM100 de 640mm cada). Na Figura 92 vê-se a definição do valor do campo “posição” de cada uma das sete estruturas “Estacao”. Cada valor representa a posição real, em milímetros, no motor linear, correspondente ao ponto central de cada uma das oito estações.

```
Estacoes[0].posicao = "130.000";
Estacoes[1].posicao = "320.000";
Estacoes[2].posicao = "320.000";
Estacoes[3].posicao = "960.000";
Estacoes[4].posicao = "960.000";
Estacoes[5].posicao = "1600.000";
Estacoes[6].posicao = "1600.000";
Estacoes[7].posicao = "1790.000";
```

Figura 92 - Distribuição das estações ao longo do motor

De salientar que existem estações com a mesma posição. Isto é porque, como é ilustrado na Figura 88, algumas delas partilham a mesma posição relativa uma vez que uma fica do lado direito e outra do lado esquerdo do motor. As estações 0 e 7 são estações que apresentam apenas a função de inserir e recolher peças na e da linha de produção. Estão dispostas nas duas extremidades do motor linear. Esta abordagem possibilita que o número das

estações presente no protocolo dos pedidos dos clientes possa ser internamente associado, pelo sistema de controlo, a um valor em milímetros no motor linear.

O segundo campo representa o estado de cada estação. Quando um pedido é tratado, a estação que recebe a peça é colocada no estado "Busy". Quando essa estação terminar o trabalho, vai enviar um pedido com o estado "Done". Quando esse pedido for tratado a peça vai ser recolhida e entregue na estação seguinte e só aqui é que o sistema de controlo volta a colocar a estação com estado "Ready". Até lá os pedidos que apresentarem esta estação como destino não podem ser executados. Isto imita a situação real, no caso de uma estação estar a executar um trabalho e apenas ficar disponível para receber uma nova peça quando a peça for terminada e enviada.

Na aplicação desenvolvida a alteração do estado das estações é demonstrada com a alteração da cor do bloco representante de cada estação. Na Figura 113 pode-se observar as estações 1 e 2, que receberam uma peça, mudaram a sua cor representando o estado "Busy".

O terceiro campo na estrutura "Estacao" é na verdade uma outra estrutura chamada "peca" Figura 93.

```
public struct Peca
{
    public int id_peca;
    public Sequencia[] sequencia;
}
```

Figura 93 - Estrutura "peca"

É através do campo "id_peca" da estrutura "peca" que é possível identificar cada peça que entra na linha de produção, estação 0, até ao momento que ela sai, estação 7. Através do segundo campo, que é na verdade uma outra estrutura, é possível atualizar a sequência de cada peça e garantir que a peça passa por todas as estações antes de sair da linha de produção. O segundo campo é então uma estrutura do tipo "Sequencia" [Figura 94].

```
public struct Sequencia
{
    public int estacao;
    public bool saltar;
    public bool executado;
}
```

Figura 94 - Estrutura "Sequencia"

Por sua vez esta estrutura apresenta três campos. O primeiro campo serve para indicar o número da estação na sequência de estações. O segundo serve para informar se, no caso de a estação estar no estado “busy”, se pode ser ultrapassada na sequência ou não. O terceiro campo serve para informar se a peça já passou pela estação em questão ou não.

Com a estrutura “sequencia” dentro da estrutura “peca” que por sua vez está dentro da estrutura “Estacao” permite que o sistema de controlo saiba em que estação está cada peça e que estações lhe faltam percorrer e com isto decidir qual a forma mais eficiente o caminho a percorrer por cada peça.

Uma vez que informação sobre os *sliders* é também fundamental para um sistema de controlo eficiente, foi criado um *array* de estruturas onde em cada estrutura vai constar o número, a posição e o estado de cada *slider* [Figura 95].

```
public struct Slider
{
    public int numero;
    public string posicao;
    public string estado;
}

Slider[] Sliders;
```

Figura 95 - Estrutura dos slider

Com a informação presente nestes três campos, o sistema vai sempre saber qual é a posição de cada *slider* e se está livre ou não, permitindo escolher sempre o *slider* que vai executar o pedido mais rapidamente.

5.2.3.1 Servidor TCP

Na aplicação “Sistema de Controlo” existe sempre uma *thread* à espera de novos clientes. Quando surge um cliente, que corresponde a uma estação, essa *thread* passa a ser uma ligação cliente /servidor e é criada uma nova *thread* para esperar por um novo cliente. Desta forma é conseguido que múltiplos clientes se possam ligar à aplicação “Sistema de Controlo”.

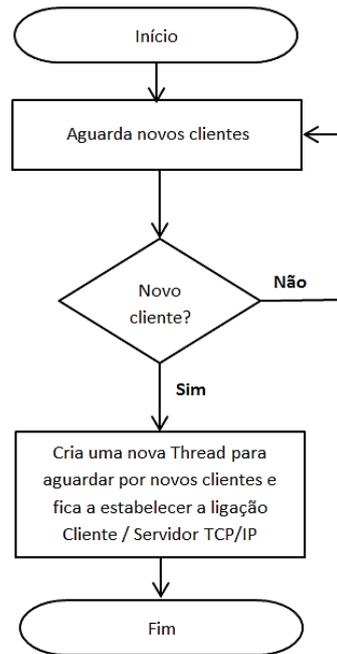


Figura 96 - Fluxograma do algoritmo para estabelecer ligações entre os clientes e o servidor

No sistema de controlo, os pedidos enviados pelas estações são armazenados numa lista de pedidos onde cada pedido é uma estrutura e onde está definida a estação de origem e o estado [Figura 97].

```
public struct Pedido
{
    public int id_estacao;
    public string estado;
}

Queue<Pedido> Pedidos;
```

Figura 97 - Estrutura de pedidos

Os pedidos das estações vão chegar através da ligação TCP/IP e a lista de pedidos vai ser preenchida como ilustrado na Figura 98.

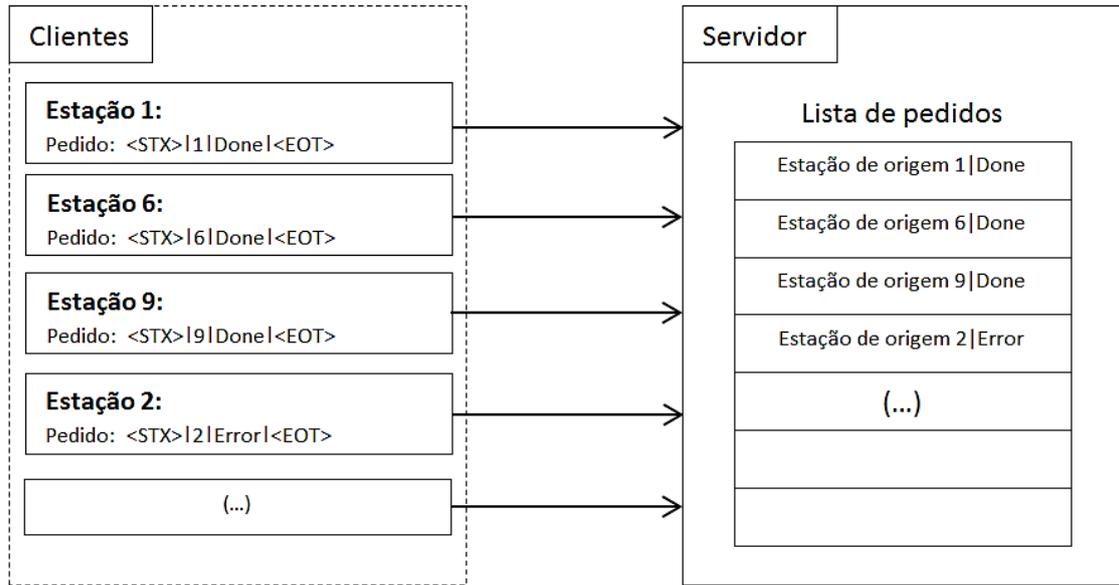


Figura 98 - Preenchimento da lista de pedidos

Na Figura 99 está o fluxograma do algoritmo responsável pelo tratamento dos pedidos à medida que vão chegando ao servidor. Os campos dos pedidos são selecionados e copiados para os campos respetivos na estrutura “Pedido”. É também possível verificar como o algoritmo procede à eliminação de pedidos que não cumpram o protocolo de comunicação estabelecido entre os clientes e o servidor.

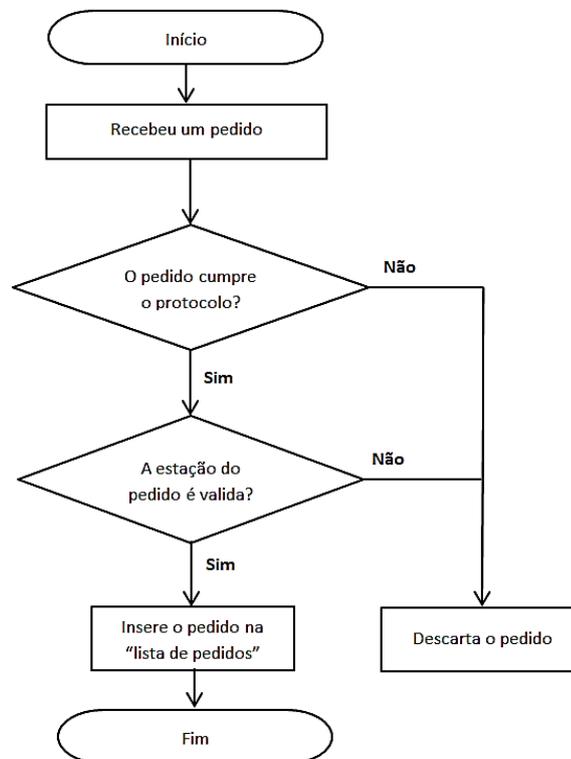


Figura 99 - Fluxograma do algoritmo de validação de pedidos

Desta forma apenas pedidos válidos é que são inseridos na “lista de pedidos”.

5.2.3.2 Gestão da lista de pedidos

A segunda *thread* da aplicação é responsável pela reorganização da “lista de pedidos” procurando garantir ao sistema uma maior capacidade de produção de peças. Esta abordagem permite que este algoritmo possa ser melhorado e/ou alterado à medida que o conhecimento do funcionamento do sistema real vai aumentando, sem que o resto do programa seja alterado.

O fluxograma da Figura 100 descreve o algoritmo para a ordenação da lista de pedidos para que a resposta a todos os pedidos seja a mais eficaz possível.

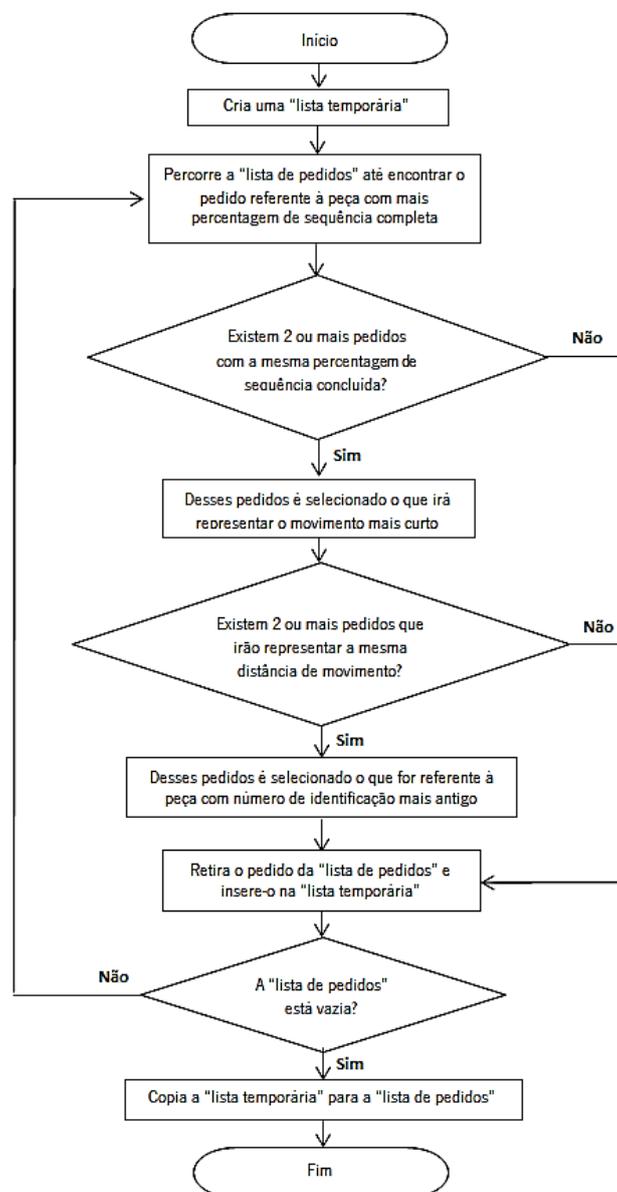


Figura 100 - Fluxograma do algoritmo de gestão da lista de pedidos

Quando o programa está a executar esta *thread*, é garantido que a *thread* que responde aos pedidos não possa ser executada, impedindo assim o acesso à “lista de pedidos” enquanto esta está a ser reorganizada.

Inicialmente é criada uma nova lista vazia para onde os pedidos vão ser copiados, ficando dispostos pela ordem pretendida. Criada a nova lista, o programa vai percorrer a lista atual e verificar qual é o pedido que se refere a uma peça com a maior percentagem de sequência concluída.

Para peças com a mesma percentagem de sequência completa, é dada prioridade a pedidos que representem movimentos mais curtos no motor linear.

Se ainda existirem pedidos indiferenciados, o algoritmo acaba por dar prioridade ao pedido que se refira a uma peça com o número de identificação mais baixo, dando assim prioridade às peças que entraram primeiro na linha de produção.

À medida que estas condições vão sendo cumpridas, os pedidos vão sendo copiados para a nova lista, ficando esta com os pedidos ordenados, tendo em conta a forma mais eficaz de os atender.

5.2.3.3 Responder a um pedido

A terceira *thread* da aplicação é responsável por responder aos pedidos da lista. Antes de retirar qualquer pedido o programa verifica a “lista de pedidos” está vazia e se a comunicação RS-232C com o controlador LCC140 está em funcionamento [Figura 101].

```
if (Pedidos.Count == 0 || serialPort1.IsOpen == false) return;
```

Figura 101 - Verifica se existem pedidos e se a comunicação serie está aberta

Como a lista de pedidos está a ser organizada tendo em conta a melhor eficiência do sistema, para esta *thread* a lista de pedidos funciona como uma *FIFO* (first in first out). É retirado o primeiro pedido da lista de pedidos e copiado para uma nova estrutura [Figura 102].

```
Pedido pedido = Pedidos.Dequeue();
```

Figura 102 - Cópia do primeiro pedido da lista de pedidos

O fluxograma da Figura 103 descreve a execução de um pedido retirado da “lista de pedidos”.

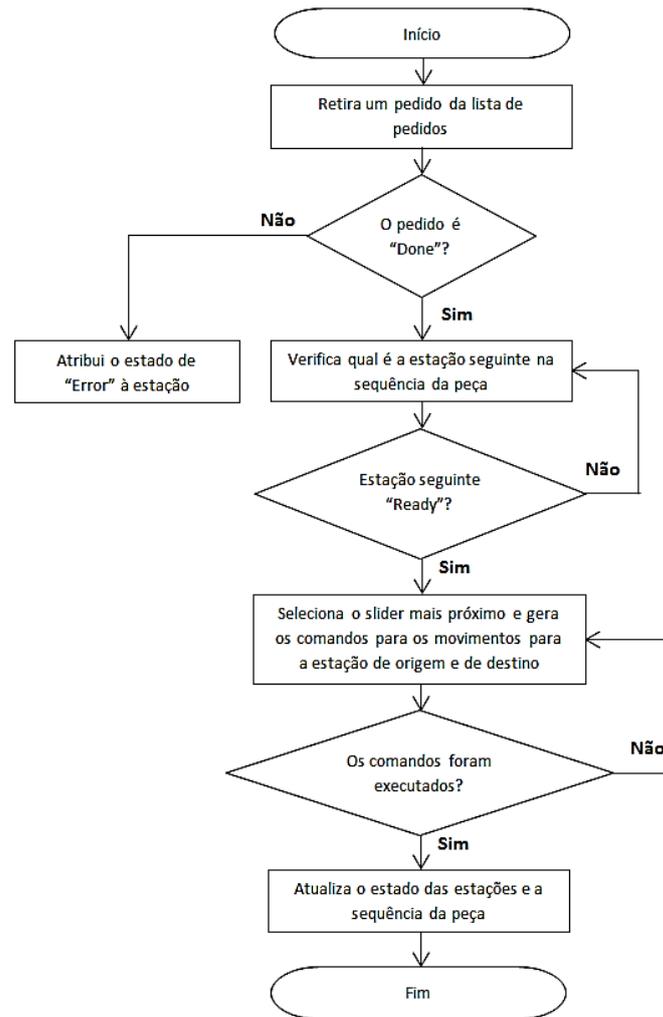


Figura 103 - Fluxograma do algoritmo para responder a um pedido

O programa começa por verificar se o estado do pedido é “Done” uma vez que são os estados que necessitam do movimento do motor.

Se não for “Done” quer dizer que é “Error” então o programa coloca a estação no estado de erro, faz as devidas atualizações aos gráficos e passa para o pedido seguinte.

Se for “Done” o programa vai pesquisar a primeira estação na sequência onde a peça ainda não tenha passado e em seguida verifica se essa estação está “Ready”, isto é, se está pronta para receber uma peça. Caso não esteja, pergunta se pode ignorar essa estação e avançar para a estação seguinte na sequência [Figura 104]. Esta condição simula a situação real onde o trabalho de uma estação não pode ser iniciado sem que o trabalho de uma estação anterior tenha sido executado.

```

if (pedido.estado == "Done")
{
    int i;
    for (i = 0; i < 8; i++)
        if (!Estacoes[pedido.id_estacao].peca.sequencia[i].executado && (i != pedido.id_estacao))
            if (Estacoes[i].estado == "Ready")

```

Figura 104 - Verifica se o estado do pedido é "Done"

Apenas quando se responde ao primeiro pedido é que é necessário perguntar ao controlador a posição dos dois *sliders* como ilustrado na Figura 105. Depois de ter respondido ao primeiro pedido as posições dos dois *sliders* vão ser sempre conhecidas uma vez que estes, no final de cada movimento, vão ficar na posição da estação de destino da peça.

```

int k;
for (k = 1; k < 3; k++)
    if (Sliders[k-1].estado == "Ready")
    {
        serialPort1.WriteLine("@?SLDR POS " + k + "\r");
        Sliders[k-1].posicao = serialPort1.ReadLine();
    }

```

Figura 105 - Pergunta ao controlador a posição do slider 1

Em cada resposta a um pedido é analisada a posição da estação de origem e feita uma comparação para saber qual o *slider* que está mais perto. De seguida define-se o *slider* mais próximo para a execução do movimento, ativa-se o motor e envia-se o comando que vai executar o movimento para a posição de origem do pedido a fim de recolher a peça. [Figura 106]

```

serialPort1.WriteLine("@SLDR NO 1 \r");
serialPort1.WriteLine("@SRVO 1 \r");
serialPort1.WriteLine("@MOVD " + Estacoes[pedido.id_estacao].posicao + ",100 \r");

```

Figura 106 - Comandos para seleção e movimentação do slider para a estação de origem

Recebida a resposta "OK" do controlador LCC140, que informa que o *slider* executou o movimento anterior corretamente, e se encontra na posição da estação de origem do pedido pronto para recolher a peça, simula-se o tempo relativo ao movimento do braço robótico transferir a peça da estação para o slider [Figura 107].

```

serialPort1.WriteLine("@TIMR 300 \r");

```

Figura 107 – Comando para manter o slider parado durante 3 segundos

Depois de decorrido este tempo, o controlador envia um novo "OK" a informar que cumpriu o comando anterior com sucesso. Depois de ser recebida essa confirmação é enviado o comando para o *slider* se deslocar com a peça para a estação de destino fazendo também a simulação do

tempo para o braço robótico retirar a peça do *slider* para a estação de destino da peça [Figura 108].

```
serialPort1.WriteLine("@MOVD " + Estacoes[i].posicao + ",100 \r");  
serialPort1.WriteLine("@TIMR 500 \r");
```

Figura 108 - Movimento para a estação destino

No final muda-se o estado das estações. A estação, que enviou a peça, muda o estado de “Busy” para “Ready” e a estação, que recebeu a peça, muda o estado de “Ready” para “Busy”. A sequência da peça é atualizada, isto é, a estação de origem é sinalizada como executada na sequência da peça. Finalmente atribui-se a posição da estação de destino ao *slider* que entregou a peça e desta forma depois da primeira entrega de peça o sistema sabe sempre a posição de cada *slider* o que permite uma diminuição no tempo de execução do programa uma vez que este não precisa de voltar a perguntar ao controlador LCC140 qual a posição dos *sliders*. [Figura 109].

```
Estacoes[pedido.id_estacao].estado = "Ready";  
Estacoes[i].estado = "Busy";  
Estacoes[pedido.id_estacao].peca.sequencia[pedido.id_estacao].executado = true;  
Sliders[1].posicao = Estacoes[i].posicao;
```

Figura 109 – Atualização dos estados e da sequência

Uma estação no estado “Busy” significa que essa estação está a executar trabalho numa peça. Uma estação no estado “Ready” significa que está pronta para receber uma peça. A atualização dos estados no fim de responder a um pedido permite criar uma condição em que se todas as estações que faltam percorrer a uma peça estiverem no estado “Busy” e surgir um pedido para movimentar essa peça, esse pedido não é executado e volta a ser inserido na lista de pedidos a aguardar até que uma das estações mude o seu estado para “Ready”.

O estado das estações será também um fator muito importante para melhorar a gestão da lista de pedidos. Sabendo os tempos que cada estação demora a executar o trabalho em cada peça, o sistema de controlo será capaz de definir a sequência de atendimento dos pedidos que responderá a todos mais rapidamente.

As respostas do LCC140 aos comandos enviados é também uma informação importante para o sistema de controlo. Se o comando estiver correto e for executado a resposta do LCC140 é invariavelmente “OK”. Esta condição de comando bem interpretado é verificada cada vez que um comando é enviado para o LCC140 como demonstra a Figura 110.

```

serialPort1.WriteLine("@SRVO 1 \r");

if (serialPort1.ReadLine().Contains("OK"))
{
    (...)
}

```

Figura 110 - Verificação da execução do comando

Se o comando estiver errado, ou por algum motivo não puder ser executado, o LCC140 disponibiliza um conjunto de respostas que ajudam a identificar o problema. Por exemplo, se o comando responsável pelo movimento do *slider* [Figura 108] não for executado, em vez do tradicional “OK” o LCC140 vai enviar “NG \r\n soft limit over”. Este erro indica que os limites impostos nos parâmetros de inicialização [Figura 64] foram ultrapassados e como consequência, o movimento não pode ser executado.

Estes *outputs* do LCC140 foram muito úteis na fase inicial, uma vez que ajudavam a descobrir problemas no programa de uma forma mais eficiente. À medida que o programa foi evoluindo, tornando-se mais robusto e à prova de erros, os *outputs* do controlador são interpretados e, em caso de respostas “NG”, o programa automaticamente gera novos comandos de forma a conseguir-se a execução do movimento pretendido.

5.2.3.4 Comunicação entre a aplicação “Sistema de Controlo” e o Motor Linear

Com a substituição do PLC por uma aplicação em C# com comunicação por RS-232C com o motor, foi necessário, antes de mais, estabelecer a comunicação entre a aplicação C# e o motor. Essa tarefa passa por configurar os parâmetros da comunicação entre o computador, onde a aplicação “sistema de controlo” vai funcionar, e o primeiro controlador LCC140 do motor linear. Na Figura 111 estão ilustrados os parâmetros da comunicação RS232 do LCC140.

Parameter	Set value
Baud rate	9600 bps
Data bit length	8 bits
Stop bit length	1 bit
Parity check	Yes
Parity designation	Odd number parity (ODD)
Control method (X parameter)	XON/XOFF Software control method (enabled)
Communication method	Full duplex
Synchronization method	Start-stop synchronization
Return key transmission processing	CR code
CR code receiving processing	When receiving CR/LF: Return+ line feed When receiving CR: Return

Figura 111 - Parâmetros da comunicação RS232 com o LCC140

A aplicação foi desenvolvida no *software* Microsoft Visual Studio. A linguagem C#, apresenta um bloco de código (`serialPort`) que pré-estabelece a comunicação série sendo só necessário inserir os parâmetros da comunicação nesse bloco de código como ilustra a Figura 112.

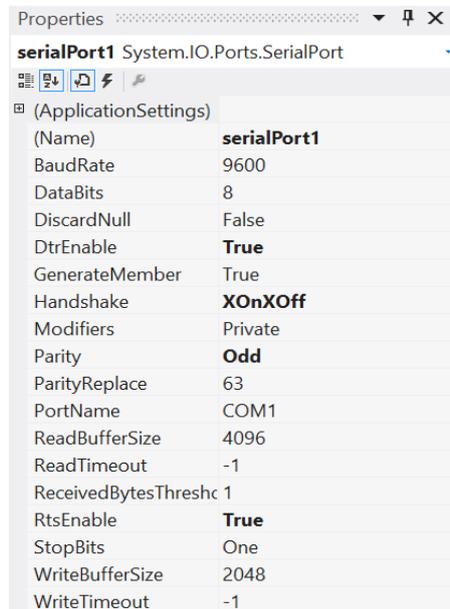


Figura 112 - Configuração da porta serie na aplicação C#

De ressaltar que os parâmetros DTR e RTS têm que estar ativos. No manual do LCC140 não é feita nenhuma referência a este facto. Depois de implementada, a comunicação série foi testada com o auxílio de uma caixa de texto, onde foram escritos comandos e enviados para o controlador LCC140. Pelas respostas do controlador aos comandos enviados, foi possível comprovar o bom funcionamento da comunicação por RS232.

5.2.3.5 Interface da aplicação “Sistema de Controlo”

A aplicação “Sistema de Controlo” apresenta a *interface* ilustrada na Figura 113.

Na secção “Porta Serie” está a configuração e ativação da porta série para a comunicação entre a aplicação e o controlador LCC140. Tem duas caixas de texto para o envio de comandos de forma manual e receção das respetivas respostas.

Na secção “Movimento Manual” é permitido ao utilizador o movimento de qualquer um dos *sliders* para qualquer uma das estações.

Na secção “Definição dos parâmetros” é possível ao utilizador a alteração dos valores dos parâmetros do motor que se revelam mais importantes para o sistema de controlo

construído. Os parâmetros “Aceleração” e “Desaceleração” são definidos em percentagem. Os parâmetros “Limite inferior” e “Limite superior” são valores, em milímetros, que delimitam a área de trabalho dos *sliders* no motor linear. O parâmetro “Peso da carga” é onde o utilizador define o peso máximo da peça a ser transportada e o parâmetro “Velocidade” é o que limita a velocidade do motor [PRM200 indicado na equação (4.3.1)].

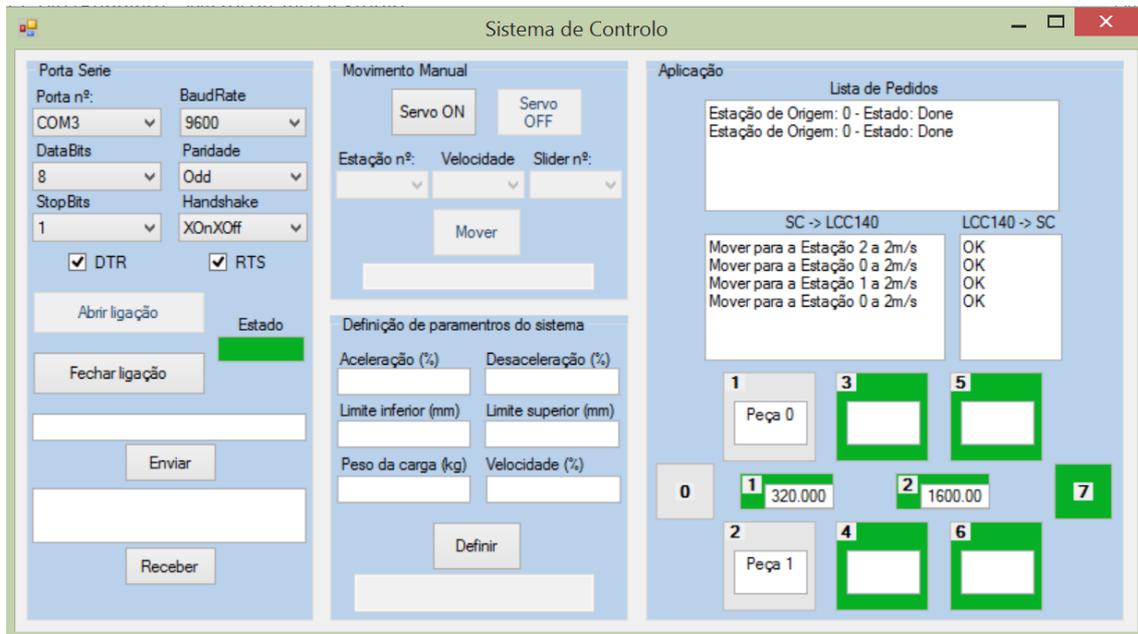


Figura 113 - Interface da aplicação do sistema de controlo

Na secção “Aplicação”, a caixa de texto com o nome “Lista de Pedidos” serve para indicar os pedidos que já foram ou estão a ser atendidos. Abaixo da lista de pedidos há duas caixas de texto (SC -> LCC140 e LCC140 -> SC) que têm como principal função monitorizar a comunicação entre o sistema de controlo e o LCC140 e vice-versa revelando-se uma importante ajuda para detetar problemas na execução dos pedidos. Na parte inferior desta secção é disponibilizado um gráfico que representa a disposição e o estado das estações e dos *sliders*. A cor verde indica que a estação está livre para receber peças e a cor cinzenta indica que a estação está ocupada a trabalhar numa peça. Caso a estação sofra algum problema e ficar em avaria, a respetiva caixa fica a piscar a cor verde. Todos estes estados são atualizados através dos pedidos recebidos das estações. Dentro de cada caixa das estações existe ainda um pequeno campo onde surge a informação da peça que está na estação, nomeadamente o número da peça e a sequência que esta peça já completou.

Analisando a Figura 113 com maior detalhe, verifica-se que o primeiro pedido é da estação zero a informar que terminou o trabalho na peça. O sistema de controlo, para atender

esse pedido, analisou a sequência da peça e verificou que a próxima estação na sequência da peça com o estado “Ready” é a estação 1. Enviou o *slider* para a estação 0 e ficou à espera da resposta “OK” do controlador, que indica a chegada do slider à estação 0. Depois de recebido o “OK” o sistema de controlo envia o *slider* para a estação 1 e espera pelo “OK” do controlador concluindo assim a resposta ao primeiro pedido. O segundo pedido é novamente da estação 0 a indicar que terminou o trabalho numa nova peça. Ao analisar a sequência da nova peça, o sistema de controlo, vai verificar que a próxima estação livre não é a estação 1, uma vez que ainda está ocupada com a peça do primeiro pedido, mas sim a estação 2. Vai então gerar os comandos para os movimentos, até á estação 0 para recolher a nova peça, e até à estação 2 para a entregar. Tanto a estação 1 como a estação 2, apresentam a cor cinza indicando o estado “Busy”, isto é, as estações estão a executar trabalho numa peça. De ressaltar que nenhuma peça consegue sair do sistema sem cumprir toda a sequência, podendo, no entanto, executá-la de forma completamente arbitrária.

Capítulo 6 - Resultados Obtidos e Discussão

Neste capítulo serão apresentados os resultados alcançados visando o funcionamento de todas as componentes implementadas ao longo deste projeto. Foi feita uma comparação direta entre o sistema construído e um dos sistemas atualmente em funcionamento nas linhas de montagem da empresa. Os resultados dessa comparação vão ser apresentados e analisados em detalhe ao longo deste capítulo.

6.1 Transportador TS4plus

Um dos transportadores usados pela empresa Preh Portugal nas linhas de montagem e cujo projeto desenvolvido ambiciona substituir, é o transportador TS4plus comercializado pela Rexroth. Tal como a maioria dos transportadores industriais comercializados atualmente, apresenta uma construção modular. A empresa usa módulos retos de 600mm e módulos em curva de 90° para construir linhas de montagem tendo sempre em consideração a utilização mais eficaz possível do espaço físico.



Figura 114 - Transportador TS4plus

Cada um dos módulos apresenta um motor rotativo trifásico acoplado à estrutura mecânica que constitui o módulo. O movimento linear necessário para o transporte das peças é obtido por duas correias paralelas a circular na base do módulo. A paleta de transporte das peças, ao estar em contacto com as correias vai circular ao longo de todo o percurso composto pelos módulos. O movimento linear das correias é conseguido através do movimento do motor em conjunto com um conversor de movimento, uma vez que para economizar espaço, o motor é colocado a 90° em relação ao movimento linear das correias. [Figura 115]

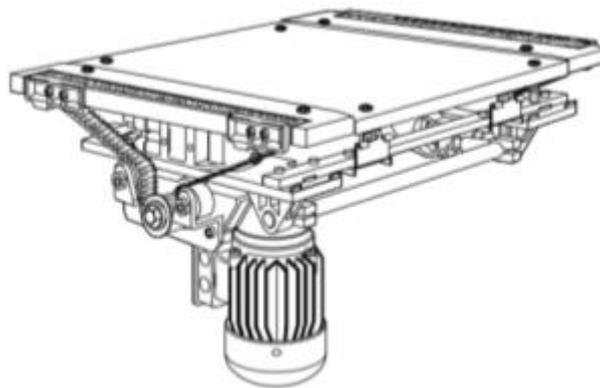


Figura 115 - Detalhe ilustrativo do sistema de propulsão do TS4plus

Na Figura 116 está ilustrado um dos módulos do TS4plus onde se pode visualizar as duas correias paralelas, que conferem o movimento às paletes que transportam as peças, o motor montado verticalmente na parte inferior do módulo e a transmissão que converte o movimento rotativo do motor em movimento linear.



Figura 116 – Módulo TS4plus em funcionamento na Preh Portugal

O preço associado a cada um destes módulos é de aproximadamente 1600€. Cada um dos módulos tem um motor trifásico de 100W de potência.

Estes motores permitem ao sistema apresentar uma velocidade de translação das paletes de 18m/min ou 0,3m/s. Na Tabela 14 estão assinaladas as principais características do sistema.

Tabela 14 - Características do sistema TS4plus

Características do sistema	TS4plus
Força máxima	820N
Velocidade do motor	1400RPM
Velocidade linear máxima	0,3m/s
Aceleração	4G
Precisão do posicionamento	±0,15mm
Comprimento máximo do sistema	20m
Dimensões da <i>Pallet</i>	400mm*400mm
Peso do mover	8,6kg
Temperatura de operação	0 a 50°C
Certificado	CE

Como este sistema está desenhado para equipar linhas de montagem com o tradicional movimento sequencial, então para uma linha com capacidade se servir 6 estações de trabalho, são necessários pelo menos 12 módulos deste transportador.

estações. O tempo das peças em cada estação, não é relevante para a comparação de resultados, uma vez que as estações serão as mesmas nos dois sistemas.

No sistema que foi desenvolvido uma peça não percorre sempre a mesma distância, uma vez que a sua sequência pode variar, mas é seguro afirmar que nunca percorrerá mais do que 5 metros (sequência com maior distancia percorrida). A uma velocidade de 3m/s cada peça demora no máximo 1,67 segundos a percorrer toda a linha de produção.

Com a ajuda de uma pinça amperimétrica foram feitas medições de consumo com os dois sistemas em funcionamento. Cada motor presente em cada um dos 12 módulos é trifásico, está ligado em estrela e apresenta um consumo de 0,5A por fase. O consumo elétrico de cada módulo é dado por:

$$P = U_f \times I_f \times \cos\varphi \quad 6.2.1$$

$$P = 3 \times 230 \times 0,5 \times 0,6 = 207W$$

Assim cada módulo apresenta um consumo de 207W e como existem 12 módulos o consumo total da montagem é de 2484W.

Como a empresa tem atualmente 3 turnos de trabalho, é possível afirmar que o sistema trabalha 24h horas por dia, 6 dias por semana, logo:

$$P = 2,485kW * 24horas * 6dias * 4semanas = 1431,36 kW.h$$

O preço praticado pela distribuidora de energia para empresas, em que a tensão entre fases tenha valor eficaz superior a 1kV e igual ou inferior a 45kV, divide-se em quatro períodos horários: horas cheias, de ponta, de vazio normal e de supervazio. Cada um destes quatro períodos subdivide-se em três opções tarifárias: Tarifa de curtas utilizações, de médias utilizações e de longas utilizações. [31] Por ser complexo fazer o cálculo tendo em conta todas estas variáveis, optou-se por utilizar o preço *standard* por kW.h de 0,1635€ sem iva.

$$Custo = 1431,36 kW.h * 0,1635€ = 234,03€$$

Como o preço, o sistema TS4plus montado na empresa tem um custo elétrico mensal de 234,03€.

O sistema desenvolvido apresenta 3 módulos Yamaha LCM100. Os módulos são monofásicos, tendo sido medida a corrente na fase que os alimenta enquanto executavam movimentos à

velocidade de 3m/s. Foi medido um consumo de 2,4A, o que significa que cada módulo consome 0,8A.

Realizando os cálculos mas agora para o sistema desenvolvido:

$$P = 230 \times 2,4 \times 0,6 = 331,2W$$

$$P.h = 0,3312kW * 24horas * 6dias * 4semanas = 190,77 kW.h$$

$$Custo = 190,77 kW.h * 0,1635€ = 31,19€$$

Desta forma o sistema desenvolvido irá representar um custo elétrico mensal de 31,19€.

Nas empresas em claro crescimento, o espaço é um bem de extrema importância sendo mais uma variável que diferencia o sistema desenvolvido em relação ao sistema atualmente em funcionamento.

O sistema TS4plus, atualmente a funcionar na Preh Portugal, apresenta a disposição ilustrada na Figura 117 que representa uma área de $2,56m \times 1,9m = 4,864m^2$

O sistema desenvolvido, para servir as mesmas 6 estações, irá representar uma área ocupada de $2m \times 1,5m = 3m^2$.

Seja qual for a natureza do projeto, os custos associados à aquisição e desenvolvimento tem um papel preponderante nas decisões administrativas e, como tal, será também feita uma comparação dos dois sistemas neste atributo.

Para o sistema ST4plus como tem 12 módulos e cada um dos módulos custa 1600€, o preço total do sistema para servir 6 estações é de 19200€.

Para o sistema desenvolvido como tem 3 módulos e cada módulo custa 10165€, o preço total do sistema desenvolvido é de 30495€.

A manutenção necessária de cada um dos sistemas, apesar de não ser uma variável quantificável, é comparativa dos dois sistemas.

O sistema TS4plus apresenta um ponto de avaria associado ao desgaste das correias que garantem o movimento linear do transportador. Essas correias têm então que ser substituídas com alguma regularidade. A transmissão que desloca o movimento rotativo do motor em 90° também necessita de manutenções e reparações regulares.

O sistema desenvolvido, graças à tecnologia de motores lineares não apresenta contactos que representem grande fadiga mecânica. O único contacto físico existente é entre os *sliders* e a calha guia e graças ao sistema de rolamentos de baixo atrito a única manutenção recomendada pelo fabricante é lubrificar esse sistema de rolamentos dos *sliders*.

Tabela 15 - Resumo da comparação entre os dois sistemas

	TS4plus	Sistema desenvolvido
Velocidade	0,3m/s	3m/s
Custo elétrico mensal	234,03€	31,19€
Área ocupada	4,864m ²	3m ²
Investimento inicial	19200€	30495€
Manutenção	Média	Baixa

6.3 Discussão de resultados

O novo sistema apresenta uma velocidade que é 10 vezes superior à do sistema que intenta substituir. É este elevado valor de velocidade que permite a aplicação do conceito de distribuidor em detrimento do normal conceito de transportador associado a estes sistemas. Numa linha sequencial seriam retirados poucos dividendos desta velocidade uma vez que só no movimento de estação em estação é que esta velocidade seria usada ficando parado todo o tempo que a peça estivesse a ser trabalhada. No conceito desenvolvido, como existem apenas dois *sliders* a servir as 6 linhas de montagem garante-se que o motor linear tenha uma utilização contínua sendo assim retirado todo o partido da uma das características mais diferenciadoras deste motor.

Outra característica diferenciadora deste sistema é o baixo consumo energético. A tecnologia presente nos motores lineares possibilita que o movimento linear necessário à aplicação seja obtido de forma direta sem a necessidade de adaptação do movimento rotacional em movimento linear e com isso uma redução significativa do consumo elétrico. Quando se realiza a comparação do consumo elétrico dos dois sistemas verifica-se um consumo mensal 7,5 vezes inferior ao sistema que atualmente equipa a linha de produção.

Como já foi referido anteriormente, o espaço físico ocupado pelos equipamentos tem vindo a ganhar importância no contexto de uma indústria cada vez mais competitiva e em

constante expansão. O uso eficiente da área disponível é imperativo e esta é mais uma característica que o sistema desenvolvido se revela vantajoso em relação ao sistema em funcionamento na Preh Portugal. O sistema desenvolvido apresenta uma ocupação de espaço 40% mais eficiente.

Quando uma tecnologia surge no mercado, os valores associados à sua aquisição são normalmente elevados. À medida que a tecnologia se vai vulgarizando e as soluções sendo desenvolvidas por mais empresas, a concorrência terá como consequência a diminuição dos preços. Apesar de ser evidente que o motor linear que equipa a solução desenvolvida apresenta um custo ainda elevado, como a utilização eficiente dos recursos foi um objetivo transversal ao desenvolvimento do projeto, conseguiu-se que a extensão do motor linear fosse a mais pequena possível e com isto o valor de investimento inicial representar um acréscimo de 38% do que o investimento na solução a atualmente em funcionamento.

Apesar do investimento inicial ser elevado a medio/longo prazo esse investimento vai-se justificar uma vez que os ganhos associados à poupança no consumo de energia elétrica, na redução dos custos em manutenção são uma certeza.

Apesar de ainda não existirem valores concretos facilmente se percebe que com o sistema desenvolvido a produção de peças vai aumentar. A velocidade associada ao distribuidor em conjugação com um sistema de controlo “inteligente” a decidir qual a forma mais rápida de atender todos os pedidos das estações vai inevitavelmente traduzir-se num aumento de produção.

Tendo em conta os resultados apresentados pode-se afirmar que o sistema desenvolvido e o novo conceito de linha de produção associado são uma alternativa viável ao sistema atualmente a funcionar na empresa.

Capítulo 7 - Conclusão e Trabalho Futuro

Neste último ponto do trabalho, procura-se concluir esta dissertação, salientando aquelas que parecem serem as características mais vantajosas do sistema desenvolvido e revelar algumas das propostas futuras que foram surgindo, à medida que se foi evoluindo e *know-how* sobre o sistema e os componentes que o constituem foi aumentando.

7.1 Conclusões

Os principais objetivos deste projeto foram cumpridos com sucesso. A realização do estudo de mercado cumpriu a sua função principal permitindo fazer uma escolha informada que satisfaz todas as necessidades impostas para este sistema.

Os resultados obtidos viabilizam a solução, demonstrando que o sistema é fiável, robusto e responde às principais necessidades inicialmente apontadas, como a rapidez, a segurança, a eficiência energética e espacial.

As vantagens técnicas do sistema em relação aos sistemas tradicionais e as vantagens do novo conceito de linha de produção ficaram evidenciadas nos resultados obtidos.

A modularidade do sistema confere-lhe a capacidade de se adaptar não só á situação em estudo mas a um grande número situações industriais onde o transporte de cargas seja necessário.

O objetivo de utilizar o PLC como elemento central do sistema de controlo e através dele controlar todos os sistemas constituintes da linha de produção não foi conseguido pela razão descrita no capítulo 5, contudo a solução encontrada para contornar o problema revelou-se suficiente para testar os sistemas e conceitos desenvolvidos ao longo desta dissertação.

O conceito de linha de produção idealizado foi implementado nas suas funções mais básicas, mas foi suficiente para comprovar a sua aplicabilidade e funcionalidade. Este mesmo conceito abriu portas para uma continuidade de desenvolvimento que vai tornar este projeto, um ponto de partida para um sistema final com enorme potencial e aplicação no mundo industrial.

Concluindo, apesar de, tal como era espectável num trabalho desta natureza, não se ter chegado a uma solução final, o trabalho desenvolvido no âmbito desta dissertação representou uma importante etapa no desenvolvimento do projeto total da empresa, tendo sido validados todos os conceitos de controlo para o sistema final.

7.2 Trabalho Futuro

Num projeto empresarial como este, que tem como objetivo romper com o tradicional, o trabalho futuro representa uma etapa ainda maior do que aquela que foi concluída até este ponto. Com o desenvolvimento deste projeto, foi percorrido um caminho importante que permitiu o assomar de inúmeras possibilidades para a progressão deste projeto.

Na fase de desenvolvimento em que o projeto se encontra, urge converter o sistema de controlo desenvolvido para uma das linguagens do PLC, concluindo assim o que era inicialmente apontado como ponto de conclusão desta dissertação.

É também necessário desenvolver a estrutura mecânica para o motor linear, que apesar de não apresentar um desafio tecnológico, tem um papel muito importante neste projeto, uma vez que para além da elevação necessária ao correto funcionamento do distribuidor providencia a fixação essencial para que o motor linear possa operar com as velocidades máximas permitidas.

O passo seguinte é o desenvolvimento do sistema que irá realizar a transferência das peças entre o distribuidor e as diferentes estações. A opção por braços robóticos é uma certeza, mas é essencial uma escolha ponderada de braços que se adaptem ao sistema e que consigam movimentos rápidos que não comprometam o desempenho. Em paralelo, é necessário o desenvolvimento de um sistema de fixação das peças aos *sliders* e às estações. Deverá ser forte o suficiente para lidar com as elevadas velocidades do motor, e com o trabalho em cada estação. No entanto, deverá também ser flexível o suficiente, para que o tempo do braço robótico fazer a libertação e transferência das peças dos *sliders* para as estações e vice-versa seja o menor possível.

Cumpridas as tarefas anteriormente descritas, o sistema fica em condições de ser poder interligar com as estações e os braços robóticos. Os tempos de trabalho reais de cada estação e os tempos de transferência das peças dos *sliders* para as estações e vice-versa passam a ser confirmados por *inputs* ao PLC, enviados pelas estações e pelos braços robóticos respetivamente. Isto permitirá ao sistema de controlo adaptar-se e conseguir o melhor desempenho, independentemente do tempo que cada estação necessite para executar o trabalho na peça. Na Figura 118 está ilustrado o esquema representativo do sistema de controlo para a linha de produção completa e que a médio prazo a empresa pretende ter ao dispor do departamento de produção.

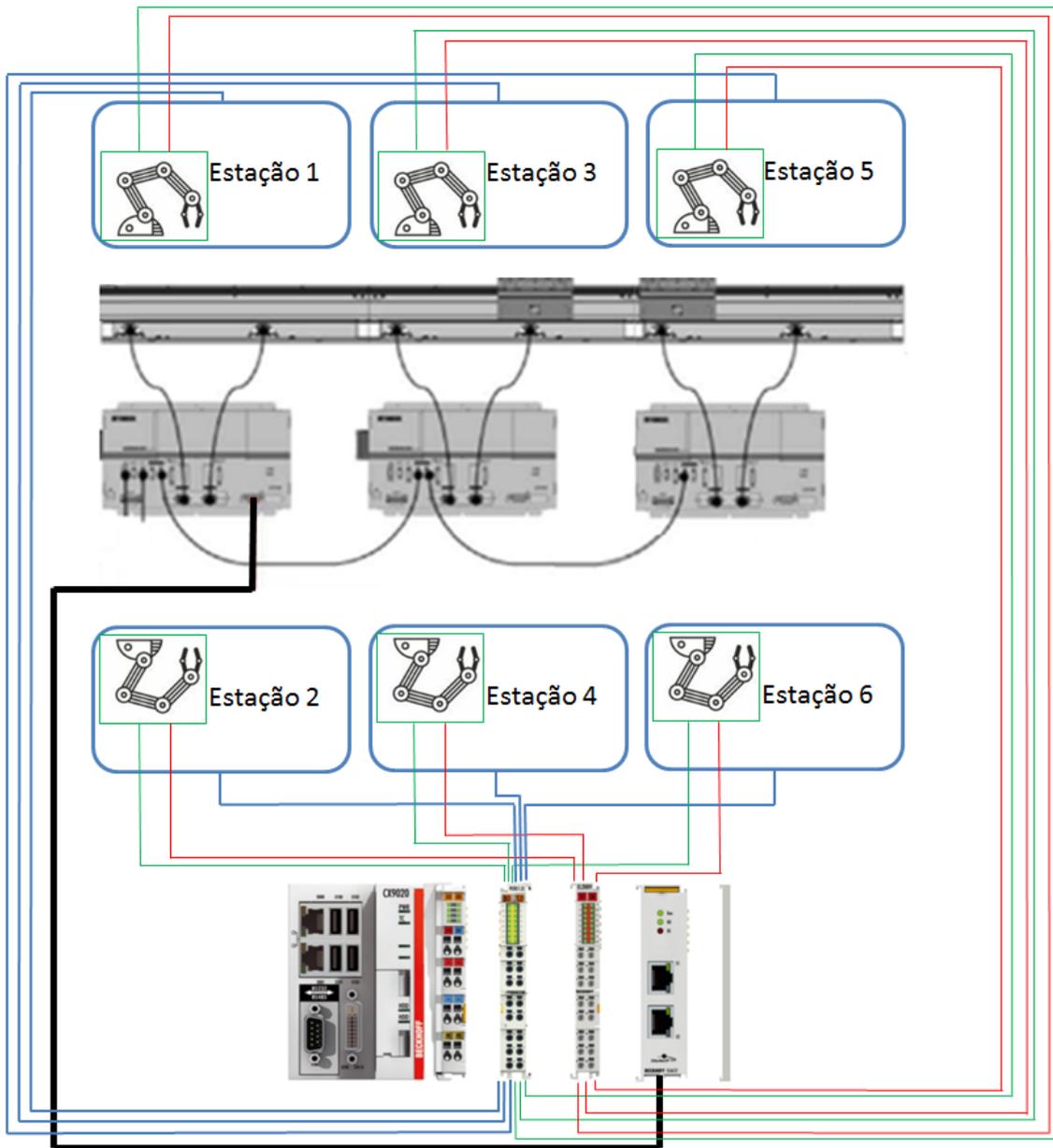


Figura 118 - Sistema de controlo futuro

Referências Bibliográficas

- [1] Thyssenkrupp, “Multi,” [Online]. Available: <https://multi.thyssenkrupp-elavator.com/en/>. [Acedido em 4 janeiro 2016].
- [2] Forbes, “Forbes 400,” Forbes, 2016. [Online]. Available: <http://www.forbes.com/profile/elon-musk/?list=forbes-400>. [Acedido em 06 10 2016].
- [3] L. Yan, Development and Application of the Maglev Transportation System, 2008.
- [4] Nexans, “Nexans Brings energy to life,” [Online]. Available: http://www.nexans.com/eservice/Corporate-en/navigate_221395/Transrapid_Shanghai.html. [Acedido em 24 11 2015].
- [5] M. K. Samantaray, “Maglev Levitation Train,” em *Maglev Levitation Train*, Nalanda, 2015.
- [6] L. Hyung-Woo , K. Ki-Chan e L. Ju, “Review of maglev train technologies,” em *Magnetics*, 2006.
- [7] A. Cassat e M. Jufer, “MAGLEV projects technology aspects and choices,” em *Applied Superconductivity*,, 2002.
- [8] T. Stephens, “Transrapid Maglev System Innovative traintechology,” [Online]. Available: <http://slideplayer.com/slide/10901059/>. [Acedido em 15 12 2015].
- [9] Funini, [Online]. Available: http://funini.com/train/nagoya/nagoya_misc/linimo100/index.html.en. [Acedido em 24 11 2015].
- [10] B. Hesse, “Digital Trends,” 13 agosto 2015. [Online]. Available: <http://www.digitaltrends.com/cool-tech/fastest-train-in-the-world/#/3>. [Acedido em 23 novembro 2015].
- [11] Económico, “Económico Digital,” 14 maio 2016. [Online]. Available: http://economico.sapo.pt/noticias/hyperloop-o-comboio-que-viaja-a-mais-de-mil-kmhora_249284.html. [Acedido em 14 maio 2016].
- [12] Skytran, “21st Century Transportation,” [Online]. Available: <http://www.magnemotion.com/industrial-automation/>. [Acedido em 1 março 2016].
- [13] I. MagneMotion, “MagneMotion Inc.,” [Online]. Available:

- <http://www.magnemotion.com/industrial-automation>. [Acedido em 12 Novembro 2015].
- Beckhoff, Beckhoff Automation, [Online]. Available:
- [14] https://www.beckhoff.com/english.asp?drive_technology/xts.htm. [Acedido em 7 fevereiro 2016].
- Rockwell, rockwellautomation, [Online]. Available:
- [15] http://www.rockwellautomation.com/en_UK/products-technologies/itrak/overview.page. [Acedido em 20 fevereiro 2016].
- J. C. Rautio, "The Long Road to Maxwell's Equations," 1 dezembro 2014. [Online].
- [16] Available: <http://spectrum.ieee.org/telecom/wireless/the-long-road-to-maxwells-equations>. [Acedido em 3 maio 2016].
- AD Elster, "Magnetic Properties of Matter," [Online]. Available:
- [17] <http://mriquestions.com/what-causes-magnetism.html>. [Acedido em 10 maio 2016].
- [18] B. Bowers, Sir Charles Wheatstone 1802-1875, London: The Instituion of Electrical Engineers, 2001.
- [19] Y. G. Jin, J. Zhu e J. L. Zheng, "Electromagnetic analysis of a permanet magnet linear synchronous motor," em *Electrical Machines and Systems*, 2008.
- [20] R. D. Thornton, "Linear Synchronous Motor Design," em *In Electric Machines and Drives*, 2005.
- [21] Z. J. Piech e J. F. Gieras, Linear Synchronous Motors Transportation and Automation Systems, Taylor & Francis, 2000.
- [22] P. Brooks, *EtherNet/IP: Industrial Protocol White Paper*, Institute of Electrical and Electronic Engineers, 2001.
- [23] ODVA, Inc., *EtherNet/IP - CIP on Ethernet Technology*, 2006.
- [24] ODVA, Inc., "ODVA," [Online]. Available: <https://www.odva.org/>. [Acedido em 7 4 2016].
- [25] P. A. M. K. a. B. S. Kumar, "A Study on the Suitability of Ethernet/IP and EtherCAT," *International Journal of Future Computer and Communication*, vol. 2, 2013.
- [26] Dalas Semiconductor, "Fundamentals of RS-232".
- [27] Texas Instruments, "Comparing Bus Solutions," 2000.
- [28] A. B. Esteve, "Elaboração dos circuitos de comando e controle do veículo MagLev-Cobra e proposta de sistema de condução automática," Rio de Janeiro, 2014.

- Siemens, 4 dezembro 2015. [Online]. Available:
- [29] <https://mall.industry.siemens.com/mall/en/WW/Catalog/Products/10030552?tree=CatalogTree>.
- Rexroth, Bosch Group, 4 dezembro 2015. [Online]. Available:
- [30] <http://www.boschrexroth.com/dcc/Vornavigation/VorNavi.cfm?Language=EN&PageID=p146806>.
- EDP, “<https://www.edpsu.pt/pt/empresas/tarifasehorarios/Pages/TarifaMT.aspx>,” [Online]. Available:
- [31] <https://www.edpsu.pt/pt/empresas/tarifasehorarios/Pages/TarifaMT.aspx>. [Acedido em 28 09 2016].
- B. S. a. J. Breil, “New developments for a linear motor system with multiple carriers,” em [32] *4th International Symposium on Linear Drives for Industry Applications*, Birmingham, 2003.
- Micromech Ltd, 5 dezembro 2015. [Online]. Available:
- [33] <https://www.youtube.com/watch?v=ZRPAJsBNOWo>.
- Tecnotion, 14 janeiro 2016. [Online]. Available:
- [34] <http://www.tecnotion.com/products/?group=m>.
- Sina Drives, 14 janeiro 2016. [Online]. Available:
- [35] <http://www.sinadrives.com/en/products/ml-linear-motor-stages/>.
- Global Media Group, 9 Junho 2016. [Online]. Available:
- [36] <https://www.dinheirovivo.pt/empresas/um-elevador-que-anda-para-o-lado-nao-nao-e-ficcao-e-mesmo-a-serio/>.
- National Instruments, 16 Junho 2016. [Online]. Available: <http://www.ni.com/white-paper/7299/pt/#toc3>.
- [37]
- R. D. Thornton, T. Clarck e B. Perreault, “Linear synchronous motor propulsion small transit vehicles,” em *Proceedings of the 2004 ASME/IEEE Joint*, 2004.
- [38]
- Jenny Science, [Online]. Available: <http://www.jennyscience.de/en/products/linear-motor-stages/linaxr-lxc-f08f10/>. [Acedido em 8 dezembro 2015].
- [39]
- N. H. Vidal da Silva, *Dissertação de Mestrado: Desenvolvimento de sistema de levitação magnética, controlo e monitorização aplicado ao protótipo de transporte de cargas*,
- [40]

Guimarães: Universidade do Minho, 2012.

[41] R. F. da Cunha Castro, *Tese de Mestrado: Sistema de Propulsão Magnético Aplicado ao Transporte de Cargas*, Guimarães: Universidade do Minho, 2012.

Anexo
Lista de Custos

Lista de Custos						
Descrição	Fabricante	Referência	Fornecedor	Quantidade	Preço	
					Unidade	Total
Motor Linear						
Modulo LCM100-4M	Yamaha	KDJ-M2020-40	EPL	3,00	10549	31647€
Slider	Yamaha	KDJ-M2264-10	EPL	2,00	1375	2750€
Placa Ethernet/IP Slave	Yamaha	KDK-M4400-E0	EPL	1,00	-	-
Modulo terminador lado direito	Yamaha	KDJ-M20221-R0	EPL	1,00	-	-
Modulo terminador lado esquerdo	Yamaha	KDJ-M20221-L0	EPL	1,00	-	-
Conetor de alimentação	Yamaha	KAS-M5382-00	EPL	3,00	-	-
Conetor dummy HPB	Yamaha	KDK-M5163-00	EPL	3,00	-	-
Conetor de segurança sem ligações	Yamaha	KDK-M5370-10	EPL	3,00	-	-
Conetor terminador de linha	Yamaha	KDK-M5361-00	EPL	2,00	-	-
Console de programação e operação manual	Yamaha	KBB-M5110-21	EPL	1,00	-	-
Software de programação e operação	Yamaha	KGK-M4966-00	EPL	1,00	-	-
Cabo de programação USB-RS232C	Yamaha	KGK-M538F-00	EPL	1,00	-	-
Insertion/Ejection Rail 44mm with connection block	Yamaha	KDJ-M6200-00	EPL	2,00	-	-
Bloco de ligação entre módulos LCM100	Yamaha	KDJ-M6100-00	EPL	2,00	-	-
Cabo de ligação entre módulos	Yamaha	KDJ-M4811-00	EPL	2,00	-	-
Cabo LINK c 1m	Yamaha	KDK-M5361	EPL	2,00	-	-
Motor Linear						34397€
Bloco EtherCat						
PLC CX9020	Beckhoff	160010540	Bresimar	1,00	633,40	633,40€
EL6652 - ETHERNET/IP MASTER TERMINAL	Beckhoff	160013059	Bresimar	1,00	383,40	383,40€
Fonte de Alimentação DR-120-24	Mean Well	468002315	Bresimar	1,00	44,94	44,94€
EL1809 - 16-channel digital input 24 V DC	Beckhoff	48150006	Bresimar	1,00	110,23	110,23€
EL2809 - 16-channel digital output 24 V DC	Beckhoff	30140006	Bresimar	1,00	153,23	153,23€
Bloco EtherCat						1325,2€
Total						35722,2€