



Análise e controlo de posição de transelevadores

MIGUEL RIBEIRO COSTA

julho de 2019

ANÁLISE E CONTROLO DE POSIÇÃO DE TRANSELEVADORES

Miguel Ribeiro Costa



Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Área de Especialização de Automação e Sistemas

Departamento de Engenharia Eletrotécnica

Instituto Superior de Engenharia do Porto

2019

Este relatório satisfaz, parcialmente, os requisitos que constam da Ficha de Disciplina de Tese/Dissertação, do 2º ano, do Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Candidato: Miguel Ribeiro Costa, N° 1110717, 1110717@isep.ipp.pt

Orientação científica: Dr. Eng.º Ramiro de Sousa Barbosa, rsb@isep.ipp.pt

Empresa: Consoveyo, S.A. - Körber Logistics

Supervisão: Eng.º Vitor Vaz, vitor.vaz@consoveyo.com



Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Área de Especialização de Automação e Sistemas

Departamento de Engenharia Eletrotécnica

Instituto Superior de Engenharia do Porto

17 de julho de 2019

Agradecimentos

A realização da presente tese de mestrado é um processo longo, de grande persistência e dedicação. Não menos importante é o contributo das várias pessoas envolvidas, através da sua disponibilidade, confiança e colaboração. A todos os que me rodeiam, agradeço as palavras de incentivo em prol de mais uma etapa na minha vida académica. Sem todos estes contributos, esta investigação não teria sido possível.

Agradeço sobretudo à minha família por toda colaboração nas tarefas diárias e pela força nos momentos mais difíceis;

À minha namorada pela sua paciência, compreensão e flexibilidade no decorrer deste processo;

Ao meu orientador, Eng.º Ramiro Barbosa, que desde o primeiro momento, se mostrou disponível para colaborar focando-se sempre no trabalho contínuo e em clarificar os próximos passos. Sem dúvida, uma contribuição forte neste processo;

Ao Eng.º Vitor Vaz agradeço todas as ferramentas de simulação e pelo seu valioso contributo, sendo um fator chave no desenvolvimento deste trabalho;

Ao Eng.º Miguel Pinto, que me apoiou de livre e espontânea vontade, por diversas vezes procurando sempre passar o seu conhecimento científico. Dotado de uma capacidade diferenciadora, o meu especial agradecimento a este amigo.

Ao Eng.º Pedro Carneiro pelo seu espírito crítico na revisão deste relatório.

Resumo

O desempenho de um sistema logístico é avaliado pela sua disponibilidade e cadência. Assim sendo, é imperativo a otimização dos diferentes componentes que constituem um sistema logístico automático. O foco desta dissertação é o desenvolvimento de um método para otimização da dinâmica do movimento de um transelevador.

Através de um sistema de controlo de posição, o propósito passa por melhorar o desempenho do movimento, elaborando para isso, uma função designada de *Third Order Polynomial S-Curve Model*. Esta função permite a otimização do movimento, com a possibilidade de manipular com suavidade cargas sensíveis. Outro importante fator é a redução dos impactos mecânicos devido à variação gradual da aceleração.

Contudo, embora o propósito deste trabalho incida sobre os transelevadores, é possível aplicar a função em diversos equipamentos que integram as soluções da Consoveyo S.A..

Palavras-Chave

Transelevador, Sistema de Recuperação e Armazenamento Automatizado, Sistemas Intralogísticos, *S-Curve*, Controlo de Movimento, Redução de Tempo de Movimento, Otimização de Consumo Energético.

Abstract

Logistics system performance is evaluated by his availability and cadence. Therefore, it's imperative to optimize the different parts of an automatic logistic system. The main goal of this dissertation is the development of a method to optimize the dynamic of a stacker crane movement.

Through a position control system, the purpose is to improve the performance of the movement by designing a function called the Third Order Polynomial S-Curve Model. This function allows the movements optimization, with potencial of handling sensitive loads smoothly. Another important factor is the reduction of mechanical impacts due to the gradual variation of acceleration.

However, although the purpose of this work is to focus on the stacker cranes, it is possible to apply the function in some equipments of Consoveyo S.A . solutions.

Keywords

Stacker Crane, Automated Storage and Retrieval System, Intralogistics Systems, S-Curve, Motion Control, Time Optimization, Energy Consumption Optimization .

Índice

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	III
ABSTRACT	V
ÍNDICE	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	IX
ÍNDICE DE TABELAS	XIII
ACRÓNIMOS	XV
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO	2
1.2. OBJETIVOS	3
1.3. A EMPRESA	4
1.4. CALENDARIZAÇÃO	6
1.5. ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO	7
2. DESCRIÇÃO DO TRANSELEVADOR	9
2.1. O TRANSELEVADOR	10
2.2. EIXOS, DIMENSÕES E SISTEMAS DE COORDENADAS	11
2.3. <i>LAYOUT</i> DO TRANSELEVADOR	13
2.4. DISPOSITIVOS GERAIS	15
2.5. MODOS DE FUNCIONAMENTO.....	26
2.6. REDES DE COMUNICAÇÃO	27
2.7. LISTAGEM DE ERROS.....	28
3. ANÁLISE DOS PERFIS DE MOVIMENTO	31
3.1. TIPOS DE PERFIS (ANÁLISE GRÁFICA)	31
3.2. <i>JERK</i>	32
3.3. PERFIL DE MOVIMENTO SIMÉTRICO – MODELO TRAPEZOIDAL	33
3.4. PERFIL DE MOVIMENTO ASSIMÉTRICO – MODELO <i>S-CURVE</i>	35
3.5. SIMULAÇÃO DE PERFIS	36
4. DESENVOLVIMENTO	47
4.1. ARQUITETURA DO SISTEMA	47

4.2.	PERFIL DE MOVIMENTO – FUNÇÃO ORIGINAL.....	48
4.3.	PROPOSTA	50
4.4.	PERFIL DE MOVIMENTO – NOVA VERSÃO	52
4.5.	SISTEMA DE CONTROLO.....	53
5.	IMPLEMENTAÇÃO E TESTES	57
5.1.	ESPECIFICAÇÕES DOS DISPOSITIVOS DE TESTE.....	57
5.2.	COMPARAÇÃO DE RESULTADOS.....	59
6.	CONCLUSÕES	79
	REFERÊNCIAS DOCUMENTAIS.....	81
	ANEXO A – CÓDIGO DE SIMULAÇÃO DOS PERFIS	85
	ANEXO B – CÁLCULO DOS PERFIS TRIANGULAR E TRAPEZOIDAL	95
	ANEXO C – CÁLCULO DO PERFIL <i>S-CURVE</i>	97

Índice de Figuras

Figura 1 – Logotipo da Consoveyo S.A. [9]	4
Figura 2 – Instalações da Consoveyo S.A. em Portugal [12].....	4
Figura 3 – Armazenamento de <i>miniloads</i> [14].....	5
Figura 4 – Exemplos de AGV [16][17].....	5
Figura 5 – Armazém automático do sector da construção [19].....	6
Figura 6 – Logotipo do grupo Körber [21]	6
Figura 7 – O Transelevador [22].....	10
Figura 8 – Exemplo de um transelevador bímastro [23].....	11
Figura 9 – Representação de zona de transelevadores [24].....	11
Figura 10 – Eixos de movimento [23].....	12
Figura 11 – Sistema de coordenadas de elevação Y [24].....	12
Figura 12 – Sistema de coordenadas de translação X [24].....	12
Figura 13 – Constituição de um transelevador [24]	13
Figura 14 – Plataforma de carga (vista lateral frontal) [24]	14
Figura 15 – Plataforma de carga (vista lateral traseira) [24].....	14
Figura 16 – Base do transelevador [24]	15
Figura 17 – PLC Siemens (CPU 315F-2 PN/DP) [23].....	16
Figura 18 – ET200SP Siemens [25].....	16
Figura 19 – SEW EURODRIVE – Movidrive MDX61B [28]	17
Figura 20 – SEW MOVIMOT MM [29].....	17
Figura 21 – SEW MFP21D [30]	18
Figura 22 – Leuze DDLS 200 [31].....	18
Figura 23 – Ilustração do sistema de comunicação por infravermelhos [32].....	19
Figura 24 – Leuze DDLS 508 [33].....	19
Figura 25 – Sistema de posicionamento de translação [32]	20
Figura 26 – Leuze AMS 304i [34]	20
Figura 27 – Leuze BPS34 SM100 [35].....	21
Figura 28 – Kubler <i>absolute encoder</i> [36]	21
Figura 29 – Condicionador de sinal Scaime CPJ [37] e célula de carga [38]	22
Figura 30 – Switch Siemens Scalance X108PoE [39]	22

Figura 31 – Câmera CCTV Axis P3225–LV [41].....	23
Figura 32 – Quadro elétrico do transelevador [24]	23
Figura 33 – HMI Siemens KTM700 [42].....	24
Figura 34 – Painel de controlo da plataforma CP [43].....	24
Figura 35 – TL70 Painel luminoso [44]	25
Figura 36 – SEW EURODRIVE Motor AC – Série DR [45]	25
Figura 37 – Sensores de segurança fotoelétricos [46]	26
Figura 38 – Modelo OSI [47]	27
Figura 39 – Rede de comunicação PROFIBUS [48][49]	27
Figura 40 – Rede de comunicação ETHERNET	28
Figura 41 – Perfis simétricos <i>S–Curve</i> (1A) e trapezoidal (1B) [50]	32
Figura 42 – Relação energia vibratória e frequência [50]	33
Figura 43 – Perfil simétrico trapezoidal [51]	34
Figura 44 – Perfil assimétrico <i>S–Curve</i> [52]	35
Figura 45 – Aplicação de simulação de movimento do transelevador	37
Figura 46 – Fluxograma da simulação do perfil trapezoidal/triangular	38
Figura 47 – Função de velocidade – modelo trapezoidal	39
Figura 48 – Função de posição – modelo trapezoidal	39
Figura 49 – Função de velocidade – modelo triangular	40
Figura 50 – Função de posição – modelo triangular	40
Figura 51 – Função de velocidade – modelo <i>S–Curve</i>	41
Figura 52 – Função de posição – modelo <i>S–Curve</i>	41
Figura 53 – Fluxograma da simulação e implementação do perfil <i>S–Curve</i>	43
Figura 54 – Fluxograma do cálculo iterativo da raiz cúbica	44
Figura 55 – Fluxograma do cálculo iterativo da velocidade máxima.....	45
Figura 56 – Arquitetura do sistema	48
Figura 57 – Perfil da <i>S–Curve</i> original.....	48
Figura 58 – Representação do perfil de velocidade a implementar.....	52
Figura 59 – Diagrama de blocos.....	54
Figura 60 – Sistema VFD [53]	54
Figura 61 – Aplicação SCADA.....	60
Figura 62 – Parâmetros da Nova <i>S–Curve</i> – simulação do movimento curto.....	60
Figura 63 – Duração/tempos da Nova <i>S–Curve</i> – simulação do movimento curto.....	61
Figura 64 – <i>Database</i> dos parâmetros de entrada – <i>S–Curve</i> original	61
Figura 65 – <i>Database</i> dos parâmetros de entrada – Nova <i>S–Curve</i>	61

Figura 66 – Variáveis da função cálculo – Nova <i>S-Curve</i>	62
Figura 67 – Versão original – sentido positivo – movimento curto.....	62
Figura 68 – Versão original – sentido negativo – movimento curto.....	63
Figura 69 – Nova versão – sentido positivo – movimento curto.....	63
Figura 70 – Nova versão – sentido negativo – movimento curto.....	63
Figura 71 – Parâmetros da Nova <i>S-Curve</i> – simulação do movimento longo.....	65
Figura 72 – Duração/tempos da Nova <i>S-Curve</i> – simulação do movimento longo.....	65
Figura 73 – Versão original – sentido positivo – movimento longo.....	66
Figura 74 – Versão original – sentido negativo – movimento longo.....	66
Figura 75 – Nova versão – sentido positivo – movimento longo.....	66
Figura 76 – Nova versão – sentido negativo – movimento longo.....	67
Figura 77 – Parâmetros da Nova <i>S-Curve</i> – simulação do movimento intermédio.....	68
Figura 78 – Duração/tempos da Nova <i>S-Curve</i> – simulação do movimento intermédio.....	68
Figura 79 – Versão original – sentido positivo – movimento intermédio.....	69
Figura 80 – Versão original – sentido negativo – movimento intermédio.....	69
Figura 81 – Nova versão – sentido positivo – movimento intermédio.....	69
Figura 82 – Nova versão – sentido negativo – movimento intermédio.....	70
Figura 83 – Parâmetros da Nova <i>S-Curve</i> – Simulação do movimento ótimo.....	71
Figura 84 – Duração/tempos da Nova <i>S-Curve</i> – Simulação do movimento ótimo.....	71
Figura 85 – <i>Database</i> dos parâmetros de entrada da Nova <i>S-Curve</i> – Movimento ótimo.....	72
Figura 86 – Perfil de velocidade da Nova <i>S-Curve</i> – Simulação do movimento ótimo.....	72
Figura 87 – Perfil de posição da Nova <i>S-Curve</i> – Simulação do movimento ótimo.....	73
Figura 88 – Nova versão – sentido positivo – movimento ótimo.....	73
Figura 89 – Nova versão – sentido negativo – movimento ótimo.....	74
Figura 90 – Exemplo de tempo de amostragem.....	75
Figura 91 – Tempo de ciclo do PLC.....	76
Figura 92 – Tempo de amostragem PROFIBUS.....	77

Índice de Tabelas

Tabela 1 – Calendarização do projeto	7
Tabela 2 – Exemplo de listagem de erros.....	29
Tabela 3 – Variáveis de entrada – função original	49
Tabela 4 – Variáveis de cálculo – função original	50
Tabela 5 – Variáveis de saída – função original	50
Tabela 6 – Restantes variáveis de entrada – nova versão.....	53
Tabela 7 – Restantes variáveis de cálculo – nova versão.....	53
Tabela 8 – Parâmetros para o cálculo do coeficiente	54
Tabela 9 – Especificações PLC e motor de translação.....	58
Tabela 10 – Especificações <i>drive</i> e <i>encoder</i> de translação	59
Tabela 11 – Duração do movimento – amostra de movimento curto.....	64
Tabela 12 – Duração do movimento – amostra de movimento longo.....	67
Tabela 13 – Duração do movimento – amostra de movimento intermédio	70
Tabela 14 – Duração do movimento – amostra de movimento ótimo	74

Acrónimos

AGV	–	<i>Automatic Guided Vehicle</i>
AS/RS	–	<i>Automated Storage and Retrieval System</i>
CP	–	<i>Control Panel</i>
CPU	–	<i>Central Processing Unit</i>
DCS	–	<i>Distributed Control System</i>
DP	–	<i>Decentralized Peripherals</i>
EUA	–	Estados Unidos da América
JIT	–	<i>Just-In-Time</i>
LAN	–	<i>Local Area Network</i>
OMV	–	<i>Overhead Monorail Vehicle</i>
OSC	–	<i>Overhead Stacker Crane</i>
OSI	–	<i>Open System Interconnection</i>
PLC	–	<i>Programmable Logic Controller</i>
PoE	–	<i>Power over Ethernet</i>
PROFIBUS-DP	–	<i>Process Field Bus – Decentralized Peripherals</i>
PROFINET	–	<i>Process Field Net</i>
RFID	–	<i>Radio-Frequency IDentification</i>
RGV	–	<i>Rail Guided Vehicle</i>
SCADA	–	<i>Supervisory Control And Data Acquisition</i>

- SCP – *System Control Panel*
- STK – *Stacker Crane*
- VFD – *Variable-Frequency Drive*
- WLan – *Wireless Computer Network*
- WMS – *Warehouse Management System*

1. INTRODUÇÃO

Originalmente, o conceito de logística colocava em dúvida profissionais e estudantes. Para muitos, a logística era vista como uma área de custo acrescido, para outros um processo de valor acrescentado. Nessa altura, o termo estava relacionado com o transporte ou distribuição física de mercadorias. Embora persistisse a divergência de opiniões, todos viam a logística como uma função essencial no setor dos negócios. Naturalmente, ao longo da sua história o conceito evoluiu, tornando-se mais abrangente [1] [2].

Clarificando o conceito de Logística, na ótica do *Council of Logistics Managment*, à data de 1991: “*Logistics is that part of supply chain process that plans, implements, and controls the efficient, effective flow and storage of goods, services, and related information from point of origin to point of consumption in order to meet customers requirements*”. Por outras palavras, todo o processo de criação e distribuição de um produto ou serviço com o principal objetivo de satisfazer o cliente. O serviço ao cliente é parte integrante do processo de negociação, ou seja, um compromisso contínuo e vantajoso para o cliente, assumido pela organização [1].

Atualmente, as organizações aplicam diversas metodologias para melhorar o desempenho do negócio, por exemplo, a gestão de material, financeira, de recursos humanos e de informação da cadeia de abastecimento (*supply chain managment*). Devido à dificuldade da gestão em controlar diversas variáveis envolvidas no negócio, salientam-se os fatores mais relevantes como o tempo e o espaço. Fatores chave que influenciam os resultados a que uma empresa se propõe num ambiente

competitivo. A globalização e a evolução da comunicação, permite que “o cliente” exija qualidade do produto, requisitos específicos ou até exclusividade, localização estratégica e celeridade na entrega do mesmo [1][3][4].

De modo a ganhar vantagem sobre os concorrentes, as empresas questionam a logística para que esta responda com soluções de custo reduzido, maximizando a rapidez sobretudo do transporte e distribuição dos seus produtos. Atualmente, as empresas sentem maior dificuldade em controlar e melhorar a *performance* do transporte externo, dando assim lugar a questões específicas de carácter interno. Entre as quais, a análise do processo interno que controla todo o fluxo de materiais dentro de armazéns, unidades fabris e centros de distribuição. Esta vertente “interna” da Logística denomina-se por Intralogística. Embora seja um assunto relativamente novo no que respeita a Logística, este termo também é conhecido como “*in-house logistic*” [5].

A aposta das organizações na Intralogística trouxe inúmeras vantagens que contribuem para melhorar a *performance* da empresa. Uma maior eficiência obtém-se agilizando o fluxo de materiais reduzindo assim o desperdício de tempo, espaço e custos. A gestão de capital também reflete as suas vantagens no que diz respeito à área financeira. Com a Intralogística, é possível realizar novos investimentos, uma vez que, tudo que se considere desperdício pode ser tomado como despesa a médio prazo [5].

1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO

Como é descrito no artigo de G. Kartnig, B.Grozel e N. Zrníc em 2012 intitulado “*Past, State-of-the-Art and Future of Intralogistics in Relation to Megatrends*”, por volta do ano de 1950 o fluxo interno de materiais era feito com *bag carts* (carrinhos com um saco incorporado), pontes rolantes, entre outros. As empresas optavam por um método de armazenamento simples, como a disposição horizontal de materiais, colocando-os “no chão da fábrica”. Nessa altura, devido à evolução das técnicas de transporte desenvolvidas nos EUA, foi criada a atual paleta universal para auxiliar a movimentação de carga, ainda utilizada nos dias de hoje.

A conceção da paleta universal deu origem à introdução de dispositivos de carregamento/armazenamento de paletes, como translevadores. Por conseguinte, o armazenamento vertical passa a ser visto como uma opção vantajosa de armazenamento, dado que economiza espaço e torna simples o acesso aos artigos.

Em 1960, após um considerável progresso económico, as empresas começaram a expandir o fabrico e a internacionalizar os seus negócios. Este facto levou à inflação da mão-de-obra e do custo dos equipamentos e matérias-primas, e assim, as empresas começaram a perceber a

necessidade de aumentar a eficiência nas diversas áreas da sua estrutura, não apenas no processo produtivo. Recorrendo à tecnologia disponível na época, foi possível reformular a configuração do armazenamento, resultando numa maior capacidade de processamento, e conseqüentemente, numa otimização de espaço e custos. Nessa década, o crescimento tecnológico leva à construção do primeiro armazém automático (Alemanha, 1962). O mercado aposta na diversidade de produtos de maior qualidade, grande disponibilidade e brevidade de entrega. Uma década que registou nova evolução tecnológica, no campo dos sistemas de transporte e armazenamento como AGV e AS/RS, resultando em consideráveis investimentos em armazéns com estantes mais altas e em equipamentos de manuseamento de cargas [6].

Com a terceira revolução industrial, a tecnologia motivou o uso de funções de controlo, posicionamento, transferência de dados e relatório de erros. Naturalmente, surgiu o conceito “*Just-in-time*”, que se entende por melhorar o desempenho, elevando a produtividade com a redução de desperdícios. Como caracterizou Chase e outros autores, desperdício consiste em: “*anything other than the minimum amount of equipment, materials, parts, and workers (working time) which are absolutely essential to production*”. A Filosofia JIT consiste na eficiência dos seus processos de modo a obter um resultado de alta qualidade e sem desperdícios. Nos dias que correm, organizações de renome reconhecem valor nesta abordagem, sendo um passo que contribui para o seu progresso [6][7].

As décadas de 1980 e 1990 marcaram pela evolução dos sistemas computacionais e de redes de dados baseadas em Ethernet, que contribuiram para a otimização da gestão do armazém.

Novas estratégias motivaram a construção de indústrias de maiores dimensões junto dos seus clientes. Entre outros desenvolvimentos relevantes, encontram-se o e-commerce e a tecnologia LAN sem fio (WLAN). Por fim, mais recentemente foi introduzida a tecnologia de identificação RFID, permitindo aos dispositivos de transporte carregar mais informação que o sistema de código de barras, através de um microchip [6].

1.2. OBJETIVOS

Este estudo concentra-se no desenvolvimento de um novo sistema de controlo de posição de um transelevador baseado num previamente implementado nos equipamentos desenvolvidos pela Consoveyo S.A.. O propósito é desenvolver uma nova função que minimize o *jerk* e reduza a vibração residual da carga transportada. A função deverá calcular o perfil de velocidade ótimo para realizar o posicionamento da máquina no menor tempo possível, melhorando assim o seu desempenho. Este documento descreve a metodologia utilizada, a implementação e os resultados experimentais.

1.3. A EMPRESA

A Consoveyo S.A. (Figura 1) posiciona-se no mercado como integradora de sistemas flexíveis de automação em intralogística e sistemas automatizados de transporte, armazenamento e de manipulação de materiais. A flexibilidade torna-se assim uma vantagem, a fim de adequar o sistema às mudanças dos produtos (por exemplo, flutuações de volume, geometria de produtos, etc.) [8].



Figura 1 – Logotipo da Consoveyo S.A. [9]

Anteriormente conhecida como Efacec Handling Solutions, a Consoveyo S.A. foi adquirida em setembro de 2015 pelo grupo Körber. A missão da empresa passa por desenvolver soluções intralogísticas eficientes e económicas, acompanhando a evolução da tecnologia. Apresenta soluções/serviços com o objetivo de obter maior produtividade e otimização na utilização do espaço. Em Portugal, localiza-se em Moreira da Maia, no distrito do Porto (Figura 2); no resto do mundo em Espanha, República Checa, Índia e Singapura [10] [11].



Figura 2 – Instalações da Consoveyo S.A. em Portugal [12]

Como integradora de sistemas, a empresa cria soluções como por exemplo armazéns automáticos (Figura 3), soluções de manipulação de produtos, transporte interno, *picking* e cumprimento de pedidos. Como software de apoio também desenvolve aplicações de gestão do armazém (WMS), SCADA (*Supervisory Control And Data Acquisition*) e de controlo de fluxos de materiais (DCS) [13].



Figura 3 – Armazenamento de *miniloads* [14]

Como fornecedora de produtos, concebe e implementa sistemas de atendimento de pedidos, cujo equipamentos são AGV (*Automatic Guided Vehicles*) (Figura 4), OSC (*Overhead Stacker Cranes*), RGV (*Rail Guided Vehicles*), STK (*Stacker Cranes*), *shuttle cars*, elevadores, transportadores, entre outros [15].



Figura 4 – Exemplos de AGV [16][17]

Tais soluções automatizadas de intralogística (Figura 5) podem ser encontradas em diferentes indústrias, tais como farmacêutica, química, papelreira, automóvel, alimentar, bebidas e operadores de logística de terceiros, documentação, entre outros [18].

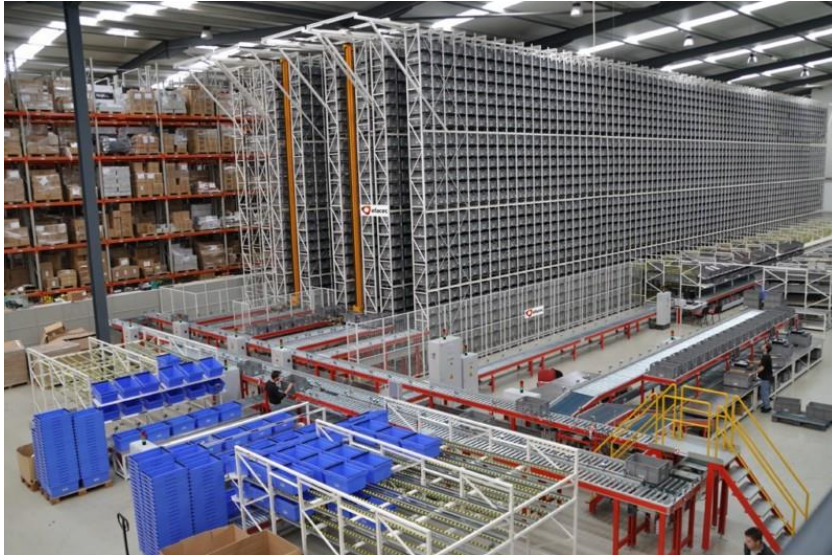


Figura 5 – Armazém automático do sector da construção [19]

A Körber AG (Figura 6) é a *holding* de um grupo internacional de tecnologia. O Grupo possui empresas tecnológicas e mais de 100 empresas de produção, serviços e vendas [20].



Figura 6 – Logotipo do grupo Körber [21]

1.4. CALENDARIZAÇÃO

De forma a organizar as fases do trabalho tornou-se necessário estimar a duração das mesmas. Recorrendo à ferramenta MS Project (Tabela 1), apresenta-se um diagrama de Gantt com as tarefas, subtarefas e respetiva duração.

A escolha do tema deve-se ao facto de estar relacionado com a otimização de um produto da empresa, contribuindo assim não só para os projetos atuais como para futuros.

Inicialmente recolheu-se de informação relacionada com *motion profiles* e controlo de *jerk*, em artigos científicos, teses, entre outros documentos. Com esta informação, elaborou-se o relatório à medida que o projeto se desenvolvia.

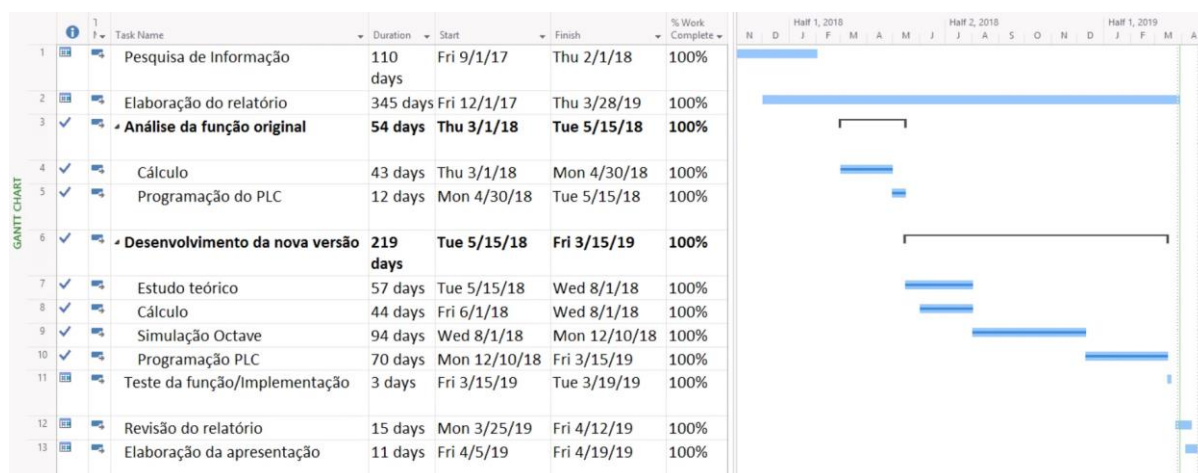
Em seguida, procedeu-se à análise da função previamente utilizada nos sistemas da Consoveyo, num PLC (*Programmable Logic Controller*) da Siemens S7-300/400.

Iniciou-se o desenvolvimento da nova função, primeiramente com o cálculo matemático e simulação recorrendo a um *software* de cálculo numérico, denominado Octave. Em seguida, a “conversão” da lógica em linguagem Ladder, utilizando o *software* da Siemens Step 7. Como ferramenta de apoio a esta simulação, utilizou-se um *software* dedicado à monitorização de sinais de PLC, designado PLC Analyzer.

Numa fase final, testou-se a função em contexto real (em ambiente industrial), comparando os resultados obtidos com os previstos.

Por último, este documento sofreu as devidas revisões de modo a relatar, de forma estruturada, o conteúdo estudado. Para apresentação deste trabalho desenvolveu-se um resumo em Powerpoint.

Tabela 1 – Calendarização do projeto



1.5. ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO

O capítulo 1 consiste em definir o âmbito do projeto abordando alguns métodos intralogísticos atualmente utilizados na indústria, realçando a importância dos mesmos. Posteriormente, apresenta-se os objetivos do trabalho e a empresa, na qual poderá ser implementada a função desenvolvida. Em seguida são ilustradas as diversas fases do planeamento deste trabalho e a respetiva organização do relatório.

No capítulo 2 descreve-se de modo geral, o transelevador, os seus modos de funcionamento e os equipamentos mais relevantes. O capítulo seguinte (3) apresenta uma análise sobre perfis de movimento e a respetiva simulação.

A arquitetura e o sistema de controlo são abordados no capítulo 4, bem como, o paralelismo entre a definição da nova função e a original. O capítulo 5 dedica-se à descrição das especificações dos equipamentos de teste e à análise dos resultados após a implementação. Neste capítulo são comparadas a função simulada (Octave), a original (PLC) e a nova *S-Curve* (PLC). Também são abordados temas como a aquisição de sinal.

Para finalizar, no capítulo 6 são apresentadas conclusões do trabalho desenvolvido e sugeridas possíveis evoluções do mesmo.

2. DESCRIÇÃO DO TRANSELEVADOR

Um transelevador é um equipamento desenhado para o armazenamento automático de cargas. Este viaja ao longo das alas do armazém onde são colocadas, retiradas e posicionadas diversas cargas (Figura 7).

Em síntese, este equipamento carrega uma carga existente num ponto destinado à entrada de carga no armazém e, de seguida, armazena-a num determinado alvéolo da estante do armazém. Quando solicitado, e no processo inverso, este é capaz de retirar uma carga armazenada de um determinado alvéolo da estante e colocá-la num ou mais pontos destinados a saídas de carga do armazém.

Uma das principais vantagens deste tipo de máquinas é, geralmente, o transporte de cargas de peso elevado. Este facto, não só colmata a capacidade limitada de um ser humano, como evita a necessidade deste recurso para operação.

O transelevador move-se apoiado num carril, entre dois *racks* (estantes), ao longo de um corredor/ala.



Figura 7 – O Traselevador [22]

Composto por uma plataforma elevatória e um sistema de garfos telescópicos, este tem a capacidade de depositar e recolher produtos do *rack*. Os traselevadores podem transportar uma panóplia de produtos desde *unit loads* (produto em palete) ou *mini loads* (caixas de menores dimensões). Estas máquinas atualmente usam motores elétricos e possuem configurações flexíveis, dimensionadas com uma finalidade específica.

Os armazéns, por sua vez, são geralmente grandes e podem ser específicos como por exemplo armazéns de congelação, entre outros.

2.1. O TRANSELEVADOR

Para uma melhor compreensão da operação de armazenamento e recolha de carga, em seguida é descrita a constituição e o funcionamento geral do traselevador.

Resumidamente, o transelevador é uma máquina automatizada composta por uma base que assenta num carril, um mastro (no mínimo) e uma plataforma de carga. No caso da estrutura apresentada na Figura 8, foi implementado um bimastro, com o objetivo de transportar cargas de peso elevado.

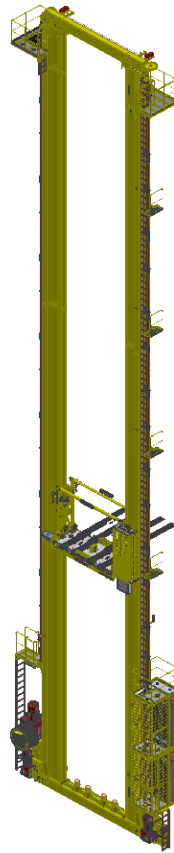


Figura 8 – Exemplo de um transelevador bimastro [23]

2.2. EIXOS, DIMENSÕES E SISTEMAS DE COORDENADAS

Ao movimento do transelevador ao longo de uma ala (eixo X), geralmente, entre duas estantes (Figura 9) dá-se o nome de translação.

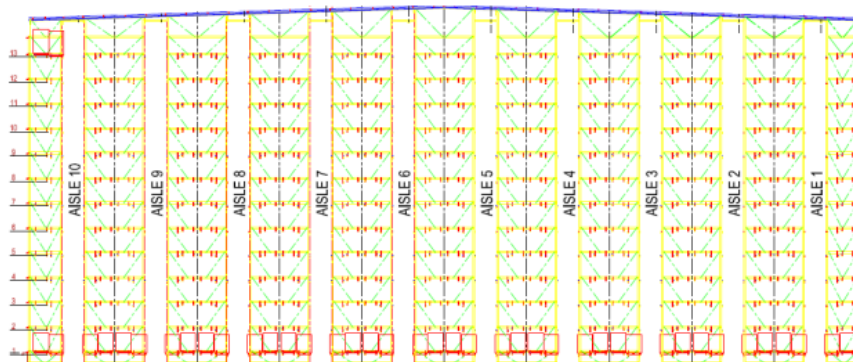


Figura 9 – Representação de zona de transelevadores [24]

De forma a garantir maior aproveitamento volumétrico de espaço, este movimenta-se em altura (eixo Y), armazenando a carga que transporta na estante (eixo Z) (Figura 10). O movimento em altura designa-se por elevação.

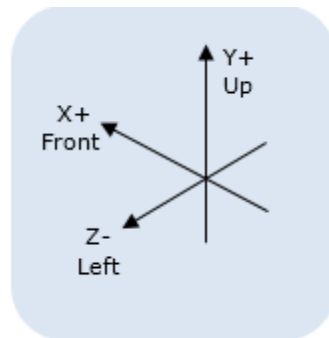


Figura 10 – Eixos de movimento [23]

Relativamente às suas dimensões físicas, geralmente possui um comprimento inferior a 15 m e uma altura, por vezes, superior a 30 m (Figura 11).

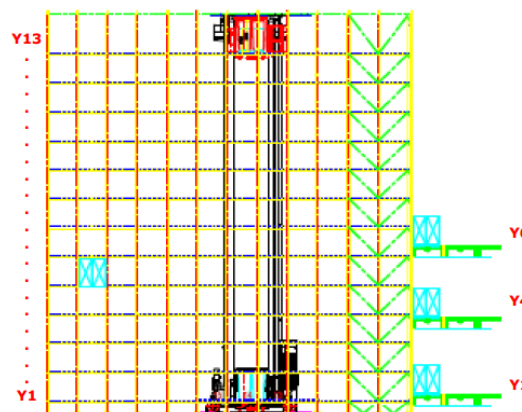


Figura 11 – Sistema de coordenadas de elevação Y [24]

Este desloca-se ao longo de uma ala (Figura 12) cujo comprimento pode atingir uma distância superior a 300 m. Todas estas dimensões são variáveis consoante o pretendido pelo cliente (relacionado com as cadências desejadas e a estrutura física da estante, por vezes já implementada).

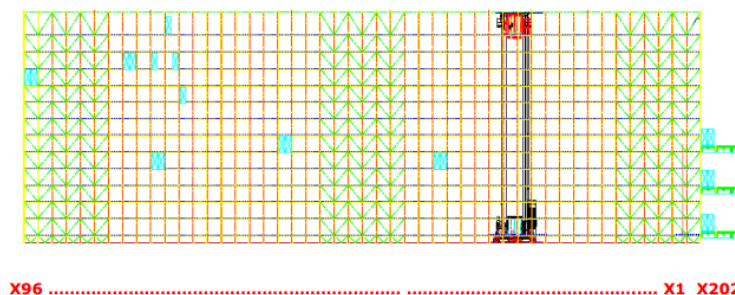


Figura 12 – Sistema de coordenadas de translação X [24]

2.3. LAYOUT DO TRANSELEVADOR

A Figura 13 ilustra, detalhadamente, a constituição do transelevador. Para além do referido anteriormente, na parte inferior da máquina encontram-se o(s) motor(es) de translação e o de elevação, a cabine do quadro elétrico e a plataforma de acesso às escadas de um dos mastros. Estas possuem plataformas de apoio ao operador, quando este pretende aceder à parte superior da máquina, eventualmente para manutenção. No topo da ala existe uma guia de orientação do transelevador (eixo X), complementar ao carril existente na parte inferior. Entre os mastros encontra-se a plataforma de carga, onde é transportado o produto a armazenar.

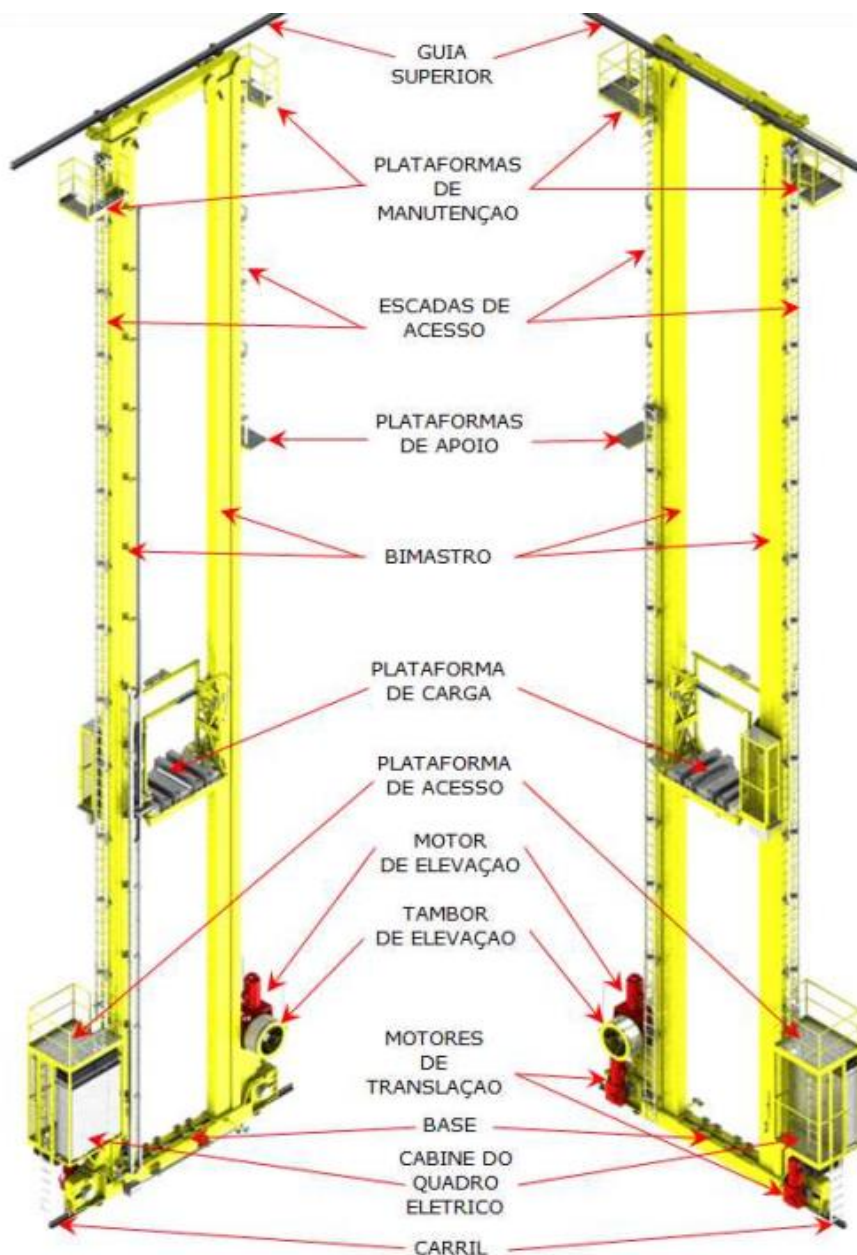


Figura 13 – Constituição de um transelevador [24]

A plataforma de carga (Figura 14) é constituída por um ou mais conjuntos de garfos para carga/descarga do produto transportado, a cabine para transporte do operador e um sistema de paraquedas, para segurança da plataforma.

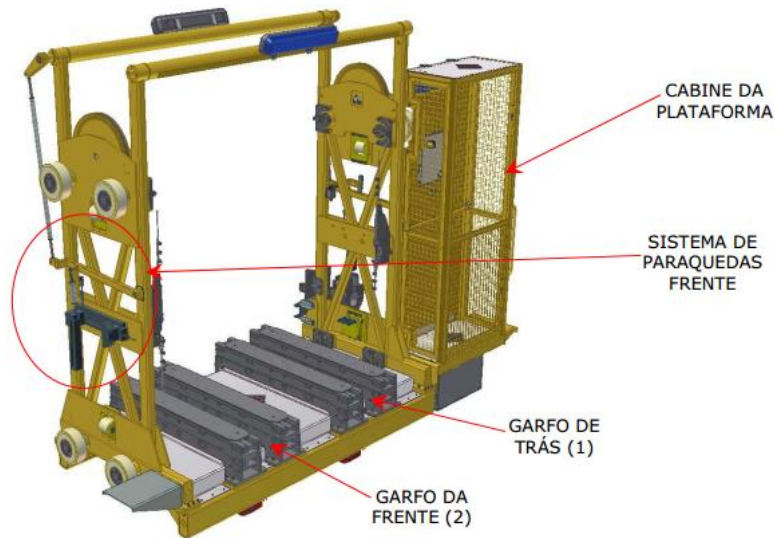


Figura 14 – Plataforma de carga (vista lateral frontal) [24]

No interior da cabine da plataforma existe uma HMI (*Human Machine Interface*) – painel designado por CP1 - e na retaguarda da mesma instalaram-se equipamentos de corte e redução de velocidade de elevação (Figura 15). A plataforma possui um sistema de iluminação, bem como o interior da cabine.

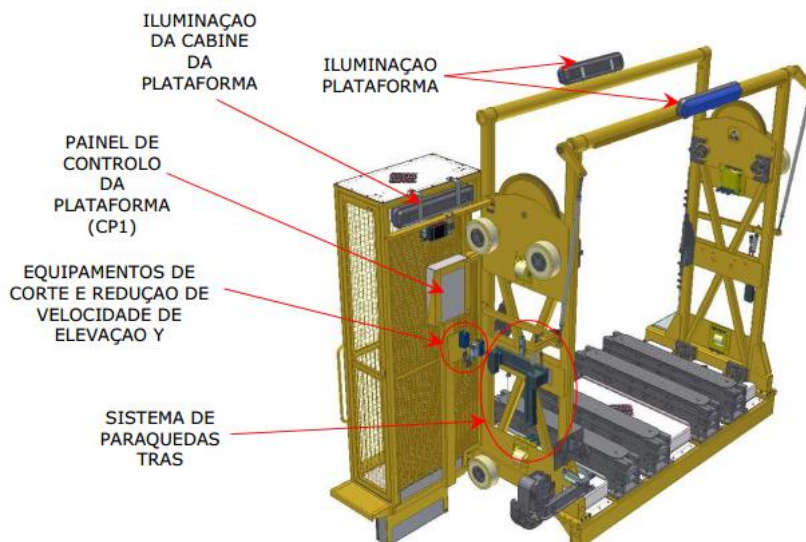


Figura 15 – Plataforma de carga (vista lateral traseira) [24]

Por fim, a base do transelevador (Figura 16) possui uma das resistências de frenagem (para dissipação de energia na travagem), o equipamento de comunicação (PROFIBUS-DP, *Process Field Bus – Decentralized Peripherals*) por infravermelhos e os batentes da elevação e translação (sendo este último, hidráulico). Restam ainda dispositivos limitadores de velocidade (translação) e o coletor de alimentação de potência do transelevador.

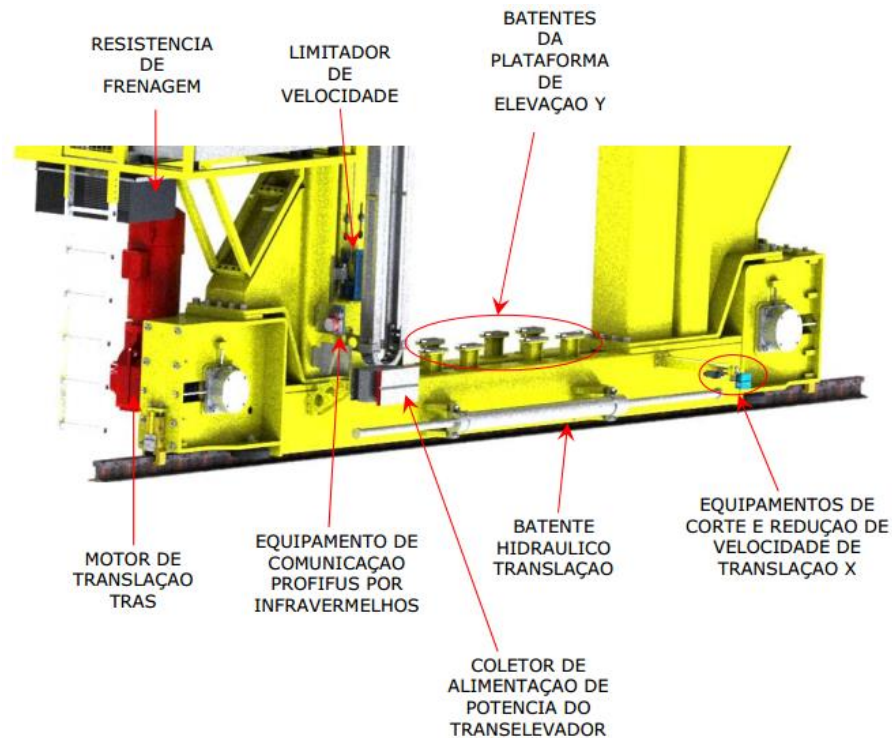


Figura 16 – Base do transelevador [24]

2.4. DISPOSITIVOS GERAIS

Os sistemas de controlo podem ser compostos por dispositivos capazes de receber (sensores) e enviar sinais (atuadores), de modo a monitorizar processos. Assim sendo, o PLC (Figura 17) é um CPU (*Central Processing Unit*) com a capacidade de executar instruções sequenciais programadas, permitindo o controlo de processo em tempo real. No sistema do transelevador, o PLC tem como principais funções monitorizar os sinais provenientes da diversa instrumentação existente, controlar e gerar referências para os variadores de velocidade dos diversos motores e comunicar com o WMS. Nos sistemas implementados a máquina possui várias interfaces entre as quais com o operador (através da HMI), com o WMS, com sistemas de transportadores, com *shift cars*, etc.

A máquina possui também um sistema de segurança, composto por uma cadeia de emergência (com corte físico de energia quando acionada), que impõe a paragem e *quickstops* ao *drives* de controlo dos motores [24].



Figura 17 – PLC Siemens (CPU 315F-2 PN/DP) [23]

A ET200SP é um módulo que comunica com o PLC por PROFIBUS-DP utilizado para receber e enviar sinais, através das suas cartas de comunicação (Figura 18). Também é possível comunicar via PROFINET no caso da rede de comunicação utilizar esse protocolo.



Figura 18 – ET200SP Siemens [25]

O VFD (*Variable-Frequency Drive*) ou, simplesmente, *drive* é uma unidade eletrónica de potência que permite um controlo contínuo da velocidade do motor, através da variação da frequência e da tensão de entrada do mesmo. O uso deste equipamento permite uma maior otimização de energia, uma vez que apenas requisita da rede a potência necessária para um desempenho ótimo do sistema. Ao acrescentar um *drive* a montante do motor, fará com que este diminua a sua eficiência, “No entanto, a generalidade das aplicações não operam os motores de indução apenas à sua velocidade e carga nominal. A alimentação dos motores de indução com variadores eletrónicos de velocidade permitiu a sua aplicação em acionamentos com necessidade de controlo da velocidade, de binário e/ou de posição. Nestes casos, a adição de variadores resulta no aumento de eficiência de todo o sistema”. Outras vantagens do uso deste dispositivo é o facto de proteger a rede/máquina, de evitar

arranques/paragens bruscas e de controlar o excesso de corrente e temperatura. Deste modo pode-se afirmar que o *drive* influencia na qualidade no sistema como um todo, contribuindo com maior volume de produção [26][27].



Figura 19 – SEW EURODRIVE – Movidrive MDX61B [28]

A Figura 19 ilustra um exemplo de variador de velocidade usado na elevação/translação. Juntamente com o variador de elevação é colocado um *encoder* digital, acoplado ao veio do motor para monitorizar a velocidade. Os motores possuem um freio eletromagnético de segurança e termístores, para deteção de sobreaquecimento. Quanto ao controlo de velocidade, este é feito em malha fechada, para conseguir um movimento controlado, suave e seguro. Como referido anteriormente, o PLC é a unidade responsável pela comunicação com os variadores, utilizando para isso o protocolo de rede de comunicação PROFIBUS-DP ou PROFINET [24].



Figura 20 – SEW MOVIMOT MM [29]

O *drive* utilizado para controlo dos garfos é da série Movimot MM, acoplado ao motor como mostra a Figura 20. Para comunicar com o PLC, é integrado um módulo PROFIBUS-DP (Figura 21).



Figura 21 – SEW MFP21D [30]

O PLC troca informação com o transelevador através de um sistema de comunicação infravermelhos. A Figura 22 apresenta um dispositivo responsável pela transmissão dos dados, sendo que esta é do tipo *full-duplex*.



Figura 22 – Leuze DDLs 200 [31]

Alimentado a 24 V DC, comunica com o PLC através da rede PROFIBUS-DP. Fisicamente, um dispositivo (móvel) é colocado no transelevador e o outro (fixo) no extremo da ala, como mostra a Figura 23[24].



Figura 23 – Ilustração do sistema de comunicação por infravermelhos [32]

Se o transelevador comunicar através da rede ETHERNET, é utilizado o dispositivo apresentado na Figura 24, seguindo o mesmo sistema da Figura 23.



Figura 24 – Leuze DDL5 508 [33]

Quanto ao posicionamento no eixo de translação, O sistema possui um dispositivo de codificação, que informa o PLC da posição do transelevador ao longo da ala (distância à máquina). Este sensor ótico, colocado no final da ala, é acompanhado de um refletor colocado no transelevador. Não é demais referir que estes mantêm sempre contacto visual (não físico) entre eles, para que possa ser medida a sua posição no eixo X (Figura 25).

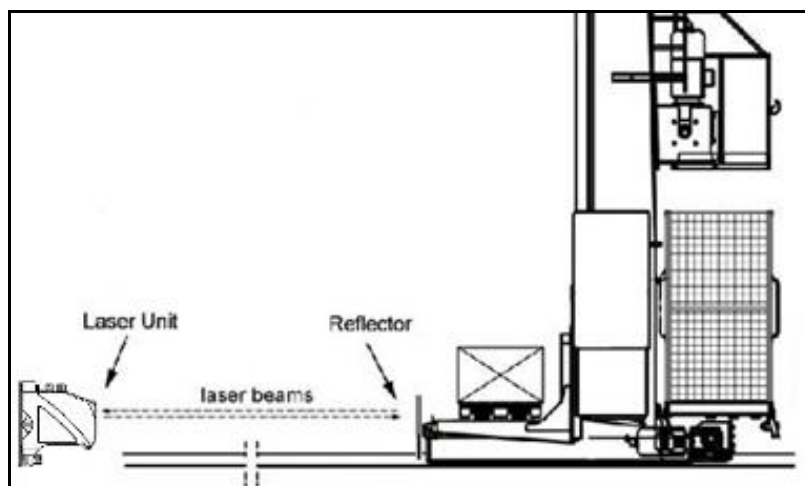


Figura 25 – Sistema de posicionamento de translação [32]

Esta distância é medida através da fase do ângulo do sinal transmitido e do recebido. O dispositivo apresentado na Figura 26 é alimentado a 24 V DC e comunica com o PLC através da rede PROFIBUS-DP [24].



Figura 26 – Leuze AMS 304i [34]

A Figura 27 é um exemplo do sistema de codificação utilizado na elevação, fabricado pela Leuze. Com a utilização de um *scanner* infravermelho de leitura contínua, pode medir-se a posição (vertical) através da leitura da fita em código de barras. Este dispositivo tem uma característica relevante, uma vez que se trata de um *encoder* absoluto, este atribui um código digital único a cada incremento medido. Os dados são enviados para o PLC via rede PROFIBUS-DP, mesmo em caso de falha de alimentação [24].



Figura 27 – Leuze BPS34 SM100 [35]

Como sistema de posicionamento dos garfos, são utilizados *encoders* absolutos da Kubler (Figura 28). Os *encoders* são acoplados no veio de cada motor, estabelecendo assim uma relação direta com o veio do motor e indirecta com a deslocação linear do garfo telescópico [24].



Figura 28 – Kubler *absolute encoder* [36]

De modo a ler o valor do peso da carga transportada, implementou-se um sistema de pesagem (Figura 29) com dispositivos Scaime. Este é constituído por uma célula de carga (apropriada para controlo de carga em equipamentos de elevação) que mede a tensão dos cabos de sustentação de plataforma, e um condicionador de sinal analógico CPJ. Importante referir que o sinal pode traduzir a informação de peso excessivo ou peso demasiado baixo (sinónimo de cabos de aço sem tensão). O PLC recebe o sinal através da rede PROFIBUS-DP [24].



Figura 29 – Condicionador de sinal Scaime CPJ [37] e célula de carga [38]

Uma vez que permite a detecção de problemas de funcionamento e também para eventuais emergências, o transelevador possui um sistema de câmaras de vigilância (CCTV). Desta forma é possível visualizar remotamente cada etapa de movimento. Para que possam ser colocadas várias câmaras no sistema é utilizado o *switch* da Figura 30, que as conecta a uma rede *ethernet* ligada ao PLC.



Figura 30 – Switch Siemens Scalance X108PoE [39]

As suas portas de comunicação transmitem os dados juntamente com alimentação para as câmaras com base na tecnologia PoE (*Power over Ethernet*). O *switch* tem a capacidade de verificar se o dispositivo com o qual quer comunicar possui suporte ao PoE, através da medição de uma resistência, evitando assim danificar os que não suportem esta tecnologia [40].

A Figura 31 representa o modelo da câmara utilizado, sendo que geralmente é instalada pelo menos uma de cada lado do transelevador, para análise do seu comportamento e para, eventualmente, possíveis acidentes.



Figura 31 – Câmera CCTV Axis P3225–LV [41]

Os quadros elétricos possuem os dispositivos que constituem o circuito de potência e controlo do sistema. Estes dispositivos procuram proteger tanto o ser humano como os próprios circuitos do quadro. Assim sendo, é possível garantir proteção contra curto-circuitos, sobreintensidades e incêndios.

Na Figura 32 é apresentado o *layout* do quadro situado na cabine de cada transelevador, composto pelos dispositivos de corte e proteção dos equipamentos da máquina. No painel frontal, não só é possível ver o estado atual da máquina através do painel luminoso, como controlar a movimentação dos vários os eixos, testar os sinais luminosos, atuar a emergência ou fazer o *reset* da máquina. Este é um dos pontos onde é possível controlar a máquina em modo manual.

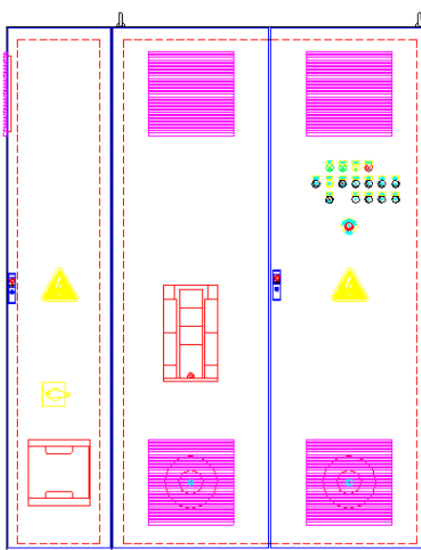


Figura 32 – Quadro elétrico do transelevador [24]

A Figura 33 apresenta um outro tipo de interface entre a máquina e o operador, sendo possível operar a máquina em modo manual ou em semi-automático. Este equipamento necessita de parametrização de modo a integrá-lo na rede de comunicação com o PLC. Após estabelecida essa comunicação, o operador pode comandar os atuadores, fazer o *preset* dos *encoders* e verificar alguns dos sinais dos sensores (os mais relevantes). A HMI possui um ecrã tátil, é alimentada a +24 V DC e comunica, como foi dito anteriormente, utilizando o protocolo PROFIBUS-DP.



Figura 33 – HMI Siemens KTM700 [42]

A HMI está instalada num quadro (CP), por norma, dentro da cabine da plataforma. Como se vê na Figura 34, este painel também possui botão de emergência, teste de lâmpadas, *reset* e *dead man*.

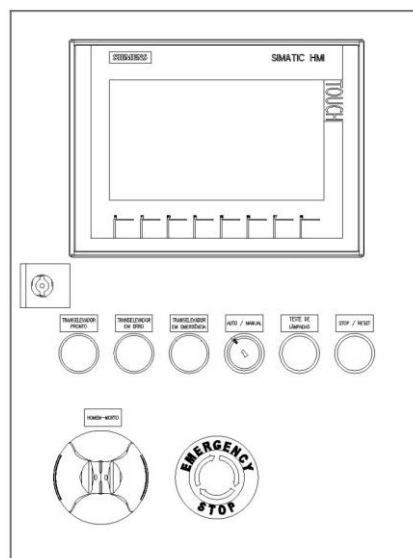


Figura 34 – Painel de controlo da plataforma CP [43]

No mastro de transelevador, numa zona visível, é colocado uma baliza luminosa ilustrativa dos diversos estados da máquina, como se vê na Figura 35.



Figura 35 – TL70 Painel luminoso [44]

A Figura 36 apresenta um motor AC da SEW, um exemplo de um motor utilizado na translação. Um motor que se caracteriza por ter uma potência de 30 kW e consumir 97 A de corrente, quando ligado em triângulo. Assume como principais vantagens a sua configuração simples, robustez, o facto de integrar um *encoder* no motor, a sua alta eficiência energética e o cumprimento do padrão dos motores IEC (motores de baixa tensão).

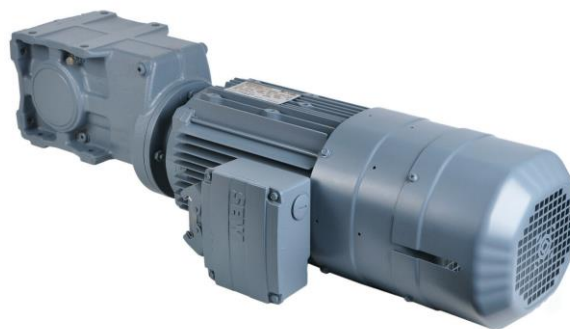


Figura 36 – SEW EURODRIVE Motor AC – Série DR [45]

A Figura 37 apresenta um dispositivo de segurança do transelevador. Este é um sensor fotoelétrico de sincronização óptica, que transmite ao receptor um feixe único infravermelho. Como diagnóstico possui um *display* com *leds* representativos do seu estado.

A sua aplicação justifica-se pela necessidade de garantir o centramento da carga na plataforma do transelevador e, por vezes, também o centramento dos garfos.



Figura 37 – Sensores de segurança fotoelétricos [46]

Quanto à utilização de dispositivos de segurança, o transelevador possui outros tipos de dispositivos como é o caso das portas de acesso à ala e cabine, homem-morto, entre outros.

2.5. MODOS DE FUNCIONAMENTO

O transelevador possui vários modos de funcionamento, definidos pela posição do seletor de chaves “auto/manual” instalado na plataforma e na cabine do quadro elétrico. Entre os modos disponíveis encontram-se o modo automático, o semi-automático e o manual. Na entrada de cada ala também existe uma caixa de acesso à ala, com um selector de remoto/local.

No modo automático, ou seja, quando o seletor da caixa da ala está em remoto e ambos os seletores do transelevador estão na posição de “automático”, são permitidas trocas de dados entre o WMS e o transelevador. Neste modo é possível controlar remotamente o transelevador a partir do WMS, bem como através do SCADA. O transelevador envia informações de estatística, erros, estados e confirmações de comandos.

O modo semi-automático difere do anterior na posição dos seletores de chaves, sendo que um dos seletores do transelevador deve estar na posição de “automático” e o seletor no local de operação deve estar em “manual”. Neste modo, o seletor da caixa da ala deve estar em “local”, não sendo aceites comandos remotos.

O modo manual é idêntico ao semi-automático sendo mais indicado para movimentos de ajuste.

2.6. REDES DE COMUNICAÇÃO

O sistema é composto por duas redes de comunicação, ambas baseadas no sistema de comunicação em redes industriais Fieldbus. Uma das redes de comunicação utilizada segue um padrão denominado PROFIBUS (versão DP - *Decentralized Peripherals*), onde o PLC controla os seus periféricos em tempo real. Este tipo de rede é utilizado quando há necessidade de uma alta velocidade e eficiência de comunicação e de um grande volume de troca de dados.

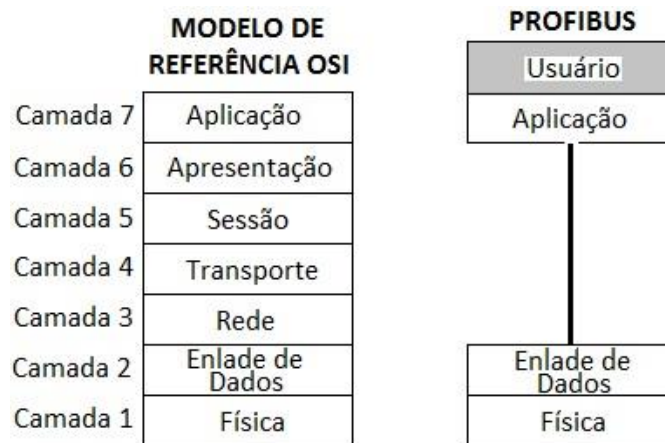


Figura 38 – Modelo OSI [47]

A arquitetura da rede PROFIBUS baseia-se num protocolo que segue o modelo OSI (Figura 38). O meio físico de comunicação é RS-485, cuja topologia é do tipo barramento. A Figura 39 ilustra a disposição dos dispositivos que compõem a rede PROFIBUS-DP.

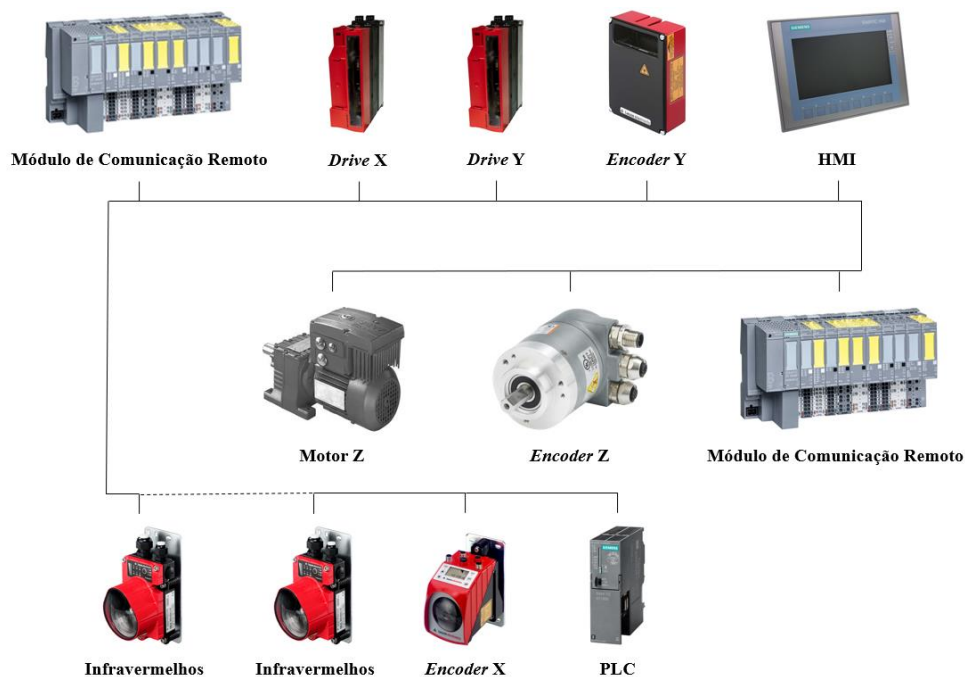


Figura 39 – Rede de comunicação PROFIBUS [48][49]

A rede de comunicação ETHERNET, segue o modelo da Figura 40, onde ilustra a sua topologia em árvore.

Por vezes, também é utilizada a rede PROFINET em detrimento da rede PROFIBUS, dado que perante uma maior densidade de tráfego ou sobrecarga da rede, esta possui maior rapidez, flexibilidade e confiabilidade na entrega dos pacotes de dados.

Outra grande vantagem é o facto de ser uma rede baseada no padrão de comunicação Ethernet, de uso frequente na automação industrial.

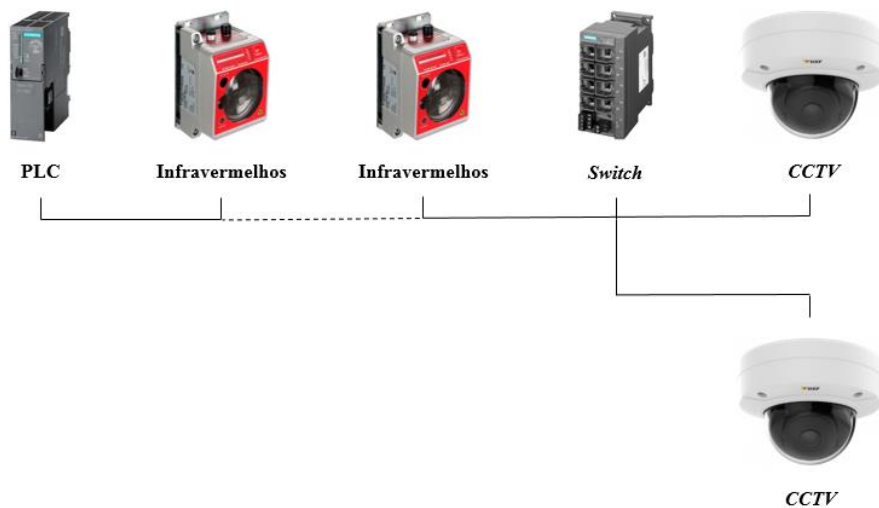


Figura 40 – Rede de comunicação ETHERNET

2.7. LISTAGEM DE ERROS

De modo a facilitar a resolução de erros de programação e manutenção do transelevador, torna-se necessário recorrer ao uso do relatório de erros.

Após a ocorrência de um erro, através do SCADA/HMI, é possível consultar o(s) tipo(s) de erro(s) em questão. Apresentam-se com um código e uma descrição, por ex: código: “E 081”; descrição: “Z: Coordenada Impossível”. Estes erros são divididos em categorias de forma a facilitar a interpretação do operador. O transelevador informa sobre erros de translação, elevação, garfos, emergências, gerais, de comunicação e específicos. O início do descritivo do erro diz respeito à sua categoria. Na Tabela 2 é possível ver exemplos de erros das diferentes categorias.

Tabela 2 – Exemplo de listagem de erros

Categoria	Código	Descrição
Translação	E 003	X: Coordenada Impossível
Elevação	E 020	Y: <i>Encoder</i> (Leitor de Código de Barras)
Garfos	E 082	Z: Comando Impossível
Emergência	E 191	EM: Botão de Emergência Ativo
Geral	E 195	GEN: Porta de Acesso ao Quadro Aberta
Comunicação	E 215	COMS: <i>Drive ZS</i>
Específico	E 250	SPEC: Amortecedor Não Posicionado

3. ANÁLISE DOS PERFIS DE MOVIMENTO

O controlo de movimento é uma vertente da automação que permite que uma máquina se movimente com base numa dada referência (geralmente de posição e/ou velocidade). Este controlo pode ser feito em malha aberta ou em malha fechada. No controlo em malha aberta o controlador envia um comando para o atuador, e não tem informação se o atuador recebeu o comando ou qual foi o seu efeito no sistema. Por sua vez, o controlo em malha fechada difere no *feedback* enviado pelo atuador ao controlador, para que este possa compensar o erro relativo ao comando. Geralmente, no caso de um controlo de posição e/ou velocidade de um motor, esta informação é dada por um *encoder*. Desta forma pode obter-se um controlo com maior precisão.

O controlo de movimento do transelevador é um controlo de posição (ponto-a-ponto) em malha fechada.

3.1. TIPOS DE PERFIS (ANÁLISE GRÁFICA)

Geralmente, este tipo de controlo baseia-se em perfis simétricos de velocidade, cujos modelos são do tipo trapezoidal e *S-Curve* (Figura 41).

O trapezoidal é dividido em 3 fases, entre as quais, fase de aceleração, de velocidade constante e de desaceleração, respetivamente. Na fase 1, a carga parte de uma posição de repouso e inicia o movimento com uma aceleração linear constante. Esta fase termina no instante em que é atingida a velocidade máxima pretendida. Inicia-se a fase 2 com velocidade constante e a aceleração nula. A fase 3 tem início na posição de desaceleração calculada, permitindo que a carga desacelere linearmente até o momento em que esta atinge a posição final com velocidade nula.

Embora com semelhanças, o que distingue os dois perfis é que o modelo da *S-Curve* possui fases de movimento nos instantes de mudança de aceleração do modelo trapezoidal. Como se pode analisar na Figura 41 (1A), a *S-Curve* possui 7 fases, sendo que as fases 2/4/6 correspondem às fases 1/2/3 do perfil trapezoidal, respetivamente. O perfil da velocidade evolui de trapezoidal para *S-Curve*.

Analisando o perfil da aceleração, este passa do tipo degrau para trapezoidal. Esta mudança deve-se ao facto de controlar a característica de movimento presente nos instantes de variação da aceleração denominada por “*jerk*”. O perfil trapezoidal possui transições instantâneas entre as 3 fases, ou seja, instantes em que o valor de *jerk* é infinito. Já no perfil *S-Curve* esta transição (fases 1/3/5/7) ocorre com um *jerk* limitado (formato de degrau) [50].

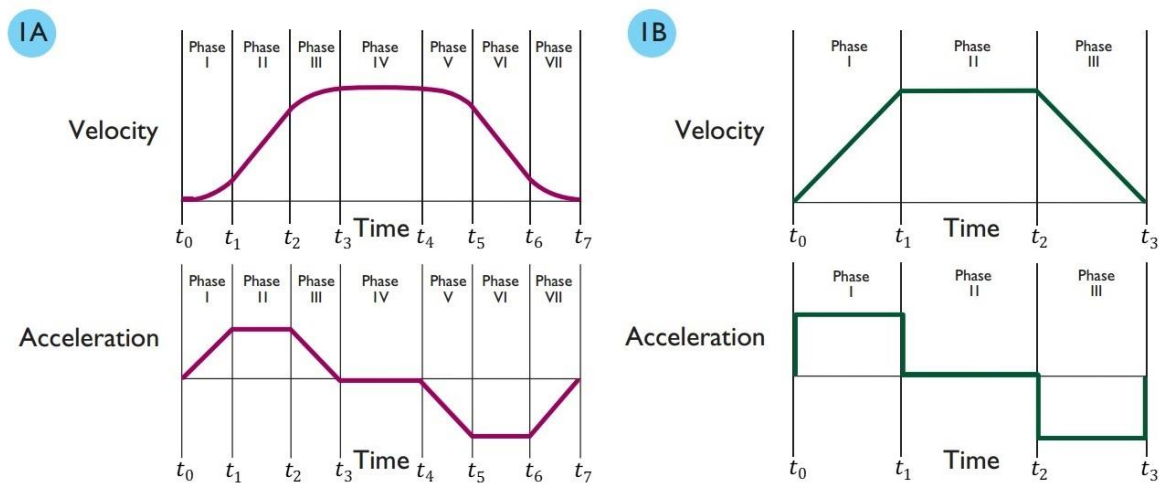


Figura 41 – Perfis simétricos *S-Curve* (1A) e trapezoidal (1B) [50]

3.2. JERK

Analisando os perfis da Figura 41, uma característica visível graficamente é a suavidade da curva de velocidade do modelo *S-Curve* em oposição ao trapezoidal. Este fenómeno consiste no estado de uma dada carga, em que quanto maior for o *jerk*, maior será a quantidade de energia vibratória indesejada gerada, e maior o respetivo espetro de frequência de energia vibratória (Figura 42).

Resumidamente, ao limitar o *jerk*, dissipa-se a energia vibracional pela mecânica do sistema, garantindo assim menor oscilação da carga.

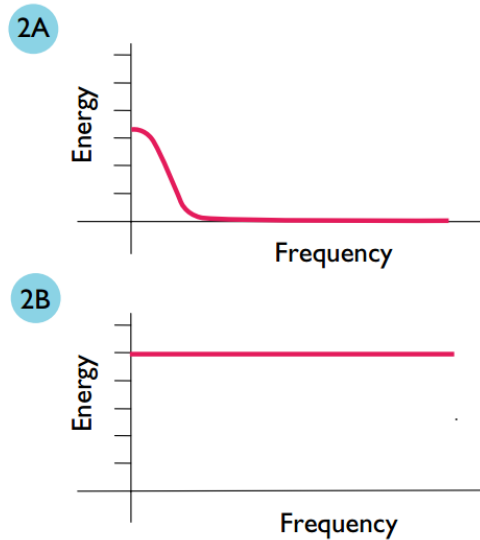


Figura 42 – Relação energia vibratória e frequência [50]

Eis as vantagens mais relevantes do controlo de *jerk*:

- Maior suavidade de movimento;
- Redução de desgaste;
- Maior estabilidade;
- Redução dos impactos mecânicos;
- Redução da oscilação da carga.

3.3. PERFIL DE MOVIMENTO SIMÉTRICO – MODELO TRAPEZOIDAL

Recorrendo às equações da cinemática, após serem estabelecidas as condições iniciais de posição, velocidade e aceleração para os instantes de t_i ($i = 0,1,2,3$) é possível representar matematicamente os vários perfis de movimento (Figura 43). De entre os parâmetros iniciais encontram-se a posição inicial e final; a velocidade mínima inicial e final e a aceleração, desaceleração e velocidade máxima.

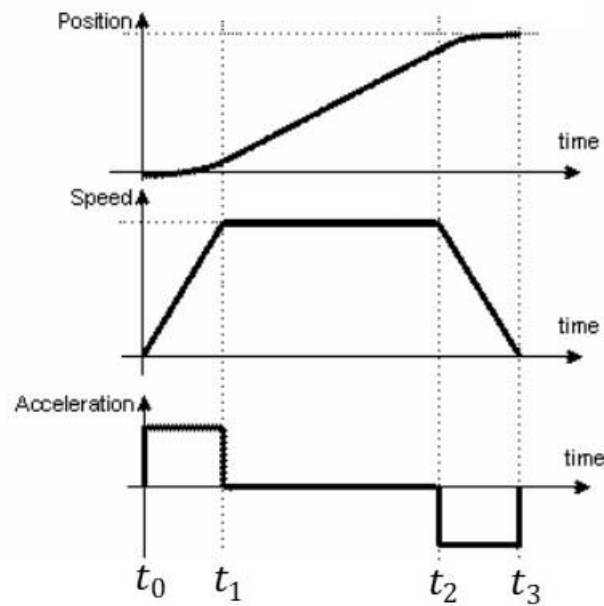


Figura 43 – Perfil simétrico trapezoidal [51]

O perfil da posição s_i traduz-se pela seguinte expressão:

$$s_i = s(t_i) = s_{i-1} + v_{i-1}t_i + \frac{1}{2}at_i^2 \quad (1)$$

A equação (2) apresenta o perfil da posição, para cada uma das fases.

$$s_i = s(t_i) = \begin{cases} s_0 + v_0t_1 + \frac{1}{2}at_1^2, & t_0 < t_i < t_1 \\ s_1 + v_1t_2 + \frac{1}{2}at_2^2, & t_1 < t_i < t_2 \\ s_2 + v_2t_3 + \frac{1}{2}at_3^2, & t_2 < t_i < t_3 \end{cases} \quad (2)$$

O perfil da velocidade (equação (4)) define-se através da primeira derivada da equação da posição em relação ao tempo, como se verifica na equação (3).

$$v_i = v(t_i) = s_{i-1} + v_{i-1}t_i + \frac{1}{2}at_i^2 \frac{ds}{dt} \quad (3)$$

$$v_i = v(t_i) = \begin{cases} v_0 + at_1, & t_0 < t_i < t_1 \\ v_1 + at_2, & t_1 < t_i < t_2 \\ v_2 + at_3, & t_2 < t_i < t_3 \end{cases} \quad (4)$$

O perfil da aceleração (equação (6)) define-se através da segunda derivada da equação da posição em relação ao tempo, como se verifica na equação (5).

$$a_i = a(t_i) = s_{i-1} + v_{i-1}t_i + \frac{1}{2}at_i^2 \frac{d^2s}{dt^2} \quad (5)$$

$$a_i = a(t_i) = \begin{cases} a_1, & t_0 < t_i < t_1 \\ a_2, & t_1 < t_i < t_2 \\ a_3, & t_2 < t_i < t_3 \end{cases} \quad (6)$$

O cálculo auxiliar encontra-se no Anexo B, onde se pode verificar o cálculo da posição de desaceleração, entre outros.

3.4. PERFIL DE MOVIMENTO ASSIMÉTRICO – MODELO S-CURVE

Com base nas equações da cinemática, após serem estabelecidas as condições iniciais de posição, velocidade, aceleração e *jerk* para os instantes de t_i ($i = 0,1,2...7$) é possível representar matematicamente os vários perfis de movimento (Figura 44). De entre os parâmetros iniciais encontram-se a posição inicial e final; a velocidade mínima inicial e final; a velocidade, aceleração e desaceleração máxima e *jerk*.

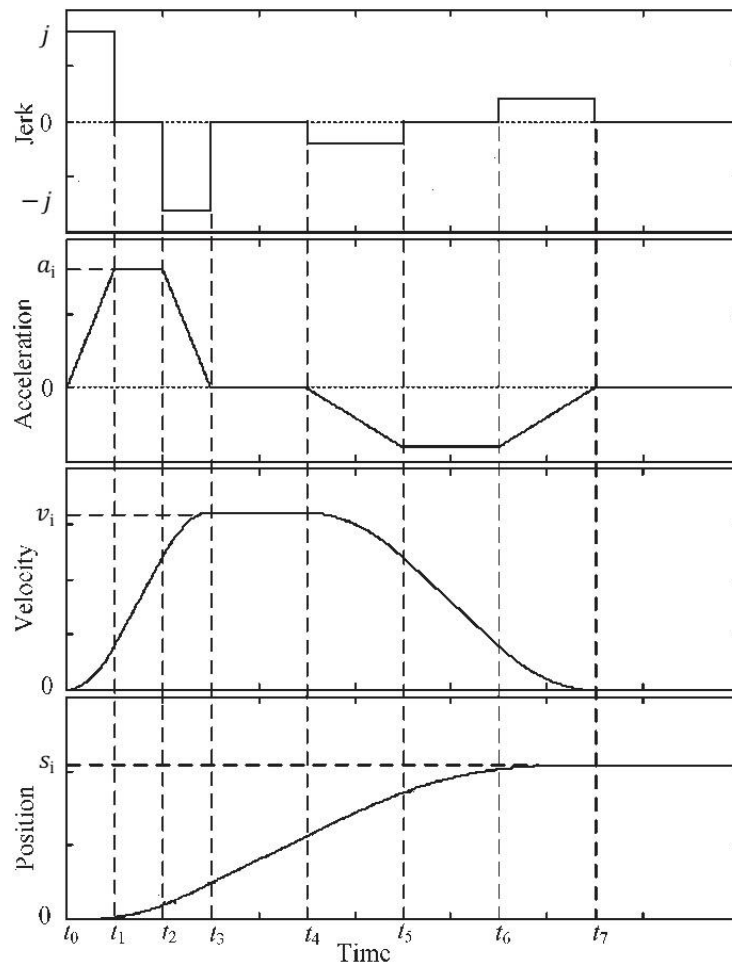


Figura 44 – Perfil assimétrico S-Curve [52]

O perfil da posição s_i obtém-se segundo a equação geral da posição:

$$s_i = s(t_i) = s_{i-1} + v_{i-1}t_i + \frac{1}{2}at_i^2 + \frac{1}{6}j_it_i^3 \quad (7)$$

A equação da velocidade define-se através da primeira derivada da equação da posição em relação ao tempo:

$$v_i = v(t_i) = s_{i-1} + v_{i-1}t_i + \frac{1}{2}at_i^2 + \frac{1}{6}j_it_i^3 \frac{ds}{dt} \quad (8)$$

No Anexo C são apresentados os cálculos que caracterizam a simulação e a função. Para isso, consideraram-se diferentes cenários visando a otimização do comportamento estudado.

Cenário 1: $t_2 = t_4 = t_6 = 0$. Neste cenário são calculados os parâmetros para as fases 1/3/5/7, desprezando as fases cujo *jerk* é nulo.

Cenário 2: $t_2 \neq 0$, $t_4 \neq 0$ e $t_6 \neq 0$. Calculados os parâmetros de posição, velocidade e aceleração, para as fases 2/4/6.

3.5. SIMULAÇÃO DE PERFIS

Esta secção apresenta a lógica das funções bem como as representações gráficas dos vários perfis de movimento. Para o teste da função utilizou-se a ferramenta Octave, uma vez que se trata de um *software* livre para cálculo numérico. O Anexo A permite uma análise do código em que se baseiam as respetivas simulações.

Para visualizar o movimento do transelevador, utilizou-se o simulador TrySim. Na Figura 45 pode ver-se a simulação de um transelevador na janela superior (vista 3D). A janela inferior diz respeito à operação de comando e sinalização de estados. O que se entende pela primeira é a seleção do modo de funcionamento, a definição da posição final, comandos de *stop*, *reset* e *start* quando se inicia um novo movimento. Exemplos de sinalização de estados tais como posicionado, pronto, *fault*, posição atual e modo de funcionamento auto/manual.

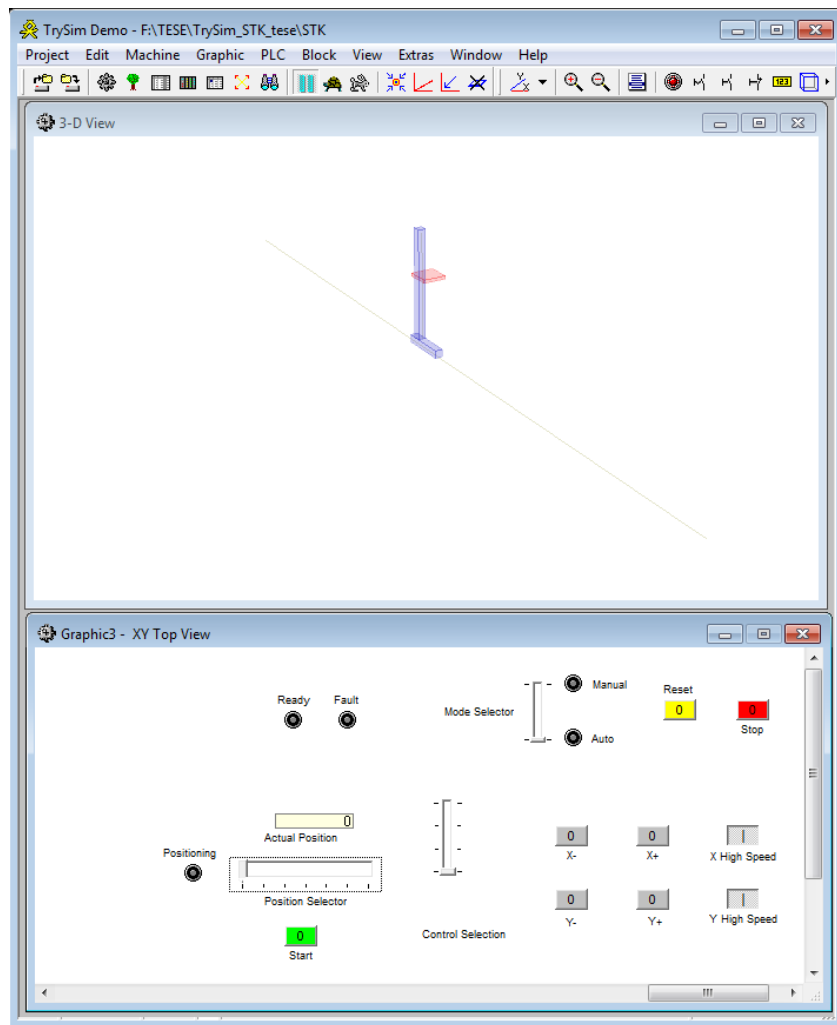


Figura 45 – Aplicação de simulação de movimento do transelevador

3.5.1. PERFIS DE MOVIMENTO SIMÉTRICO - MODELO TRAPEZOIDAL

Recorreu-se à representação esquemática da Figura 46, por forma a ilustrar o algoritmo desenvolvido para a simulação dos perfis trapezoidal e triangular. Numa primeira fase após receber os parâmetros de entrada, a função avalia a distância a percorrer da posição inicial à final. Mediante esta distância será calculado o perfil correspondente. Em cada um dos perfis são calculados os valores das posições e velocidades finais no momento da mudança de fase. A mudança de fase é definida pela posição.

Posto isto, é avaliada a posição atual comparativamente com a posição final de cada fase, delimitando assim em que fase de movimento se encontra. A velocidade calculada correspondente a cada fase é enviada para o *drive*, ao longo do movimento. Esta simulação permite ilustrar um movimento assimétrico, basta para isso que parâmetros de entrada da aceleração e desaceleração assumam valores distintos.

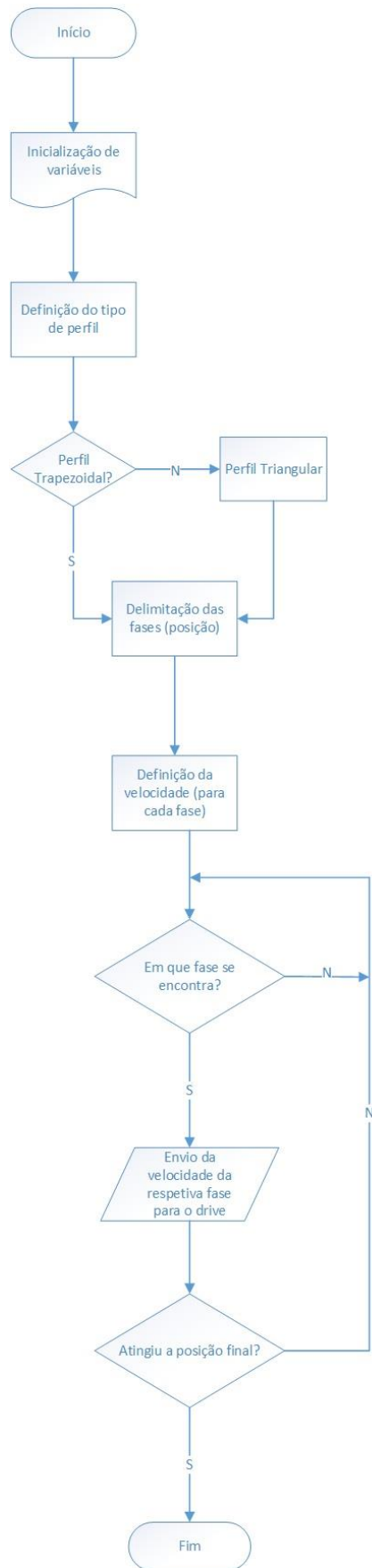


Figura 46 – Fluxograma da simulação do perfil trapezoidal/triangular

As ilustrações das Figura 47 e Figura 48 são a representação gráfica dos perfis descritos matematicamente nas equações (4) e (2) respetivamente, mediante determinados parâmetros iniciais. Seguindo a lógica da Figura 46, os exemplos abaixo representam a simulação de um movimento de 25 m (exemplo de um movimento longo). Na Figura 47 pode verificar-se que o corpo inicia o movimento com uma velocidade inicial mínima (ex: 150 mm/s), atinge a sua velocidade máxima de 2 m/s e termina o movimento com uma velocidade final mínima de 50 mm/s (não é visível no gráfico devido à sua escala – exemplo que se verifica na Figura 49). Este último parâmetro foi considerado pois permite maior precisão ao atingir a posição pretendida. Quanto à rampa de aceleração/desaceleração, no caso de um movimento simétrico, estas possuem o mesmo declive como se verifica na Figura 47.

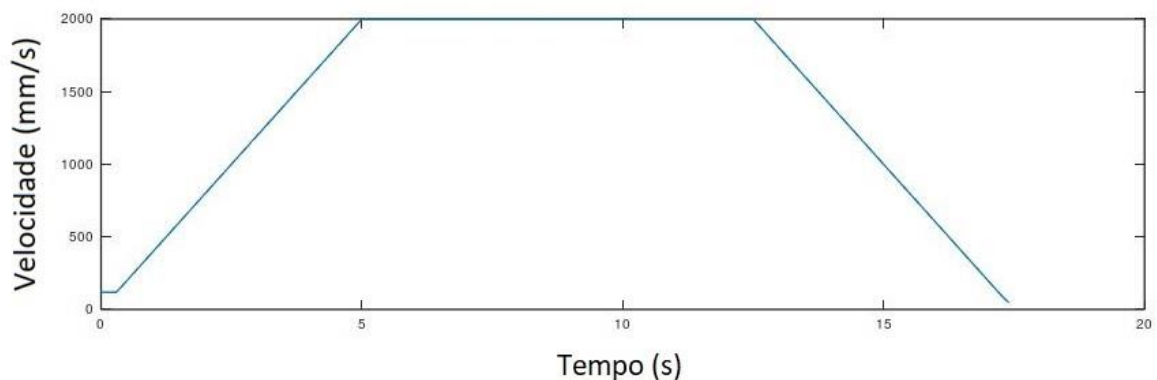


Figura 47 – Função de velocidade – modelo trapezoidal

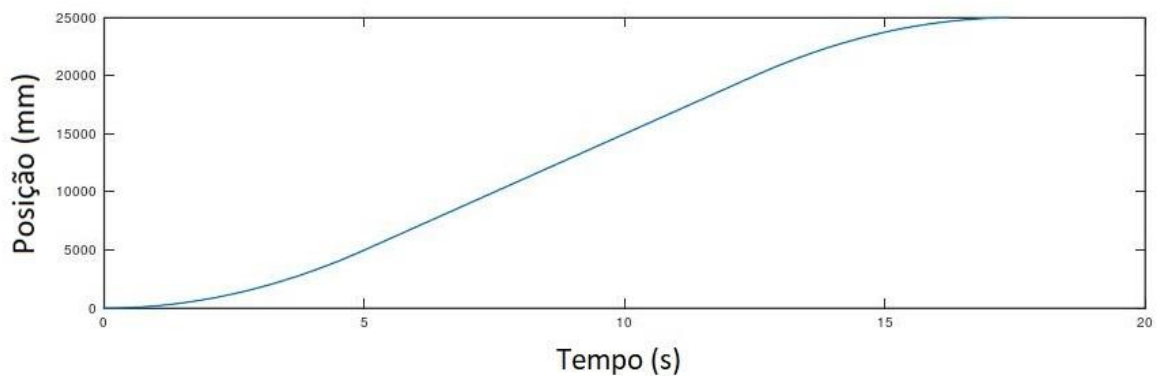


Figura 48 – Função de posição – modelo trapezoidal

3.5.2. PERFIS DE MOVIMENTO SIMÉTRICO - MODELO TRIANGULAR

As Figura 49 e 50 descrevem graficamente os perfis, quando a velocidade máxima inicialmente definida não é atingida. Desta forma, os perfis de posição, velocidade e aceleração apenas se dividem em 2 fases (de aceleração e desaceleração) - para t_i ($i = 0,1,2$). É de notar que o modelo triangular também segue a lógica de funcionamento apresentada na Figura 46.

Os exemplos apresentados bem como os parâmetros definidos são a simulação de um movimento simétrico de 1 m (exemplo de um movimento curto). Na Figura 49 pode verificar-se que o corpo inicia o movimento com uma velocidade inicial mínima (ex: 120 mm/s) e atinge a sua velocidade máxima de 0,6 m/s. Esta velocidade foi calculada considerando a distância, entre outros parâmetros iniciais, sendo que a velocidade máxima para o movimento foi considerada de 2 m/s. No final, o corpo termina o movimento com uma velocidade final mínima de 50 mm/s.

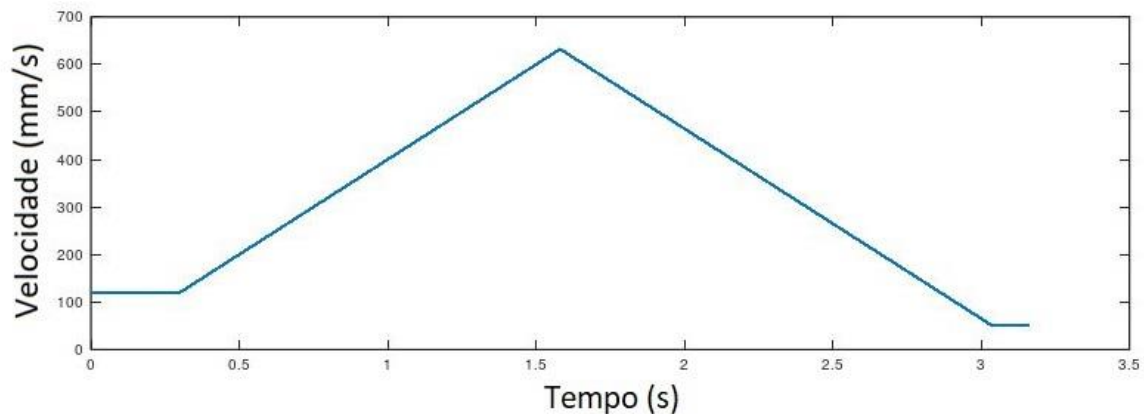


Figura 49 – Função de velocidade – modelo triangular

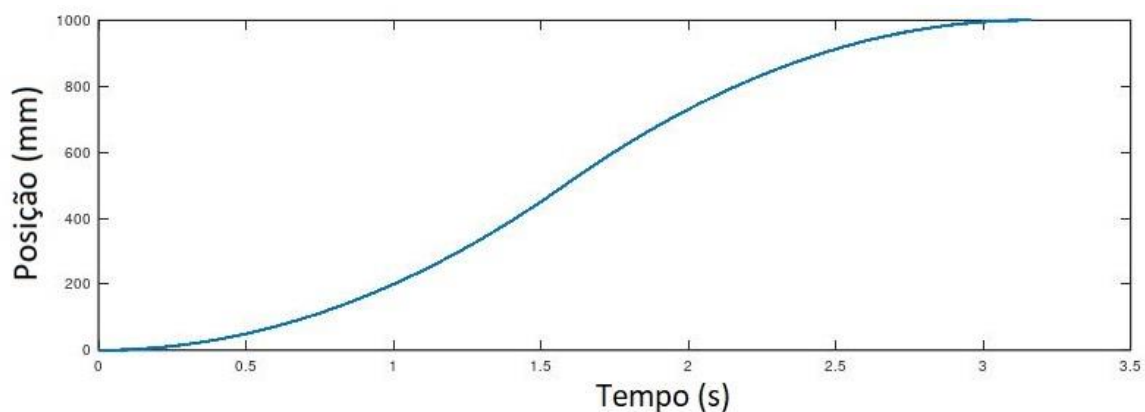


Figura 50 – Função de posição – modelo triangular

3.5.3. PERFIS DE MOVIMENTO ASSIMÉTRICO - MODELO S-CURVE

A Figura 53 descreve o processo de cálculo dos parâmetros de controlo a enviar ao *drive* do motor, durante o movimento. Inicialmente a função calcula a velocidade máxima, através de um método iterativo. Este método analisa vários parâmetros, entre os quais, a posição alvo. A aceleração e desaceleração máximas são também calculadas em simultâneo, relacionando a velocidade atual com os diversos *jerks*. Com base nos valores máximos de aceleração, desaceleração e velocidade, é recalculada a posição final de cada uma das fases.

O método de análise da fase atual segue a mesma ideologia do perfil trapezoidal e triangular, sendo a comparação entre a posição atual com a posição final de cada fase. Posteriormente, é calculado o valor da velocidade na respetiva fase, e enviado para o *drive* de controlo do motor.

A Figura 51 é o resultado do processo descrito na Figura 53. Matematicamente, representa a variação de velocidade descrita pela equação (8).

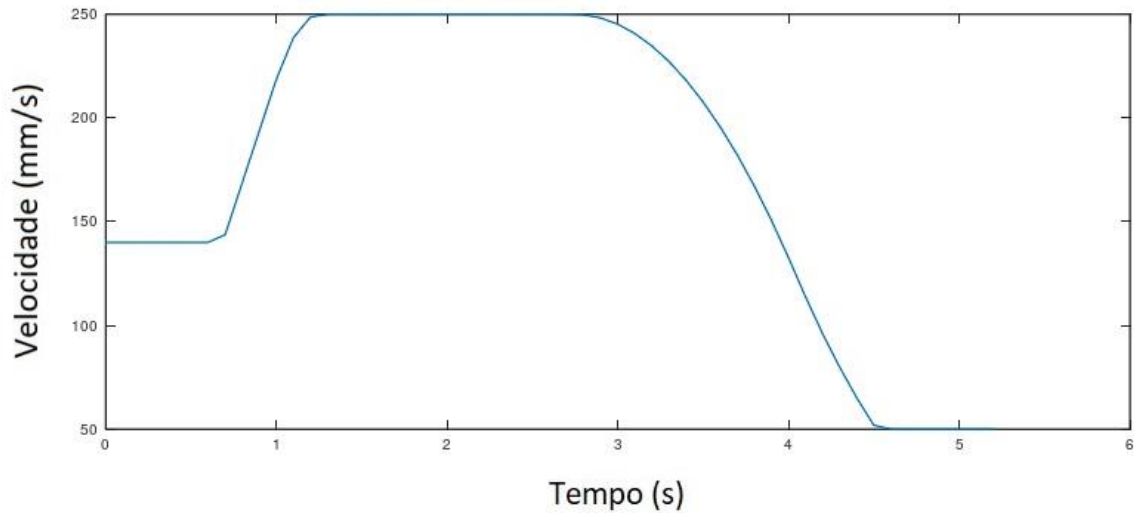


Figura 51 – Função de velocidade – modelo S-Curve

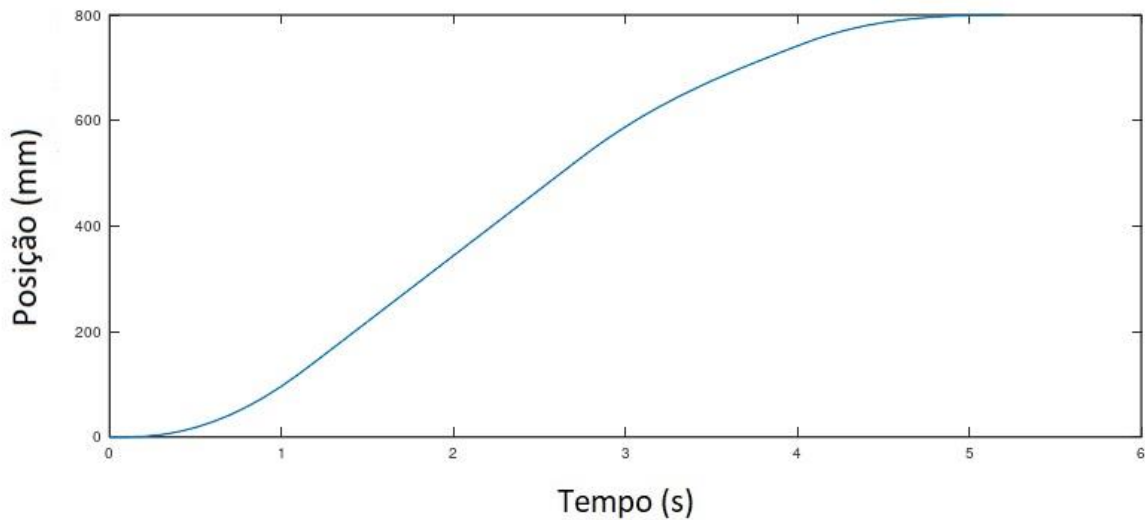


Figura 52 – Função de posição – modelo S-Curve

De modo a tornar mais visível a dinâmica simulou-se o movimento com uma velocidade de 250 mm/s e definiu-se uma distância de 80 m. O transelevador inicia o movimento com uma velocidade inicial de 140 mm/s e termina com 50 mm/s. Na Figura 51 verifica-se que a rampa de aceleração possui maior declive que a rampa de desaceleração. Assim, é possível adequar a dinâmica do movimento mediante a carga a transportar.

Esta simulação permite ilustrar um movimento simétrico, basta para isso que parâmetros de entrada da aceleração e desaceleração sejam iguais.

A Figura 52 ilustra a mudança de posição do mesmo movimento (relativo à equação (7)).

No processo representado na Figura 53, na saída de dados ‘Envio da velocidade da respectiva fase para o drive’, a velocidade é calculada com base na raiz real de uma função cúbica. Este cálculo consiste num processo iterativo e incremental, como descrito na Figura 54. Após a receção dos parâmetros de entrada são calculados a raiz cúbica, a sua primeira derivada, a raiz real e o desvio entre a raiz da iteração atual e anterior. A cada ciclo é incrementado o número de iterações e guardado valor da raiz real da iteração anterior. O ciclo iterativo termina quando o desvio do cálculo da raiz da iteração atual é inferior a 0,001 ou o número de iterações é superior a 20.

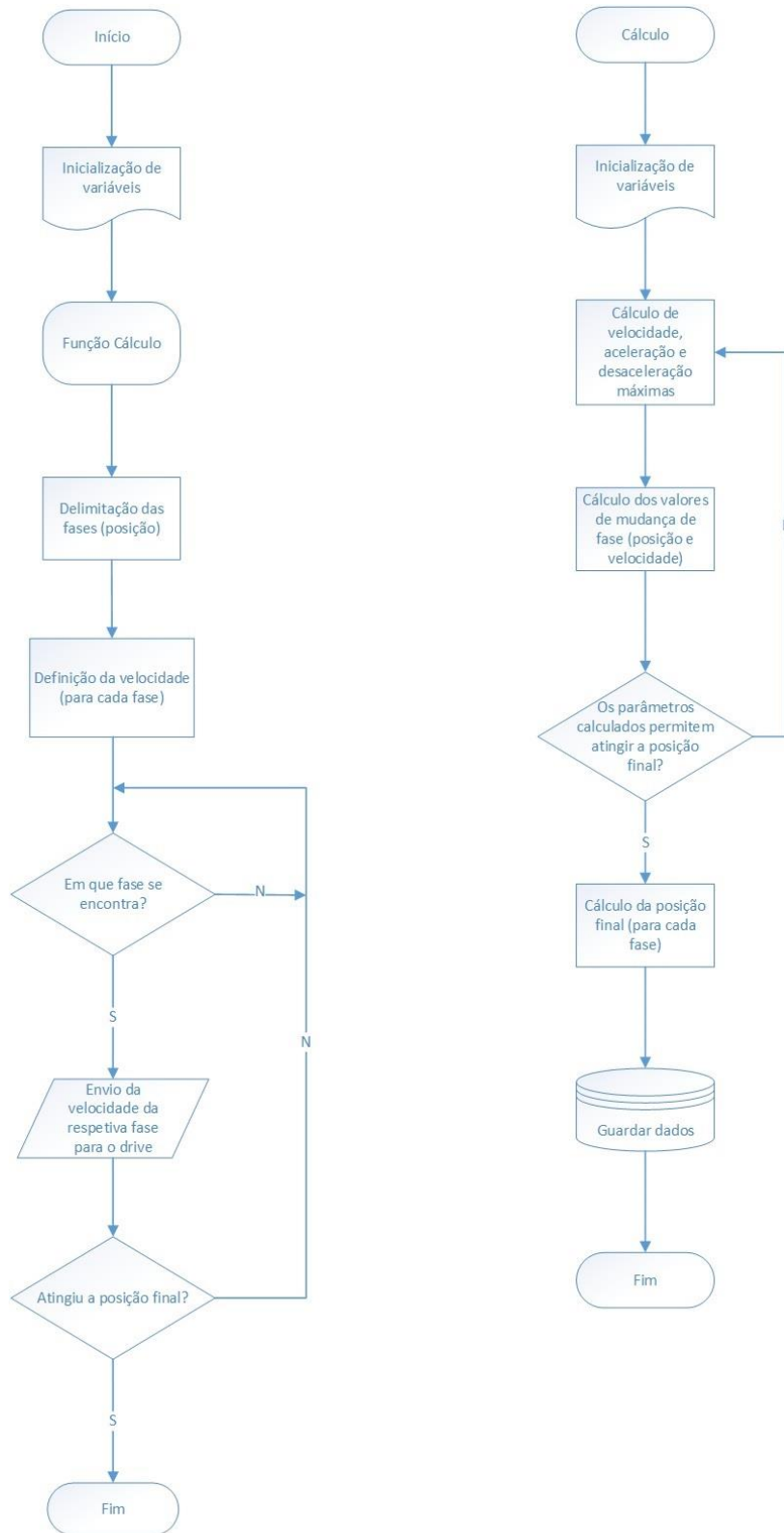


Figura 53 – Fluxograma da simulação e implementação do perfil S-Curve

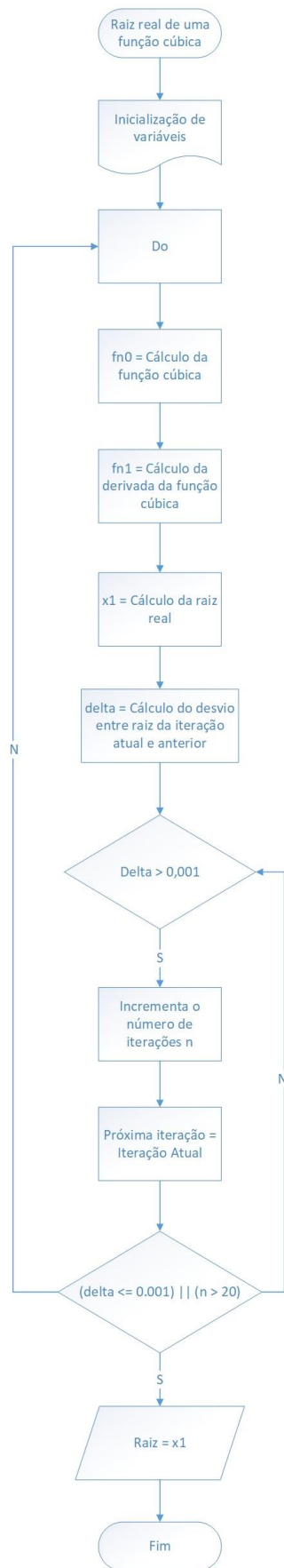


Figura 54 – Fluxograma do cálculo iterativo da raiz cúbica

Na função Cálculo representada na Figura 53, o ciclo *do-while* caracterizado pelo bloco de decisão ‘Os parâmetros calculados permitem atingir a posição final?’ também consiste num método iterativo e incremental. Esse processo é descrito na Figura 55, onde se pretende calcular a velocidade máxima do movimento, de modo a atingir a posição final. Esta velocidade máxima afeta ao cálculo dos tempos de cada fase, a aceleração e desaceleração máxima, e posição limite de cada fase. A cada ciclo é somada/subtraída à velocidade atual uma velocidade (V_{janela}), consoante a posição final calculada é menor/maior que a pretendida, respetivamente. O número de iterações dado por ‘i’, é inicializado com valor 0 e incrementado a cada ciclo. O ciclo termina quando diferença entre a velocidade máxima da iteração atual e da iteração anterior é inferior ou igual a 1 mm/s.

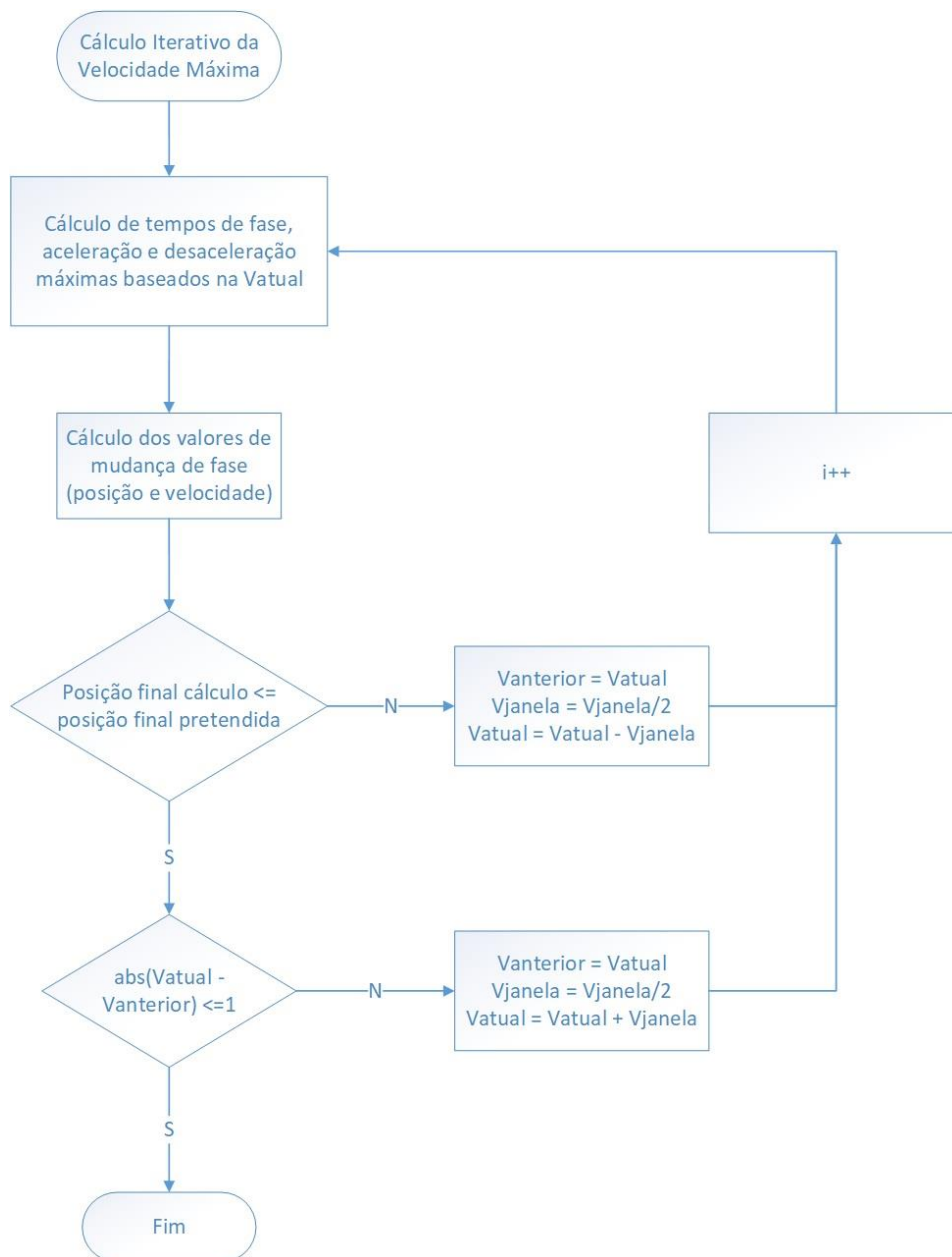


Figura 55 – Fluxograma do cálculo iterativo da velocidade máxima

4. DESENVOLVIMENTO

Este capítulo apresenta o sistema, a sua arquitetura e ainda o controlo implementado. Identifica o que se pretende evoluir, bem como a solução original e a proposta. Entre outros pontos, caracteriza os aspetos mais relevantes necessários ao desenvolvimento da função.

4.1. ARQUITETURA DO SISTEMA

O sistema consiste no controlo de posição de dois motores de um transelevador. Este controlo é feito por intermédio de um PLC e de um variador de frequência. O PLC recebe ainda o valor da posição atual por meio de um *encoder*. O sistema aplica assim um controlo em malha fechada, permitindo regular a sua velocidade, aceleração e *jerk* (Figura 56).

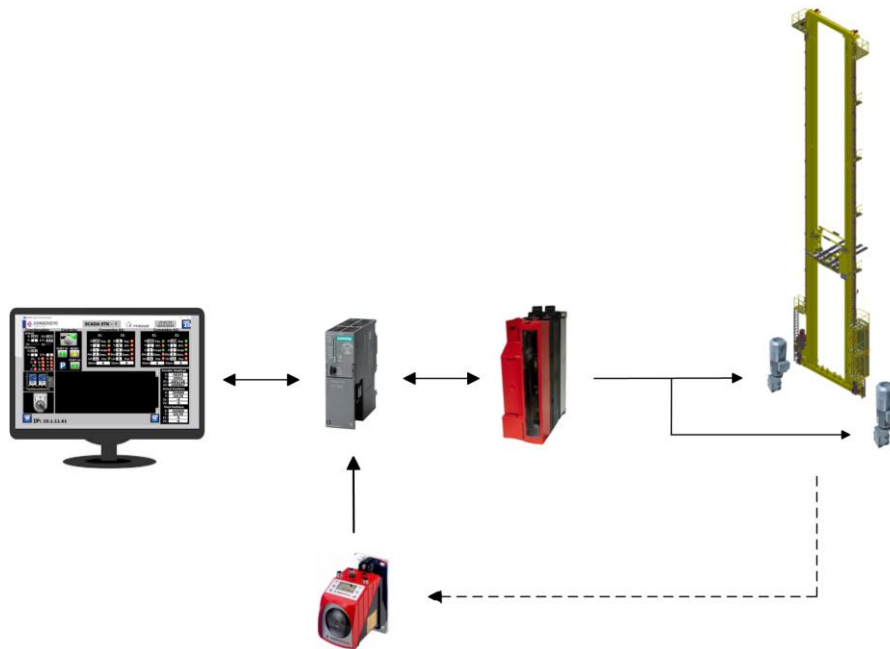


Figura 56 – Arquitetura do sistema

4.2. PERFIL DE MOVIMENTO – FUNÇÃO ORIGINAL

O perfil original segue o modelo *S-Curve*, descrevendo um perfil simétrico de velocidade, em zonas de aceleração positiva e negativa. O perfil é composto por 7 fases, onde o corpo acelera nas fases 1/2/3 até atingir a velocidade máxima (Figura 57). Nas fases 5/6/7 o corpo desacelera gradualmente até atingir a posição final, com velocidade e aceleração nulas.

Matematicamente, o corpo movimenta-se com *jerk* constante nas fases 1/3/5/7. Esta definição será o motivo deste estudo, uma vez que, ao controlar estes parâmetros de forma independente (entre fases), permite uma maior flexibilidade da curva do movimento.

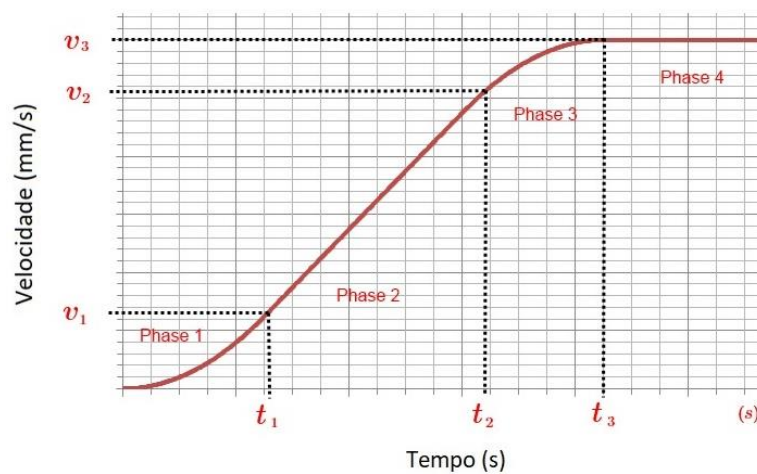


Figura 57 – Perfil da *S-Curve* original

4.2.1. TABELAS DE ENTRADAS E SAÍDAS – FUNÇÃO ORIGINAL

Primeiramente, as Tabelas 3, 4 e 5 apresentam os parâmetros controlados pelo PLC (função original). Estas contêm tanto variáveis de entrada do PLC, bem como de processamento/cálculo e respectivas saídas.

Tabela 3 – Variáveis de entrada – função original

Função	Variável	Descrição
Entrada	IN_POS_ACT	Posição atual
Entrada	IN_POS_MAX	Posição máxima
Entrada	IN_POS_MIN	Posição mínima
Entrada	IN_DIST_COIN	Janela de posicionamento
Entrada	IN_DIST_STOP_POS	Distância de paragem direção positiva
Entrada	IN_DIST_STOP_NEG	Distância de paragem direção negativa
Entrada	IN_ACCEL_MAX	Aceleração máxima
Entrada	IN_JERK_MAX	<i>Jerk</i> máximo
Entrada	IN_SPEED_MAX	Velocidade máxima
Entrada	IN_SPEED_MIN	Velocidade mínima
Entrada	IN_SPEED_COEFF	Coefficiente de Velocidade
Entrada	IN_SPEED_LIMIT	Velocidade máxima do projeto
Entrada	IN_BRAKE_ON	Freio Aberto
Entrada	IN_MOV_EXE	Movimento em execução

Tabela 4 – Variáveis de cálculo – função original

Função	Variável	Descrição
Entrada e saída	IN_OUT_POS_FIN	Posição final
Entrada e saída	IN_OUT_POS_START	Posição inicial
Entrada e saída	IN_OUT_START_DIST	Distância à posição inicial
Entrada e saída	IN_OUT_CALC_MAX_SPEED	Cálculo da velocidade máxima
Entrada e saída	IN_OUT_CALC_MAX_ACC	Cálculo da aceleração máxima
Entrada e saída	IN_OUT_CALC_DIST_PHASE1	Cálculo da distância no final da fase 1
Entrada e saída	IN_OUT_CALC_DIST_PHASE2	Cálculo da distância no final da fase 2
Entrada e saída	IN_OUT_CALC_DIST_PHASE3	Cálculo da distância no final da fase 3
Entrada e saída	IN_OUT_CALC_SPEED_PHASE1	Cálculo da velocidade da fase 1
Entrada e saída	IN_OUT_CALC_SPEED_PHASE2	Cálculo da velocidade da fase 2
Entrada e saída	IN_OUT_CALC_SPEED_PHASE3	Cálculo da velocidade da fase 3
Entrada e saída	IN_OUT_MOV_START	Início do movimento

Tabela 5 – Variáveis de saída – função original

Função	Variável	Descrição
Saída	OUT_SPEED	Velocidade de referência
Saída	OUT_DIRECTION	Direção do movimento
Saída	OUT_POSITIONED	Posicionado
Saída	OUT_DIST_ACT_FIN	Distância entre a posição atual e final

4.3. PROPOSTA

Como condições iniciais, será utilizado um sistema que avalia a posição atual ao longo do movimento, controlando a velocidade do acionamento. A função deverá ter em conta os seguintes parâmetros (Figura 58):

- Posição inicial do movimento (p_{ini});
- Posição final do movimento (p_{fin});

- Velocidade máxima ($v_{\text{máx}}$);
- Velocidade inicial mínima ($v_{i\text{mín}}$);
- Velocidade final mínima ($v_{f\text{mín}}$);
- Aceleração máxima ($a_{\text{máx}}$);
- Desaceleração máxima ($d_{\text{máx}}$);
- “*jerk*” inicial de aceleração máximo ($j_{ia\text{máx}}$);
- “*jerk*” final de aceleração máximo ($j_{fa\text{máx}}$);
- “*jerk*” inicial de desaceleração máximo ($j_{id\text{máx}}$);
- “*jerk*” final de desaceleração máximo ($j_{fd\text{máx}}$).

Para realizar essa otimização, antes de iniciar o movimento a função deverá calcular os seguintes valores tendo em conta a distância a percorrer:

- Velocidade máxima para o movimento;
- Aceleração máxima para o movimento;
- Desaceleração máxima para o movimento;
- Distância de fim da Zona de Aceleração e início da Zona de Velocidade Constante;
- Distância de fim da Zona de Velocidade Constante e início da zona de Desaceleração.

A função deverá ser desenvolvida e testada nos PLC da Siemens S7-300/400 e S7-1200/1500.

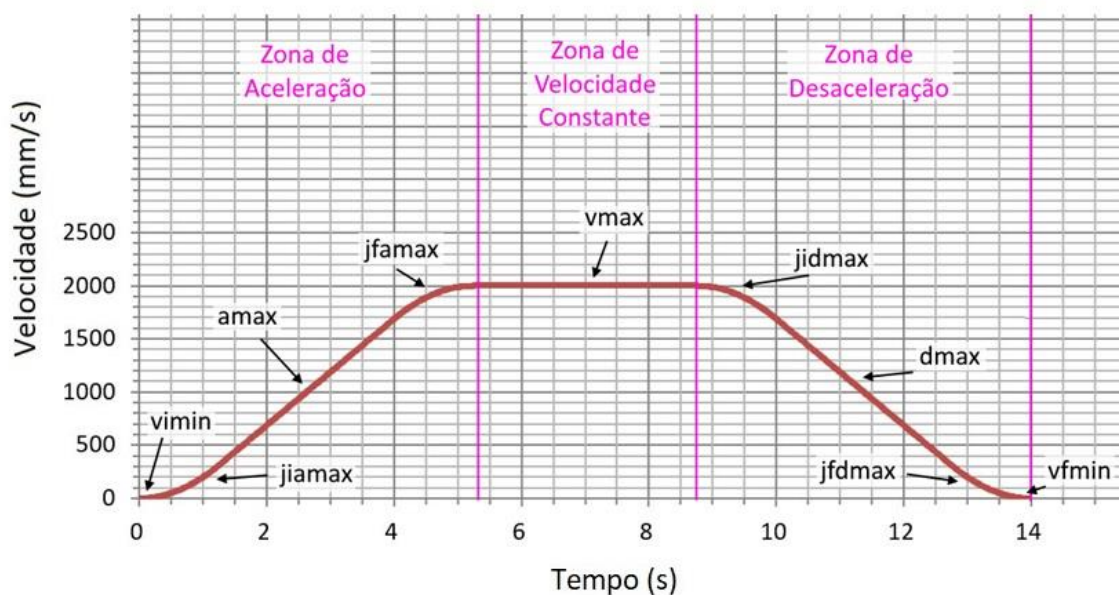


Figura 58 – Representação do perfil de velocidade a implementar

4.4. PERFIL DE MOVIMENTO – NOVA VERSÃO

O perfil a desenvolver consiste num modelo de movimento denominado de *S-Curve*, onde se pretende controlar, em específico, a variável de *jerk* a cada variação do perfil de aceleração. Assim sendo, ao longo do movimento será possível controlar os parâmetros $j_{ia_{máx}}$, $j_{fa_{máx}}$, $j_{id_{máx}}$ e $j_{fd_{máx}}$, tendo em vista um movimento mais controlado e com melhor desempenho, tal como ilustrado na Figura 58.

O controlo destes parâmetros de forma independente, é sinónimo de maior flexibilidade. Esta característica permite que a função se adapte a outros sistemas, com características distintas (dependendo da sua aplicação/finalidade). Em jeito de comparação, uma solução em que o foco é a velocidade do movimento *versus* um outro sistema que dá prioridade à estabilidade da carga durante o transporte.

4.4.1. TABELAS DE ENTRADAS E SAÍDAS – NOVA VERSÃO

Após a análise da função original e do comportamento pretendido da nova função, foram definidas novas variáveis de controlo do sistema (Tabelas 6 e 7). Estas complementam as já mencionadas na função original (Tabelas 3, 4 e 5).

Tabela 6 – Restantes variáveis de entrada – nova versão

Função	Variável	Descrição
Entrada	IN_DECEL_MAX	Desaceleração máxima
Entrada	IN_SPEED_MIN_INIT	Velocidade inicial mínima
Entrada	IN_SPEED_MIN_FIN	Velocidade final mínima
Entrada	IN_JERK_PHASE1	<i>Jerk</i> inicial máximo – zona de aceleração
Entrada	IN_JERK_PHASE3	<i>Jerk</i> final máximo – zona de aceleração
Entrada	IN_JERK_PHASE5	<i>Jerk</i> inicial máximo – zona de desaceleração
Entrada	IN_JERK_PHASE7	<i>Jerk</i> final máximo – zona de desaceleração

Tabela 7 – Restantes variáveis de cálculo – nova versão

Função	Variável	Descrição
Entrada e saída	IN_OUT_CALC_MAX_DEC	Cálculo da desaceleração máxima
Entrada e saída	IN_OUT_CALC_DIST_PHASE4	Cálculo da distância no final da fase 4
Entrada e saída	IN_OUT_CALC_DIST_PHASE5	Cálculo da distância no final da fase 5
Entrada e saída	IN_OUT_CALC_DIST_PHASE6	Cálculo da distância no final da fase 6
Entrada e saída	IN_OUT_CALC_DIST_PHASE7	Cálculo da distância no final da fase 7
Entrada e saída	IN_OUT_CALC_SPEED_PHASE4	Cálculo da velocidade da fase 4
Entrada e saída	IN_OUT_CALC_SPEED_PHASE5	Cálculo da velocidade da fase 5
Entrada e saída	IN_OUT_CALC_SPEED_PHASE6	Cálculo da velocidade da fase 6
Entrada e saída	IN_OUT_CALC_SPEED_PHASE7	Cálculo da velocidade da fase 7

4.5. SISTEMA DE CONTROLO

O controlo é implementado num PLC através de uma função que efetua cálculos lógicos por forma a gerar o comportamento pretendido.

A velocidade atual (entre outros parâmetros) é calculada para cada uma das fases do movimento. Em seguida é enviada para o *drive* através de uma função de interface com o mesmo, em cada instante de variação da posição.

O *drive*, por sua vez, transforma esse valor numa dada frequência e tensão elétrica, controlando a alimentação do motor. Como função de *feedback*, o *encoder* do respectivo eixo, realimenta a função com a posição atual. Desta forma, informa o sistema da distância até à posição final (Figura 59).

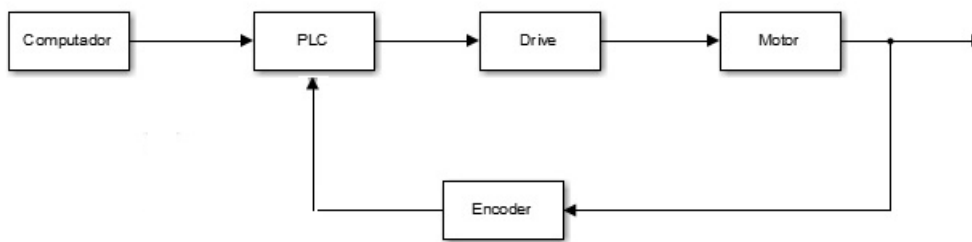


Figura 59 – Diagrama de blocos

Na Figura 60 está representado graficamente o controlo elétrico do motor de indução trifásico. O *drive* é alimentado através da rede (alimentação trifásica) e converte o valor de velocidade enviado pelo PLC num correspondente valor de tensão.

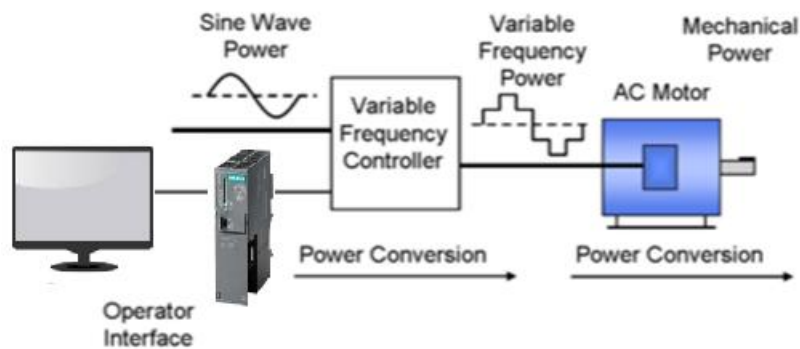


Figura 60 – Sistema VFD [53]

Por parte do PLC, a velocidade é calculada em mm/s e por meio de um coeficiente, convertida em rpm. Para o cálculo do coeficiente são necessários os dados da Tabela 8.

Tabela 8 – Parâmetros para o cálculo do coeficiente

Tipo de dados	Característica	Descrição
Motor	Velocidade (rpm)	1480
	Redução total i	22,62
Mecânico	Diâmetro da roda (mm)	800
	Velocidade (m/s)	4,4

Perímetro da roda:

$$P_{Roda} = \pi * D_{Roda} = \pi * 800 = 2513,2741 \text{ mm} \quad (9)$$

Número de voltas à velocidade máxima:

$$N_{voltas_{v_{m\acute{a}x}}} = \frac{V_{m\acute{a}x}}{\frac{P_{Roda}}{1000}} = \frac{4,4}{\left(\frac{2513,2741}{1000}\right)} = 1,75 \text{ voltas/s} \quad (10)$$

Máximo de velocidade para o motor:

$$V_{m\acute{a}x_motor} = N_{voltas_{v_{m\acute{a}x}}} * i * 60 = 1,75 * 22,62 * 60 = 2376,06 \text{ rpm} \quad (11)$$

Frequência para a velocidade máxima:

$$f_{v_{m\acute{a}x}} = \frac{V_{m\acute{a}x_motor}}{V_{motor}} * 50 = \frac{2376,06}{1480} * 50 = 80,27 \text{ Hz} \quad (12)$$

Velocidade máxima ajustada:

$$V_{m\acute{a}x_ajustada} = V_{m\acute{a}x_motor} * \frac{f_{v_{m\acute{a}x_ajustada}}}{f_{v_{m\acute{a}x}}} = 2376,06 * \frac{80}{80,27} = 2368 \text{ rpm} \quad (13)$$

Coefficiente de velocidade:

$$coef_{speed} = \frac{V_{m\acute{a}x_ajustada}}{V_{m\acute{a}x} * 1000} = \frac{2368}{4,4 * 1000} = 0,538 \quad (14)$$

Em seguida, sabendo a velocidade atual (mm/s) e o coeficiente, converte-se a velocidade para rpm, de modo a que o *drive* interprete corretamente a velocidade enviada pelo PLC:

$$V_{calc_rpm} = V_{calc_mm/s} * coef_{velocidade} * 5 \quad (15)$$

5. IMPLEMENTAÇÃO E TESTES

A fase de testes é composta pela aplicação da função no PLC e consequente análise e registo do comportamento de transelevador. Estes resultados serão apresentados neste capítulo, a fim de verificar o cumprimento dos objetivos propostos. Se necessário, os ficheiros de simulação bem como o código do PLC encontram-se à parte deste documento, devidamente identificados.

5.1. ESPECIFICAÇÕES DOS DISPOSITIVOS DE TESTE

Numa fase inicial do projeto, cada transelevador é dimensionado com vista a cumprir os requisitos do cliente, no momento imediatamente após a venda do projeto. Posto isto, foi utilizado um transelevador para teste com determinados equipamentos. Os equipamentos considerados mais relevantes, anteriormente apresentados na Figura 56 da arquitetura, caracterizam-se pelas especificações mencionadas nas Tabelas 9 e 10.

Tabela 9 – Especificações PLC e motor de translação

Equipamento	Característica	Descrição
PLC Siemens	Modelo	6ES7315-2FJ14-0AB0
	CPU	315F-2 PN/DP com 512 kB de memória de trabalho
	Interfaces	MPI/DP 12 Mbit/s; Ethernet PROFINET; Necessário cartão de memória – Micro
SEW EURODRIVE Motor AC – Série DR	Modelo	KH107 DRN200L4/BE30HR/TH
	Potência (kW)	30
	Corrente (A)	97,00/56,00
	Tensão (V)	230/400
	Frequência (Hz)	50
	Cos γ	0,82
	Redução total i	22,62
	Rotações por minuto (rpm)	1480/65
Percentagem de eficiência (%)	93,6	

Tabela 10 – Especificações *drive* e *encoder* de translação

Equipamento	Característica	Descrição
Drive - SEW EURODRIVE	Modelo	Movidrive B
	Tipo	MDX61B1100-503-4-00
	Tensão de alimentação nominal (V)	3 x AC 380 – 500
	Corrente de alimentação nominal (A)	180 (100%) 225 (125%)
	Corrente de saída nominal (A)	AC 200 (100%) AC 250 (125%)
	Potência aparente de saída (kVA)	139
	Leuze – Encoder de posicionamento	Modelo
Fonte de luz		Laser Vermelho
Faixa de medição (m)		200...300
Precisão (mm)		5
Interface		PROFIBUS-DP com velocidade de transmissão até 12 Mbit/s

5.2. COMPARAÇÃO DE RESULTADOS

De forma a avaliar o desempenho do transelevador perante a função desenvolvida, testou-se o seu comportamento em ambiente industrial. Para este teste utilizou-se um PLC da Siemens, modelo 315F-2 PN/DP. Os comandos recebidos pelo transelevador, foram enviados por meio de uma aplicação SCADA baseada em WinCC (ver Figura 61), frequentemente utilizada em fases de comissionamento/*ramp-up* do sistema.

Consideraram-se os mesmos parâmetros de entrada, em ambas as funções, para posteriormente permitir a comparação da dinâmica, tempos de movimentos, cálculo da velocidade máxima, etc. O ensaio baseou-se em deslocamentos curtos, intermédios e longos, em ambos os sentidos de movimento, viabilizando uma análise sustentada do seu comportamento.

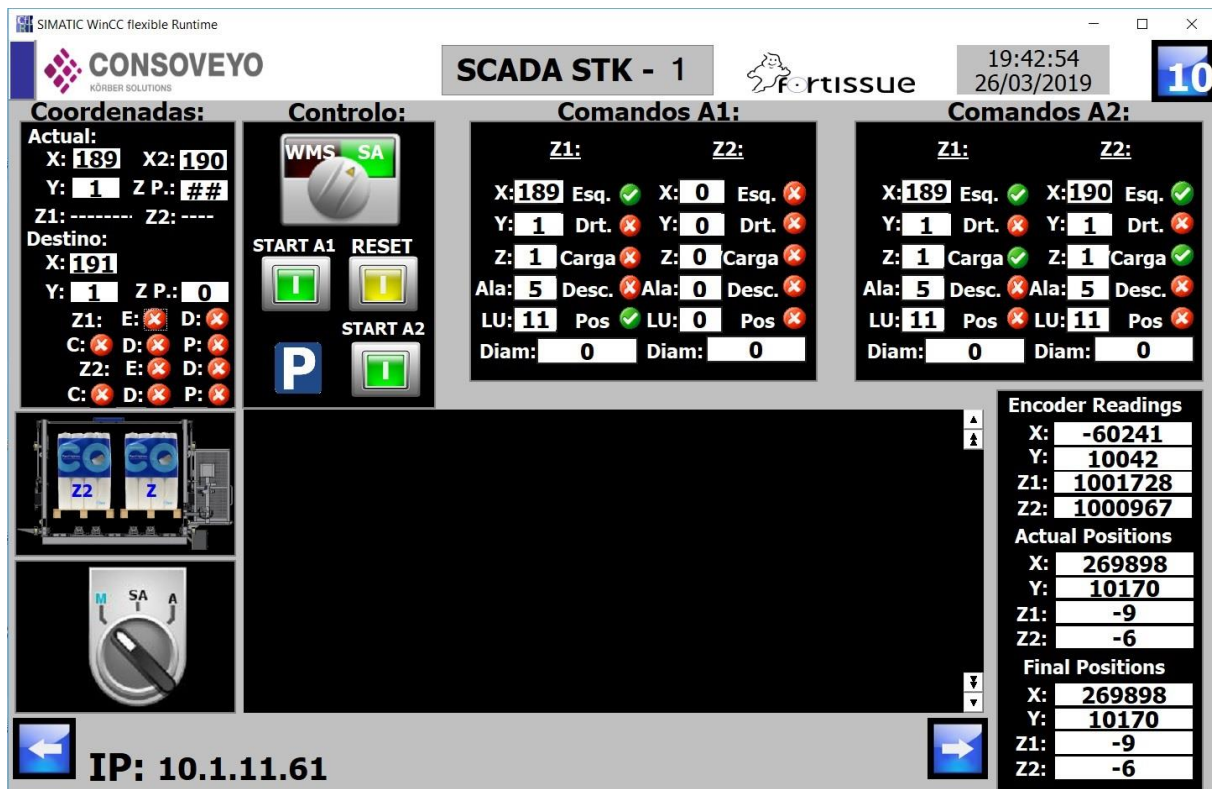


Figura 61 – Aplicação SCADA

5.2.1. MOVIMENTO CURTO

Comparou-se o comportamento entre a simulação (Octave) e o real (máquina física), para ambas as funções, original e a nova. Primeiramente, fez-se a análise de um movimento curto, de aproximadamente 1,5 m. A figura 62 apresenta os parâmetros de entrada da função simulada.

```

8 % INPUT VALUES
9 disp("##### INITIALIZATIONS #####")
10
11
12 st = 1552 % Travel distance (mm)
13 vmax = 4000 % Maximum speed (mm.s-1)
14 vimin = 40 % Minimum starting speed (mm.s-1)
15 vfmin = 40 % Minimum positioning speed (mm.s-1)
16 amax = 700 % Maximum acceleration (mm.s-2)
17 dmax = 700 % Maximum deceleration (mm.s-2)
18 j1 = 100 % Jerk at start of acceleration (mm.s-3)
19 j3 = 100 % Jerk at end of acceleration (mm.s-3)
20 j5 = 100 % Jerk at start of deceleration (mm.s-3)
21 j7 = 100 % Jerk at end of deceleration (mm.s-3)
22

```

Figura 62 – Parâmetros da Nova S-Curve – simulação do movimento curto

Para tais parâmetros de entrada, obtiveram-se os tempos de movimento da Figura 63. No momento da implementação no PLC, seria expectável obter tempos aproximados a esta simulação.

```

##### Tempo na Zona de Aceleracao (s) #####
t_aceleracao = 4.0745
##### Tempo na Zona de Desaceleracao (s) #####
t_desaceleracao = 4.0745
##### Tempo de Movimento (s) #####
Tempo_de_movimento = 8.1535
>>

```

Janela de Comandos Editor Documentação

Figura 63 – Duração/tempos da Nova S–Curve – simulação do movimento curto

Para o teste no PLC, os dados considerados relevantes apresentam-se, de forma resumida, nas Tabelas 11, 12, 13 e 14. Entre eles, são avaliados dados como o sentido de movimento, a distância percorrida, o tempo da zona de aceleração e desaceleração, bem como o tempo total de cada movimento. A coluna ‘Comparação’ traduz a diferença de tempos de movimento entre as funções.

Os dados apresentados na Tabela 11 foram compilados com base nas Figuras 67, 68, 69 e 70, com o objetivo de resumir as mesmas.

De modo a comparar o movimento curto (simulação vs real), consideraram-se os mesmos parâmetros de entrada do PLC (Figura 64 e Figura 65) utilizados na função simulada (Figura 62).

Address	Name	Type	Initial value	Actual value	Comment
76.0	SPEED.Auto.Min1	DINT	L#0	L#40	mm.s-1 - Minimum speed before stop
128.0	SPEED.Max.AUTO	DINT	L#4400	L#4000	mm.s-1 - Maximum for project in Auto
298.0	ACCELERATION.Auto	DINT	L#0	L#700	mm.s-2 - Maximum Acceleration & Deceleration value
326.0	JERK.Pos_Neg_Auto	DINT	L#200	L#100	mm.s-3 - Maximum jerk in Auto

Figura 64 – Database dos parâmetros de entrada – S–Curve original

Address	Name	Type	Initial value	Actual value	Comment
60.0	SPEED.MAX_STK	DINT	L#2000	L#4000	mm.s-1 - Maximum for project, Dynamic
68.0	SPEED.MIN_INIT	DINT	L#0	L#40	mm.s-1 - Minimum speed to start
72.0	SPEED.MIN_FIN	DINT	L#0	L#40	mm.s-1 - Minimum speed before stop
76.0	ACCELERATION.ACCEL	DINT	L#300	L#700	mm.s-2 - Maximum Acceleration value, Dynamic
80.0	ACCELERATION.DECCEL	DINT	L#300	L#700	mm.s-2 - Maximum Deceleration value, Dynamic
84.0	JERK.PHASE1	DINT	L#100	L#100	mm.s-3 - Jerk for Phase1
88.0	JERK.PHASE3	DINT	L#100	L#100	mm.s-3 - Jerk for Phase3
92.0	JERK.PHASE5	DINT	L#100	L#100	mm.s-3 - Jerk for Phase5
96.0	JERK.PHASE7	DINT	L#100	L#100	mm.s-3 - Jerk for Phase7

Figura 65 – Database dos parâmetros de entrada – Nova S–Curve

A Figura 66 enumera as variáveis de entrada da função cálculo, cujo fluxograma consta na Figura 53.

Address	Name	Type	Initial value	Actual value	Comment
0.0	IN.SPEED_MAX_r	REAL	0.000000e+000	0.000000e+000	mm.s-1 - Maximum speed value
4.0	IN.START_DIST_r	REAL	0.000000e+000	0.000000e+000	mm
8.0	IN.DIST_ACT_FIN_r	REAL	0.000000e+000	0.000000e+000	mm
12.0	IN.decel_max_r	REAL	0.000000e+000	0.000000e+000	mm.s-2 - Maximum Deceleration value
16.0	IN.accel_max_r	REAL	0.000000e+000	0.000000e+000	mm.s-2 - Maximum Acceleration value
20.0	IN.CALC_SPEED_MIN_FIN	REAL	0.000000e+000	0.000000e+000	mm.s-1 - Minimum speed before stop
24.0	IN.CALC_SPEED_MIN_INIT	REAL	0.000000e+000	0.000000e+000	mm.s-1 - Minimum speed to start
28.0	IN.JERK.PHASE1_r	REAL	0.000000e+000	0.000000e+000	mm.s-3 - Jerk for Phase1
32.0	IN.JERK.PHASE3_r	REAL	0.000000e+000	0.000000e+000	mm.s-3 - Jerk for Phase3
36.0	IN.JERK.PHASE5_r	REAL	0.000000e+000	0.000000e+000	mm.s-3 - Jerk for Phase5
40.0	IN.JERK.PHASE7_r	REAL	0.000000e+000	0.000000e+000	mm.s-3 - Jerk for Phase7
44.0	IN_OUT.CALC.decel_max	REAL	0.000000e+000	0.000000e+000	mm.s-2 - Maximum Deceleration value calculated, Dynamic
48.0	IN_OUT.CALC.accel_max	REAL	0.000000e+000	0.000000e+000	mm.s-2 - Maximum Acceleration value calculated, Dynamic
52.0	IN_OUT.CALC.vmax_r	REAL	0.000000e+000	0.000000e+000	mm.s-1 - Maximum speed value calculated, Dynamic
56.0	IN_OUT.CALC.SPEED_MIN_FIN	REAL	0.000000e+000	0.000000e+000	mm.s-1 - Minimum speed before stop
60.0	IN_OUT.CALC.SPEED_MIN_INIT	REAL	0.000000e+000	0.000000e+000	mm.s-1 - Minimum speed to start
64.0	OUT.KVA_r	REAL	0.000000e+000	0.000000e+000	Acceleration Constant, Dynamic
68.0	OUT.KVD_r	REAL	0.000000e+000	0.000000e+000	Deceleration Constant, Dynamic
72.0	OUT.travel_time	REAL	0.000000e+000	0.000000e+000	s
76.0	OUT.IterAlg	TIME	T#0MS	T#0MS	
80.0	OUT.ITER_FIRST_CYCLE	DINT	L#0	L#0	
84.0	OUT.CALC.X1_r	REAL	0.000000e+000	0.000000e+000	mm - End of Phase1 calculated position, Dynamic
88.0	OUT.CALC.X2_r	REAL	0.000000e+000	0.000000e+000	mm - End of Phase2 calculated position, Dynamic
92.0	OUT.CALC.X3_r	REAL	0.000000e+000	0.000000e+000	mm - End of Phase3 calculated position, Dynamic
96.0	OUT.CALC.X4_r	REAL	0.000000e+000	0.000000e+000	mm - End of Phase4 calculated position, Dynamic
100.0	OUT.CALC.X5_r	REAL	0.000000e+000	0.000000e+000	mm - End of Phase5 calculated position, Dynamic
104.0	OUT.CALC.X6_r	REAL	0.000000e+000	0.000000e+000	mm - End of Phase6 calculated position, Dynamic
108.0	OUT.CALC.X7_r	REAL	0.000000e+000	0.000000e+000	mm - End of Phase7 calculated position, Dynamic
112.0	OUT.CALC.V1_r	REAL	0.000000e+000	0.000000e+000	mm.s-1 - End of Phase1 calculated speed, Dynamic
116.0	OUT.CALC.V2_r	REAL	0.000000e+000	0.000000e+000	mm.s-1 - End of Phase2 calculated speed, Dynamic
120.0	OUT.CALC.V3_r	REAL	0.000000e+000	0.000000e+000	mm.s-1 - End of Phase3 calculated speed, Dynamic
124.0	OUT.CALC.V4_r	REAL	0.000000e+000	0.000000e+000	mm.s-1 - End of Phase4 calculated speed, Dynamic
128.0	OUT.CALC.V5_r	REAL	0.000000e+000	0.000000e+000	mm.s-1 - End of Phase5 calculated speed, Dynamic
132.0	OUT.CALC.V6_r	REAL	0.000000e+000	0.000000e+000	mm.s-1 - End of Phase6 calculated speed, Dynamic

Figura 66 – Variáveis da função cálculo – Nova S-Curve

A Tabela 11, referente ao movimento curto, mostra um movimento de aproximadamente 1,5 m, tal como na simulação da Figura 62.

Recorrendo a um *software* de aquisição de sinais de PLC (PLC Analyzer), compilaram-se os registos gráficos dos perfis testados (apresentados de seguida).

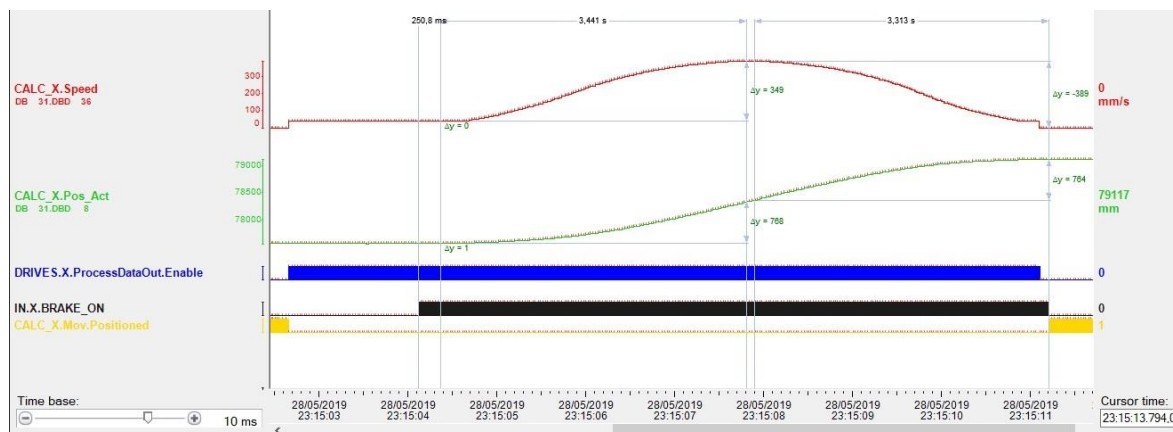


Figura 67 – Versão original – sentido positivo – movimento curto

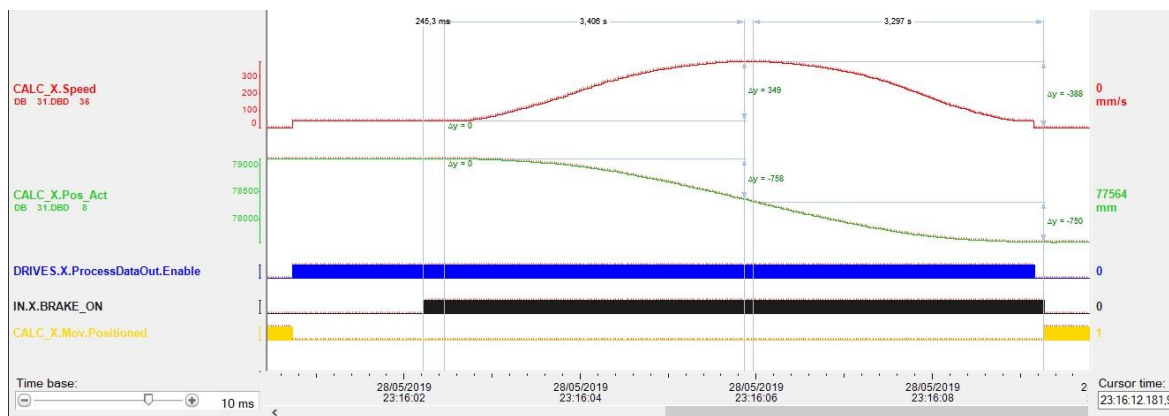


Figura 68 – Versão original – sentido negativo – movimento curto

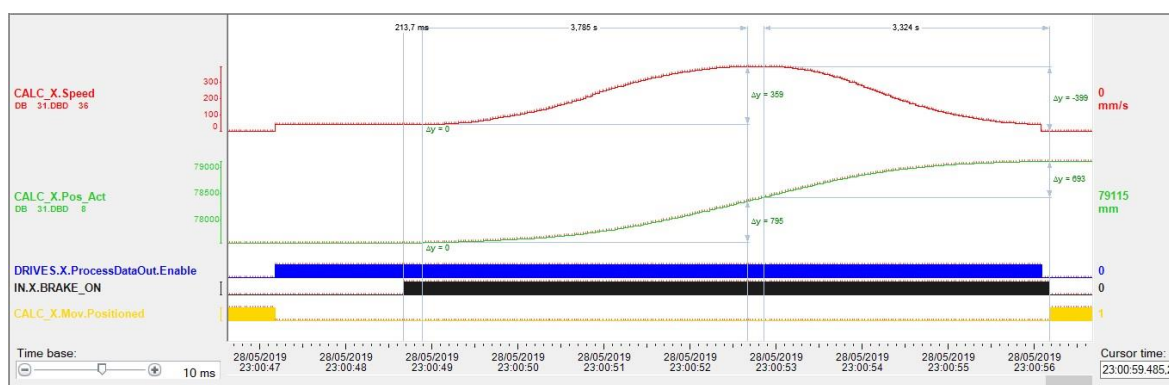


Figura 69 – Nova versão – sentido positivo – movimento curto

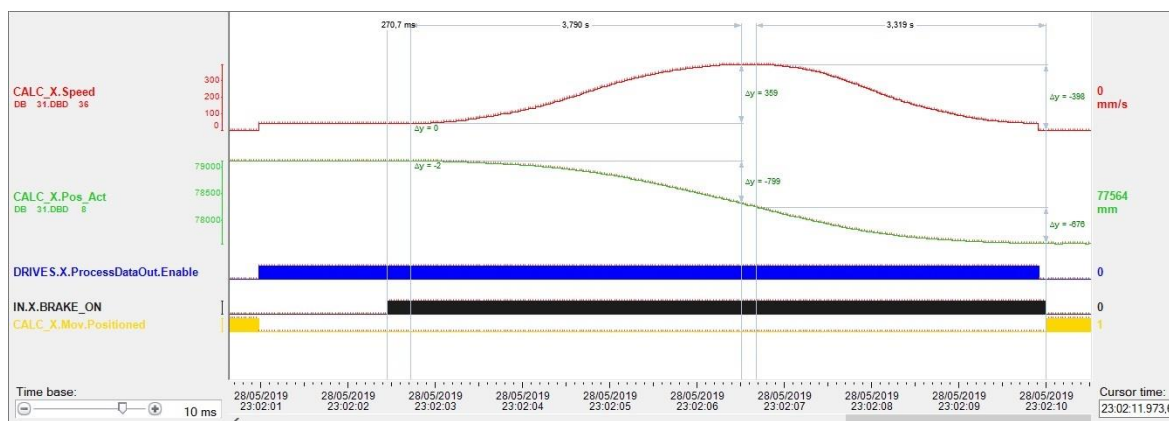


Figura 70 – Nova versão – sentido negativo – movimento curto

Como é possível verificar na Tabela 11, os tempos de movimento entre a simulação e as funções do PLC possuem ligeira diferença. Esta situação deve-se ao facto do cálculo do tempo de movimento da simulação não ter em conta a velocidade inicial e final mínima. A simulação apenas considera estes parâmetros para a representação gráfica do perfil de velocidade (Figura 51).

Como era expectável, para os mesmos parâmetros de entrada, a função original e a nova possuem tempos de movimento aproximados. Quanto à comparação deste tempo, pode afirmar-se que as diferenças em torno de 0,4 s não devem ser consideradas. De entre outras razões, estas diferenças (simulação vs PLC) devem-se ao tempo de ciclo do PLC e da rede PROFIBUS, e também devido à baixa resolução dos cálculos do PLC, em virgula flutuante.

Tabela 11 – Duração do movimento – amostra de movimento curto

Sentido	Parâmetros	Simulação (Octave)	Versão Original (PLC)	Nova Versão (PLC)	Comparação (V. Original – N. Versão)
Positivo	Distância (mm)	1552	1553	1552	-
	Tempo na Zona de Aceleração (s)	4,075	3,441	3,785	-
	Tempo na Zona de Desaceleração (s)	4,075	3,313	3,324	-
	Tempo de Movimento (s)	8,154	6,844	7,292	-0,448
Negativo	Distância (mm)	1552	1553	1550	-
	Tempo na Zona de Aceleração (s)	4,075	3,406	3,790	-
	Tempo na Zona de Desaceleração (s)	4,075	3,297	3,319	-
	Tempo de Movimento (s)	8,154	6,809	7,291	-0,482

5.2.2. MOVIMENTO LONGO

A Figura 71 apresenta os parâmetros de entrada da função simulada, desta vez, para o movimento longo, de aproximadamente 69 m.

```

8 % INPUT VALUES
9 disp("##### INITIALIZATIONS #####")

38 st = 69129 % Travel distance (mm)
39 vmax = 4000 % Maximum speed (mm.s-1)
40 vmin = 300 % Minimum starting speed (mm.s-1)
41 vfmín = 40 % Minimum positioning speed (mm.s-1)
42 amax = 700 % Maximum acceleration (mm.s-2)
43 dmax = 700 % Maximum deceleration (mm.s-2)
44 j1 = 100 % Jerk at start of acceleration (mm.s-3)
45 j3 = 100 % Jerk at end of acceleration (mm.s-3)
46 j5 = 100 % Jerk at start of deceleration (mm.s-3)
47 j7 = 100 % Jerk at end of deceleration (mm.s-3)

```

Figura 71 – Parâmetros da Nova S-Curve – simulação do movimento longo

Para tais parâmetros de entrada, obtiveram-se os tempos de movimento da Figura 72.

```

##### Tempo na Zona de Aceleracao (s) #####
t_aceleracao = 12.649
##### Tempo na Zona de Desaceleracao (s) #####
t_desaceleracao = 12.649
##### Tempo de Movimento (s) #####
Tempo_de_movimento = 30.985
>> |

```

Janela de Comandos Editor Documentação

Figura 72 – Duração/tempos da Nova S-Curve – simulação do movimento longo

De modo a comparar o movimento longo (simulação vs real), consideraram-se praticamente os mesmos parâmetros de entrada do PLC (Figura 64 e Figura 65) utilizados na função simulada (Figura 71). Com exceção da velocidade inicial mínima (vmin), que possui um valor de 300 mm/s, diferente do utilizado no movimento curto. A alteração deste parâmetro deve-se ao facto de o transelevador poder iniciar o movimento com maior velocidade, dado que está perante um movimento longo, contribuindo assim para uma redução de tempo total de movimento.

Como resultado da análise gráfica, os resultados presentes na Tabela 12 são relativos às Figuras 73, 74, 75 e 76. A Tabela 12, alusiva ao movimento longo, mostra um movimento de aproximadamente 69 m.

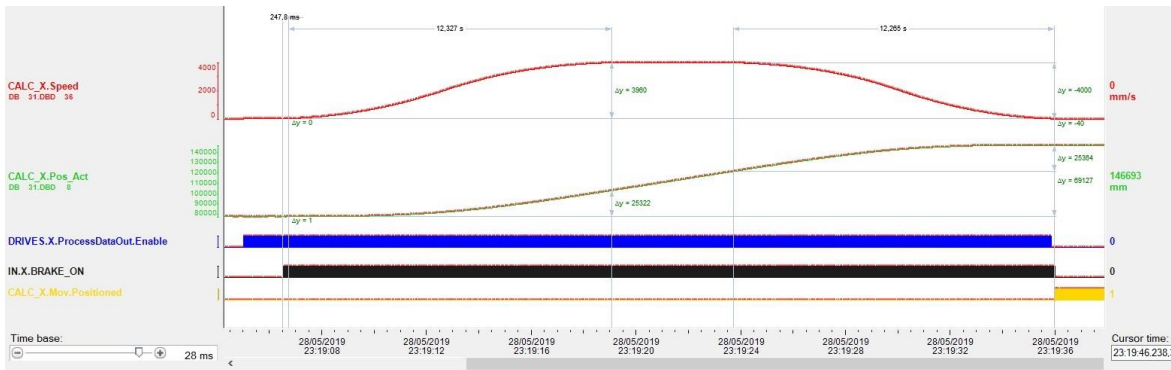


Figura 73 – Versão original – sentido positivo – movimento longo

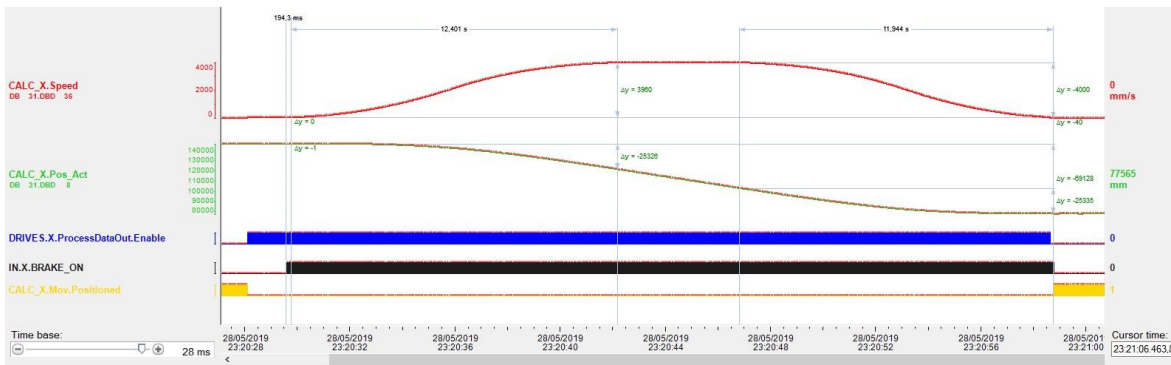


Figura 74 – Versão original – sentido negativo – movimento longo

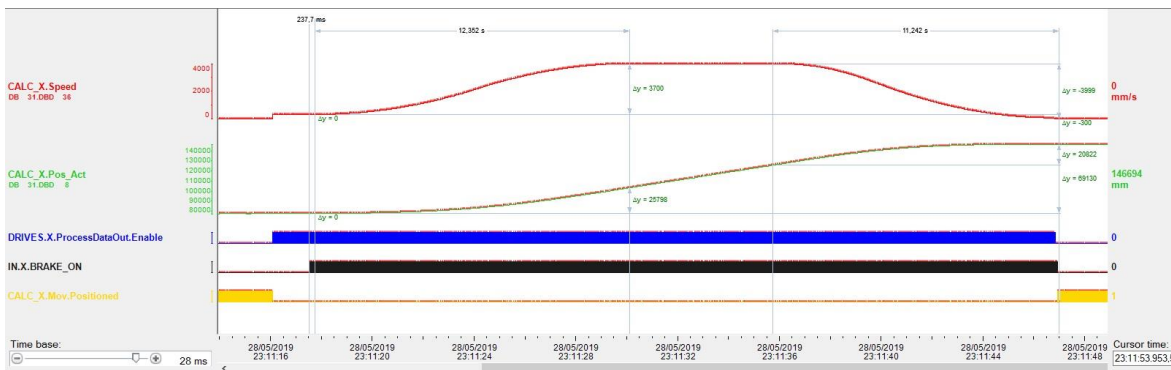


Figura 75 – Nova versão – sentido positivo – movimento longo

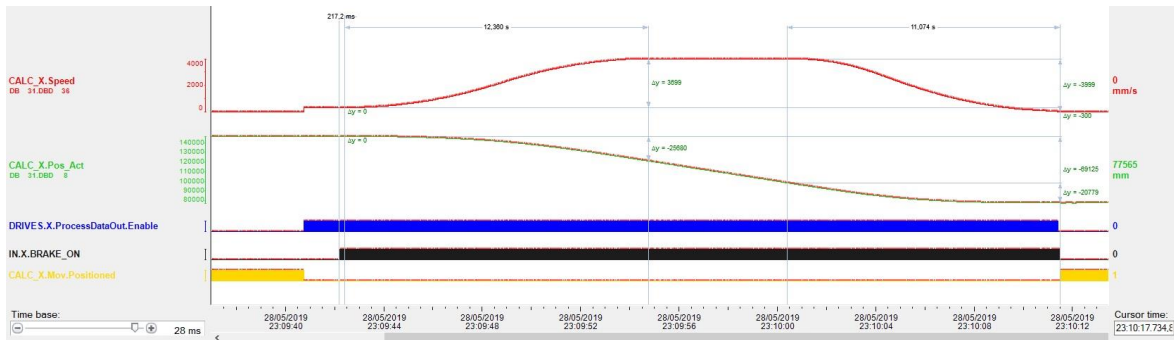


Figura 76 – Nova versão – sentido negativo – movimento longo

A Tabela 12 ilustra a diferença entre os tempos de movimento da simulação e das funções do PLC. Como referido anteriormente, o cálculo do tempo de movimento da simulação não tem em conta a velocidade inicial e final mínima, o que justifica a essa diferença. A simulação apenas considera estes parâmetros para a representação gráfica do perfil de velocidade (Figura 51).

Como era expectável, para os mesmos parâmetros de entrada, a função original e a nova possuem tempos de movimento aproximados. Quanto à comparação deste tempo, considera-se desprezável a diferença, devido aos motivos referidos na análise do movimento curto.

Tabela 12 – Duração do movimento – amostra de movimento longo

Sentido	Parâmetros	Simulação (Octave)	Versão Original (PLC)	Nova Versão (PLC)	Comparação (V. Original – N. Versão)
Positivo	Distância (mm)	69129	69129	69129	-
	Tempo na Zona de Aceleração (s)	12,649	12,327	12,352	-
	Tempo na Zona de Desaceleração (s)	12,649	12,265	11,242	-
	Tempo de Movimento (s)	30,985	29,235	29,237	-0,002
Negativo	Distância (mm)	69129	69127	69126	-
	Tempo na Zona de Aceleração (s)	12,649	12,401	12,360	-
	Tempo na Zona de Desaceleração (s)	12,649	11,944	11,074	-
	Tempo de Movimento (s)	30,985	28,991	29,091	-0,100

5.2.3. MOVIMENTO INTERMÉDIO

Para simular o movimento intermédio, de aproximadamente 10 m, são utilizados os seguintes parâmetros de entrada da função (Figura 77).

```
8 % INPUT VALUES
9 disp("##### INITIALIZATIONS #####")

25 st = 9847 % Travel distance (mm)
26 vmax = 4000 % Maximum speed (mm.s-1)
27 vimin = 300 % Minimum starting speed (mm.s-1)
28 vfmin = 40 % Minimum positioning speed (mm.s-1)
29 amax = 700 % Maximum acceleration (mm.s-2)
30 dmax = 700 % Maximum deceleration (mm.s-2)
31 j1 = 100 % Jerk at start of acceleration (mm.s-3)
32 j3 = 100 % Jerk at end of acceleration (mm.s-3)
33 j5 = 100 % Jerk at start of deceleration (mm.s-3)
34 j7 = 100 % Jerk at end of deceleration (mm.s-3)
```

Figura 77 – Parâmetros da Nova S-Curve – simulação do movimento intermédio

Para tais parâmetros de entrada, obtiveram-se os tempos de movimento da Figura 78.

```
##### Tempo na Zona de Aceleracao (s) #####
t_aceleracao = 7.5441
##### Tempo na Zona de Desaceleracao (s) #####
t_desaceleracao = 7.5441
##### Tempo de Movimento (s) #####
Tempo_de_movimento = 15.093
>>
```

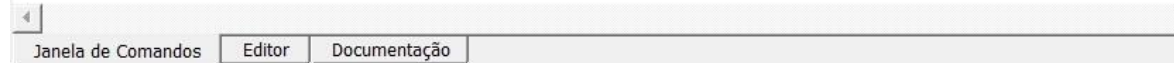


Figura 78 – Duração/tempos da Nova S-Curve – simulação do movimento intermédio

De modo a comparar o movimento intermédio (simulação vs real), consideraram-se praticamente os mesmos parâmetros de entrada do PLC (Figura 64 e Figura 65) utilizados na função simulada (Figura 77). Com exceção da velocidade inicial mínima (vimin), que possui um valor de 300 mm/s, semelhante ao movimento longo. A alteração deste parâmetro deve-se ao facto de o transelevador poder iniciar o movimento com maior velocidade, dado que não está perante um movimento curto, como referido anteriormente.

As Figuras 79, 80, 81 e 82, caracterizam o movimento intermédio (de aprox. 10 m), como resumido na Tabela 13. Segue-se o mesmo método de análise das Tabelas 11 e 12.

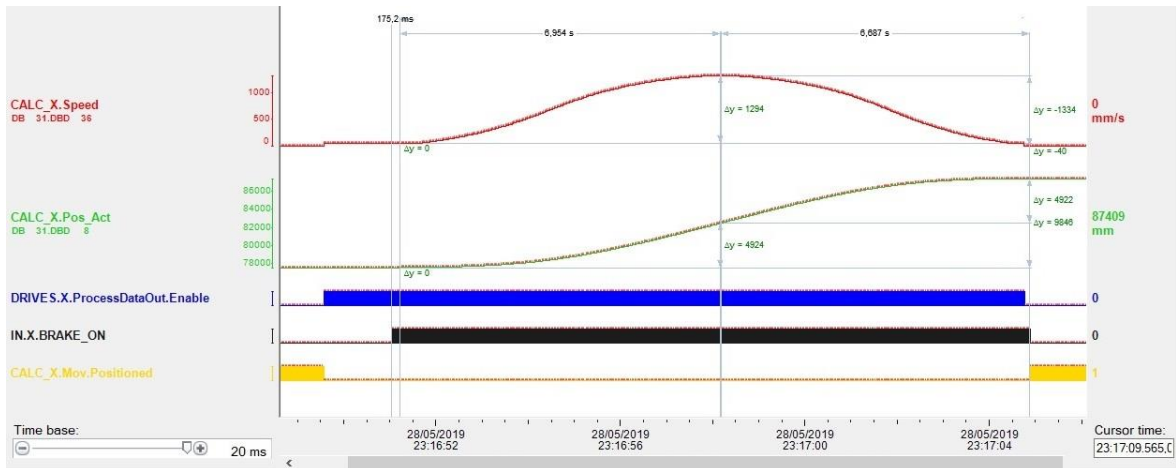


Figura 79 – Versão original – sentido positivo – movimento intermédio

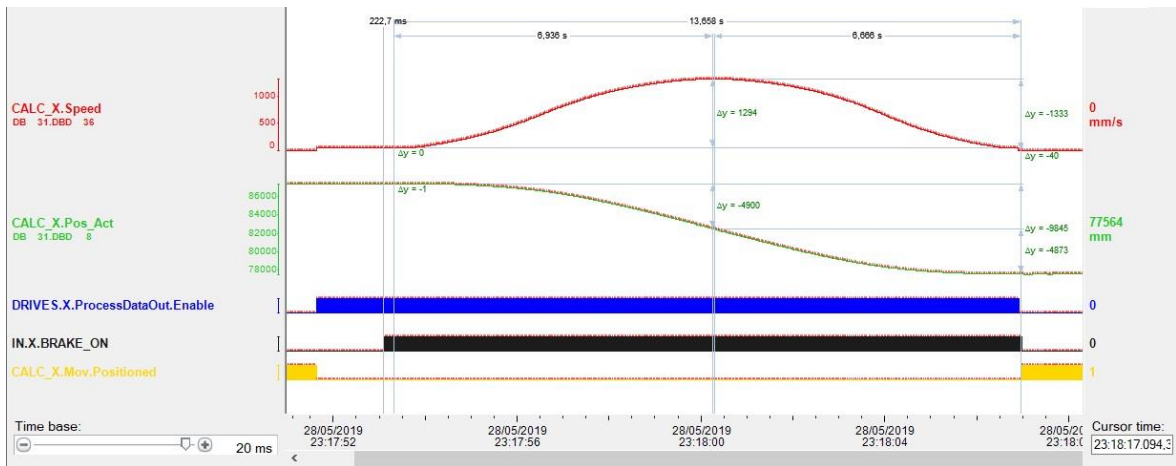


Figura 80 – Versão original – sentido negativo – movimento intermédio

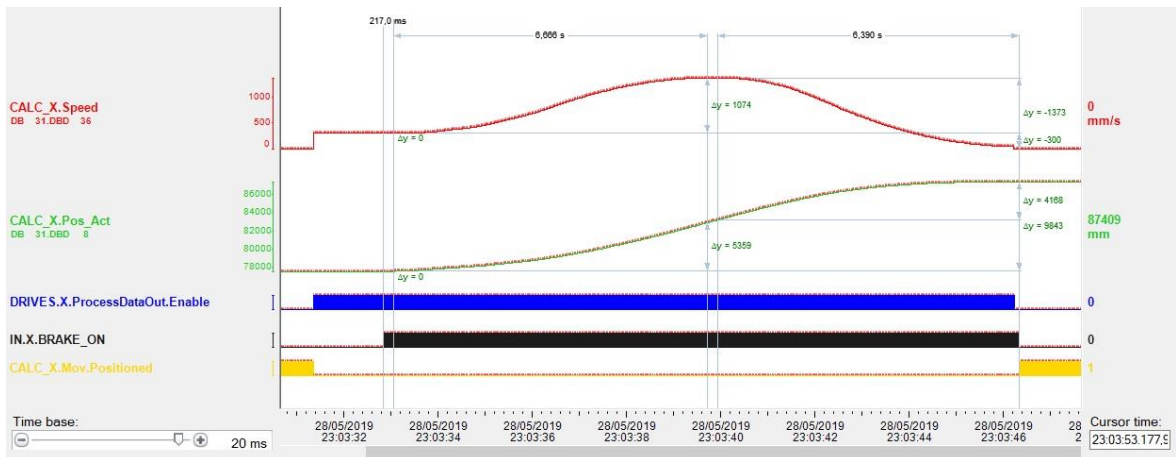


Figura 81 – Nova versão – sentido positivo – movimento intermédio

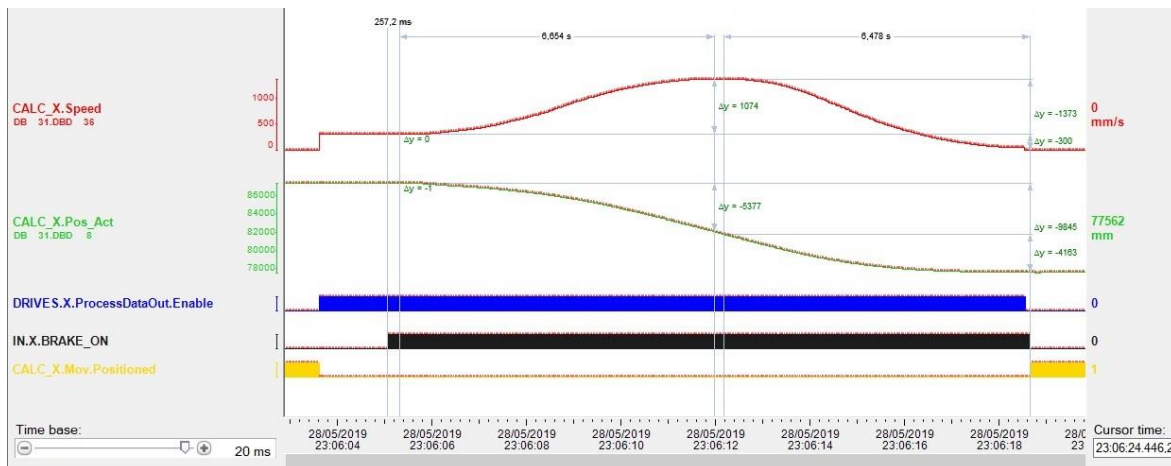


Figura 82 – Nova versão – sentido negativo – movimento intermédio

Como era previsto, para os mesmos parâmetros de entrada, a função original e a nova possuem tempos de movimento aproximados (Tabela 13). Quanto à comparação deste tempo, considera-se desprezável a diferença, devido aos motivos referidos na análise do movimento curto.

Tabela 13 – Duração do movimento – amostra de movimento intermédio

Sentido	Parâmetros	Simulação (Octave)	Versão Original (PLC)	Nova Versão (PLC)	Comparação (V. Original – N. Versão)
Positivo	Distância (mm)	9847	9847	9844	-
	Tempo na Zona de Aceleração (s)	7,544	6,954	6,666	-
	Tempo na Zona de Desaceleração (s)	7,544	6,687	6,390	-
	Tempo de Movimento (s)	15,093	13,668	13,270	0,398
Negativo	Distância (mm)	9847	9846	9847	-
	Tempo na Zona de Aceleração (s)	7,544	6,936	6,654	-
	Tempo na Zona de Desaceleração (s)	7,544	6,666	6,478	-
	Tempo de Movimento (s)	15,093	13,658	13,337	0,321

Os resultados das tabelas analisadas mostram que, para a mesma parametrização, obtêm-se tempos de movimento semelhantes.

5.2.4. MOVIMENTO ÓTIMO

Em seguida, apresenta-se a nova função com uma dinâmica ótima, diferindo apenas na parametrização de velocidade inicial e *jerks*.

Para simular o movimento ótimo, utilizou-se o exemplo do movimento longo, de aproximadamente 69 m. Os parâmetros de entrada da função na simulação são os seguintes (Figura 83).

```

8  % INPUT VALUES
9  disp("##### INITIALIZATIONS #####")

50 st = 69131 % Travel distance (mm)
51 vmax = 4000 % Maximum speed (mm.s-1)
52 vmin = 300 % Minimum starting speed (mm.s-1)
53 vfmin = 40 % Minimum positioning speed (mm.s-1)
54 amax = 700 % Maximum acceleration (mm.s-2)
55 dmax = 700 % Maximum deceleration (mm.s-2)
56 j1 = 400 % Jerk at start of acceleration (mm.s-3)
57 j3 = 300 % Jerk at end of acceleration (mm.s-3)
58 j5 = 100 % Jerk at start of deceleration (mm.s-3)
59 j7 = 100 % Jerk at end of deceleration (mm.s-3)

```

Figura 83 – Parâmetros da Nova S-Curve – Simulação do movimento ótimo

Para tais parâmetros de entrada, obteve-se uma simulação com seguintes tempos de movimento (Figura UU).

```

##### Tempo na Zona de Aceleracao (s) #####
t_aceleracao = 7.7560
##### Tempo na Zona de Desaceleracao (s) #####
t_desaceleracao = 12.649
##### Tempo de Movimento (s) #####
Tempo_de_movimento = 28.411
a = 700
d = 632.46
>>

```



Figura 84 – Duração/tempos da Nova S-Curve – Simulação do movimento ótimo

Para o movimento controlado via PLC, consideraram-se os mesmos parâmetros de entrada usados na simulação (Figura 85).

Address	Name	Type	Initial value	Actual value	Comment
48.0	DIST.POS	DINT	L#4	L#5	
52.0	DIST.STOP_POS	DINT	L#2	L#4	
56.0	DIST.STOP_NEG	DINT	L#2	L#4	
60.0	SPEED.MAX_STK	DINT	L#4000	L#4000	mm.s-1 - Maximum for project, Dynamic
64.0	SPEED.AUTO_MIN	DINT	L#0	L#40	mm.s-1 - Minimum speed to start
68.0	SPEED.MIN_INIT	DINT	L#0	L#300	mm.s-1 - Minimum speed to start
72.0	SPEED.MIN_FIN	DINT	L#0	L#40	mm.s-1 - Minimum speed before stop
76.0	ACCELERATION.ACCEL	DINT	L#700	L#700	mm.s-2 - Maximum Acceleration value, Dynamic
80.0	ACCELERATION.DECEL	DINT	L#700	L#700	mm.s-2 - Maximum Deceleration value, Dynamic
84.0	JERK.PHASE1	DINT	L#100	L#400	mm.s-3 - Jerk for Phase1
88.0	JERK.PHASE3	DINT	L#100	L#300	mm.s-3 - Jerk for Phase3
92.0	JERK.PHASE5	DINT	L#100	L#100	mm.s-3 - Jerk for Phase5
96.0	JERK.PHASE7	DINT	L#100	L#100	mm.s-3 - Jerk for Phase7

Figura 85 – Database dos parâmetros de entrada da Nova S-Curve – Movimento ótimo

Os perfis de velocidade e posição obtidos através da simulação estão representados nas Figuras 86 e 87. Relativamente ao perfil de velocidade, é perceptível uma velocidade inicial mais elevada (superior à final). A curva de aceleração difere da de desaceleração, sendo possível observar na zona de aceleração um declive superior. Na figura 84 (resultado do cálculo da simulação), pode verificar-se que o transelevador usa a aceleração máxima na zona de aceleração.

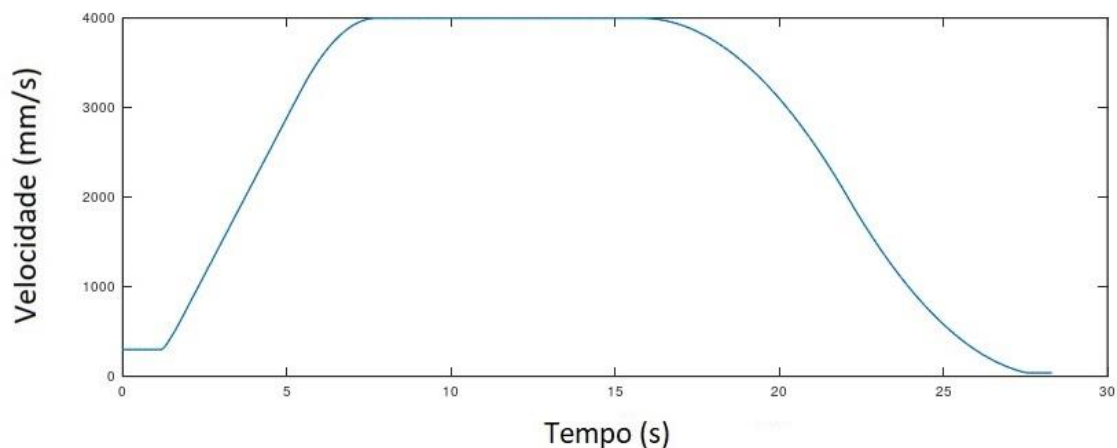


Figura 86 – Perfil de velocidade da Nova S-Curve – Simulação do movimento ótimo

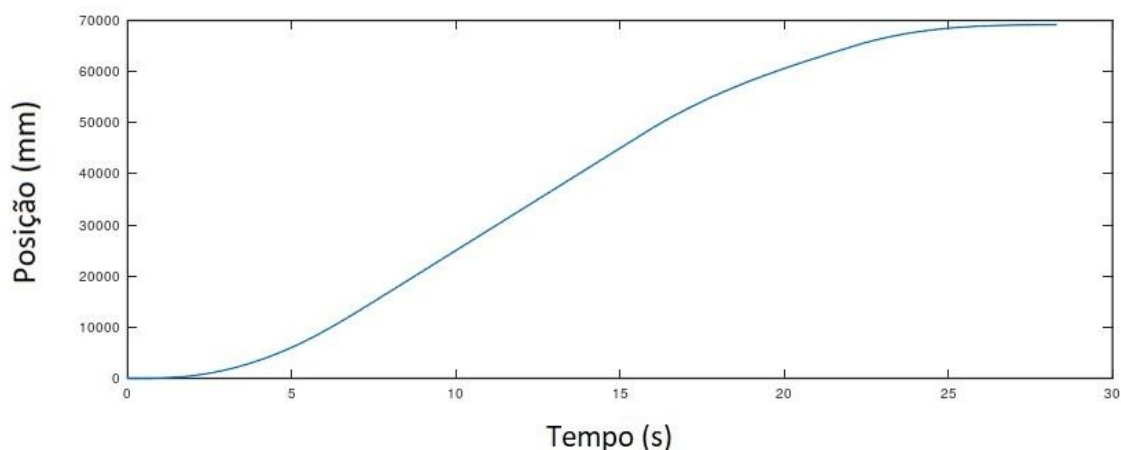


Figura 87 – Perfil de posição da Nova S-Curve – Simulação do movimento ótimo

Os registos do PLC Analyzer mostram claramente uma velocidade inicial distinta da final, o que permite ao transelevador arrancar mais rápido (Figura 88 e 89). Desta forma, também é notório que alcança mais rapidamente a velocidade máxima. Comparando as zonas de aceleração e desaceleração, verifica-se maior declive no início do movimento do que no final (aceleração calculada > desaceleração calculada).

Relativamente ao efeito do *jerk*, a zona de aceleração possui um impulso maior inicial e final que a de desaceleração (JERK.PHASE1 (400 mm/s³) e JERK.PHASE3 (300 mm/s³)). Verifica-se maior suavidade na curva de desaceleração devido a um *jerk* mais controlado - parâmetros JERK.PHASE5 (100 mm/s³) e JERK.PHASE7 (100 mm/s³). Desta forma, obtém-se um perfil ótimo de movimento.

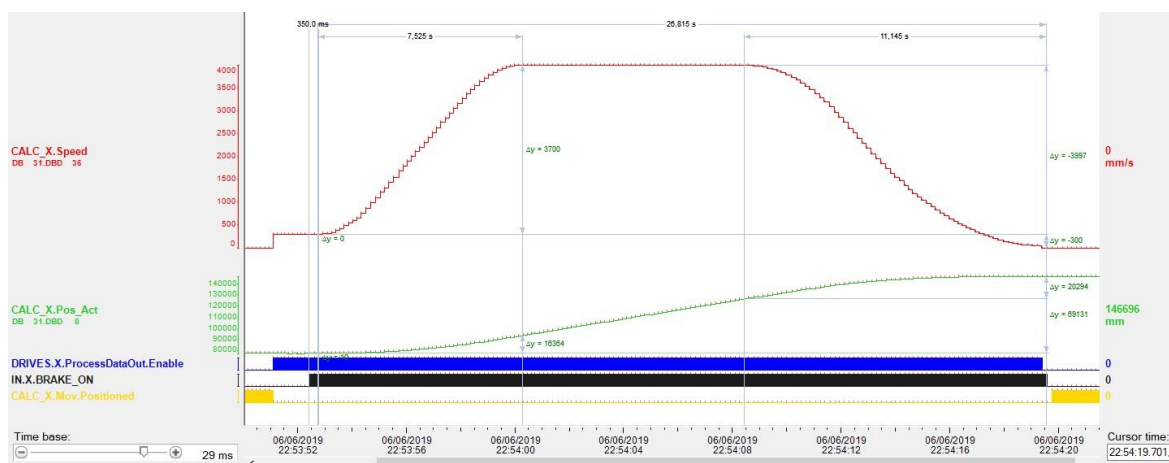


Figura 88 – Nova versão – sentido positivo – movimento ótimo

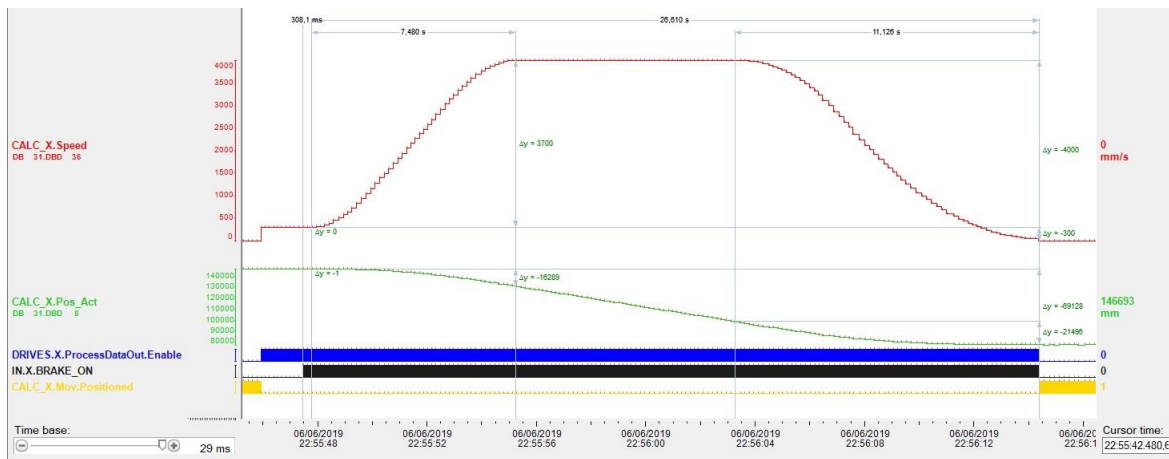


Figura 89 – Nova versão – sentido negativo – movimento ótimo

Como era previsto, parametrizadas para um movimento ótimo, a simulação e a nova função do PLC possuem tempos de movimento ligeiramente diferentes, motivo mencionado anteriormente (Figura 14).

Tabela 14 – Duração do movimento – amostra de movimento ótimo

Sentido	Parâmetros	Simulação (Octave)	Nova Versão (PLC)
Positivo	Distância (mm)	69131	69131
	Tempo na Zona de Aceleração (s)	7,756	7,525
	Tempo na Zona de Desaceleração (s)	12,649	11,145
	Tempo de Movimento (s)	28,411	26,815
Negativo	Distância (mm)	69131	69129
	Tempo na Zona de Aceleração (s)	7,756	7,480
	Tempo na Zona de Desaceleração (s)	12,649	11,126
	Tempo de Movimento (s)	28,411	26,610

Os resultados do movimento ótimo mostram que é possível otimizar o desempenho do movimento do transelevador. Com base no controlo da velocidade mínima inicial, da aceleração e desaceleração e do parâmetro *jerk*, nas diversas fases do movimento, consegue obter-se uma maior dinâmica e redução de vibração da carga. Sendo uma solução de *software*, é considerada de baixo custo, uma vez que, apenas existem custos de desenvolvimento do cálculo e programação da função.

5.2.5. AMOSTRAGEM DO SINAL

No que diz respeito ao sinal adquirido através do PLC Analyzer, obteve-se uma taxa de amostragem de aproximadamente 38 Hz (Figura 90).

Sendo n o número de períodos, o tempo de amostragem (s) obtém-se através da seguinte equação:

$$t_{amostragem} = \frac{t_{medido}}{n} \quad (16)$$

Por sua vez, calcula-se a frequência de amostragem (Hz) através da equação:

$$f_{amostragem} = \frac{1}{t_{amostragem}} \quad (17)$$

O exemplo utilizado para medir o tempo de amostragem foi o do movimento longo da nova *S-Curve*, no sentido positivo (Figura 90).

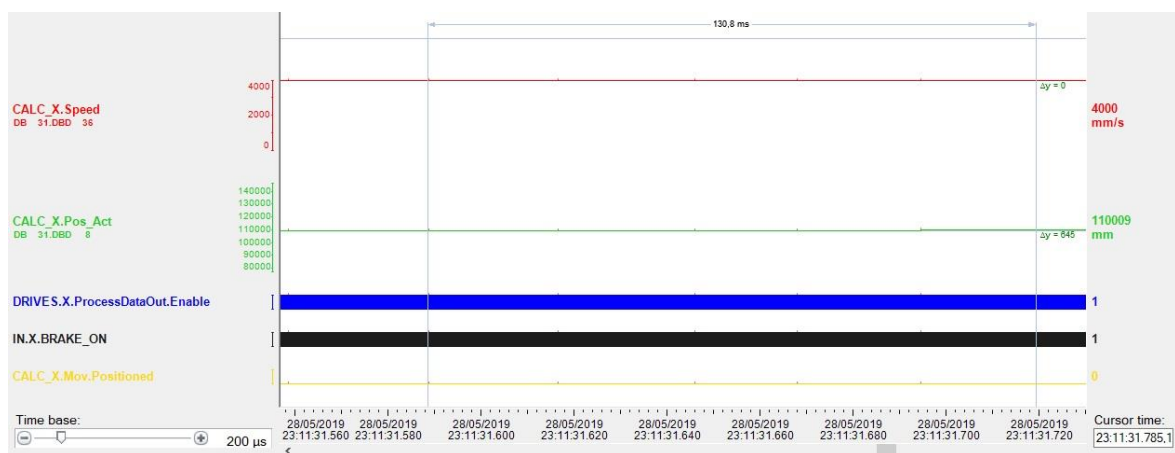


Figura 90 – Exemplo de tempo de amostragem

Tempo de amostragem:

$$t_{amostragem} = \frac{0,1308}{5} \quad (18)$$

Substituindo,

$$f_{amostragem} = \frac{1}{0,02616} \quad (19)$$

Obtém-se a frequência de amostragem:

$$f_{amostragem} = 38,23 \text{ Hz} \quad (20)$$

Conhecendo o tempo de ciclo do PLC (Figura 91) e o tempo de amostragem da rede PROFIBUS (Figura 92), é possível calcular o erro máximo de amostragem através da equação:

$$e_{\text{máx_amostragem}} = t_{\text{amostragem_PROFIBUS}} + t_{\text{ciclo_PLC}} + t_{\text{ciclo_PLC}} + t_{\text{amostragem_PROFIBUS}} \quad (21)$$

$$e_{\text{máx_amostragem}} = 27,8 + 6 + 6 + 27,8 \quad (22)$$

$$e_{\text{máx_amostragem}} = 67,6 \text{ ms} \quad (23)$$

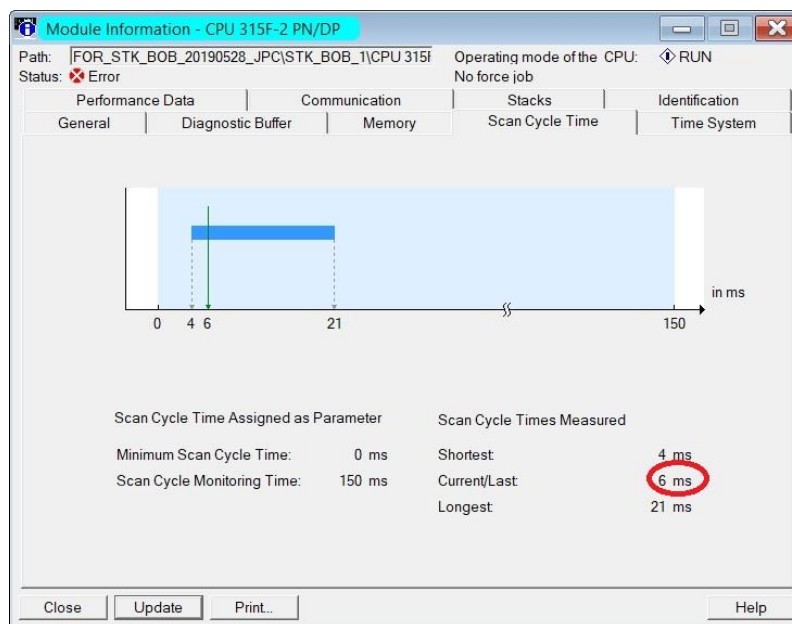


Figura 91 – Tempo de ciclo do PLC

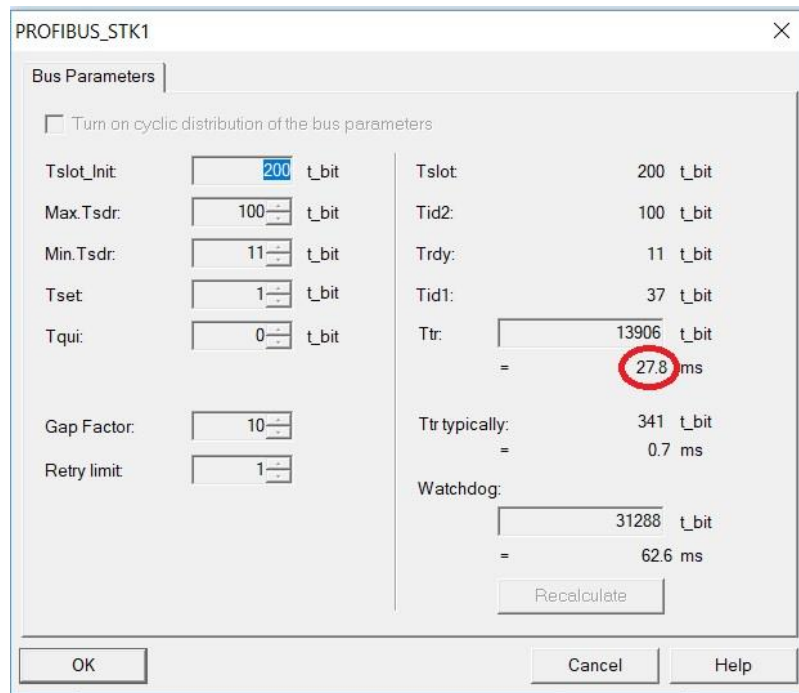


Figura 92 – Tempo de amostragem PROFIBUS

Conhecendo o erro máximo de amostragem é possível determinar o erro máximo de posição. Sabendo que a velocidade máxima do transelevador é de 4 m/s (4 mm/ms), então:

$$e_{\text{máx_posição}} = v_{\text{máx}} * e_{\text{máx_amostragem}} \quad (24)$$

Desta forma obtém um erro máximo de posição de 270,4 mm:

$$e_{\text{máx_posição}} = 4 * 67,6 = 270,4 \text{ mm} \quad (25)$$

6. CONCLUSÕES

A necessidade de otimização do desempenho do transelevador motivou, naturalmente, a implementação de um novo método de controlo. Esta nova abordagem promove uma considerável redução de desgaste e impactos mecânicos, com uma dinâmica controlável.

Em formato *S-Curve*, com zonas de aceleração e desaceleração independentes, oferece maior flexibilidade na dinâmica do movimento. O facto de destacar uma velocidade inicial diferente da final, também pode contribuir com maior eficiência no cumprimento de cadências. A otimização do desempenho verifica-se também através do controlo do parâmetro *jerk*. Pelo facto deste parâmetro ser controlado, pode obter-se uma dinâmica mais suave, e conseqüentemente menor vibração da carga na fase final/durante o movimento. Nota-se também uma maior fiabilidade da precisão do posicionamento, no momento que o transelevador atinge a posição final, minimizando possíveis reposicionamentos. É importante referir que todo este controlo é possível, parametrizando a função para o tipo de sistema pretendido (dependendo do tipo de carga a transportar, aceleração/desaceleração máxima, etc). O método de controlo proposto é aplicável numa vasta gama de máquinas que exijam movimento, por exemplo em sistemas de *pick-and-place*, sistemas de posicionamento, robôs industriais e sistemas de alta velocidade e precisão.

Em síntese, o trabalho proposto consistia em desenvolver uma função polinomial de terceira ordem, todavia como sugestão de melhoria, reconhecem-se vantagens em desenvolver uma função polinomial de quarta/quinta ordem. Para isso é necessário controlar a quarta e quinta derivada da

posição, denominada de *snap* e *crackle*, respetivamente. Estas componentes estão associadas a fenómenos vibratórios, mais especificamente, quando esta excitação induz modos de vibração multi-ressonante. A título de exemplo, em momentos de transição de movimento (por exemplo: arranque e paragem; descolagem e aterragem; ao acelerar e desacelerar).

Por fim, de um modo geral este trabalho foi bastante enriquecedor e desafiante sob vários pontos de vista, entre o quais, no desenvolvimento do controlo e na compreensão da dinâmica do transelevador.

Referências Documentais

- [1] S. M. Rutner and C. J. Langley, “Logistics Value: Definition, Process and Measurement,” *Int. J. Logist. Manag.*, vol. 11, no. 2, pp. 73–82, Jul. 2000.
- [2] “Web Artigos - Logística.” [Online]. Available: <https://www.webartigos.com/artigos/o-que-e-logistica/12366>. [Accessed: 17-Jan-2018].
- [3] A. Borade, A. B. Borade, and S. V. Bansod, “Domain Of Supply Chain Management - A State Of Art’.” *J. Technol. Manag. Innov.*, vol. 2, no. 4, pp. 109–121, Jan. 2008.
- [4] M. Santos, Á. Cardoso, and D. Chaves, “Aplicação de PDCA e MASP na melhoria do nível de serviço em terceirização intralogística,” 2006.
- [5] “Definição de intralogística e qual a sua importância nos negócios - FGL Gestão Logística.” [Online]. Available: <http://fgl.com.br/o-que-e-intralogistica/>. [Accessed: 17-Jan-2018].
- [6] G. Kartnig, B. Grösel, and N. Zrnic, “Past, State-of-the-Art and Future of Intralogistics in Relation to Megatrends,” *FME Trans.*, vol. 40, pp. 193–200, 2012.
- [7] “Just-in-Time Logistics,” 2009.
- [8] R. Yousefifar, J. Popp, T. B. Karl-Heinz Wehking, W. Kersten, T. Blecker, C. M. Ri, T. Beyer, and K.-H. Wehking, “Proceedings of the Hamburg Inter Adaptive Intra-Logistic Published in: Innovations and Strategies for Logistics an Adaptive Intra-Logistics,” 2015.
- [9] “Logo Consoveyo.” [Online]. Available: http://www.consoveyo.com/Resources/Public/Images/CONSOVEYO_2C_pos.png. [Accessed: 10-Sep-2017].
- [10] “Company Philosophy.” [Online]. Available: <http://www.consoveyo.com/en/consoveyo/company-philosophy.html>. [Accessed: 10-Sep-2017].
- [11] “Locations.” [Online]. Available: <http://www.consoveyo.com/en/consoveyo/locations.html>. [Accessed: 10-Sep-2017].
- [12] “Instalações Consoveyo Portugal.” [Online]. Available: http://www.consoveyo.com/fileadmin/_processed_/2/4/csm_Company_f71a161d6a.jpg. [Accessed: 10-Sep-2017].
- [13] “Company.” [Online]. Available: <http://www.consoveyo.com/en/consoveyo.html>. [Accessed: 10-Sep-2017].
- [14] “catalogue.” [Online]. Available: www.easyfairs.com/events_216/empack-madrid-2014_54198/logistics-madrid-2014_54404/exhibitors-products_54481/exhibitor-catalogue_54487/stand/503845/. [Accessed: 20-Aug-2017].
- [15] “Product Solutions.” [Online]. Available: <http://www.consoveyo.com/en/products.html>. [Accessed: 10-Sep-2017].
- [16] “csm_1-4c3193_ba27fde637.png (800×532).” [Online]. Available: http://www.easyfairs.com/typo3temp/_processed_/csm_1-4c3193_ba27fde637.png. [Accessed: 10-Sep-2017].
- [17] “AGV_Suavecel.” [Online]. Available:

- http://www.easyfairs.com/typo3temp/_processed_/csm__DMN2511_Suavecel_ce28bbca59.jpg. [Accessed: 10-Sep-2017].
- [18] “References Consoveyo - Experience.” [Online]. Available: <http://www.consoveyo.com/en/references.html>. [Accessed: 10-Sep-2017].
- [19] “Armazém Automático.” [Online]. Available: http://www.easyfairs.com/typo3temp/_processed_/csm_CC0913647_01aaa0552f.jpg. [Accessed: 10-Sep-2017].
- [20] “Business Area.” [Online]. Available: <http://www.consoveyo.com/en/consoveyo/business-area.html>. [Accessed: 10-Sep-2017].
- [21] “Logo Koerber.” [Online]. Available: https://cdn.walter-machines.com/uploads/tx_schleifringhistory/Koerber.png. [Accessed: 10-Sep-2017].
- [22] “Stacker Crane - Consoveyo.” [Online]. Available: https://www.easyfairs.com/typo3temp/_processed_/csm_Traun---Feurstein_300dpi_8c5cb4cfcb.jpg. [Accessed: 24-Jan-2019].
- [23] (Consoveyo) RIC, “CCS - SRM Operation Manual - 0000.docx,” 2017.
- [24] (Consoveyo) Miguel Brito and (Consoveyo) F. Duarte, “UNICER_Manual_Oper_STK_GDP_v1.10.doc_STK_GDP,” 2015.
- [25] “ET200SP - Siemens.” [Online]. Available: <http://w3.siemens.com/mcms/distributed-io/en/ip20-systems/PublishingImages/portlet-ip20-et200sp.jpg>. [Accessed: 06-Jan-2018].
- [26] Fábio André Duarte Ferreira, “Fábio André Duarte Ferreira Ensaio Combinado de Motores e Variadores Eletrônicos de Velocidade,” 2014.
- [27] “Variador de Velocidade.” [Online]. Available: <http://motorcontrol.pt/o-que-e-um-variador-de-velocidade>. [Accessed: 23-Sep-2017].
- [28] “EURODRIVE Movidrive MDX61B0022-5A3-4-0T - SEW.” [Online]. Available: <https://picclick.co.uk/SEW-EURODRIVE-Movidrive-MDX61B0022-5A3-4-0T-NEW-262460537835.html>. [Accessed: 23-Sep-2017].
- [29] “Movimot MM - SEW.” [Online]. Available: <http://docplayer.ru/docs-images/62/46980797/images/6-1.jpg>. [Accessed: 24-Sep-2017].
- [30] “MFP21D Profibus Module - SEW.” [Online]. Available: <https://i.ebayimg.com/images/g/nxIAAOSwxCxT96M4/s-l300.jpg>. [Accessed: 24-Sep-2017].
- [31] “DDL5 200 - Leuze.” [Online]. Available: http://img.directindustry.com/images_di/photo-g/4741-3026627.jpg. [Accessed: 23-Sep-2017].
- [32] (Consoveyo) Miguel Costa, “JT2-Oper_Manual-STK- PT-0001,” 2018.
- [33] “DDL5508 - Leuze.” [Online]. Available: http://www.leuze.com/selector/ci_img/Heiler/Volumes/Volume0/opasdata/d100001/derivates/1/001/740/8/DV001_666px_PPIC_DDL5500_R.jpg. [Accessed: 03-Mar-2018].
- [34] “AMS304i - Leuze.” [Online]. Available: http://www.leuze.com/media/contents/loesungen__fallstudien/sensoren_fuer__die_automatisierte_buchausleihe_in_buechereien_/Bild10.jpg. [Accessed: 24-Sep-2017].
- [35] “BPS34 SM100 - Leuze.” [Online]. Available: <https://pimg.tradeindia.com/01619999/b/1/BPS-34-S-M-100Barcode-positioning-system-leuze-elctronics.jpg>. [Accessed: 24-Sep-2017].
- [36] “Absolute Encoder - Kubler.” [Online]. Available:

- [https://instockspares.com/images/stories/virtuemart/product/KÜBLER Kubler 8.5888.0421.2102.S010.K014 Sendix 5888 Hollow Shaft Can Open Dubai instockspares.com ships from dubai \(1\).png](https://instockspares.com/images/stories/virtuemart/product/KÜBLER_Kubler_8.5888.0421.2102.S010.K014_Sendix_5888_Hollow_Shaft_Can_Open_Dubai_instockspares.com_ships_from_dubai_(1).png). [Accessed: 24-Sep-2017].
- [37] “CPJ Version Rail DIN - Scaime.” [Online]. Available: http://img.directindustry.com/images_di/photo-g/16014-7549953.jpg. [Accessed: 24-Sep-2017].
- [38] “M16-50kN-SP/FME1736 - Scaime.” [Online]. Available: http://www.scaime.com/upload/articles/142-en-vign-224_224.jpg. [Accessed: 24-Sep-2017].
- [39] “Industrial Ethernet Switch Scalance X108 PoE - Siemens.” [Online]. Available: <http://simatic-market.ru/catalog-resources/product-pictures/640/6GK5108-0PA00-2AA3.jpg>. [Accessed: 03-Mar-2018].
- [40] *Power over Ethernet (PoE)*. www.guiadohardware.net.
- [41] “CCTV P3225-LV - Axis.” [Online]. Available: https://www.axis.com/sites/default/files/styles/chunk_media_collection_and_text_dektop_top_wide__1x__211xauto_/public/p3225-lv.png?itok=Hlz87n-C. [Accessed: 03-Mar-2018].
- [42] “HMI KTM700 - Siemens.” [Online]. Available: http://media.automation24.com/Artikelbilder/Shop800px/101690_1.jpg. [Accessed: 01-Nov-2017].
- [43] (Consoveyo) Miguel Costa, “FOR_PAL-Oper_Manual-STK- PT-0001.” 2018.
- [44] “TL70 Modular Tower Light.” [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=IKrZFTF5TIQ>. [Accessed: 20-Apr-2019].
- [45] “SEW-EURODRIVE-gearmotor-K39-DR Series.” [Online]. Available: [https://www.picclickimg.com/00/s/MTA2NlgxNjAw/z/UGgAAOSwEaxcYtNB/\\$/SEW-EURODRIVE-gearmotor-servomotor-K39-DRL100L4BE5HR-ABB8-TH-ES7S-385Nm-450rpm-_57.jpg](https://www.picclickimg.com/00/s/MTA2NlgxNjAw/z/UGgAAOSwEaxcYtNB/$/SEW-EURODRIVE-gearmotor-servomotor-K39-DRL100L4BE5HR-ABB8-TH-ES7S-385Nm-450rpm-_57.jpg). [Accessed: 20-Apr-2019].
- [46] “SICK WEU26/3-103A00.” [Online]. Available: <https://www.sick.com/media/ZOOM/3/63/663/IM0061663.png>. [Accessed: 20-Apr-2019].
- [47] “Profibus - Modelo OSI.” [Online]. Available: <https://www.automacaoindustrial.info/wp-content/uploads/2012/06/3-modelo-osi-2.jpg>. [Accessed: 04-Mar-2018].
- [48] “Absolute Encoder 5868 (Shaft) - Kubler.” [Online]. Available: <https://www.telematic.com/Product/1zyXn/5868-Shaft-Absolute-Encoder>. [Accessed: 02-Mar-2018].
- [49] “BPS 37 - Leuze.” [Online]. Available: <http://www.clrwtr.com/Images/Leuze-Lumiflex/Leuze-BPS-37.jpg>. [Accessed: 04-Mar-2018].
- [50] C. Lewin, “Mathematics of Motion Control Profiles,” *Performance Motion Devices*, pp. 1–5, 2007.
- [51] “Symmetric motion profiles (trapezoidal).” [Online]. Available: <https://www.technosoftmotion.com/ESM-um-html/embim35.png>. [Accessed: 20-Apr-2019].
- [52] C. W. Ha, K. H. Rew, and K. S. Kim, “A complete solution to asymmetric S-curve motion profile: Theory & experiments,” *2008 Int. Conf. Control. Autom. Syst. ICCAS 2008*, no. February 2014, pp. 2845–2849, 2008.
- [53] “VFD_System.” [Online]. Available: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/0/07/Variable-frequency_Drive_System.png/320px-Variable-frequency_Drive_System.png.

[Accessed: 29-Apr-2019].

Anexo A – Código de Simulação dos Perfis

Código da simulação do perfil trapezoidal/triangular simétrico.

```
% Symmetric Trapezoidal/Triangular Profile
% 2018-10

clc
clear

% INPUT VALUES
disp("##### INITIALIZATIONS
#####")

smax = 25000 % Travel distance (mm)
vmax = 2000 % Maximum speed (mm.s-1)
vimin = 120 % Minimum starting speed (mm.s-1)
vfmin = 50 % Minimum positioning speed (mm.s-1)
amax = 400 % Maximum acceleration (mm.s-2)
dmax = 400 % Maximum deceleration (mm.s-2)

tic % set timer function with toc like output
a = amax;
d = dmax;
vact = vmax;
ct = type = s = s0 = s1_calc = s2_calc = s_des =
i = t = v = 0;

% CALCULATIONS
disp("##### CALCULATIONS
#####")

%Profile Definition
%acc position - trapezoidal profile
s1_calc = (1/2)*((vmax^2)/a);
%dec position - trapezoidal profile
s2_calc = smax-(1/2)*((vmax^2)/d);
if(s2_calc>s1_calc)
    %3 phases profile
    type = 'trapezoidal';
    s_des = s2_calc;
else
    %2 phases profile
    type = 'triangular';
    %new reference speed
    vact = ((smax-s0)*a)^(1/2);
    %acc position - triangular profile
    s1_calc = s0+(1/2)*((vact^2)/a);
    %dec position - triangular profile
```

```

s2_calc = smax-(1/2)*((vact^2)/d);
s_des = s2_calc;
endif

%Trapezoidal Profile
if strcmp(type,'trapezoidal')
    t = zeros(3,1);
    t(1) = vact/a;
    t(2) = (s2_calc-s1_calc)/vact;
    t(3) = vact/d;

    v = zeros(3,1);
    v(1) = a*t(1);
    v(2) = v(1);
    v(3) = v(2) - d*t(3);

    s = zeros(3,1);
    s(1) = (1/2)*a*t(1)^2;
    s(2) = s(1) + v(1)*t(2);
    s(3) = s(2) + v(2)*t(3)-(1/2)*d*t(3)^2;

toc % count time of seconds since timer 'tic' was
set

% Display calculated values
disp("##### PLOTS
#####")
a, d
totaltime = t(1) + t(2) + t(3)
t, v, s

% Plot calculated transition speeds
tplot = zeros(3,1);
vplot = zeros(3,1);
for i=[2:4]
    tplot(i)=tplot(i-1)+t(i-1);
    vplot(i)=v(i-1);
end
plot(tplot,vplot)

% Plot speed and position graphs
plotsize = round((totaltime)*10);
plottime = zeros(plotsize,1);
plotspeed = zeros(plotsize,1);
plotpos = zeros(plotsize,1);

for n=1:plotsize
    plottime(n,1) = (n-1)/10;
    if (plottime(n,1) <= t(1))
        ct = plottime(n,1);
        plotspeed(n,1) = a*ct;
        plotpos(n,1) = (1/2)*a*ct^2;
    elseif (plottime(n,1) <= t(1) + t(2))
        ct = plottime(n,1) - t(1);
        plotspeed(n,1) = v(1);
    end
end

```

```

        plotpos(n,1) = s(1) + v(1)*ct
    elseif (plottime(n,1) > t(1) + t(2))
        ct = plottime(n,1)-t(1)-t(2);
        plotspeed(n,1) = v(2) - d*ct;
        plotpos(n,1) = s(2) + v(2)*ct-(1/2)*d*ct^2;
    end
    if (plotpos(n,1) <= s(1)) && (plotspeed(n,1) <
vimin)
        plotspeed(n,1) = vimin;
    end
    if (plotpos(n,1) > s(2)) && (plotspeed(n,1) <
vfmin)
        plotspeed(n,1) = vfmin;
    end
end
end

subplot (2, 1, 1)
plot(plottime, plotspeed)
subplot (2, 1, 2)
plot(plottime, plotpos)

else

%Triangular Profile
strcmp(type,'triangular')

    t = zeros(2,1);
    t(1) = vact/a;
    t(2) = vact/d;

    v = zeros(2,1);
    v(1) = a*t(1);
    v(2) = v(1) - d*t(2);

    s = zeros(2,1);
    s(1) = (1/2)*a*t(1)^2;
    s(2) = s(1) + v(1)*t(2)-(1/2)*d*t(2)^2;

toc % count time of seconds since timer 'tic' was
set

% Display calculated values
disp("##### PLOTS
#####")
a, d
totaltime = t(1) + t(2)
t, v, s

% Plot calculated transition speeds
tplot = zeros(2,1);
vplot = zeros(2,1);
for i=[2:3]
    tplot(i)=tplot(i-1)+t(i-1);

```

```

    vplot(i)=v(i-1);
end
plot(tplot,vplot)

% Plot speed and position graphs
plotsize = round((totaltime)*1000);
plottime = zeros(plotsize,1);
plotspeed = zeros(plotsize,1);
plotpos = zeros(plotsize,1);
for n=1:plotsize
    plottime(n,1) = (n-1)/1000;
    if (plottime(n,1) <= t(1))
        ct = plottime(n,1);
        plotspeed(n,1) = a*ct;
        plotpos(n,1) = (1/2)*a*ct^2;
    elseif (plottime(n,1) > t(1))
        ct = plottime(n,1)-t(1);
        plotspeed(n,1) = v(1) - d*ct;
        plotpos(n,1) = s(1) + v(1)*ct - (1/2)*d*ct^2;
    end

    if (plotpos(n,1) <= s(1)) && (plotspeed(n,1) <
vimin)
        plotspeed(n,1) = vimin;
    end
    if (plotpos(n,1) > s(1)) && (plotspeed(n,1) <
vfmin)
        plotspeed(n,1) = vfmin;
    end
end
end

subplot (2, 1, 1)
plot(plottime, plotspeed)
subplot (2, 1, 2)
plot(plottime, plotpos)

endif

disp("##### END
#####")

```

Código da simulação do perfil *S-Curve* assimétrico.

```

% Position and Speed Control Optimization
% Asymmetric Scurve Profile
% 2018-10

clc
clear

% INPUT VALUES
disp("##### INITIALIZATIONS
#####")

st = 800 % Travel distance (mm)

```

```

vmax = 250 % Maximum speed (mm.s-1)
vmin = 140 % Minimum starting speed (mm.s-1)
vfmin = 50 % Minimum positioning speed (mm.s-1)
amax = 250 % Maximum acceleration (mm.s-2)
dmax = 250 % Maximum deceleration (mm.s-2)
j1 = 1000 % Jerk at start of acceleration (mm.s-3)
j3 = 1000 % Jerk at end of acceleration (mm.s-3)
j5 = 150 % Jerk at start of deceleration (mm.s-3)
j7 = 150 % Jerk at end of deceleration (mm.s-3)

% CALCULATIONS
disp("##### CALCULATIONS
#####")

% Define function to calculate the real root of a
cubic function
function root = cubicroot (x0, a, b, c, d)

% Initialization
n = 1;
xn = x0;
x1 = 0;

do
    % Function value calculation
    fn0 = a*xn^3 + b*xn^2 + c*xn + d;

    % Derivative value calculation
    fn1 = 3*a*xn^2 + 2*b*xn + c;

    % Root value calculation
    x1 = xn - (fn0/fn1);

    % Deviation calculation
    delta = abs(x1-xn)

    if delta > 0.001
        n++
        xn = x1;
    end

until ((delta <= 0.001) || (n > 20) )

root = x1;

endfunction

tic % set timer function with toc like output

kva = (j1+j3)/(2*j1*j3);
kvd = (j5+j7)/(2*j5*j7);

a = amax;
d = dmax;

```

```

vact = vmax;
vrange = vmax;
vold = vact;
found = false;
i =0;
do
    t = zeros(7,1);
    % Find acceleration for selected speed
    a = sqrt(vact/kva);
    if a > amax
        a = amax;
        t(2) = (vact - ((j1+j3)/(2*j1*j3))*(a^2))/a;
    end
    t(1) = a/j1;
    t(3) = a/j3;

    % Find deceleration for selected speed
    d = sqrt(vact/kvd);
    if d > dmax
        d = dmax;
        t(6) = (vact - ((j5+j7)/(2*j5*j7))*(d^2))/d;
    end
    t(5) = d/j5;
    t(7) = d/j7;

    v = zeros(7,1);
    v(1) = (a^2)/(2*j1);
    v(2) = v(1) + a*t(2);
    v(3) = v(2) + a*t(3)-(1/2)*j3*t(3)^2;
    v(6) = (d^2)/(2*j7);
    v(5) = v(6) + d*t(6);
    v(4) = v(5) + d*t(5)-(1/2)*j5*t(5)^2;

    s = zeros(7,1);
    s(1) = (1/6)*j1*t(1)^3;
    s(2) = s(1) + v(1)*t(2)+(1/2)*a*t(2)^2;
    s(3) = s(2) + v(2)*t(3)+(1/2)*a*t(3)^2-
(1/6)*j3*t(3)^3;
    s(4) = s(3) + v(3)*t(4);
    s(5) = s(4) + v(4)*t(5)-
(1/2)*d*t(5)^2+(1/6)*j5*t(5)^3;
    s(6) = s(5) + v(5)*t(6)-(1/2)*d*t(6)^2;
    s(7) = s(6) + (1/6)*j7*t(7)^3;

    if s(7) <= st
        if abs(vact - vold)<=1
            found = true;
        else
            vold = vact;
            vrange = vrange / 2;
            vact = vact + vrange;
        end
    else
        vold = vact;
        vrange = vrange / 2;
        vact = vact - vrange;
    end
end

```

```

    end
    i++;
    i
    vold
    vrange
    vact
    until(found)

% Final calculation of time at constant speed
if s(7) < st
    t(4) = (st-s(7))/v(3);
    end

% Calculate positions

% Final position of phase 1
s(1) = (1/6)*j1*t(1)^3
% Final position of phase 2
s(2) = s(1) + v(1)*t(2)+(1/2)*a*t(2)^2
% Final position of phase 3
s(3) = s(2) + v(2)*t(3)+(1/2)*a*t(3)^2-
(1/6)*j3*t(3)^3
% Final position of phase 4
s(4) = s(3) + v(3)*t(4)
% Final position of phase 5
s(5) = s(4) + v(4)*t(5)-
(1/2)*d*t(5)^2+(1/6)*j5*t(5)^3
% Final position of phase 6
s(6) = s(5) + v(5)*t(6)-(1/2)*d*t(6)^2
% Final position of phase 7
s(7) = s(6) + (1/6)*j7*t(7)^3

% Display calculation time
toc

% Display calculated values
vact, a, d
totaltime = t(1) + t(2) + t(3) + t(4) + t(5) +
t(6) + t(7)
t, v, s

disp("##### PLOTS
#####")

% Plot calculated transition speeds
tplot = zeros(8,1);
vplot = zeros(8,1);
for i=[2:8]
    tplot(i)=tplot(i-1)+t(i-1);
    vplot(i)=v(i-1);
end
plot(tplot,vplot)

% Plot speed and position graphs
plotsize = round((totaltime)*10);
plottime = zeros(plotsize,1);

```

```

plotspeed = zeros(plotsize,1);
plotpos = zeros(plotsize,1);
for n=1:plotsize
    plottime(n,1) = (n-1)/10;
    if (plottime(n,1) <= t(1))
        ct = plottime(n,1);
        plotspeed(n,1) = (1/2)*j1*ct^2;
        plotpos(n,1) = (1/6)*j1*ct^3;
    elseif (plottime(n,1) <= t(1) + t(2))
        ct = plottime(n,1) - t(1);
        plotspeed(n,1) = v(1) + a*ct;
        plotpos(n,1) = s(1) + v(1)*ct+(1/2)*a*ct^2;
    elseif (plottime(n,1) <= t(1) + t(2) + t(3))
        ct = plottime(n,1)-t(1)-t(2);
        plotspeed(n,1) = v(2) + a*ct - (1/2)*j3*ct^2;
        plotpos(n,1) = s(2) + v(2)*ct+(1/2)*a*ct^2-
(1/6)*j3*ct^3;
    elseif (plottime(n,1) <= t(1) + t(2) + t(3) +
t(4))
        ct = plottime(n,1)-t(1)-t(2)-t(3);
        plotspeed(n,1) = v(3);
        plotpos(n,1) = s(3) + v(3)*ct;
    elseif (plottime(n,1) <= t(1) + t(2) + t(3) +
t(4) + t(5))
        ct = plottime(n,1)-t(1)-t(2)-t(3)-t(4);
        plotspeed(n,1) = v(4) - (1/2)*j5*ct^2;
        plotpos(n,1) = s(4) + v(4)*ct-
(1/2)*d*ct^2+(1/6)*j5*ct^3;
    elseif (plottime(n,1) <= t(1) + t(2) + t(3) +
t(4) + t(5) + t(6))
        ct = plottime(n,1)-t(1)-t(2)-t(3)-t(4)-t(5);
        plotspeed(n,1) = v(5)-d*ct;
        plotpos(n,1) = s(5) + v(5)*ct-(1/2)*d*ct^2;
    elseif (plottime(n,1) <= t(1) + t(2) + t(3) +
t(4) + t(5) + t(6) + t(7))
        ct = plottime(n,1)-t(1)-t(2)-t(3)-t(4)-t(5)-
t(6);
        plotspeed(n,1) = v(6) - d*ct + (1/2)*j7*ct^2;
        plotpos(n,1) = s(6) + v(6)*ct - (1/2)*d*ct^2
+ (1/6)*j7*ct^3;
    end
end

plot(plottime, plotspeed, ";Speed [mm/s];")
plot(plottime, plotpos, ";Position [mm];")

% Plot final speed graph
plotspeed_final = zeros(plotsize,1);
plotcx = zeros(plotsize,1);
for n=1:plotsize
    plottime(n,1) = (n-1)/10;
    if (plotpos(n,1) <= s(1)) % Phase 1
        cx = plotpos(n,1);
        plotspeed_final(n,1) =
((6*cx/j1)^(2/3))*(j1/2);
    elseif (plotpos(n,1) <= s(2)) % Phase 2

```

```

    cx = s(1) - plotpos(n,1);
    plotspeed_final(n,1) = sqrt((v(1)^2)-2*a*cx);
elseif (plotpos(n,1) <= s(3)) % Phase 3
    cx = s(2) - plotpos(n,1);
    time = cubicroot(0, -j3/6, a/2, v(2), cx);
    plotspeed_final(n,1) = v(2) + a*time -
(1/2)*j3*time^2;
elseif (plotpos(n,1) <= s(4)) % Phase 4
    plotspeed_final(n,1) = v(3);
elseif (plotpos(n,1) <= s(5)) % Phase 5
    cx = s(4) - plotpos(n,1);
    plotspeed_final(n,1) = v(4) -
(1/2)*j5*cubicroot(0, j5/6, -d/2, v(4), cx)^2;
elseif (plotpos(n,1) <= s(6)) % Phase 6
    cx = plotpos(n,1) - s(5);
    plotspeed_final(n,1) = sqrt((v(5)^2)-2*d*cx);
elseif (plotpos(n,1) <= s(7)) % Phase 7
    cx = s(7) - plotpos(n,1);
    plotspeed_final(n,1) =
((6*cx/j7)^(2/3))*(j7/2);
end
if (plotpos(n,1) <= s(3)) &&
(plotspeed_final(n,1) < vmin)
    plotspeed_final(n,1) = vmin;
end
if (plotpos(n,1) > s(3)) &&
(plotspeed_final(n,1) < vfmn)
    plotspeed_final(n,1) = vfmn;
end
end
end

subplot (2, 1, 1)
plot(plottime, plotspeed_final)
subplot (2, 1, 2)
plot(plottime, plotpos)

```


Anexo B – Cálculo dos perfis triangular e trapezoidal

Teoricamente por Chuck Lewin, fundador da empresa *Performance Motion Devices* [50], a distância de desaceleração é dada por:

$$s_{\text{des}} = \frac{v^2}{2a} \quad (\text{B.1})$$

Com base na equação (2), que diz respeito à distância de aceleração

$$s_1 = \frac{1}{2}at_1^2 \quad (\text{B.2})$$

Substituindo por

$$v_1 = at_1 \Leftrightarrow t_1 = \frac{v}{a} \quad (\text{B.3})$$

Obtém-se

$$s_1 = \frac{v^2}{2a} \quad (\text{B.4})$$

Então, a distância s_2 que se baseia na equação (B.1)

$$s_2 = s_{\text{max}} - s_{\text{des}} \quad (\text{B.5})$$

Sendo este um perfil simétrico, em que a distância de aceleração é igual à distância de desaceleração, então:

$$s_2 = s_{\text{max}} - \frac{v^2}{2a} \quad (\text{B.6})$$

Anexo C – Cálculo do perfil *S–Curve*

Cenário 1: $t_2 = t_4 = t_6 = 0$.

Aceleração e desaceleração:

$$a(t_i) = \begin{cases} a, & t < t_4 \\ d, & t > t_4 \end{cases} \quad (\text{C.1})$$

Tempo:

$$a_1 = j_1 t_1 \Leftrightarrow t_1 = \frac{a}{j_1} \quad (\text{C.2})$$

$$a_3 = j_3 t_3 \Leftrightarrow t_3 = \frac{a}{j_3} \quad (\text{C.3})$$

$$d_5 = j_5 t_5 \Leftrightarrow t_5 = \frac{d}{j_5} \quad (\text{C.4})$$

$$d_7 = j_7 t_7 \Leftrightarrow t_7 = \frac{d}{j_7} \quad (\text{C.5})$$

Velocidade:

$$v_1 = \frac{1}{2} j_1 t_1^2 = \frac{a^2}{2j_1} \quad (\text{C.6})$$

$$v_3 = v_2 + at_3 - \frac{1}{2} j_3 t_3^2 \quad (\text{C.7})$$

$$v_4 = v_5 + dt_5 - \frac{1}{2} j_5 t_5^2 \quad (\text{C.8})$$

$$v_6 = \frac{1}{2} j_7 t_7^2 = \frac{d^2}{2j_7} \quad (\text{C.9})$$

Posição:

$$s_1 = \frac{1}{6} j_1 t_1^3 \quad (\text{C.10})$$

$$s_3 = s_2 + v_2 t_3 + \frac{1}{2} a t_3^2 - \frac{1}{6} j_3 t_3^3 \quad (\text{C.11})$$

$$s_5 = s_4 + v_4 t_5 - \frac{1}{2} d t_5^2 + \frac{1}{6} j_5 t_5^3 \quad (\text{C.12})$$

$$s_7 = s_6 + v_6 t_7 - \frac{1}{2} d t_7^2 + \frac{1}{6} j_7 t_7^3 \quad (\text{C.13})$$

Aceleração máxima e constante de aceleração:

Através da equação

$$v_3 = v_1 + a t_3 - \frac{1}{2} j_3 t_3^2 \quad (\text{C.14})$$

Substituindo por

$$t_3 = \frac{a}{j_3} \quad (\text{C.15})$$

Obtém-se

$$v_3 = \left(\frac{j_1 + j_3}{2j_1j_3} \right) a^2 = K_{va} a^2 \quad (\text{C.16})$$

Então,

$$a = \sqrt{\frac{v}{K_{va}}} \quad (\text{C.17})$$

Desaceleração máxima e constante de desaceleração:

Com base na equação

$$v_7 = v_5 - d t_7 + \frac{1}{2} j_7 t_7^2 \quad (\text{C.18})$$

Substituindo

$$t_7 = \frac{a}{j_7} \quad (\text{C.19})$$

Obtém-se

$$v_7 = \left(\frac{j_5 + j_7}{2j_5j_7} \right) d^2 = K_{vd} d^2 \quad (\text{C.20})$$

Então,

$$d = \sqrt{\frac{v}{K_{vd}}} \quad (\text{C.21})$$

Cálculo da velocidade atual a enviar ao *drive*:

Fase 1:

Considerando s a posição atual:

$$s_x = s \quad (\text{C.22})$$

Com base nas equações (C.12) e (C.16), a velocidade na fase 1 calcula-se através de:

$$v = \begin{cases} s_x = \frac{1}{6}j_1t^3 \\ v = \frac{1}{2}j_1t^2 \end{cases} \Leftrightarrow v = \begin{cases} t = \sqrt[3]{\frac{6s_x}{j_1}} \\ v = \frac{j_1}{2} \left(\sqrt[3]{\frac{6s_x}{j_1}} \right)^2 \end{cases} \quad (\text{C.23})$$

Fase 3:

Considerando s a posição atual:

$$s_x = s_2 - s \quad (\text{C.24})$$

Através das equações (C.13) e (C.17), a velocidade na fase 3 calcula-se através de:

$$v = \begin{cases} s = s_2 + v_2t + \frac{1}{2}at^2 - \frac{1}{6}j_3t^3 \\ v = v_2 + at - \frac{1}{2}j_3t^2 \end{cases} \Leftrightarrow v = \begin{cases} 0 = s_x + v_2t + \frac{1}{2}at^2 - \frac{1}{6}j_3t^3 \\ v = v_2 + at - \frac{1}{2}j_3t^2 \end{cases} \quad (\text{C.25})$$

Fase 5:

Considerando s a posição atual:

$$s_x = s_4 - s \quad (\text{C.26})$$

Através das equações (C.14) e (C.18), a velocidade na fase 5 calcula-se através de:

$$v = \begin{cases} s = s_4 + v_4 t - \frac{1}{2} dt^2 + \frac{1}{6} j_5 t^3 \\ v_4 = v - \frac{1}{2} j_5 t^2 \end{cases} \Leftrightarrow v = \begin{cases} 0 = s_x + v_4 t - \frac{1}{2} dt^2 + \frac{1}{6} j_5 t^3 \\ v = v_4 - \frac{1}{2} j_5 t^2 \end{cases} \quad (\text{C.27})$$

Fase 7:

Considerando s a posição atual:

$$s_x = s_7 - s \quad (\text{C.28})$$

Com base nas equações (C.15) e (C.19), a velocidade na fase 7 calcula-se através de:

$$v = \begin{cases} s_x = \frac{1}{6} j_7 t^3 \\ v = \frac{1}{2} j_7 t^2 \end{cases} \Leftrightarrow v = \begin{cases} t = \sqrt[3]{\frac{6s_x}{j_7}} \\ v = \frac{j_7}{2} \left(\sqrt[3]{\frac{6s_x}{j_7}} \right)^2 \end{cases} \quad (\text{C.29})$$

Cenário 2: $t_2 \neq 0$, $t_4 \neq 0$ e $t_6 \neq 0$.

Velocidade:

$$v_2 = v_1 + at_2 \quad (\text{C.30})$$

$$v_5 = v_6 + dt_6 \quad (\text{C.31})$$

Posição:

$$s_2 = s_1 + v_1 t_2 + \frac{1}{2} at_2^2 \quad (\text{C.32})$$

$$s_4 = s_3 + v_3 t_4 \quad (\text{C.33})$$

$$s_6 = s_5 + v_5 t_6 - \frac{1}{2} dt_6^2 \quad (\text{C.34})$$

Através da equação da velocidade (C.30) e da equação da constante de aceleração (C.17), obtém-se:

$$t_2 = \frac{v - K_{va} a^2}{a} \quad (\text{C.35})$$

Através da equação da velocidade (C.31) e da equação da constante de desaceleração (C.21), obtém-se:

$$t_6 = \frac{v - K_{vd}d^2}{d} \quad (\text{C.36})$$

O tempo de velocidade constante é calculado através da distância total a percorrer e da velocidade máxima:

$$t_4 = \frac{st - s_7}{v_3} \quad (\text{C.37})$$

Cálculo da velocidade atual a enviar ao *drive*:

Fase 2:

Considerando s a posição atual:

$$s_x = s_1 - s \quad (\text{C.38})$$

Com base nas equações (C.30) e (C.32), a velocidade na fase 2 calcula-se através de:

$$v = \begin{cases} s = s_1 + v_1t + \frac{1}{2}at^2 \\ v = v_1 + at \end{cases} \Leftrightarrow v = \begin{cases} 0 = s_x + v_1t + \frac{1}{2}at^2 \\ v = \sqrt{v_1^2 - 2as_x} \end{cases} \quad (\text{C.39})$$

Fase 6:

Considerando s a posição atual:

$$s_x = s - s_5 \quad (\text{C.40})$$

Com base nas equações (C.31) e (C.34), a velocidade na fase 6 calcula-se através de:

$$v = \begin{cases} s = s_5 + v_5t - \frac{1}{2}dt^2 \\ v = v_5 - dt \end{cases} \Leftrightarrow v = \begin{cases} 0 = -s_x + v_5t - \frac{1}{2}dt^2 \\ v = \sqrt{v_5^2 - 2ds_x} \end{cases} \quad (\text{C.41})$$

Fase 4:

Assume-se que a velocidade na fase 4 é a velocidade final da fase 3:

$$v = v_3 \quad (\text{C.42})$$

