



Melhoria dos Processos de Cálculo de Cadências em Transportadores de Paletes

DIOGO MIGUEL DE BARROS MATOS

outubro de 2023

MELHORIA DOS PROCESSOS DE CÁLCULO DE CADÊNCIAS EM TRANSPORTADORES DE PALETES

Diogo Miguel de Barros Matos, 1180576

2023

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica

isen

P.PORTO

MELHORIA DOS PROCESSOS DE CÁLCULO DE CADÊNCIAS EM TRANSPORTADORES DE PALETES

Diogo Miguel de Barros Matos

1180576

Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação da Professora Doutora Maria Teresa Ribeiro Pereira e coorientação da Professora Doutora Marisa João Guerra Pereira Oliveira.

2023

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica

isen

P.PORTO

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, quero expressar a minha profunda gratidão à minha estimada Carlota, por todos os nossos momentos, pela infinita paciência, pelo incansável apoio e por nunca duvidar de mim.

Não posso deixar de reconhecer todo o apoio, educação e experiência proporcionados pelos meus pais, Jorge Matos e Isabel Barros. Sem a presença deles, não seria de todo possível estar aqui.

Pretendo também estender a minha apreciação ao Paulo Moreira e à Rosa Moreira, pelo seu contínuo apoio, amabilidade e orientação.

Gostaria de expressar também a minha sincera gratidão aos meus colegas e amigos mais próximos, Pedro Maia, Nuno Rocha, Bruna Sousa e Rui Diogo Cunha, por todos os momentos de diversão, angústia, reflexão e crescimento que compartilhamos de forma tão significativa.

Não posso deixar de destacar a Professora Doutora Maria Teresa Ribeiro Pereira, a quem desejo endereçar o meu agradecimento pela sua disponibilidade, apoio inestimável e pelos materiais fornecidos.

Por último, mas de igual importância, quero expressar a minha sincera gratidão à minha chefe e orientadora, Paola Elizalde, ao meu coorientador, Daniel Silva, e a toda a equipa de *Solution Design* da *Körber Supply Chain PT*, com quem trabalhei, aprendi e me diverti tanto.

página propositadamente em branco

RESUMO

A automação é uma tecnologia crucial na logística, sendo capaz de aumentar a competitividade das empresas. O desenvolvimento de um sistema de armazenamento automatizado é complexo e requer a otimização do fluxo de materiais e a determinação da capacidade de manipulação de cargas. O objetivo deste projeto é desenvolver uma ferramenta para calcular as cadências em transportadores de paletes em armazéns automatizados, usando a metodologia *Action Research* e implementando o projeto numa empresa acolhedora. Os objetivos específicos incluem a redução do tempo de cálculo de cadências, automatização do cálculo, melhoria na compreensão da quantidade de equipamentos necessários, redução de possíveis erros e melhoria da livreria de ferramentas de cálculo.

Este projeto aborda o desenvolvimento e implementação dessa ferramenta, visando a melhoria dos processos de concepção, orçamentação e entrega de soluções logísticas, bem como a obtenção de cálculos precisos relativos às cadências em sistemas de transportadores de paletes. O estudo teve início com uma revisão bibliográfica abrangente sobre os conceitos essenciais relacionados com transportadores de paletes, métodos de cálculo de cadências e a importância da precisão desses cálculos na indústria. Esta revisão teórica serviu de base para o desenvolvimento da ferramenta.

A ferramenta concebida abrange diversos aspetos relacionados com os transportadores de paletes, incluindo a definição de equipamentos, parâmetros operacionais e o cálculo do tempo de ciclo. Além disso, possibilita a análise de sistemas completos de transportadores de paletes, identificando potenciais gargalos e calculando a taxa de fluxo global. Para a validação da ferramenta, foram realizadas simulações com recurso a software especializado. Estas simulações revelaram a precisão da ferramenta na previsão das cadências em transportadores de paletes, com variações percentuais inferiores a 5%, confirmando a confiabilidade da ferramenta.

A implementação da ferramenta na empresa acolhedora resultou em melhorias substanciais nos processos de concepção e orçamentação de soluções, bem como numa compreensão mais detalhada dos equipamentos em análise e da quantidade de equipamentos necessária nos projetos.

Os trabalhos futuros incluem a expansão da ferramenta para abranger outros tipos de equipamentos, a simplificação da análise de sistemas que envolvem mesas de transferência ou rotativas, a internacionalização da ferramenta para alcançar uma audiência global e a adaptação desta às normas complementares que possam ser adquiridas futuramente pela empresa acolhedora.

Este projeto representa uma contribuição valiosa para a livreria de ferramentas da empresa acolhedora, bem como uma melhoria e automatização dos processos de cálculo de cadências e sublinha a importância de ferramentas precisas para o cálculo de cadências de diferentes equipamentos na indústria.

PALAVRAS-CHAVE

Logística; Cálculo de Cadências; Transportadores; Paletes; Ferramenta.

página propositadamente em branco

ABSTRACT

Automation is a crucial technology in logistics, capable of enhancing the competitiveness of companies. The development of an automated storage system is complex and necessitates the optimization of material flow and determination of load handling capacity. The objective of this project is to develop a tool for calculating throughputs in pallet conveyors within automated warehouses, employing the Action Research methodology and implementing the project within a host company. Specific objectives include reducing throughput calculation time, automating the calculation process, improving the understanding of equipment requirements, reducing potential errors, and enhancing the library of calculation tools.

This project addresses the development and implementation of this tool, aiming to improve the processes of design, budgeting, and delivery of logistics solutions, as well as obtaining accurate throughput calculations for pallet conveyor systems. The study commenced with a comprehensive literature review on essential concepts related to pallet conveyors, throughput calculation methods, and the significance of precision in these calculations within the industry. This theoretical review served as the foundation for the tool's development.

The designed tool encompasses various aspects related to pallet conveyors, including equipment definitions, operational parameters, and cycle time calculations. Moreover, it enables the analysis of complete pallet conveyor systems, identifying potential bottlenecks and calculating the overall flow rate. To validate the tool, simulations were conducted using specialized software. These simulations demonstrated the tool's precision in predicting pallet conveyor throughputs, with percentage variations below 5%, confirming its reliability.

The implementation of the tool in the host company resulted in substantial improvements in solution design and budgeting processes, as well as a more comprehensive understanding of the equipment under analysis and the quantity of equipment required for projects.

Future work includes expanding the tool's scope to encompass other types of equipment, simplifying the analysis of systems involving transfer or rotary tables, internationalizing the tool to reach a global audience, and adapting it to potential additional standards that the host company may acquire in the future.

This project represents a valuable contribution to the host company's library of tools, as well as an enhancement and automation of throughput calculation processes, underscoring the importance of precise tools for calculating throughputs for various equipment types in the industry.

KEYWORDS

Logistics; Throughput Calculation; Conveyors; Pallets; Tool.

página propositadamente em branco

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS.....	5
RESUMO	I
ABSTRACT.....	III
ÍNDICE.....	V
ÍNDICE DE FIGURAS	IX
ÍNDICE DE TABELAS	XIII
ÍNDICE DE EQUAÇÕES	XV
LISTAS DE SIGLAS E SÍMBOLOS.....	XIX
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Enquadramento e Pertinência	1
1.2. Questões e Objetivos de Investigação	2
1.3. Metodologia	2
1.4. Estrutura do Trabalho	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1. Cadeia de Abastecimento e Logística.....	4
2.2. Sistemas de Armazenagem	5
2.2.1. Funções Básicas de um Sistema de Armazenamento.....	6
2.2.2. Tipos de Armazéns e Estruturas de Armazenamento.....	7
2.2.3. Dimensionamento de um Armazém	8
2.3. Sistemas Automáticos de Armazenamento	9
2.3.1. Sistemas de Gestão de Armazéns (WMS)	10
2.3.2. Transelevadores.....	12
2.3.3. Transportadores de Paletes	13
2.4. Cadência em Transportadores de Paletes.....	16
2.4.1. Ferramentas Existentes de Cálculo de Cadências.....	16
2.4.1.1. <i>Software</i> de Simulação de Sistemas.....	16
2.4.1.2. <i>Machine Learning</i>	17
2.5. Considerações Finais	18
3. CASO DE ESTUDO	19
3.1. Apresentação da Empresa.....	19
3.2. Enquadramento do Problema no Cálculo de Cadências em Transportadores de Paletes na Empresa.....	19
3.3. Desenho da Solução	20
3.3.1. Modelo de Suporte à Ferramenta – VDI 3978	21
3.3.1.1. Cálculos Matemáticos de Suporte à Elaboração da Ferramenta	22

3.3.2. Implementação da Ferramenta de Cálculo de Cadências de Transportadores de Paletes e Exemplo Prático	35
3.4. Exemplo Prático com um Software de Simulação de Sistemas	57
3.5. Avaliação dos Resultados	60
4. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	63
4.1. Conclusões.....	63
4.2. Trabalhos Futuros.....	64
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	65

página propositadamente em branco

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. As cinco fases do Action Research (Baskerville & Wood-Harper, 1996)	3
Figura 2. Cadeia de Abastecimento e Logística (F. M. Guedes, 2023)	5
Figura 3. Exemplo de um Sistema de Armazenamento Automático (Körber Supply Chain PT, 2022)	10
Figura 4. Conjuntos Principais de um Transelevador (Geraldês, 2019)	13
Figura 5. Logótipo Körber Supply Chain	19
Figura 6. Gráfico Velocidade-Tempo: Tipo 1- Movimento Completo	23
Figura 7. Gráfico Velocidade-Tempo: Tipo 2 - Movimento Acelerado.....	25
Figura 8. Gráfico Velocidade-Tempo: Tipo 3 - Movimento Desacelerado	28
Figura 9. Gráfico Velocidade-Tempo: Tipo 4 - Movimento Uniforme.....	30
Figura 10. Gráfico Velocidade-Tempo: Mesa de Transferência	31
Figura 11. Gráfico Velocidade-Tempo: Mesa Rotativa.....	34
Figura 12. Páginas Principais da Ferramenta	36
Figura 13. Cabeçalho da Ferramenta	36
Figura 14. Coleta de Informação da Carga	37
Figura 15. Escolha da Paleta a Utilizar	37
Figura 16. Exemplo de uma paleta com overhang (PalletOnline, 2021).....	39
Figura 17. Exemplo dos Parâmetros de Carga Preenchidos.....	39
Figura 18. Coleta de Informação - Transportador de Rolos, RCV	39
Figura 19. SSL ou LSL	40
Figura 20. Transportador de Rolos.....	40
Figura 21. Continuação Exemplo - Transportador de Rolos.....	42
Figura 22. Tempos de Operação Extra - Transportador de Rolos	44
Figura 23. Finalização Exemplo - Transportador de Rolos, RCV.....	44
Figura 24. Coleta de Informação - Transportador de Correntes, CCV	44
Figura 25. Tempos de Operação Extra - Transportador de Correntes	45
Figura 26. Exemplo - Transportador de Correntes, CCV	45
Figura 27. Coleta de Informações - Mesa de Transferência, TRT.....	46
Figura 28. Exemplo - Mesa de Transferência, TRT	47
Figura 29. Tempos de Operação Extra - Mesa de Transferência	48
Figura 30. Finalização Exemplo - Mesa de Transferência, TRT	48
Figura 31. Coleta de Informações - Mesa Rotativa, RTB.....	49
Figura 32. Exemplo - Mesa Rotativa, RTB	50
Figura 33. Tempos de Operação Extra - Mesa Rotativa	51
Figura 34. Finalização Exemplo - Mesa Rotativa, RTB.....	52
Figura 35. Título e Análise de Resultados da Página System	52
Figura 36. Parâmetro Equipamento	53
Figura 37. Parâmetro Tipo de Movimento.....	53
Figura 38. Parâmetro Modelo/ Comprimento	53
Figura 39. Parâmetro Percentagem de Transferência	53
Figura 40. Parâmetro Ângulo de Rotação	54
Figura 41. Parâmetros Tempos de Operação Extra	54

Figura 42. Parâmetros Resultados Individuais	54
Figura 43. Botão de Cálculo de Cadência	54
Figura 44. Botão de Gerar Nova Página	54
Figura 45. Parâmetros Página Total	55
Figura 46. Parâmetros Página de Lista de Equipamentos	55
Figura 47. Parâmetros Análise de Resultados da Página Total	55
Figura 48. Sistema Exemplo	55
Figura 49. Preenchimento System Parte 1	56
Figura 50. Análise dos Resultados Individuais.....	56
Figura 51. Análise dos Resultados Coletivos	56
Figura 52. Título Folha Gerada	56
Figura 53. Lista de Equipamentos - Exemplo Parte 1	56
Figura 54. Análise de Resultados Total	56
Figura 55. Simulação Flexsim - Transportador de Rolos, RCV.....	58
Figura 56. Simulação Flexsim - Características Transportador Rolos.....	58
Figura 57. Simulação Flexsim - Resultados Transportador Rolos.....	59
Figura 58. Simulação Flexsim - Transportador de Correntes, CCV.....	59
Figura 59. Simulação Felxsim – Resultados Transportador de Correntes.....	59

página propositadamente em branco

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1. Diferentes Equipamentos Transportadores de Paletes.....	14
Tabela 2. Requerimentos de Carga - Transportador de Rolos	38
Tabela 3. Requerimentos de Carga - Transportador de Correntes.....	38
Tabela 4. Diferentes Modelos de Mesas de Transferência, TRT	45

página propositadamente em branco

ÍNDICE DE EQUAÇÕES

Equação 1. Equação da Cinemática – Posição – Tipo 1.....	23
Equação 2. Equação da Cinemática – Velocidade – Tipo 1.....	23
Equação 3. Dedução da Velocidade do Movimento Completo em t_1	23
Equação 4. Dedução da Velocidade do Movimento Completo em t_2	23
Equação 5. Dedução da Velocidade do Movimento Completo em t_3	23
Equação 6. Dedução da Distância Percorrida do Movimento Completo em t_1	24
Equação 7. Dedução da Distância Percorrida do Movimento Completo em t_2	24
Equação 8. Dedução da Distância Percorrida do Movimento Completo em t_3	24
Equação 9. Dedução do t_1 do Movimento Completo.....	24
Equação 10. Dedução do t_2 do Movimento Completo.....	24
Equação 11. Tempo de Ciclo do Movimento Completo.....	24
Equação 12. Equação de Verificação do Tempo de Ciclo do Movimento Completo (1).....	25
Equação 13. Equação de Verificação do Tempo de Ciclo do Movimento Completo (2).....	25
Equação 14. Equação da Cinemática – Posição – Tipo 2.....	25
Equação 15. Equação da Cinemática – Velocidade – Tipo 2.....	25
Equação 16. Dedução da Velocidade do Movimento Acelerado em t_1	26
Equação 17. Dedução da Velocidade do Movimento Acelerado em t_2	26
Equação 18. Dedução da Distância Percorrida do Movimento Acelerado em t_1	26
Equação 19. Dedução da Distância Percorrida do Movimento Acelerado em t_2	26
Equação 20. Dedução do t_1 do Movimento Acelerado.....	26
Equação 21. Dedução do t_2 do movimento acelerado.....	26
Equação 22. Tempo de Ciclo do Movimento Acelerado.....	27
Equação 23. Equação de Verificação do Tempo de Ciclo do Movimento Acelerado.....	27
Equação 24. Equação da Cinemática – Posição – Tipo 3.....	27
Equação 25. Equação da Cinemática – Velocidade – Tipo 3.....	27
Equação 26. Dedução da Velocidade do Movimento Desacelerado em t_1	28
Equação 27. Dedução da Velocidade do Movimento Desacelerado em t_2	28
Equação 28. Dedução da Distância Percorrida do Movimento Desacelerado em t_1	28
Equação 29. Dedução da Distância Percorrida do Movimento Desacelerado em t_2	28
Equação 30. Dedução do t_2 do Movimento Desacelerado.....	28
Equação 31. Dedução do t_1 do movimento desacelerado.....	29
Equação 32. Tempo de Ciclo do Movimento Desacelerado.....	29
Equação 33. Equação da Cinemática – Posição – Tipo 4.....	29
Equação 34. Equação da Cinemática – Velocidade – Tipo 4.....	29
Equação 35. Dedução da Velocidade do Movimento Uniforme em t_1	30
Equação 36. Dedução da Distância Percorrida do Movimento Uniforme em t_1	30
Equação 37. Tempo de Ciclo do Movimento Uniforme.....	30
Equação 38. Tempo de Ciclo da Mesa de Transferência.....	32
Equação 39. Equação de Verificação do Tempo de Ciclo da Mesa de Transferência (1).....	32
Equação 40. Equação de Verificação do Tempo de Ciclo da Mesa de Transferência (2).....	32
Equação 41. Tempo de Ciclo da Mesa de Transferência Caso as Verificações das Equações 37 e 38 Sejam Verdadeiras.....	32
Equação 42. Tempo de Ciclo da Mesa Rotativa.....	34

Equação 43. Equação de Verificação do Tempo de Ciclo da Mesa Rotativa (1)	34
Equação 44. Equação de Verificação do Tempo de Ciclo da Mesa Rotativa (2)	34
Equação 45. Tempo de Ciclo da Mesa Rotativa Caso as Verificações das Equações 41 e 42 Sejam Verdadeiras	35
Equação 46. Sucessão Número Paletes em Cima do Transportador	41
Equação 47. Dedução Sucessão – Distâncias de Segurança	42
Equação 48. Dedução Sucessão – Comprimento e Número de Paletes	42
Equação 49. Dedução Sucessão – Distância entre Cargas	42
Equação 50. Número de Paletes que o Transportador Conseguir Suportar	42
Equação 51. Cálculo da Cadência	43
Equação 52. Cálculo do Tempo de Ciclo - TRT - Tipo 1	47
Equação 53. Cálculo do Tempo de Ciclo - TRT - Tipo 2	47
Equação 54. Cálculo do Tempo de Ciclo - TRT - Tipo 3	48
Equação 55. Cálculo do Tempo de Ciclo - TRT - Tipo 4	48
Equação 56. Cálculo do Tempo de Ciclo - RTB - Tipo 1	51
Equação 57. Cálculo do Tempo de Ciclo - RTB - Tipo 2	51
Equação 58. Cálculo do Tempo de Ciclo - RTB - Tipo 3	51
Equação 59. Cálculo do Tempo de Ciclo - RTB - Tipo 4	51

página propositadamente em branco

LISTAS DE SIGLAS E SÍMBOLOS

Lista de Siglas

AGV	Automatic Guided Vehicle
AIDC	Automatic Identification and Data Capture
AS/RS	Automated Storage and Retrieval System
CCV	Chain Conveyor/Transportador de Correntes
CSCMP	Council of Supply Chain Management Professionals
HBW	High Bay Warehouses
ISEP	Instituto Superior de Engenharia do Porto
KSC PT	Körber Supply Chain Portugal
LSL	Long Side Leading
ML	Machine Learning
P.Porto	Instituto Politécnico do Porto
R&D	Research & Development
RCV	Roller Conveyor/Transportador de Rolos
RFID	Radio Frequency Identification
RGV	Rail Guided Vehicle
RTB	Rotating Table/Mesa Rotativa
SSL	Short Side Leading
TRT	Transfer Table/Mesa de Transferência
WLAN	Wireless Local Area Network
WMS	Warehouse Management System/Sistema de Gestão de Armazéns

Lista de Símbolos

Kg	Kilogramas
mm	Milímetros
ms ⁻¹	Metros por segundo
ms ⁻²	Metros por segundo ao quadrado
%	Porcentagem

página propositadamente em branco

1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo, é fornecida uma breve descrição e enquadramento do projeto, incluindo também a pertinência do tema. De seguida, é formulada a questão de investigação, o objetivo global do projeto e os objetivos específicos que se esperam alcançar ao longo do mesmo. Adicionalmente, é apresentada a empresa onde o projeto foi desenvolvido e, por último, a estrutura do trabalho.

1.1. Enquadramento e Pertinência

A automatização pode ser considerada uma tecnologia que consiste na realização de tarefas de forma automática, sem intervenção humana. Esta tecnologia está ligada a movimentos repetitivos e mecânicos, sem a possibilidade de correção. Por outro lado, um sistema de automação inteligente age como um operador humano, utilizando informações sensoriais para tomar e executar a ação mais adequada. A automação tem suscitado grandes expectativas de mudança no processo produtivo e tem tido um impacto significativo em vários setores da indústria, incluindo a área da logística. Esta tecnologia oferece ferramentas que permitem uma distribuição dinâmica de produtos e aumentam a competitividade das empresas, uma vez que estas são constantemente desafiadas a obter uma distribuição rápida e flexível para atender às exigências do mercado (Sell et al., 2013).

Deste modo, a implementação de sistemas logísticos eficientes é fundamental para as empresas, uma vez que pode ajudar a reduzir custos logísticos, que constituem uma parte significativa dos custos totais de um produto ou solução, bem como identificar problemas que possam afetar a rentabilidade da empresa e/ou o nível de serviço prestado aos clientes. A eficiência logística é, portanto, crucial para o sucesso de uma empresa e para a sua capacidade de atender às necessidades dos seus clientes de forma eficaz e eficiente (Sell et al., 2013).

O processo de desenvolvimento de um sistema de armazenamento automatizado é complexo, devido à elevada interdependência das variáveis envolvidas. Num mercado altamente competitivo de sistemas de armazenamento automatizados, é crucial conceber um sistema confiável e otimizado num curto espaço de tempo, apoiado em resultados concretos. Para além disso, apresentar diferentes configurações e soluções tecnológicas viáveis é fundamental para encontrar um equilíbrio entre a solução e o custo de investimento (J. C. V. Pereira, 2011). Deste modo, a maneira como os materiais são movimentados num armazém é um dos aspetos estratégicos para atender às necessidades do mercado (Sell et al., 2013).

Para encontrar a configuração ótima de um armazém automatizado, é necessário calcular o fluxo de materiais por unidade de tempo para diferentes configurações de armazenamento. A capacidade de manipulação de carga depende de vários parâmetros, incluindo as dimensões do armazém, as dinâmicas de um transelevador e taxa de ocupação, a estratégia de armazenamento, entre outros. Existem procedimentos de cálculo que ajudam a determinar a taxa de manipulação, porém, estes estão limitados a alguns tipos de configuração de armazenamento (J. C. V. Pereira, 2011).

A empresa acolhedora, *Körber Supply Chain PT* (KSC PT), é especializada em soluções digitais para fábricas inteligentes, que incluem projetos de automação de armazéns, fornecimento de equipamentos para integração em armazéns, *retrofits* ou *revampings*. Esta solução é personalizável

para cada cliente e inclui um vasto portfólio de equipamentos como transelevadores, RGV's (*Rail Guided Vehicles*), *Shuttle Cars*, AGV's (*Automatic Guided Vehicles*), mesas rotativas, mesas de transferência, transportadores de rolos e correntes, entre outros.

Na KSC PT, existem algumas ferramentas que auxiliam o cálculo de cadências em sistemas de armazenamento automáticos, aquando da idealização da solução para o cliente. No entanto, esta biblioteca de ferramentas apresenta algumas lacunas, na medida em que, atualmente, não existe uma ferramenta que permita o cálculo de cadências de unidades de carga em transportadores de paletes, sejam eles de rolos ou correntes. Esta situação leva a ineficiências como o elevado tempo no cálculo de cadências e a alocação excessiva ou insuficiente de equipamentos para uma determinada tarefa de transporte ou *buffer* de cargas, que, por sua vez pode levar a uma solução que não se encontra otimizada. Estas ineficiências, podem-se traduzir de múltiplas formas, como um aumento no tempo de entrega de propostas a clientes, a suborçamentação do projeto, ou, numa perspetiva contrária, a perda do cliente para a concorrência devido à sobreorçamentação, entre outros.

1.2. Questões e Objetivos de Investigação

A partir do enquadramento realizado, é possível identificar que o presente projeto, tem por objetivo dar resposta à questão: de que forma a compreensão e implementação de processos de cálculo de cadências em transportadores de paletes permite a melhoria dos processos de desenvolvimento, orçamentação e entrega de soluções?

Para abordar esta questão, o objetivo geral reside no desenvolvimento de uma ferramenta que permita calcular as cadências em transportadores de paletes, com os seguintes objetivos específicos:

- Redução do tempo do cálculo de cadências em transportadores de paletes;
- Automatização do cálculo de cadências em transportadores de paletes;
- Melhoria na compreensão da quantidade de equipamentos necessários durante o desenvolvimento de soluções;
- Redução de possíveis erros aquando do desenvolvimento e orçamentação de soluções;
- Melhoria na livreria de ferramentas de cálculo de cadências do portfólio de equipamentos presentes em armazéns automáticos, da empresa acolhedora.

1.3. Metodologia

A metodologia utilizada neste projeto foi o *Action Research*, uma vez que é a mais adequada devido ao ênfase colocado na componente prática - a ação. Assim, a pesquisa é aplicada e continuamente avaliada com base nos resultados obtidos num contexto real (Walter, 2009).

Em geral, o *Action Research* segue um ciclo de cinco fases identificáveis, baseadas na criação do ambiente de pesquisa (Figura 2): diagnóstico, planeamento da ação, execução da ação, avaliação e especificação da aprendizagem (Baskerville & Wood-Harper, 1996). Na metodologia *Action-Research*, não existe distanciamento entre investigadores e praticantes, que são uma parte integrante da pesquisa e não são tratados como dados (Robson, 2016).

Assim, para que uma pesquisa seja considerada de ação, são necessários três requisitos mínimos: o objeto da pesquisa é uma prática social e há um esforço para melhorá-la; o projeto segue uma sequência de planejamento, execução, observação e reflexão, de forma crítica e interrelacionada; e os responsáveis pela prática são envolvidos em todas as etapas da pesquisa, expandindo a participação a outros afetados pela prática e mantendo um controle colaborativo do processo (Masters, 1995).

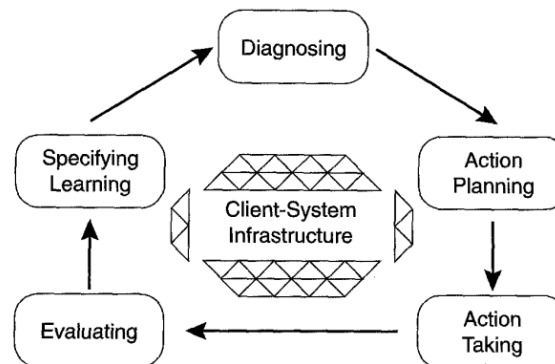


Figura 1. As cinco fases do Action Research (Baskerville & Wood-Harper, 1996)

1.4. Estrutura do Trabalho

O presente trabalho está estruturado em quatro capítulos principais, os quais se encontram subdivididos em subsecções mais pormenorizadas.

Dentro do capítulo introdutório, são tratados o enquadramento e a relevância desta dissertação de mestrado, bem como a problemática e os alvos de investigação que guiaram o desenvolvimento do estudo. Para além disso, é apresentada a metodologia selecionada para conduzir a pesquisa, juntamente com a estrutura global do relatório.

No segundo capítulo (“Revisão Bibliográfica”), são analisados de maneira abrangente temas pertinentes ao projeto em questão, com base em fontes documentais. São explorados conceitos como cadeia de abastecimento e logística, sistemas de armazenagem, sistemas automatizados de armazenamento, cadência em transportadores de paletes, e por último, são destacadas algumas considerações finais do autor. Esta revisão bibliográfica estabelece uma base teórica robusta para a compreensão do contexto do trabalho e dos principais princípios envolvidos.

No terceiro capítulo, é apresentado o estudo de caso no qual foi implementada a ferramenta de cálculo de cadências para transportadores de paletes proposta. Inicialmente, é feita uma contextualização do problema do cálculo de cadência de transportadores de paletes na empresa selecionada. De seguida, são fornecidos detalhes sobre o desenho da solução proposta, a implementação efetiva da ferramenta com um exemplo prático, a validação da ferramenta com um software de simulação e a avaliação dos resultados obtidos por meio dessa implementação.

No último capítulo, são oferecidas considerações finais derivadas desta dissertação de mestrado, resumindo as principais conclusões, contribuições e limitações do estudo. Para além disso, são sugeridas direções para futuras investigações e desenvolvimentos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, procede-se a uma análise da literatura sobre os conceitos fundamentais que são relevantes para o desenvolvimento deste projeto. Ao longo desta secção, são apresentados os fundamentos teóricos que ajudarão a compreender melhor o estudo realizado.

2.1. Cadeia de Abastecimento e Logística

A cadeia de abastecimento é o conjunto de atividades e processos necessários para obter, acrescentar valor, fornecer produtos e soluções aos consumidores de acordo com as suas expectativas e necessidades. Trata-se de um processo complexo que varia de acordo com as características do negócio, do produto e das estratégias das empresas para garantir que os produtos cheguem aos consumidores (Bertaglia, 2016).

Assim, as cadeias de abastecimento podem ser diretas, isto é, do fabricante ao utilizador final, ou possuir vários graus intermédios. A gestão da cadeia de abastecimento visa, principalmente, proporcionar o valor adequado ao cliente e a maior rentabilidade para os seus intervenientes através de uma gerência eficaz do fluxo de matérias-primas, dados e recursos financeiros (Junior & Corrêa, 2006).

De um modo geral, uma cadeia de abastecimento é composta por duas ou mais instituições, que se encontram interligadas por fluxos de matérias-primas, dados e recursos financeiros. Estas organizações podem ser empresas fabricantes de produtos, provedores de serviços logísticos e até mesmo o próprio cliente final (Stadtler, 2008).

Por outro lado, de um modo mais restrito, a cadeia de abastecimento também é aplicada a grandes empresas. Coordenar e gerir os fluxos de matéria-prima, informação e recursos financeiros para uma tal empresa de maneira eficiente é ainda uma tarefa desafiante (Stadtler, 2008).

Já a logística ou gestão logística, é uma parte da cadeia de abastecimento que se encarrega de planear, implementar e controlar o fluxo eficiente e eficaz de bens, serviços e informações entre o ponto de origem e o ponto de consumo, de forma a satisfazer as necessidades dos clientes. Segundo o *Council of Supply Chain Management Professionals* (CSCMP), a logística tem como objetivo fornecer o produto certo, para o cliente certo, na quantidade certa, nas condições certas, no lugar certo, no tempo certo e ao custo certo (Carvalho, 2013).

Deste modo, a diferenciação entre a Logística ou Gestão Logística e Gestão da Cadeia de Abastecimento é, na prática, inexistente. O que possivelmente as distingue é a abrangência de cada uma (A. P. Guedes et al., 2017).

Compreender a cadeia de abastecimento integrada pode ser uma fonte de vantagem competitiva para as empresas que entendem o seu papel estratégico. Para além disso, a gestão da cadeia de abastecimento envolve o entendimento dos impactos das atividades da empresa nos processos e na sociedade, além de ter em consideração as variáveis internas e externas que afetam a organização e os diferentes modelos de negócio estabelecidos (Bertaglia, 2016).

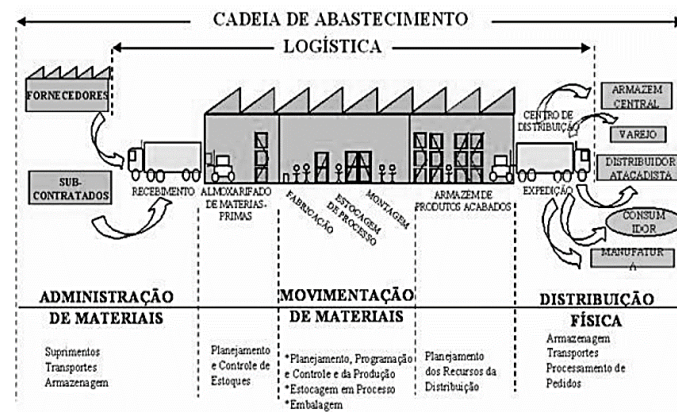


Figura 2. Cadeia de Abastecimento e Logística (F. M. Guedes, 2023)

2.2. Sistemas de Armazenagem

Atualmente, o ambiente empresarial é marcado por uma intensa concorrência global influenciada pela procura dos consumidores, que é altamente volátil devido às suas necessidades específicas. As empresas precisam de responder rapidamente às expectativas dos clientes, que cada vez mais, procuram produtos e soluções personalizadas com entregas rápidas e a preços acessíveis. Nesse contexto, armazéns, sistemas de transferência e sistemas de transporte, são componentes cruciais que auxiliam o processo circulação de bens entre os fabricantes e os consumidores (J. C. V. Pereira, 2011).

Assim, um sistema de armazenagem tem como objetivos reduzir despesas e maximizar as possibilidades de satisfazer completamente os clientes, não só no prazo estabelecido, como na quantidade total de encomendas (Machado & Sellitto, 2012).

As instalações de armazenamento são usadas para uma ampla gama de atividades industriais e comerciais, como o armazenamento de componentes, produtos ou mercadorias para consumo, centros de distribuição e lojas de todos os tipos. Estas instalações podem ter tamanhos que variam de pequenas lojas com alguns metros quadrados, até espaços com milhares de metros quadrados que processam milhares de paletes por dia (Barbosa, 2009). Deste modo, o armazenamento de produtos pode ser descrito de diversas formas, mas sempre com o objetivo comum de efetuar, de maneira adequada, a armazenagem, depois da carga ser processada, embalada e movimentada de forma correta (Rodrigues et al., 2011).

Assim, sistemas logísticos de alto desempenho podem expandir o acesso a novos mercados, à medida que o mercado global exige agilidade, qualidade e redução de custos nos serviços logísticos. O processo básico de um sistema de armazenamento e distribuição de materiais é bastante comum e simples: um produto é recebido e armazenado até que seja requisitado e, quando tal acontece, é transferido do local onde está armazenado para o local onde é necessário. Portanto, a sequência básica de um sistema de armazenamento é receber, armazenar, retirar e enviar (J. C. V. Pereira, 2011).

As atividades realizadas nas instalações devem visar alcançar determinados objetivos, os quais podem derivar dos seguintes aspetos: a capacidade de atender a um determinado fluxo, a capacidade de armazenar uma quantidade determinada de mercadorias, um nível definido de qualidade de serviço aos clientes, um custo mínimo por operação e um custo global mínimo de funcionamento (Barbosa, 2009).

Para atingir esses objetivos, é necessário haver métodos de armazenamento e manuseio adequados, equipamentos necessários, sistemas de controlo e planeamento de operações e, não menos importante, um ambiente seguro e adequado (Barbosa, 2009).

2.2.1. Funções Básicas de um Sistema de Armazenamento

Com o objetivo de melhorar a performance das cadeias de abastecimento, as empresas têm direcionado esforços e dedicado maior atenção a todos os aspetos que se relacionam com as mesmas, sendo, o armazenamento e manuseamento de cargas no armazém, destacado como uma área onde podem ser alcançadas melhorias significativas no seu desempenho (G. F. M. Pereira, 2015). Para além disso, se utilizada de forma adequada, a armazenagem pode ser uma importante vantagem competitiva (Melo & Oliveira, 2006).

De modo geral, as atividades de armazenamento não contribuem para um aumento no valor agregado do produto, podendo, no entanto, levar a um aumento dos custos de maneira significativa (Melo & Oliveira, 2006).

Posto isto, é possível identificar que um sistema de armazenamento pode ser dividido em duas operações principais: o armazenamento e o manuseamento de cargas (Ballou, 2006).

De facto, cada tipo de sistema de armazenagem, independentemente da sua natureza e modo de funcionamento, inclui funções básicas para o transporte e manipulação das unidades de carga (J. C. V. Pereira, 2011). Todos os sistemas de armazenamento possuem funções fundamentais que incluem a admissão de mercadorias, verificação, identificação dos produtos, movimentação e manipulação de cargas, armazenamento, seleção e preparação de encomendas, carregamento e expedição de mercadorias (Mecalux, 2022). Estas funções fundamentais descrevem ao mesmo tempo o fluxo de materiais num armazém (J. C. V. Pereira, 2011).

Assim, quando uma unidade de carga é recebida e identificada, é-lhe atribuída um destino, que pode ser o armazém, a zona de seleção, ou ser diretamente enviada para a zona de expedição (J. C. V. Pereira, 2011).

A descarga e a carga são a primeira e última etapas na sequência de eventos de manuseamento de materiais. Quando os produtos chegam a um armazém, é necessário descarregá-los do veículo de transporte. O processo de carga, apesar de inverso, é semelhante, porém, o carregamento inclui algumas atividades diferentes daquelas realizadas durante a descarga. Antes de os materiais serem carregados nos veículos de transporte, são geralmente realizadas verificações finais dos materiais a serem expedidos (Ballou, 2006).

A tarefa de transporte e manipulação de cargas pode ser realizada com vários tipos de equipamentos. Entre esses equipamentos estão presentes carrinhos manuais de carga, empilhadores e até mesmo sistemas completamente automatizados. Dentro do armazém, as atividades de movimentação e armazenamento são repetitivas e semelhantes às atividades de movimentação e armazenamento que ocorrem em diferentes níveis da cadeia de abastecimento (Ballou, 2006).

O armazenamento envolve a acumulação de produtos ao longo do tempo. Assim, são escolhidos diferentes locais no armazém e diferentes intervalos de tempo, dependendo do objetivo da armazenagem (Ballou, 2006).

Adicionalmente, as operações de armazenamento, dependendo do sistema escolhido, podem ser realizadas manualmente, com auxílio de um empilhador, ou completamente automáticas com um sistema de transportadores automáticos, como um transelevador (J. C. V. Pereira, 2011).

As zonas de seleção de encomendas, ou zonas de *picking*, refletem a composição de pequenas quantidades de produtos, associados às unidades de carga armazenadas. A recolha de artigos é controlada por encomendas e ordens, onde estão descritas as quantidades de artigos a serem recolhidos e a sequência com que devem ser recolhidos (J. C. V. Pereira, 2011). É usual, em sistemas automáticos de armazenagem, as zonas de *picking* estarem separadas da zona principal de armazenamento, se estas zonas estiverem de todo presentes no sistema.

Por último, o atendimento de pedidos, geralmente relacionado com zonas de seleção de encomendas, é frequentemente considerada a atividade de manipulação de materiais mais delicada, pois lidar com pedidos de pequeno volume exige muita mão-de-obra e representa um custo mais elevado em comparação com outras atividades de manuseamento de materiais (Ballou, 2006).

2.2.2. Tipos de Armazéns e Estruturas de Armazenamento

Apesar de existirem inúmeros tipos de armazéns e estruturas de armazenamento, este subcapítulo irá abordar algumas estruturas e armazéns num contexto de armazenagem manual ou automática de cargas em paletes, com auxílio a equipamentos como empilhadores, transportadores e transelevadores para o efeito de manuseamento, transporte e armazenagem de cargas.

Assim, os armazéns e estruturas de armazenamento podem ser classificados de acordo com as suas características técnicas. Essas características englobam a disposição e organização estrutural da carga a armazenar, o tipo de equipamento utilizado para o manuseamento e armazenagem da carga, como empilhadores e transelevadores e, por último, o sistema de transporte nas áreas de entrada e saída do armazém, normalmente composto por diversos equipamentos como transportadores de rolos, correntes, RGV's, entre outros (J. C. V. Pereira, 2011).

No contexto de armazenamento de cargas em paletes, é possível identificar diferentes estruturas de Porta-Paletes, sendo que estas são consideradas as mais comuns do mercado. São por norma pesadas e estáticas (Cunha, 2022):

- Porta-paletes convencional: É amplamente utilizado e escolhido quando as cargas das paletes são muito variadas. Embora requeira muito espaço para corredores, é compensado pela seleção e rapidez na operação (Paoleschi, 2014);
- Porta-paletes para corredores estreitos: Este tipo de porta-paletes permite otimizar o espaço útil de armazenamento através da redução dos corredores para movimentação (Paoleschi, 2014);
- Porta-paletes autoportante: Este tipo de porta-paletes não necessita de uma construção prévia. O tempo de construção é por norma menor e pode haver redução no valor do investimento, sendo que a estrutura de armazenamento é utilizada como suporte do próprio edifício do armazém (Paoleschi, 2014);
- Porta-paletes para transelevadores: Este tipo também otimiza o espaço útil. O corredor é ainda menor do que o convencional e, devido a alturas superiores às estruturas

convencionais, permite uma elevada densidade de carga com rapidez na movimentação. Além disso, possibilita o aproveitamento do espaço vertical, garante segurança na manipulação de paletes e permite automação do sistema (Paoleschi, 2014).

Assim, a escolha de um tipo de armazém e das suas características técnicas depende de vários parâmetros. Um fator determinante são as características do produto a ser armazenado e o tipo de suporte utilizado para padronizá-lo, como por exemplo o uso de paletes (J. C. V. Pereira, 2011).

Além das características do material a ser armazenado, é necessário ter em consideração diversos fatores como o tempo de permanência e de acesso a uma unidade de carga, aspetos geográficos, como restrições dimensionais, condições ecológicas, requisitos construtivos, entre outros (J. C. V. Pereira, 2011).

2.2.3. Dimensionamento de um Armazém

Gu et al., 2010 defendem que o dimensionamento de um armazém é um processo complexo que envolve uma série de decisões cruciais para garantir a sua eficiência e funcionamento adequado. Este processo abrange várias etapas, desde a definição da estrutura global do armazém até a seleção de equipamentos e estratégias operacionais apropriadas. A estrutura global, também conhecida como *design* conceitual, estabelece o padrão de fluxo de materiais dentro do armazém, define os departamentos funcionais e estabelece as relações de fluxo entre eles. Já as decisões de dimensionamento são responsáveis por determinar o tamanho e as dimensões do armazém, bem como a alocação de espaço entre os diferentes departamentos. Para além disso, o *layout* de cada departamento deve ser cuidadosamente planeado, considerando aspetos como a disposição dos corredores e o arranjo de blocos de paletes. A escolha dos equipamentos de armazenamento é outra componente crucial, pois define o nível de automação do armazém e os tipos de equipamentos necessários para atividades como armazenamento, transporte, recolha de pedidos e classificação. Por fim, a seleção da estratégia operacional determina como o armazém será operado em termos de armazenamento e recolha de pedidos, impactando outras decisões de *design*. Estas estratégias, que podem envolver escolhas como armazenamento aleatório ou dedicado, influenciam todo o funcionamento do armazém e devem ser consideradas desde a fase inicial de *design*.

Para Ashayeri & Gelders, 1985, no contexto do dimensionamento de um armazém, é fundamental considerar uma variedade de abordagens e considerações essenciais. Isto inclui a seleção do método de armazenamento mais apropriado para as necessidades específicas, como empilhamento em bloco, armazenamento em corredor profundo ou sistemas automatizados de armazenamento e recuperação. Este processo de *design* é orientado pelo equilíbrio entre diversos custos, incluindo construção, manutenção, inventário e mão-de-obra, garantindo uma abordagem holística. Portanto, a conceção e implementação de um armazém eficiente requerem uma compreensão profunda das considerações envolvidas em cada etapa do processo de dimensionamento.

Segundo Gu et al., 2005, o *design* global de um armazém, que abrange a estrutura, o dimensionamento e o *layout*, apresenta desafios complexos e interligados. Os *designers* muitas vezes recorrem a abordagens de resolução iterativa e com base em regras práticas para lidar com esta complexidade. Por outro lado, a literatura sobre o design de armazéns ainda é limitada, e há

espaço para investigações mais profundas que explorem abordagens de otimização mais sofisticadas e abrangentes.

Dentro da vasta literatura sobre o problema de design de armazéns, podem-se identificar duas abordagens básicas. A primeira lida com o *layout* do armazém e/ou seleção do tipo de armazém. A segunda abordagem examina as políticas operacionais de um sistema de armazém. Os procedimentos de solução para estes dois tipos de problemas podem geralmente ser agrupados em duas categorias: métodos exatos e métodos aproximados. Os métodos aproximados ou heurísticos são baseados em regras intuitivas. A maioria dos métodos aproximados apresenta uma limitação geral no sentido de não indicar quão distante a "melhor solução encontrada" pode estar da ótima. Isto significa que eles não fornecem um limite para a solução ótima, o que dificulta a avaliação da precisão das soluções aproximadas ou intuitivas (Ashayeri & Gelders, 1985).

Adicionalmente, a determinação do tamanho ideal de uma instalação de armazenamento também tem sido alvo de interesse por parte de diversos investigadores anteriores, resultando numa variedade de abordagens de modelação que estão amplamente dependentes das características da procura (Cormier & Gunn, 1996a). A capacidade estratégica de resolver questões relacionadas com a capacidade de armazenamento justifica a aplicação de modelos matemáticos avançados e de simulação para a respetiva análise. Entre as várias abordagens existentes, alguns modelos concentram-se na procura estacionária, procurando encontrar o tamanho ótimo único do armazém que satisfaça certos requisitos de serviço ou que minimize os custos. Outros métodos utilizam a simulação para avaliar métricas de desempenho, como custos totais, tendo em conta vários fatores, incluindo a capacidade de armazenamento (Cormier & Gunn, 1996b).

2.3. Sistemas Automáticos de Armazenamento

A principal finalidade dos sistemas automáticos de armazenamento é aumentar a eficiência e a produtividade em armazéns e centros de distribuição. Tal é alcançado através de equipamentos que automatizam o movimento de materiais e produtos dentro do armazém, como transelevadores, RGV's e transportadores, entre outros. Estes sistemas reduzem a dependência da mão-de-obra manual e aumentam a precisão e velocidade do transporte de cargas, o que resulta num aumento das cadências do armazém.

Assim, a armazenagem de materiais envolve uma ampla variedade de tipos de materiais a serem armazenados, cada um dos quais requer uma abordagem distinta. No entanto, o processo de armazenamento é geralmente conduzido de forma pouco eficiente, seja em termos de recursos humanos, de espaço utilizado ou de controlo. É especialmente nestes casos, que os sistemas automatizados podem proporcionar benefícios significativos e melhorar a eficiência do processo (Barreto, 2021).

Neste subcapítulo, será apresentado o sistema de gestão de armazéns (WMS), bem como alguns exemplos de equipamentos de sistemas de armazenamento automáticos, com ênfase nos equipamentos transportadores de paletes, que são o foco da presente dissertação.



Figura 3. Exemplo de um Sistema de Armazenamento Automático (Körber Supply Chain PT, 2022)

2.3.1. Sistemas de Gestão de Armazéns (WMS)

As Empresas e instalações de armazenamento têm encarado desafios cada vez mais complexos, tais como a integração e encurtamento das cadeias de abastecimento, a globalização das operações, a exigência crescente dos clientes e a rápida e crescente evolução tecnológica. Para superar esses desafios, as organizações têm vindo a procurar soluções inovadoras, sendo uma delas o sistema de gestão de armazéns (WMS - *Warehouse Management Systems*) (Ramaa et al., 2012).

O Sistema de Gestão de Armazéns (WMS) tem vindo a ganhar relevância desde a sua origem nos anos 70, devido, em parte, a uma constante evolução para a automatização de armazéns e ao subsequente desenvolvimento de tecnologia de gestão de cadeias de abastecimento (Min, 2006).

Assim, sistemas associados à gestão de Armazéns são considerados aplicações e programas informáticos que regulam todas as operações realizadas no armazém, incluindo o fluxo de materiais e a alocação de recursos (Salah et al., 2022). Destinam-se a empresas que precisam de efetuar operações de entrada e saída de mercadorias, garantindo uma utilização eficiente do espaço e sabendo precisamente onde cada produto está armazenado num determinado momento (Atieh et al., 2016).

Os objetivos fundamentais do sistema de gestão de armazém incluem (Min, 2006):

- A eliminação de falhas na execução de encomendas, através da identificação precisa do produto e monitoramento constante do ciclo;
- Redução das quantidades de stock e de manipulação de cargas, através de um fluxo constante de informação;
- Aumento da eficiência do trabalho, através da gestão e priorização das tarefas;
- Transmissão e recebimento de informações críticas acerca dos clientes/armazéns de forma eficiente;

- Otimização do espaço utilizado, através da seleção apropriada do local de armazenamento.

A fim de acompanhar de forma eficiente a movimentação de bens, utilizam-se tecnologias de identificação e captura automática de dados (AIDC), tais como leitores de códigos de barras, dispositivos móveis, redes locais sem fios (WLAN) e identificações por radiofrequência (RFID) (Salah et al., 2022).

De acordo com os sistemas de gestão de armazém, existem três tipos de aplicações de software distintas (Ramaa et al., 2012):

- WMS básico - Este sistema tem como principal objetivo controlar e registar informações referentes ao inventário e localização dos produtos. Também podem ser geradas instruções de armazenamento e de recolha. A informação de gestão de armazéns é simples e concentra-se principalmente no rendimento;
- WMS avançado – Para além das funções mencionadas no WMS básico, este sistema também é capaz de planear recursos e atividades para sincronizar o fluxo de mercadorias no armazém;
- WMS complexo - Com um WMS complexo, o armazém ou grupo de armazéns pode realmente ser otimizado. Existe informação disponível sobre cada produto relativo à sua localização, destino e a razão desse destino. É então possível efetuar o planeamento, execução e controlo de todas as cargas. Para além disso, um sistema complexo oferece funcionalidades adicionais como transporte, e planeamento logístico de valor acrescentado que ajudam a otimizar as operações.

A implementação de um sistema de gestão de armazéns deve começar com a definição de métricas para avaliar o desempenho do armazém e determinar o potencial retorno do investimento. É importante identificar as oportunidades de melhoria, para justificar e fundamentar a necessidade da implementação do mesmo (Ramaa et al., 2012).

É necessário, então, realizar a reengenharia dos processos e procedimentos do armazém para determinar quais os processos que podem ser automatizados. A modelização dos processos e fluxos de trabalho do negócio é uma ferramenta importante para entender o processo como um todo e planear a implementação do WMS de maneira adequada (Atieh et al., 2016).

Para garantir o funcionamento eficaz dos equipamentos no armazém, como um transelevador, é fundamental ter um sistema de gestão de armazéns. A integração deste sistema com os equipamentos permite manter a base de dados atualizada através de transmissões constantes de informação (Salah et al., 2022). Estes equipamentos irão ser abordados ainda neste capítulo, pelo se fez um enquadramento teórico dos mesmos com os sistemas de gestão de armazéns.

Conclui-se então que para operar e controlar de forma eficaz um armazém é crucial implementar uma abordagem de gestão de armazéns. Estes sistemas oferecem uma menor necessidade de esforço humano, maior eficiência e resultados mais precisos quando comparados com métodos de gestão manual, ajudando e permitindo uma redução nos custos através da otimização dos processos de armazenamento (Atieh et al., 2016).

2.3.2. Transelevadores

O principal objetivo dos sistemas de armazenamento convencionais e automatizados é aumentar a eficiência e produtividade das operações de armazenamento. Tal é medido através de vários indicadores, como a taxa de transferência de cargas, a capacidade de armazenamento do sistema, a facilidade de acesso aos produtos armazenados, a confiabilidade e a densidade de armazenamento. Estas características são importantes para justificar o investimento e os custos operacionais dos sistemas de armazenamento (Sell et al., 2013).

O armazenamento em alta densidade é um tipo de armazenamento onde os armazéns têm uma altura superior a 12 metros. Estes armazéns são designados de *High-bay Warehouses* (HBW). O equipamento mais utilizado neste tipo de armazenamento é o transelevador, uma vez que tem a capacidade de alcançar alturas e velocidades elevadas (J. C. V. Pereira, 2011).

O transelevador é um equipamento utilizado para elevação e transporte de cargas entre diferentes níveis. O seu principal objetivo é automatizar o armazenamento e a recolha de cargas em armazéns. Estes são capazes de realizar estas tarefas com precisão e rapidez, sem erros, enquanto proporcionam um controlo total das atividades do armazém. Isto garante que as operações de armazenamento e recolha sejam suaves, rápidas e seguras (Geraldès, 2019).

Estas máquinas são capazes de suportar uma vasta gama de cargas, tanto em termos de peso quanto de forma, podendo armazenar até 50 metros de altura, consoante a marca e o modelo do transelevador. Para além disso, estas máquinas podem ser adaptadas a condições de trabalho especiais, tais como humidade e temperaturas extremamente baixas (-25°C) (Geraldès, 2019).

Como esta máquina é modular, existem algumas características que podem ser configuradas para melhor se adaptar à indústria em que será utilizada. As mesmas incluem (Geraldès, 2019):

- Tipo de transelevador: monomastro ou bimastro;
- Configuração do sistema: dependendo do número de alas, pode ser necessário um ou vários transelevadores, sendo que um único transelevador em curva pode ser utilizado para abranger várias alas;
- Configuração de armazenamento: simples, dupla ou de profundidade múltipla;
- Altura máxima de operação;
- Capacidade de carga total;
- Tipo de unidades de carga movimentadas: paletes, contentores, caixas, caixas de cartão, etc.;
- Número de dispositivos de manipulação de carga;
- Condições de trabalho.

Para além disso, o desempenho de um transelevador depende muito das suas características dinâmicas, mas também da estratégia adotada. Em muitos casos, é desejável reduzir o tempo de ciclo combinado, em que cada ciclo de entrada é combinado com um ciclo de saída, sendo que o elemento limitador são as exigências do sistema (J. C. V. Pereira, 2011).

Por fim, o transelevador é geralmente instalado no meio da estante, ou seja, tem compartimentos em ambos os lados, e desloca-se sobre um carril instalado no chão. É suportado por uma guia no seu topo, geralmente do tipo H, que é parte integrante da estante e é geralmente fornecida com a mesma. Seja monomastro ou bimastro, o transelevador é composto por seis conjuntos principais, tal como demonstra a Figura 4 (Geraldès, 2019).

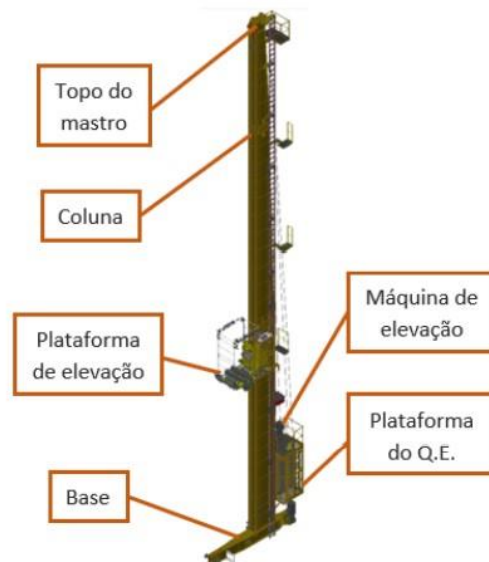


Figura 4. Conjuntos Principais de um Transelevador (Geraldès, 2019)

2.3.3. Transportadores de Paletes

Os meios de transporte, tal como todos os aparelhos de manuseamento de carga, não acrescentam valor aos elementos, produtos ou componentes que são movidos. São completamente processos de serviço e, como tal, têm uma influência indireta no preço final do produto enquanto parte dos custos fixos (McGuire, 2009).

Os transportadores são os equipamentos mais utilizados num armazém automático, permitindo o transporte de carga de um lugar para outro, de maneira rápida, eficiente e automatizada, com cadências consideráveis (Geraldès, 2019).

A seguir, está uma lista de alguns dos principais objetivos da implementação de transportadores (McGuire, 2009):

- Redução do manuseamento manual efetivo ao mínimo;
- Realização de todas as operações de manuseamento ao custo mais baixo possível;
- Eliminação de tantas operações manuais quanto possível;
- Alívio da carga de trabalho de todos os operários;
- Melhoria das considerações ergonômicas para cada operário;
- Melhoria do fluxo de trabalho entre operações;
- Fornecimento de opções de rotas para fluxo de trabalho inteligente;

- Aumento da capacidade de produção;
- Transporte de produto onde seria perigoso fazê-lo manualmente.

Na Tabela 1 encontramos alguns dos vários tipos de aparelhos transportadores de paletes, que normalmente se encontram presentes em armazéns automáticos, e uma explicação concisa do seu funcionamento. É importante mencionar que não estão representados todos os aparelhos existentes no mercado, dado que a diversidade de aparelhos é verdadeiramente vasta.

Tabela 1. Diferentes Equipamentos Transportadores de Paletes

Equipamento	Designação e Função
	<p>Transportador de Rolos: Máquinas equipados com rolos, motorização e estruturas metálicas, cujo principal objetivo é o transporte de carga em paletes.</p> <p>Este transporte é normalmente realizado num único sentido, normalmente em SSL (<i>Short Side Leading</i>) devido ao formato da parte inferior das paletes (Volta, 2020).</p>
	<p>Transportador de correntes: É um sistema de transporte que utiliza correntes e motorização montadas numa estrutura (longarinas) para movimentar cargas ou produtos (Geraldes, 2019). Este equipamento é utilizado para transportar paletes orientadas num único sentido, geralmente em LSL (<i>Long Side Leading</i>), devido à forma da parte inferior das paletes (Volta, 2020).</p>
	<p>AGV's (Automated Guided Vehicle): São sistemas de transporte automatizados que permitem a movimentação de cargas de forma autónoma, sem a necessidade de intervenção humana. São alimentados por baterias embarcadas e seguem rotas pré-definidas (Geraldes, 2019). Os AGVs são utilizados para aumentar a eficiência, reduzir custos de mão-de-obra e otimizar a área produtiva, transportando paletes entre áreas ou máquinas (Volta, 2020).</p>

	<p>RGV's (Rail Guided Vehicle): São uma solução automatizada de movimentação de cargas/produtos, que não necessitam de um operador humano. Eles são caracterizados pela alta velocidade e pela sua capacidade de seguir um caminho fixo e geralmente fechado, graças ao seu guiamento por um carril no chão. Esta é uma opção eficiente, econômica e rápida para ligar pontos distantes entre si (Geraldes, 2019).</p>
	<p>Mesas de Transferência: São aparelhos que consistem num transportador de rolos e correntes combinados e permitem a mudança de direção de uma paleta. Um dos transportadores fica estático enquanto o outro eleva ou baixa a carga (Geraldes, 2019). As mesas de transferência podem efetuar mudanças de direção de 90 graus, consoante a aplicação, podendo ser utilizadas mesas simples ou duplas. Algumas mesas de transferência também são equipadas com uma mesa rotativa que permite efetuar mudanças de direção de 90 graus entre transportadores de rolos ou correntes (Volta, 2020).</p>
	<p>Mesas Rotativas: São equipamentos que permitem a rotação de cargas/produtos em 360 graus, sem a necessidade de elevar a carga para mudar a direção (Geraldes, 2019). Existem mesas rotativas de rolos e mesas rotativas de correntes, que são capazes de efetuar mudanças de direção de 90 graus entre transportadores de rolos ou correntes, respetivamente (Volta, 2020).</p>
	<p>Carro de Transferência: É um equipamento que se move ao longo de um eixo no chão da fábrica e permite transportar paletes sem a necessidade de muitos transportadores fixos. Ele pode ter várias configurações dependendo do tipo de transportador que entrega e recebe as paletes (Volta, 2020).</p>
Equipamento (Cont.)	Designação e Função (Cont.)

Sublinha-se que o foco da presente dissertação será relativo a transportadores de rolos e transportadores de correntes motorizados, bem como mesas de transferência e mesas rotativas. Estes equipamentos irão beneficiar de uma ferramenta de cálculo de cadências, podendo nela estar presentes outros equipamentos previamente mencionados.

2.4. Cadência em Transportadores de Paletes

O conceito essencial de cadência em transportadores de paletes é medido através da métrica *throughput*, expressa em unidades de carga por hora (Williams & Gevaert, 1997). O *throughput* é definido como o volume de unidades processadas num determinado período de tempo e a sua estimativa precisa é essencial para o planeamento efetivo de reabastecimentos, níveis de inventário e recursos de mão-de-obra para atender às necessidades dos clientes (DeSutter & Gao, 2021).

Atualmente, cada vez mais, os engenheiros de processo encontram-se interessados em analisar o impacto que o número de paletes no sistema tem no *throughput*, uma vez que o dimensionamento adequado pode melhorar os tempos de ciclo, reduzir o tempo e o custo de configuração e aumentar a agilidade perante as mudanças na procura (Williams & Gevaert, 1997).

De facto, o desenho e seleção, de um sistema de armazenamento em armazéns são influenciados pela capacidade de armazenamento necessária e o *throughput* desejado. A configuração do sistema, como a altura e o comprimento de uma estante num sistema automatizado de armazenamento e recuperação AS/RS (*Automated Storage/Retrieval System*), também tem impacto no *throughput* do sistema (Zaerpour et al., 2019).

Como tal, é crucial considerar tanto o *throughput* bruto (alcançado sem variações aleatórias ou paragens de equipamento) como o *throughput* líquido (efetivamente alcançado na prática, reduzido pelas variações e paragens) para definir a "eficiência geral do sistema" como a razão entre o *throughput* líquido e o bruto (Williams & Gevaert, 1997).

2.4.1. Ferramentas Existentes de Cálculo de Cadências

No contexto do cálculo de cadências, existem ferramentas inovadoras que desempenham um papel crucial. Assim, serão exploradas, de seguida, duas abordagens fulcrais: *Softwares* de Simulação de Sistemas e a aplicação de *Machine Learning*.

2.4.1.1. *Software* de Simulação de Sistemas

A simulação desempenha um papel indispensável enquanto ferramenta analítica na avaliação, análise e otimização da cadência de paletes numa ampla gama de sistemas. A sua aplicação vai para além de uma mera avaliação, tornando-se num meio poderoso para compreender e aprimorar a capacidade de sistemas atingirem metas específicas de cadência de paletes (Williams & Gevaert, 1997). Estas metas abrangem várias dimensões, que englobam não apenas referências quantitativas como volume e qualidade, mas também considerações intrínsecas relacionadas a complexidades operacionais e restrições de custo (Williams & Khoubyari, 1996).

Deste modo, no contexto da avaliação do desempenho da cadência de paletes, a simulação emerge como uma abordagem valiosa e versátil. Ao contrário de modelos analíticos tradicionais, a simulação oferece uma perspetiva mais abrangente e pragmática que considera as complexidades da variabilidade e dinâmica do mundo real (Lerher et al., 2017). Esta distinção é elucidada por Ning et al., 2016, que sublinha a importância dos modelos de simulação estocástica em relação a

métodos analíticos determinísticos, devido à sua capacidade para capturar a complexidade inerente das situações do mundo real.

Na procura pela melhoria, investigadores como Ekren & Heragu, 2010 aprofundaram os seus estudos em avaliações orientadas por simulação. Ao utilizar análises de regressão baseadas em simulação e recorrendo a ferramentas como o *software* ARENA, os autores construíram e examinaram uma multiplicidade de modelos de simulação adaptados a diferentes cenários de *design*. Estes cenários abrangem considerações relacionadas ao movimento de paletes, à disposição do sistema e outros fatores críticos que afetam a cadência.

Marchet et al., 2013 explora os fundamentais *trade-offs* de design que afetam a cadência de paletes. O seu estudo gira em torno da formulação de um quadro abrangente de *design* que equilibra harmoniosamente a relação entre eficácia de custos e desempenho do sistema, alinhando-se a *layouts* pré-estabelecidos. Esta abordagem reconhece que a otimização do débito de paletes exige uma compreensão holística de como vários componentes interagem dentro do sistema mais amplo.

Para além disso, o avanço do cálculo de cadência de paletes não se limita apenas a modelos, também envolve estratégias operacionais. (Zou et al., 2016) defende a implementação de estratégias de processamento paralelo, onde as transações de paletes são tratadas simultaneamente por elevadores e veículos. Através de uma interação de modelos de simulação e métodos analíticos, eles apresentam um caso convincente quanto à precisão e eficácia da sua abordagem na estimativa do desempenho da cadência de paletes, sublinhando a importância prática de tais estratégias nos sistemas do mundo real.

Em cenários mais complexos com múltiplos equipamentos, o trabalho de Ning et al., 2016 assume proeminência. O seu modelo de simulação visa otimizar as configurações de prateleira em sistemas de múltiplos elevadores, com um foco aguçado na melhoria da cadência de paletes. Ao experimentar diversas taxas de recuperação e explorar uma infinidade de alternativas de prateleiras de armazenamento, os autores identificam soluções de *design* que têm o potencial de maximizar a cadência de paletes, enquanto minimizam o tempo de ciclo.

2.4.1.2. Machine Learning

O *Machine Learning* – ML revoluciona o cálculo da cadência de paletes utilizando dados de várias fontes para obter percepções e tomar decisões autónomas. Sem programação explícita, o ML aprende e adapta-se continuamente, identificando padrões e otimizando a cadência de paletes em diversos cenários operacionais (Shukla, 2014). O ML divide-se em aprendizagem supervisionada e não supervisionada. Na primeira, são utilizadas observações rotuladas e respetivos resultados, enquanto na aprendizagem não supervisionada lida-se com classificações sem resultados (Shmueli et al., 2017).

Raca et al., 2020 realça o potencial do ML na previsão da cadência de paletes, especialmente quando as equações matemáticas são insuficientes, mas existem dados amostrais disponíveis. Um sistema de previsão de cadência inclui o Coletor, o Treinador e o Preditivo. O Coletor recolhe os dados, o Treinador constrói o modelo de previsão com dados de treino e o Preditivo fornece estimativas de cadência.

A aplicação prática do ML é evidente em várias situações. Em fluxos logísticos complexos, o ML com aprendizagem supervisionada destaca-se como uma ferramenta poderosa para lidar com a complexidade da cadeia de abastecimento. A integração do ML com um Sistema de Gestão de Armazém é também relevante. As técnicas de ML agilizam a formulação de políticas de reposição, otimizando o uso do espaço, reduzindo custos operacionais e aumentando a capacidade de armazenamento (Makkar et al., 2020).

O papel incontestável do *Machine Learning* na revolução do cálculo da cadência de paletes reside na sua capacidade para explorar dados complexos e tomar decisões autónomas com base em percepções de múltiplas fontes. À medida que esta área evolui, o seu potencial para aprimorar a otimização da cadência de paletes tem o poder de redefinir a eficiência operacional em diversas indústrias (DeSutter & Gao, 2021).

2.5. Considerações Finais

Efetivamente, a cadeia de abastecimento e a logística desempenham um papel fulcral no fornecimento de produtos aos consumidores, de acordo com as suas necessidades e expectativas.

Os sistemas de armazenagem identificam-se como componente chave na circulação de produtos e bens entre fabricantes e consumidores, uma vez que incluem funções como a receção de mercadorias, armazenamento, seleção de encomendas e expedição de mercadorias, entre outras.

Deste modo, existem diferentes tipos de armazéns e estruturas de armazenamento, incluindo armazéns convencionais e automatizados. De facto, os sistemas de armazenamento automáticos demonstram-se como uma forte vantagem competitiva para as empresas, especialmente quando se encontram integrados com um sistema de gestão de armazéns (WMS), nos quais estão geralmente incluídos equipamentos como transelevadores, transportadores de paletes e veículos de transporte automatizados. Assim, independentemente da indústria e estrutura de armazenamento presente, uma empresa necessita de dar importância e de considerar variáveis internas e externas e diferentes modelos de negócio na gestão da cadeia de abastecimento.

Adicionalmente, o dimensionamento de um armazém revelou-se um processo complexo, abrangendo desde a definição da estrutura global até a seleção de equipamentos e estratégias operacionais. A abordagem conceitual na definição do fluxo de materiais, o dimensionamento adequado, o *layout* dos departamentos e a seleção de equipamentos demonstraram ser elementos cruciais para garantir a eficiência e funcionamento adequado dessas instalações.

A avaliação da cadência de paletes emerge como uma preocupação essencial na procura pela eficiência operacional. A simulação de sistemas destaca-se como uma abordagem valiosa para a compreensão e melhoria da capacidade dos sistemas de atingirem metas específicas de cadência. Através de modelos dinâmicos e estocásticos, é possível considerar a complexidade e variabilidade inerentes às operações de armazenamento.

A revolução proporcionada pelo *Machine Learning* adiciona uma camada de sofisticação na análise da cadência de paletes. A capacidade do ML de aprender padrões a partir de dados e tomar decisões autónomas é inegavelmente poderosa. Com aplicações que variam desde a previsão de cadência até a otimização de políticas de reposição e uso de espaço, o ML redefine a maneira como os sistemas de armazenamento são geridos.

3. CASO DE ESTUDO

3.1. Apresentação da Empresa

A Körber Supply Chain é uma empresa com mais de quatro décadas de experiência, que se encontra integrada no grupo alemão Körber AG, contando com mais de 10.000 colaboradores espalhados pelo mundo. A empresa destaca-se como referência global em logística automatizada, sendo o principal foco na área de armazenamento automatizado, centros de distribuição e eficiente gestão de cadeias de abastecimento.

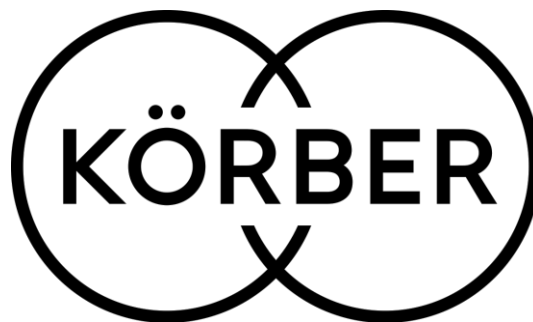


Figura 5. Logótipo Körber Supply Chain

A empresa atende a clientes em expansão que procuram soluções para aprimorar e automatizar os seus processos de armazenamento e as suas cadeias de abastecimento, seja em novos armazéns logísticos ou em instalações já existentes. Cada cliente apresenta requisitos únicos, e, portanto, a empresa desenvolve soluções personalizadas e completas para cada projeto.

A organização disponibiliza uma ampla variedade de produtos, como transelevadores, transportadores, RGV's, carros de transferência, AGV's, entre outros. Para além disso, como empresa de fornecimento de produto e como empresa integradora, a *Körber Supply Chain*, conta com parceiros internos e externos ao grupo no fornecimento de produtos customizados de modo a oferecer projetos altamente personalizados, adaptados às particularidades de cada cliente. O seu destaque no setor deve-se ao foco na integração de sistemas e ao contínuo desenvolvimento de soluções inovadoras.

3.2. Enquadramento do Problema no Cálculo de Cadências em Transportadores de Paletes na Empresa

Na KSC PT, mais precisamente, dentro do departamento de *Sales* e *Solution Design*, surge a necessidade premente de dimensionar armazéns personalizados que satisfaçam integralmente as especificações e requisitos dos clientes.

Neste processo de conceção de soluções para clientes específicos, são empregues diversas ferramentas que não apenas auxiliam na idealização e validação das soluções propostas, mas também no processo de elaboração de orçamentos. Um dos aspetos mais relevantes nesse dimensionamento consiste na capacidade máxima de paletes por hora que os transportadores incorporados na solução podem alcançar, o que é denominado como cadência.

No entanto, a empresa atualmente não dispõe de uma ferramenta que facilite o cálculo das cadências em transportadores de paletes. Atualmente, esse processo é calculado de forma simples e robusta, mas sem uma fundamentação matemática sólida. Deste modo, a capacidade do sistema de corresponder às cadências dos demais produtos incluídos na solução é estimada apenas por meio de uma aproximação grosseira, baseada em projetos anteriores e na experiência dos colaboradores mais experientes.

Esta abordagem aproximada acarreta, essencialmente, ineficiências, como o tempo elevado despendido no cálculo de cadências e a alocação excessiva ou insuficiente de equipamentos para tarefas específicas de transporte ou armazenamento de cargas, resultando em soluções que não estão devidamente otimizadas. Essas ineficiências podem manifestar-se de diversas formas, como um aumento no tempo de resposta nas propostas enviadas aos clientes, suborçamentação do projeto ou, inversamente, perda do cliente para a concorrência devido a uma sobre orçamentação, entre outros cenários possíveis.

3.3. Desenho da Solução

Com o intuito de resolver os desafios e ineficiências mencionadas anteriormente, é imprescindível que a KSC PT invista na criação e implementação de uma ferramenta avançada para o cálculo preciso das cadências em transportadores de paletes. Essa ferramenta deve basear-se em algoritmos e modelos matemáticos, que permitam simular e analisar com precisão o desempenho dos transportadores em diferentes cenários operacionais.

Ao adotar uma abordagem matemática fundamentada, a empresa poderá obter resultados mais confiáveis e precisos no dimensionamento dos armazéns personalizados, garantindo que os transportadores integrados na solução possuam uma cadências adequada para igualar ou ultrapassar a capacidade dos restantes produtos envolvidos. Isto possibilitará um uso mais eficiente dos recursos da empresa, evitando desperdícios e promovendo a otimização dos processos logísticos.

Para além disso, a ferramenta de cálculo de cadências permitirá que a equipa de *Sales e Solution Design* da KSC PT apresente propostas mais competitivas aos clientes, com prazos de entrega mais precisos e orçamentos mais afinados. Desta forma, a empresa estará mais bem posicionada para conquistar novos clientes e aumentar sua participação no mercado.

Outra vantagem significativa desta ferramenta será a capacidade de realizar simulações e análises "*what-if*", possibilitando que a equipa teste diferentes configurações de transporte e armazenamento, antecipando potenciais gargalos e identificando oportunidades de melhoria antes da implementação real da solução. Isto contribuirá para a criação de soluções altamente personalizadas, atendendo às necessidades específicas de cada cliente de forma eficiente e precisa.

A implementação de uma ferramenta deste tipo também favorecerá a padronização dos processos internos da empresa, assegurando que todas as propostas e soluções oferecidas aos clientes sejam fundamentadas por uma abordagem consistente e baseada em dados sólidos.

Para garantir o sucesso desta proposta de melhoria, a KSC PT deve investir na formação da equipa, capacitando todos os colaboradores para utilizar plenamente a nova ferramenta e compreender os princípios matemáticos subjacentes. Como tal, é importante que a empresa promova uma cultura

de inovação e melhoria contínua, encorajando a procura de soluções mais eficientes e aprimoradas constantemente.

3.3.1. Modelo de Suporte à Ferramenta – VDI 3978

A ferramenta proposta a resolver o problema mencionado deve estar em conformidade com a norma VDI 3978 - "*Throughput and calculation of cycle time of piece good conveyor systems*", uma vez que é a única norma que a empresa acolhedora toma como referência para estes tópicos e, como tal, adquiriu financeiramente para este propósito, no contexto da presente dissertação de mestrado.

Assim, a norma VDI 3978 fornece *guidelines* para o cálculo e determinação das cadências e dos tempos de ciclo em sistemas de transportadores. O objetivo é descrever o processo de forma especializada e compreensível, utilizando termos definidos, esperando estabelecer assim uma base comum para este cálculo. A norma é aplicável a diversas situações práticas e também serve como um enquadramento teórico fundamental para a compreensão dos processos e a verificação dos resultados obtidos através de simulações (Verein Deutscher Ingenieure, 2018).

Esta norma é complementar a outras normas, como a VDI 3649, VDI 3581 e VDI 4486, que tratam de disponibilidade e regras de aceitação, formando um conjunto de regras e padrões que podem ser utilizados tanto para o planeamento e aceitação como para a verificação de sistemas existentes (Verein Deutscher Ingenieure, 2018).

O método de cálculo proposto na VDI 3978 consiste em vários passos. No primeiro passo, são selecionados os elementos do sistema, determinando a cadência necessária para o fluxo de materiais em cada elemento. Para elementos que trabalham continuamente, a cadência limite é calculada com base na distância mínima entre peças transportadas e a velocidade de transporte. Para elementos que operam de forma descontínua, a cadência limite é o inverso do ciclo de tempo mais curto (Verein Deutscher Ingenieure, 2018).

O segundo passo consiste em verificar as transições entre os elementos, garantindo que não ocorram colisões nas rotas de transporte contínuo e que haja espaço suficiente no fluxo principal para permitir a entrada e saída de peças em operações de *Infeed* e *Outfeed* (Verein Deutscher Ingenieure, 2018).

O terceiro passo envolve o cálculo do sistema completo, considerando uma cadência maior do que o necessário para evitar tempos de espera e filas. Quando não é possível alcançar essa situação ideal, podem ser utilizados *buffers* para compensar picos de procura e ciclos curtos não económicos (Verein Deutscher Ingenieure, 2018).

A aplicação prática desta norma, ocorre no planeamento de sistemas de transportadores, tornando o fluxo de materiais transparente e especificando as condições e requisitos do sistema. São reunidos os dados básicos, como as cadências dos elementos, os ciclos de transporte e os tempos de trabalho. A configuração do sistema é feita através de diagramas esquemáticos, e a norma detalha como realizar os cálculos de acordo com as especificações e os resultados esperados (Verein Deutscher Ingenieure, 2018). Em situações complexas, é possível realizar medições em sistemas reais ou em situações de controlo de modo a obter os dados necessários para o cálculo. Para além disso, a norma também faz referência a outras normas relevantes que tratam de outros equipamentos específicos (Verein Deutscher Ingenieure, 2018).

3.3.1.1. Cálculos Matemáticos de Suporte à Elaboração da Ferramenta

No decurso do processo de desenvolvimento da ferramenta, foi imperativo efetuar múltiplas deduções matemáticas, a fim de ajustar a teoria e aplicabilidade da norma VDI 3978, juntamente com os seus exemplos, à utilização teórico-prática na empresa, em diversos equipamentos de transporte de paletes. Assim, tal como previamente mencionado, a ferramenta abrangerá transportadores de rolos, transportadores de correntes, mesas de transferência e mesas rotativas, estes constituindo os principais componentes destes sistemas. Adicionalmente, será essencial realizar uma avaliação abrangente para cada caso de movimento que esses transportadores possam executar em variados contextos, com o intuito de obter resultados o mais verídicos possível. Com exceção de determinados movimentos específicos para mesas de transferência e mesas rotativas, os movimentos em questão foram definidos da seguinte forma:

- Tipo 1: Movimento Completo (Aceleração, v =Constante, Desaceleração)
 - Este ciclo de movimento inicia-se com o transportador numa situação de repouso. De seguida, este acelera, de modo a movimentar $a(s)$ palete(s), até atingir um patamar de velocidade constante. Posteriormente, o transportador começa a desacelerar até retornar ao estado de repouso após a paleta ter saído do transportador, concluindo assim o ciclo deste tipo de movimento.
- Tipo 2: Movimento Acelerado (Aceleração, v = Constante)
 - Este movimento, à semelhança do movimento tipo 1, começa com o transportador numa situação de repouso. À medida que a paleta é movida, o transportador acelera até alcançar uma velocidade constante, permanecendo neste patamar à medida que novas paletes são introduzidas no transportador.
- Tipo 3: Movimento Desacelerado (v =Constante, Desaceleração)
 - Neste movimento, o transportador já se encontra em movimento num patamar de velocidade constante. Após a paleta em questão sair do transportador, o mesmo irá desacelerar até parar, chegando a uma situação de repouso, encerrando assim o seu tempo de ciclo.
- Tipo 4: Movimento Uniforme (v =Constante)
 - Neste movimento, o transportador já se encontra em movimento e num patamar de velocidade constante no início do seu ciclo e assim permanecerá, à medida que mais paletes são introduzidas neste transportador.

Cada um destes movimentos pode ser simplificado ou tornado mais complexo dependendo do subsistema onde o transportador se encontra inserido e da sua finalidade. É importante destacar que um transportador pode adotar qualquer um destes movimentos, em diferentes fases do processo. Para os transportadores que executam múltiplos tipos de movimento, opta-se pelo que terá um tempo de ciclo mais longo, o que resulta em uma menor cadência, de modo a aproximar a simulação que a ferramenta fornece à situação limite e torná-la o mais realista possível.

Deste modo, as seguintes equações foram deduzidas, com os seus resultados correspondendo ao tempo de ciclo de cada equipamento, o que viabiliza o cálculo da cadência. É relevante destacar que existirão outros fatores, relacionados com a utilização dos equipamentos, que exercerão

influência sobre o tempo de ciclo. Portanto, no final, estes intervalos de tempo adicionalmente necessitarão de ser considerados.

1. Transportador de Rolos e Correntes Tipo 1: Movimento Completo (Aceleração, v =Constante, Desaceleração)

Equações da cinemática (Equações 1 e 2):

$$x = x_0 + v_0 t + \frac{1}{2} a t^2 \quad (1)$$

$$v = v_0 + a t \quad (2)$$

Gráfico Velocidade-Tempo Tipo 1 - Movimento Completo:

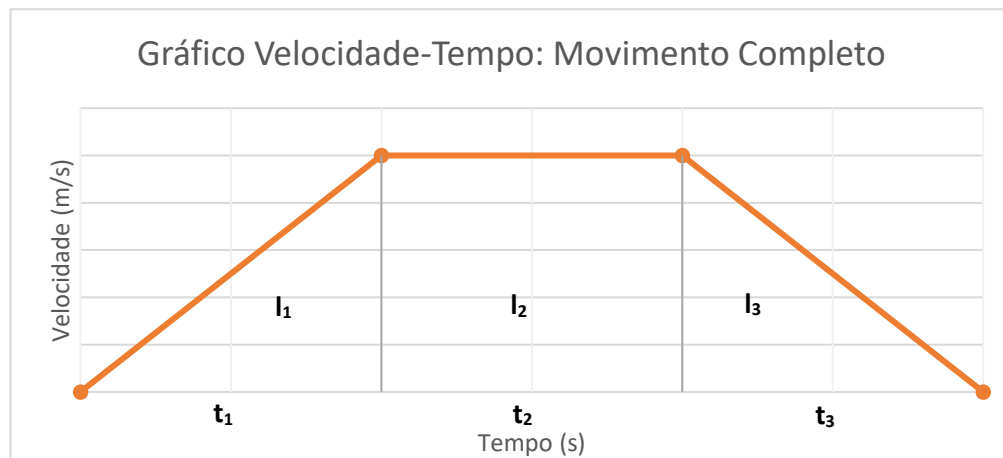


Figura 6. Gráfico Velocidade-Tempo: Tipo 1- Movimento Completo

Da Figura 6 e, utilizando as equações da cinemática/movimento, retiram-se os seguintes dados, presentes nas Equações 3, 4 e 5, para os intervalos de tempo t_1 , t_2 e t_3 .

$$t_1 \rightarrow v = at \quad (v_0 = 0) \quad (3)$$

$$t_2 \rightarrow v = v_f \quad (a = 0) \quad (4)$$

$$t_3 \rightarrow v = v_f - at \quad (5)$$

Assim, é possível obter as distâncias percorridas por uma paleta em cada fração de tempo, através da integral da velocidade em relação ao tempo (Equação 6, 7 e 8).

$$\int_0^{t_1} at \, dt = \frac{1}{2}at_1^2 \rightarrow l_1 = \frac{1}{2}at_1^2 \quad (6)$$

$$\int_0^{t_2} v_f \, dt = v_f t_2 \rightarrow l_2 = v_f t_2 \quad (7)$$

$$\int_0^{t_3} v_f - at \, dt = v_f t_1 - \frac{1}{2}at_1^2 \rightarrow l_3 = l_1 = v_f t_1 - \frac{1}{2}at_1^2 \quad (8)$$

Deste modo, a soma destas três distâncias resultará na distância total, l , que de acordo com o movimento realizado pela paleta se arredonda ao tamanho do transportador. Em conformidade com a norma, assume-se que t_1 será igual a t_3 e, conseqüentemente, l_1 será igual a l_3 .

Assim, presente na Equação 9, para t_1 , Equação 10, para t_2 e Equação 11, para t :

$$\begin{aligned} l_1 &= l_3 \\ \Leftrightarrow \frac{1}{2}at_1^2 &= v_f t_1 - \frac{1}{2}at_1^2 \\ \Leftrightarrow at_1^2 &= v_f t_1 \\ \Leftrightarrow t_1 &= \frac{v_f}{a} \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} t &= t_1 + t_2 + t_3 \\ \Leftrightarrow t &= 2t_1 + t_2 \\ \Leftrightarrow t_2 &= t - 2\frac{v_f}{a} \end{aligned} \quad \begin{array}{l} \curvearrowright \\ \curvearrowright \end{array} \quad t_1 = t_3 \quad (10)$$

$$\begin{aligned} l &= l_1 + l_2 + l_3 \\ \Leftrightarrow l &= 2l_1 + l_2 \\ \Leftrightarrow l &= 2 \times \frac{1}{2}at_1^2 + v_f t_2 \\ \Leftrightarrow l &= a \times \left(\frac{v_f}{a}\right)^2 + v_f t_2 \\ \Leftrightarrow l &= \frac{v_f^2}{a} + v_f t_2 \\ \Leftrightarrow l &= \frac{v_f^2}{a} + v_f \left(t - 2\frac{v_f}{a}\right) \\ \Leftrightarrow l &= \frac{v_f^2}{a} + v_f t - 2\frac{v_f^2}{a} \\ \Leftrightarrow l &= -\frac{v_f^2}{a} + v_f t \end{aligned} \quad \begin{array}{l} \curvearrowright \\ \curvearrowright \\ \curvearrowright \end{array} \quad \begin{array}{l} l_1 = l_3 \\ l_1 = \frac{1}{2}at_1^2 \text{ e } l_2 = v_f t_2 \\ t_2 = t - 2\frac{v_f}{a} \end{array}$$

$$\Leftrightarrow t = \frac{l}{v_f} + \frac{v_f}{a} \quad (11)$$

Após esta dedução, obtém-se a equação do tempo de ciclo, de acordo com a norma.

No entanto, é necessário que a ferramenta tenha uma verificação de que a distância percorrida na aceleração, l_1 , e na desaceleração, l_3 , ou em ambas, é inferior ao comprimento total do transportador, l , uma vez que, se isto não se verificar, significa que o transportador, para as suas condições de comprimento, velocidade e aceleração, não consegue atingir o patamar de velocidade constante. Para este caso, é possível deduzir a Equação 12 e Equação 13:

Se $l_1 > l$, apenas acelerou:

$$l_1 \geq l \rightarrow t = t_1 = \frac{v_f}{a} \quad (12)$$

Se $l_1 + l_3 > l$, apenas acelerou e desacelerou:

$$l_1 + l_3 \geq l \rightarrow t = 2 \frac{v_f}{a} \quad l_1 = l_3 \quad (13)$$

Caso contrário, a equação que irá calcular o tempo de ciclo será a obtida em cima, na equação 11.

2. Transportador de Rolos e Correntes Tipo 2: Movimento Acelerado (Aceleração, v =Constante)

Equações da cinemática (Equações 14 e 15):

$$x = x_0 + v_0 t + \frac{1}{2} a t^2 \quad (14)$$

$$v = v_0 + a t \quad (15)$$

Gráfico Velocidade-Tempo Tipo 2 - Movimento Acelerado:

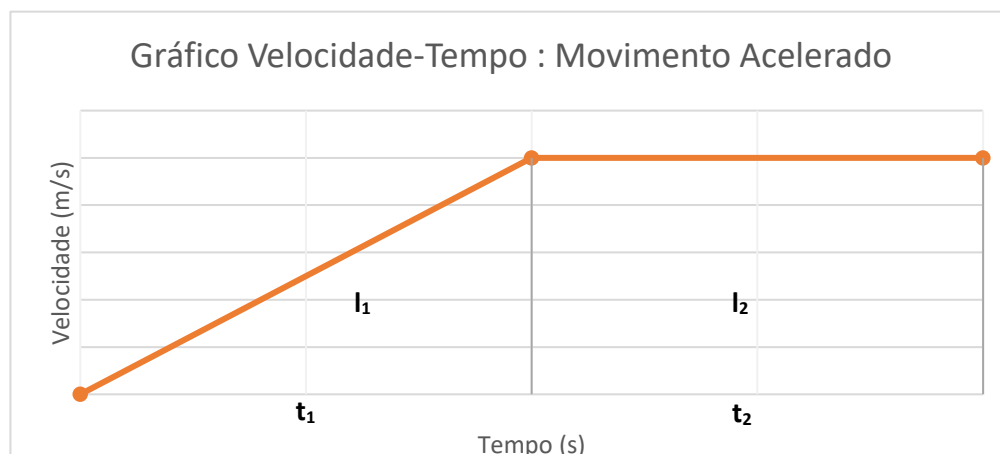


Figura 7. Gráfico Velocidade-Tempo: Tipo 2 - Movimento Acelerado

Para o gráfico representado em cima, e à semelhança do gráfico de movimento Tipo 1: Movimento Completo, utilizando as equações da cinemática, obteve-se os seguintes resultados para os intervalos de tempo t_1 e t_2 (Equação 16 e 17).

$$t_1 \rightarrow v = at \quad (v_0 = 0) \quad (16)$$

$$t_2 \rightarrow v = v_f \quad (a = 0) \quad (17)$$

Do mesmo modo, será possível obter as distâncias percorridas em cada fração de tempo através da integral da velocidade em relação ao tempo. Uma vez que as equações obtidas em cima são iguais às Equações 3 e 4, do movimento Tipo 1: Movimento Completo, é de esperar uma semelhança no que toca ao cálculo das distâncias percorridas (Equação 18 e 19). Assim, obtém-se:

$$l_1 = \frac{1}{2} at_1^2 \quad (18)$$

$$l_2 = v_f t_2 \quad (19)$$

Apesar da Integral da velocidade em relação ao tempo ser capaz de fornecer a distância percorrida, é também possível obter essa mesma distância através da área representada no gráfico velocidade-tempo, conforme se pode observar na Equação 20. Deste modo:

$$\begin{aligned} \text{Área do Triângulo} \rightarrow l_1 &= \frac{b \times h}{2} \\ \Leftrightarrow l_1 &= \frac{t_1 \times v_f}{2} \\ \Leftrightarrow t_1 v_f &= 2l_1 \\ \Leftrightarrow v_f t_1 &= 2 \times \frac{1}{2} at_1^2 \\ \Leftrightarrow t_1 &= \frac{v_f}{a} \end{aligned} \quad \left. \begin{array}{l} \\ \\ \\ \end{array} \right\} l_1 = \frac{1}{2} at_1^2 \quad (20)$$

À semelhança do sucedido na Equação 9, presente no Movimento Tipo 1, onde se igualou l_1 a l_2 , obteve-se a mesma equação para t_1 .

É também possível, através de uma análise do gráfico, fazer a dedução da Equação 21:

$$\begin{aligned} t &= t_1 + t_2 \\ \Leftrightarrow t_2 &= t - t_1 \end{aligned} \quad (21)$$

Deste modo, torna-se então possível deduzir a fórmula que conseguirá calcular o tempo de ciclo do transportador, para este tipo de movimento (Equação 22).

$$\begin{aligned}
 l &= l_1 + l_2 && \left. \begin{aligned} l_1 &= \frac{1}{2}at_1^2 \text{ e } l_2 = v_f t_2 \\ t_2 &= t - t_1 \end{aligned} \right\} \\
 \Leftrightarrow l &= \frac{1}{2}at_1^2 + v_f t_2 \\
 \Leftrightarrow l &= \frac{1}{2}at_1^2 + v_f(t - t_1) \\
 \Leftrightarrow v_f t &= l - \frac{at_1^2}{2} + v_f t_1 && \left. \begin{aligned} t_1 &= \frac{v_f}{a} \end{aligned} \right\} \\
 \Leftrightarrow v_f t &= l - \frac{1}{2} \times a \times \left(\frac{v_f}{a}\right)^2 + v_f \frac{v_f}{a} \\
 \Leftrightarrow t &= \frac{l}{v_f} + \frac{1}{2} \frac{v_f}{a}
 \end{aligned} \tag{22}$$

Após esta dedução, obtém-se a equação do tempo de ciclo, de acordo com a norma.

No entanto, é necessário que a ferramenta tenha uma verificação de que a distância percorrida na aceleração, l_1 , é inferior ao comprimento total do transportador, l , uma vez que, se isto não se verificar, significa que o transportador, para as suas condições de comprimento, velocidade e aceleração, não consegue atingir o patamar de velocidade constante. Para este caso, é possível deduzir as seguintes equações:

Se $l_1 > l$, apenas acelerou (Equação 23):

$$t = t_1 = \frac{v_f}{a} \tag{23}$$

Caso contrário, a equação que irá calcular o tempo de ciclo será a obtida em cima, na equação 22.

3. Transportador de Rolos e Correntes Tipo 3: Movimento Desacelerado (v =Constante, Desaceleração)

Equações da cinemática (Equações 24 25):

$$x = x_0 + v_0 t + \frac{1}{2} a t^2 \tag{24}$$

$$v = v_0 + a t \tag{25}$$

Gráfico Velocidade-Tempo Tipo 3 - Movimento Desacelerado:

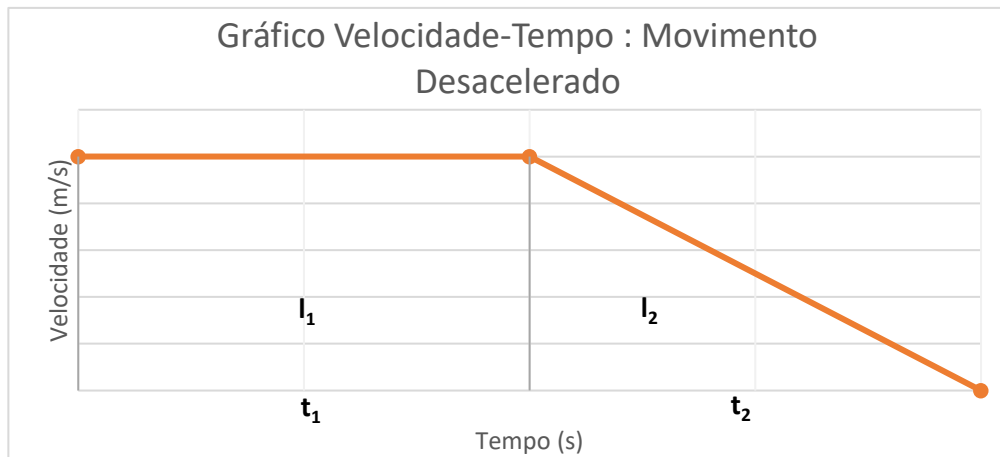


Figura 8. Gráfico Velocidade-Tempo: Tipo 3 - Movimento Desacelerado

Para o gráfico representado em cima, utilizando as equações da cinemática, obteve-se os seguintes resultados, presentes na Equação 26 e 27, para os intervalos de tempo t_1 e t_2 :

$$t_1 \rightarrow v = v_f \quad (a = 0) \quad (26)$$

$$t_2 \rightarrow v = v_f - at \quad (27)$$

Do mesmo modo, será possível obter as distâncias percorridas em cada fração de tempo através da integral da velocidade em relação ao tempo. Uma vez que as equações obtidas em cima, apesar de estarem em intervalos de tempo diferentes, são iguais às Equações 4 e 5 do Movimento Tipo 1: Movimento Completo, é de esperar uma semelhança no que toca ao cálculo das distâncias percorridas. Assim, obtém-se (Equação 28 e 29):

$$l_1 = v_f t_1 \quad (28)$$

$$l_2 = v_f t_2 - \frac{1}{2} a t_2^2 \quad (29)$$

Conforme terá sido calculado no movimento Tipo 2: Movimento Acelerado, é possível obter a distância percorrida, presente na Equação 30, através da área representada no gráfico velocidade-tempo:

$$\begin{aligned} \text{Área do Triângulo} \rightarrow l_2 &= \frac{b \times h}{2} \\ \Leftrightarrow l_2 &= \frac{t_2 \times v_f}{2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &\Leftrightarrow v_f t_2 = 2l_2 && \curvearrowright l_2 = v_f t_2 - \frac{1}{2} a t_2^2 \\
 &\Leftrightarrow v_f t_2 = 2 \times \left(v_f t_2 - \frac{1}{2} a t_2^2 \right) \\
 &\Leftrightarrow v_f t_2 = 2v_f t_2 - a t_2^2 \\
 &\Leftrightarrow t_2 = \frac{v_f}{a}
 \end{aligned} \tag{30}$$

À semelhança do sucedido na Equação 9 no Movimento Tipo 1, onde se igualou l_1 a l_3 , obteve-se a mesma equação para t_1 .

É também possível, através de uma análise do gráfico, fazer a seguinte dedução (Equação 31):

$$\begin{aligned}
 t &= t_1 + t_2 \\
 \Leftrightarrow t_1 &= t - t_2
 \end{aligned} \tag{31}$$

Deste modo, torna-se então possível deduzir a fórmula que conseguirá calcular o tempo de ciclo do transportador, para este tipo de movimento (Equação 32).

$$\begin{aligned}
 l &= l_1 + l_2 && \curvearrowright l_1 = v_f t_1 \text{ e } l_2 = v_f t_2 - \frac{1}{2} a t_2^2 \\
 l &= v_f t_1 + v_f t_2 - \frac{1}{2} a t_2^2 \\
 l &= v_f (t - t_2) + v_f t_2 - \frac{1}{2} a \times \left(\frac{v_f}{a} \right)^2 && \curvearrowright t_1 = t - t_2 \text{ e } t_2 = \frac{v_f}{a} \\
 l &= v_f t - \frac{1}{2} \frac{v_f^2}{a} \\
 t &= \frac{l}{v_f} + \frac{1}{2} \frac{v_f}{a}
 \end{aligned} \tag{32}$$

Ao contrário do movimento Tipo 1 e do movimento Tipo 2, este movimento já se encontra em velocidade constante, pelo que não é necessário efetuar qualquer tipo de verificação de que o transportador atinge esse patamar de velocidade. Assim sendo, a equação que permitirá efetuar o cálculo do tempo de ciclo de este movimento Tipo 3 será a equação 32.

4. Transportador de Rolos e Correntes Tipo 4: Movimento Uniforme (v =Constante)

Equações da cinemática (Equações 33 e 34):

$$x = x_0 + v_0 t + \frac{1}{2} a t^2 \tag{33}$$

$$v = v_0 + a t \tag{34}$$

Gráfico Velocidade-Tempo Tipo 4 - Movimento Uniforme:

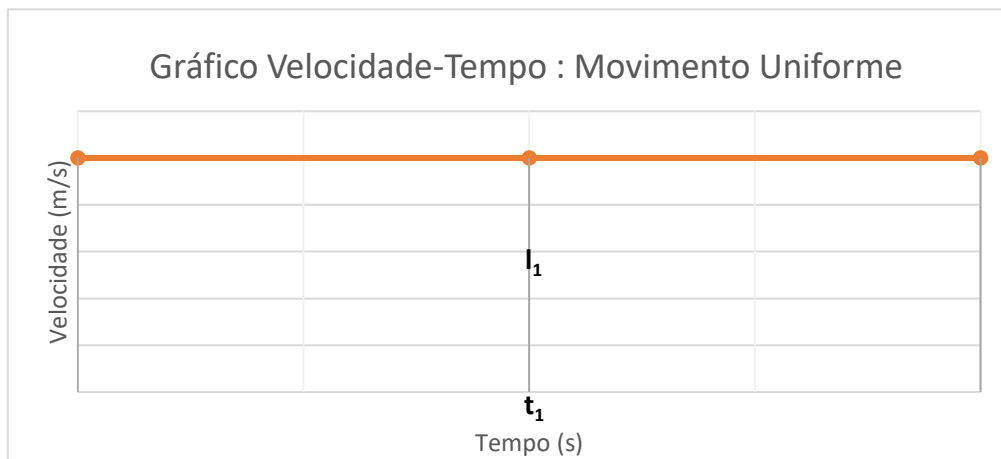


Figura 9. Gráfico Velocidade-Tempo: Tipo 4 - Movimento Uniforme

Para o gráfico representado em cima, utilizando as equações da cinemática/movimento, obteve-se os seguintes resultados para o intervalo de tempo t_1 , presentes na Equação 35:

$$t_1 \rightarrow v = v_f (a = 0) \quad (35)$$

Do mesmo modo, será possível obter a distância percorrida em cada fração de tempo através da integral da velocidade em relação ao tempo. Uma vez que a equação obtida em cima, apesar de representar um intervalo de tempo diferente, é igual à Equação 26 do Movimento Tipo 3: Movimento Desacelerado, é de esperar uma semelhança no que toca ao cálculo da distância percorrida, na Equação 36. Assim, obtém-se:

$$l_1 = v_f t_1 \quad (36)$$

Uma vez que este tipo de movimento não envolve mudanças de velocidade, e todos os parâmetros permanecem constantes, é possível deduzir diretamente o tempo de ciclo deste movimento usando a equação obtida anteriormente através da integral da velocidade em relação ao tempo. Da mesma forma, ao analisar o gráfico velocidade de tempo, é também possível chegar à mesma equação, através da área do retângulo, como já observado nos movimentos anteriores aquando do cálculo da área do triângulo.

Novamente, por este movimento se tratar de um movimento que já se encontra em velocidade constante, não é necessário efetuar qualquer tipo de verificação de que o transportador que esteja a efetuar este movimento irá atingir este patamar de velocidade. Assim, obtemos a equação 37 para o cálculo do tempo de ciclo:

$$t = \frac{l}{v_f} \quad (37)$$

Como mencionado anteriormente, a ferramenta irá também contar com outros equipamentos responsáveis pelo transporte de paletes, como mesas de transferência e mesas rotativas. Estes equipamentos, são cruciais para o funcionamento de qualquer sistema ou subsistema de transportadores, uma vez que permitem realizar mudanças de direção, pelo que foi absolutamente necessário alargar o conceito de transportador definido inicialmente na presente dissertação, de modo a incluir estes equipamentos na ferramenta.

De notar que tanto as mesas de transferência, como as mesas rotativas, depois de exercerem a sua função principal, isto é, permitir a possibilidade de o sistema efetuar, ou não, a transferência de uma paleta em um mínimo de 90° ou em um ângulo específico, respetivamente, irão comportar-se como transportadores de rolos e correntes normais, pelo que estarão sujeitos aos movimentos definidos em cima e, conseqüentemente, aos cálculos de tempo de ciclo correspondentes.

5. Mesa de Transferência

Para se chegar ao tempo de ciclo da mesa de transferência, é necessário ter em consideração os seguintes parâmetros:

- Tempo de elevação/descida dos rolos embutidos na mesa de transferência, $t_{\text{subida/descida}}$;
- Comprimento da mesa de transferência, l ;
- Largura da mesa de transferência, w ;
- Velocidade dos rolos, v_{rolos} ;
- Aceleração dos rolos, a_{rolos} ;
- Velocidade das correntes, $v_{\text{correntes}}$;
- Aceleração das correntes, $a_{\text{correntes}}$.

É crucial recordar que a mesa de transferência, podendo não efetuar a transferência, terá um comportamento em tudo semelhante a um transportador convencional. Portanto, é necessário distinguir quando uma mudança de direção no sistema realmente ocorrerá, dado que isso afetará o tempo de ciclo.

Assim, e considerando que a mesa de transferência irá, de facto, realizar transferência, é possível deduzir matematicamente o seguinte tempo de ciclo:

Gráfico Velocidade-Tempo Mesa de Transferência – Efetua Transferência:

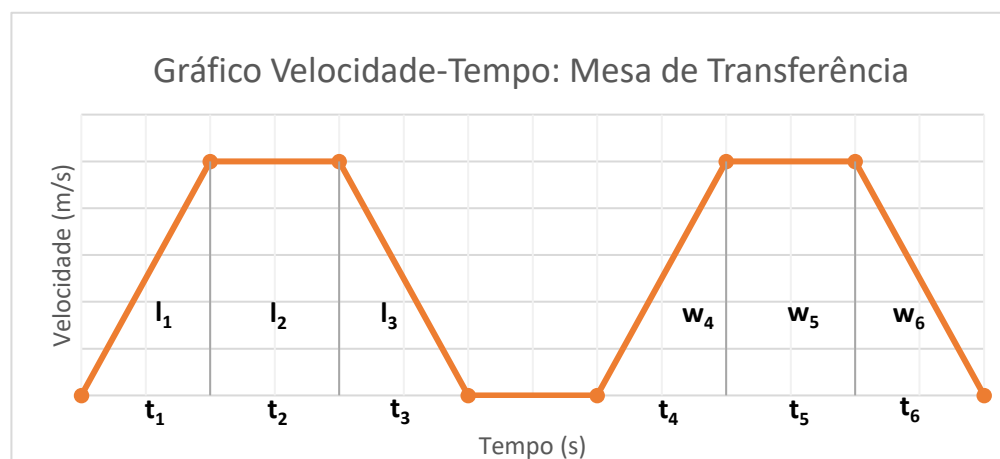


Figura 10. Gráfico Velocidade-Tempo: Mesa de Transferência

Através da observação do gráfico é possível compreender o que teoricamente ocorre durante a transferência de carga na mesa de transferência. É possível observar que a paleta pode entrar na mesa de transferência através de um transportador de rolos ou através de um transportador de correntes. Independentemente do sentido que a paleta percorre, esta iniciará o seu movimento, atravessando a mesa de transferência até ao centro, onde irá parar. De seguida, os rolos da mesa irão subir ou descer, dependendo do sentido percorrido, e a paleta irá percorrer a outra metade do transportador, perpendicular à primeira parte.

Assim, tal como referido anteriormente, assumindo que a mesa de transferência atinge, até à metade do seu comprimento e da sua largura, o patamar de velocidade constante e, tendo em consideração a Equação 11, do cálculo do tempo de ciclo, obtida no Movimento Tipo 1: Movimento Completo, é possível obter a seguinte equação do tempo de ciclo (Equação 38):

$$t = 2 \times t_{subida/descida} + \frac{l/2}{v_{rolos}} + \frac{v_{rolos}}{a_{rolos}} + \frac{w/2}{v_{correntes}} + \frac{v_{correntes}}{a_{correntes}} \quad (38)$$

À semelhança do ocorrido para o Movimento Tipo 1: Movimento Completo, nas Equações 12 e 13, é necessário realizar a verificação de que a mesa de transferência atinge o patamar de velocidade quer nos rolos, quer nas correntes. Deste modo, é realizada a seguinte verificação, nas Equações 39 e 40, tendo em conta que a paleta percorre sempre metade do percurso da mesa e, tendo em conta que para que ocorra transferência, a mesa tem de desacelerar e parar a paleta para dar início ao transportador, ou seja, os movimentos l_1 , l_3 , w_4 e w_6 têm de ocorrer obrigatoriamente.

Se $l_1+l_3>l/2$, apenas acelerou e desacelerou e não atingiu o patamar de velocidade constante:

$$l_1 + l_3 \geq l/2 \rightarrow t = 2 \frac{v_{frolos}}{a_{rolos}} \quad l_1 = l_3 \quad (39)$$

Se $w_4+w_6>w/2$, apenas acelerou e desacelerou e não atingiu o patamar de velocidade constante:

$$w_4 + w_6 \geq w/2 \rightarrow t = 2 \frac{v_{fcorrentes}}{a_{correntes}} \quad w_4 = w_6 \quad (40)$$

Assim, caso estas verificações se comprovem verdadeiras a equação irá ser substituída, no devido lugar por uma ou mais equações verificadas em cima (Equação 41):

$$t = 2 \times t_{subida/descida} + \frac{l/2}{v_{rolos}} + \frac{v_{rolos}}{a_{rolos}} + \frac{w/2}{v_{correntes}} + \frac{v_{correntes}}{a_{correntes}} \\ \Leftrightarrow t = 2 \times t_{subida/descida} + 2 \frac{v_{frolos}}{a_{rolos}} + 2 \frac{v_{fcorrentes}}{a_{correntes}} \quad (41)$$

Caso se verifique que o patamar de velocidade constante é atingido, a equação permanece a deduzida inicialmente.

Uma vez analisado o caso em que a mesa de transferência realiza, efetivamente, a transferência da carga em 90° , é necessário também analisar as situações em que este processo não ocorre. Efetivamente, quando este processo não ocorre, a mesa de transferência comporta-se como um simples transportador de rolos ou correntes, que poderá operar conforme cada um dos movimentos analisados no início do subcapítulo.

Durante a implementação da ferramenta considerou-se necessário implementar um parâmetro onde o utilizador indica a percentagem de vezes que ocorre transferência, de modo a obter um resultado o mais real possível, intercalando a equação de tempo de ciclo obtida para quando há transferência, com a equação do tipo de movimento que a mesa efetua quando se comporta como um transportador de rolos ou correntes normal, tendo também em conta, tal como nas deduções anteriores, os tempos auxiliares associados à utilização da mesa. Esta implementação será explicada e analisada com maior detalhe no próximo subcapítulo.

6. Mesa Rotativa

Para se calcular o tempo de ciclo da mesa rotativa, é necessário ter em consideração os seguintes parâmetros:

- Tempo de rotação da mesa para 90° , $t_{\text{rotação}}$;
- Ângulo de rotação;
- Comprimento da mesa rotativa, l ;
- Largura da mesa rotativa, w ;
- Velocidade dos rolos/correntes, v ;
- Aceleração dos rolos/correntes, a ;

À semelhança da mesa de transferência, a mesa rotativa pode, ou não, realizar a transferência de uma paleta em 90° . Porém, a mesa rotativa, tem a capacidade de transferir cargas em 90° e 180° , para situações que requerem a rotação da carga. Do mesmo modo, quando a mesa rotativa não efetua a transferência, esta comporta-se como um transportador convencional, pelo que será necessário realizar uma distinção nestes comportamentos, uma vez que o tempo de ciclo irá variar. Assim, e considerando que a mesa rotativa irá, de facto, realizar transferência, é possível deduzir matematicamente o seguinte tempo de ciclo:

Gráfico Velocidade-Tempo Mesa Rotativa – Efetua Transferência:

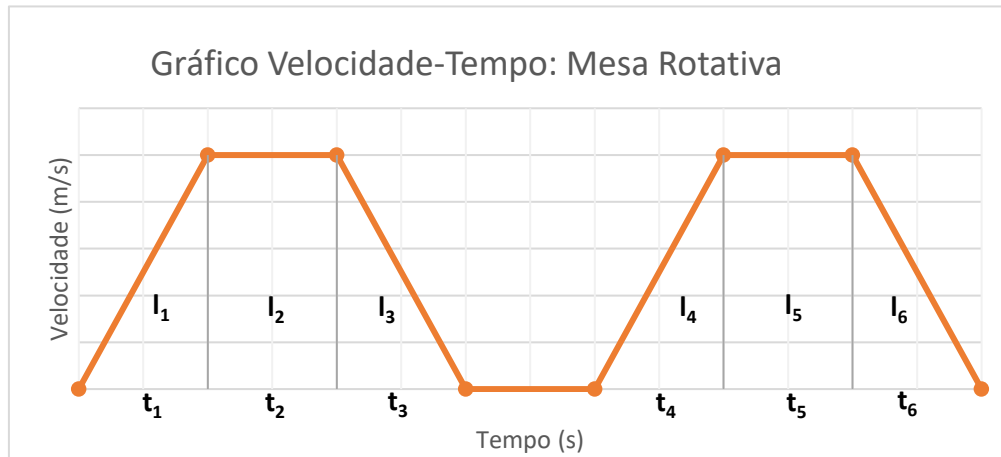


Figura 11. Gráfico Velocidade-Tempo: Mesa Rotativa

Por meio da análise do gráfico, é possível compreender teoricamente o que acontece durante a transferência de carga na mesa rotativa. É possível observar que a paleta ao entrar na mesa rotativa irá iniciar o movimento, percorrer a mesa até ao centro da mesma, onde irá parar. De seguida, a mesa irá rodar para um determinado ângulo, e a paleta irá percorrer a restante metade da mesa rotativa.

Deste modo, conforme mencionado anteriormente, assumindo que a mesa rotativa atinge, até às metades do seu comprimento, o patamar de velocidade constante e, tendo em conta a Equação 11, do cálculo de tempo de ciclo, obtida no Movimento Tipo 1: Movimento Completo, é possível obter a seguinte equação do tempo de ciclo (Equação 42):

$$t = 2 \times t_{rotação} + \frac{l/2}{v} + \frac{v}{a} + \frac{l/2}{v} + \frac{v}{a} \quad (42)$$

À semelhança do ocorrido para o Movimento Tipo 1: Movimento Completo, nas Equações 12 e 13, é necessário realizar a verificação de que a mesa rotativa atinge o patamar de velocidade constante em ambas as metades do comprimento da mesa. Assim, é realizada a seguinte verificação, presente nas Equações 43 e 44, tendo em conta que a paleta percorre sempre metade do percurso da mesa e, tendo em conta que, para que ocorra transferência, a mesa tem de parar a paleta para dar início à rotação, ou seja, os movimentos associados aos tempos l_1 , l_3 , l_4 e l_6 têm de ocorrer.

Se $l_1+l_3 > l/2$, apenas acelerou e desacelerou e não atingiu o patamar de velocidade constante:

$$l_1 + l_3 \geq l/2 \rightarrow t = 2 \frac{v_f}{a} \quad l_1 = l_3 \quad (43)$$

Se $l_4+l_6 > l/2$, apenas acelerou e desacelerou e não atingiu o patamar de velocidade constante:

$$l_4 + l_6 \geq l/2 \rightarrow t = 2 \frac{v_f}{a} \quad l_4 = l_6 \quad (44)$$

Assim, caso estas verificações se comprovem verdadeiras a equação irá ser substituída, no devido lugar pelas equações verificadas em cima (Equação 45):

$$t = 2 \times t_{rotação} + \frac{l/2}{v} + \frac{v}{a} + \frac{l/2}{v} + \frac{v}{a}$$

$$\Leftrightarrow t = 2 \times t_{rotação} + 2 \frac{v_f}{a} + 2 \frac{v_f}{a} \quad (45)$$

Caso se verifique que o patamar de velocidade constante é atingido, a equação permanece a deduzida inicialmente.

Após a análise do cenário em que a mesa rotativa efetua, efetivamente, a transferência da carga, torna-se igualmente relevante a avaliação das situações em que este processo não ocorre. Nestes casos, a mesa rotativa, à semelhança da mesa de transferência, comporta-se como um simples transportador de rolos ou correntes, adotando os movimentos analisados no início do presente subcapítulo.

Para garantir maior precisão à ferramenta, foi considerada a inclusão de um parâmetro que permite ao utilizador indicar a frequência de vezes que ocorre transferência, sob a forma de percentagem. De modo a obter um resultado o mais realista possível, combinou-se a equação de tempo de ciclo obtida para quando há transferência, com a equação do tipo de movimento que a mesa efetua quando se comporta como um transportador convencional. Para além disso, são tidos em conta os tempos auxiliares associados à utilização da mesa, conforme abordado em deduções anteriores. Esta implementação será abordada e analisada detalhadamente no próximo subcapítulo.

3.3.2. Implementação da Ferramenta de Cálculo de Cadências de Transportadores de Paletes e Exemplo Prático

Durante o processo de desenvolvimento da ferramenta foi crucial orientar e alinhar o *design*, funcionalidades e processos da ferramenta não só com a empresa acolhedora, como também com a norma VDI 3978, mantendo sempre uma mentalidade de inovação e melhoria contínua. Efetivamente, esta ferramenta aponta resolver certos desafios e ineficiências, mencionadas anteriormente, proporcionando à empresa acolhedora, de forma simplificada, uma otimização e padronização dos seus processos no que toca ao cálculo de cadências em transportadores de paletes.

Deste modo, com o objetivo de ir ao encontro de outros processos da empresa, tendo em consideração, possíveis melhorias e futuras iterações da ferramenta para uso generalizado, destaca-se que a presente ferramenta foi realizada utilizando o software Microsoft Excel, suportada por código VBA. Para além disso, é importante referir que, com o objetivo de simplificar e otimizar a ferramenta ao máximo, para que qualquer utilizador a conseguisse manusear sem dificuldade, a ferramenta encontra-se limitada aos equipamentos disponibilizados e definidos pela empresa acolhedora, tal como irá ser demonstrado e explicado no decorrer deste capítulo.

Assim, dando início à exibição da ferramenta, apresenta-se o número de páginas inicial que a mesma contém. Estas páginas, são denominadas por *Header*, *System* e *Total*, como se pode

observar na Figura 12 e representam o cabeçalho, onde será preenchida toda a informação sobre a carga e equipamentos a utilizar, a verificação e simulação do cálculo da cadência de um determinado sistema ou subsistema e, por último, a junção de toda a informação de vários sistemas e a cadência do sistema completo, respetivamente. À medida que a complexidade do sistema aumenta, existe a possibilidade de existirem múltiplos sistemas e subsistemas de transportadores, pelo que o número de páginas que a ferramenta contém poderá variar, como irá ser explicado posteriormente. Para além disso, existe também uma página de *Data*, que se encontra oculta, que serve de base de dados e de informação da ferramenta.

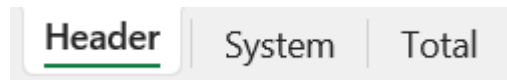


Figura 12. Páginas Principais da Ferramenta

A página inicial da ferramenta, *Header*, é destinada ao registo toda a informação relevante relativa à carga a ser manipulada, bem como as especificações dos diversos equipamentos que a ferramenta contempla. Estes equipamentos, tal como mencionado anteriormente, são:

- Transportadores de Rolos, RCV;
- Transportadores de Correntes, CCV;
- Mesas de Transferência, TRT;
- Mesas Rotativas, RTB.

Para além disso, esta primeira página, tem a capacidade de calcular a cadência de um transportador individual. Isto visa fornecer suporte e esclarecimento aos utilizadores durante o processo de desenvolvimento da solução, tornando-se numa ferramenta que possibilita não só a verificação final do sistema definido pelo utilizador, como também um acompanhamento contínuo durante o desenvolvimento dessa mesma solução.

Deste modo, a primeira página é inicialmente composta por um cabeçalho com o título da ferramenta, “*Throughput Calculation Conveyors – VDI 3978*”, onde se obtém informação relativamente à norma de suporte à ferramenta, ao autor e ao método de funcionamento da mesma, tal como se pode verificar na Figura 13. As células que se encontrem com um fundo amarelo-claro, são células que podem ser preenchidas manualmente pelo utilizador, através de escrita numérica ou através de escolhas em listas suspensas, enquanto células com um preenchimento cinzento, serão células cujos valores irão ser preenchidos automaticamente, através de fórmulas do Excel, ou através de código VBA. Esta ferramenta irá, em todas as suas páginas, ser composta por camadas de proteção que impedem os utilizadores de fazer alterações desinformadas à ferramenta, enquanto os guia para uma utilização sequencial da mesma, isenta de erros humanos, tendo em mente o conceito de *Poka Yoke*.

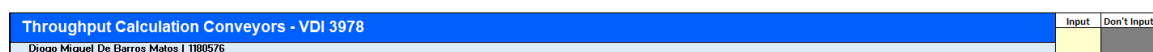


Figura 13. Cabeçalho da Ferramenta

De seguida, como se pode evidenciar na Figura 14, a ferramenta tem presente uma secção onde será debitada a informação relativa à carga que irá ser transportada e manuseada.

Unit Load	
Weight [kg]	
Dimensions [mm]	
Height [mm]	
Overhang [mm]	

Figura 14. Coleta de Informação da Carga

O primeiro parâmetro a ser preenchido é o peso, *Weight*, em quilogramas, que a carga terá juntamente com a palete. A ferramenta tem em consideração vários parâmetros que auxiliam o utilizador na escolha da palete que melhor se adequa com base no peso indicado. Isto, por sua vez, dita o passo ou o número de longarinas que o transportador de rolos ou correntes terá, respetivamente.

De seguida, o parâmetro *Dimensions*, referente à dimensão da palete em milímetros, disponibiliza uma lista suspensa com diversas opções de diferentes tipos de paletes.

Unit Load	
Weight [kg]	1200
Dimensions [mm]	
Height [mm]	800 x 1200 - EURO PALLET
Overhang [mm]	1000 x 1200 - INDUSTRIAL PALLET
	1200 x 1200 - EUR 3
	600 x 800 - EURO HALF PALLET

Figura 15. Escolha da Paleta a Utilizar

Estas paletes, conforme ilustrado na Figura 15, possuem dimensões específicas e podem ou não ser *standard*, desde que mantenham as dimensões indicadas, proporcionando assim, ao utilizador uma ampla variedade de escolha de paletes, mantendo a simplicidade e facilidade de seleção na ferramenta.

Posteriormente, é necessário inserir a altura, *Height*, em milímetros, da carga em conjunto com a paleta. À semelhança do parâmetro do peso, a ferramenta irá verificar estes dois parâmetros, de modo a garantir que tanto o peso, como a altura da carga, são adequados, não só à paleta escolhida, como também aos modelos *standard* de transportadores de rolos e correntes. Se um destes parâmetros não se verificar, o utilizador receberá uma mensagem de erro, indicando que a carga não se adequa. Em tais situações, o utilizador deverá informar o cliente e alterar a carga, para que esta esteja em conformidade com os produtos *standard* da empresa acolhedora, ou caso seja impossível fazer alterações à carga, deverá dirigir-se a outros departamentos dentro da empresa acolhedora, como o R&D, de modo a obter um produto que se encontre customizado e ajustado ainda mais às necessidades do cliente. Assim, é possível resumir este conjunto de informações na Tabela 2 e Tabela 3:

Tabela 2. Requerimentos de Carga - Transportador de Rolos

Requerimentos de Carga – Transportador de Rolos			
Passo do Transportador [mm]	Tipo Palete	Peso Máximo por Palete [kg]	Altura Máxima por Palete [mm]
127,0	600 x 800 – EURO HALF PALLET	1500	2000
150,8	800 x 1200 – EURO PALLET	1500	2500
	1000 x 1200 – INDUSTRIAL PALLET		
	1200 x 1200 – EUR 3		
198,4	800 x 1200 – EURO PALLET	1200	2000
	1000 x 1200 – INDUSTRIAL PALLET		
	1200 x 1200 – EUR 3		

Tabela 3. Requerimentos de Carga - Transportador de Correntes

Requerimentos de Carga – Transportador de Correntes			
Número de Longarinas	Tipo Palete	Peso Máximo por Palete [kg]	Altura Máxima por Palete [mm]
2	800 x 1200 – EURO PALLET	1200	2000
	1000 x 1200 – INDUSTRIAL PALLET		
	1200 x 1200 – EUR 3		
3	800 x 1200 – EURO PALLET	1500	2500
	1000 x 1200 – INDUSTRIAL PALLET		
	1200 x 1200 – EUR 3		
4	600 x 800 – EURO HALF PALLET	1500	2500

Por fim, o último parâmetro a ser preenchido é o *Overhang*. Este parâmetro, ilustrado na Figura 16, refere-se às saliências que a carga poderá ter com base na paleta escolhida. Isto ocorre porque a carga ou conjunto de cargas que estarão em cima da paleta, nem sempre coincidem exatamente com as dimensões da própria paleta, podendo, em certos casos, exceder o seu tamanho. O valor, em milímetros, que a carga excede de um dos lados da paleta é considerado como *Overhang* e terá um impacto direto no tamanho que a carga ocupa no transportador, bem como nas distâncias de segurança entre paletes e os pontos iniciais e finais do transportador.

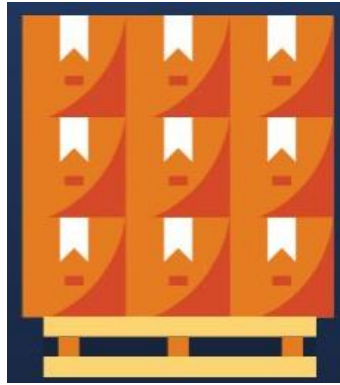


Figura 16. Exemplo de uma palete com overhang (PalletOnline, 2021)

Uma vez preenchidos estes parâmetros, como exemplificado na Figura 17, o utilizador poderá proceder ao preenchimento das células correspondentes aos equipamentos na ferramenta. Inicialmente, encontrará o transportador de rolos, *Roller Conveyor*, RCV.

Unit Load	
Weight [kg]	1200
Dimensions [mm]	800 x 1200 - EURO PALLET
Height [mm]	1000
Overhang [mm]	50,00

Figura 17. Exemplo dos Parâmetros de Carga Preenchidos

Assim, e mantendo a estética apresentada na secção da carga, para os transportadores de rolos, está presente, na Figura 18, a seguinte secção.

Roller Conveyor - RCV	
Roller Pitch	198,4
SSL or LSL	
RCV Width (W) [mm]	
RCV Length (L) [mm]	
Safety Distance (d) [mm]	
UL Safety Distance (D) [mm]	
UL Length (UL) [mm]	
Max. Nr. Of Pallets	
Velocity (v) [m/s]	
Acceleration (a) [m/s ²]	
Conveyor Type	
Cycle Time [s]	
Throughput [UL/h]	

Figura 18. Coleta de Informação - Transportador de Rolos, RCV

Conforme mencionado anteriormente, as células a cinzento, são células que irão ser preenchidas automaticamente através de fórmulas do Excel ou código VBA.

O primeiro parâmetro, *Roller Pitch*, ou passo do transportador, já aparece preenchido, uma vez que a escolha do passo no transportador de rolos tem uma relação direta com a carga que esse transportador irá suportar. Uma breve análise à Figura 17 e à Tabela 2, permite intercalar esta informação e confirmar que dos três diferentes passos de transportadores *standard*, o que melhor se adequa à informação da Figura 17, é o de 198,4 mm. Caso os parâmetros de carga fossem

alterados, o passo do transportador irá atualizar automaticamente para o que melhor se adequa a essa carga.

Em segundo lugar, é necessário escolher a direção em que a paleta irá estar orientada no transportador. Estão presentes, na Figura 19, as seguintes opções nesta lista suspensa.

Roller Conveyor - RCV	
Roller Pitch	198,4
SSL or LSL	<input type="text" value=""/>
RCV Width (W) [mm]	SSL - Short Side Leading
RCV Length (L) [mm]	LSL - Long Side Leading
Safety Distance (d) [mm]	
UL Safety Distance (D) [mm]	
UL Length (UL) [mm]	1300
Max. Nr. Of Pallets	1
Velocity (v) [m/s]	
Acceleration (a) [m/s ²]	
Conveyor Type	
Cycle Time [s]	
Throughput [UL/h]	

Figura 19. SSL ou LSL

Tal como os nomes indicam, uma paleta que siga uma orientação em SSL, será posicionada pelo seu lado mais curto, como no exemplo que se está a construir da Figura 17, pelos 800 mm. Por outro lado, se fosse escolhida a opção LSL, a paleta seria orientada pelo seu lado mais comprido, ou seja, pelos 1200 mm. De notar, que este parâmetro se encontra presente na ferramenta devido à simplificação previamente adotada no que toca à escolha da paleta. Assumindo que a paleta escolhida da Figura 17, seria *standard*, esta teria de ser obrigatoriamente posicionada em SSL em um transportador de rolos, devido à construção na parte inferior da paleta. Por outro lado, uma paleta com as dimensões indicadas na Figura 17, que não seja *standard*, pode ter uma construção inferior mais robusta, que permita à paleta, num transportador de rolos, seguir com qualquer uma das duas orientações.

Para todos os equipamentos presentes na ferramenta, à semelhança da Figura 20, encontra-se exibido o equipamento em questão, como um transportador de rolos, com a indicação de quais serão os respetivos parâmetros a preencher na respetiva secção.

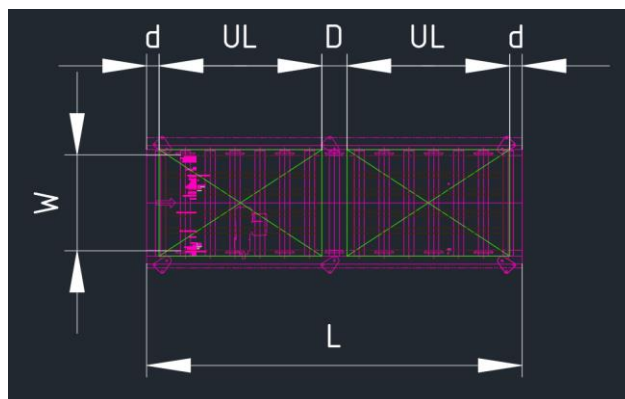


Figura 20. Transportador de Rolos

O próximo parâmetro, denominado como *RCV Width*, *W*, faz referência à largura útil do transportador. Este parâmetro é preenchido automaticamente assim que é decidida a orientação da paleta no passo anterior. Para o exemplo da Figura 17, este será preenchido com 800 mm.

De seguida, o próximo campo a ser preenchido, é o comprimento que o transportador terá, *RCV Length*, *L*. O utilizador pode seleccionar o comprimento desejado a partir de uma lista suspensa dinâmica, que varia conforme o passo dos rolos do transportador. Os comprimentos disponíveis variam entre 1000 e os 5000 mm. Estes comprimentos encontram-se relacionados com o passo do transportador, devido aos diferentes passos disponíveis. Com base no exemplo da Figura 18, um transportador com um passo de 198,4 mm terá comprimentos progressivamente maiores, à medida que se adicionam rolos de 198,4 mm em 198,4 mm. O mesmo princípio se aplica para os restantes passos disponíveis nos transportadores *standard*.

A distância de segurança, *Safety Distance*, *d*, refere-se à distância mínima que a carga, que se encontra posicionada sobre o transportador, deve manter em relação ao início ou ao fim do transportador. Esta distância tem um valor mínimo de 100 mm.

À semelhança do parâmetro anterior, a distância de segurança entre cargas, *UL Safety Distance*, é uma distância de segurança que deve ser considerada sempre que existe mais do que uma paleta simultaneamente sobre o transportador. É uma distância que é medida, à semelhança da distância de segurança, em milímetros e tem o mesmo valor mínimo de 100 mm.

O comprimento da carga, *UL Length*, *UL*, é calculado automaticamente a partir do momento em que o utilizador definiu a orientação da paleta no parâmetro *SSL* ou *LSL*, da Figura 19. Este valor é calculado somando o comprimento da paleta que estará no transportador com o *overhang* de cada um dos lados da paleta. Assim, para o exemplo que tem vindo a ser construído, o tamanho da carga, será de 1300 mm.

De seguida, encontra-se o parâmetro que diz respeito ao número máximo de paletes que cabe em cima do transportador, *Max. Nr. Of Pallets*. Este valor é obtido tendo em consideração os seguintes fatores:

- Comprimento do Transportador, *L*;
- Distância de Segurança, *d*;
- Distância de Segurança entre cargas, *D*;
- Comprimento da Carga, *UL*;
- Número de Paletes, *N*.

Estes fatores relacionam-se através de uma sucessão onde se consegue deduzir as seguintes expressões matemáticas, presente na Equação 46, 47, 48 e 49:

$$\begin{aligned}
 n = 1 \text{ Paleta} &\rightarrow d + UL + D + d & D_1 = 0 \\
 n = 2 \text{ Paletes} &\rightarrow d + UL + D + UL + d \\
 n = 3 \text{ Paletes} &\rightarrow d + UL + D + UL + D + UL + d & (46)
 \end{aligned}$$

Desta sucessão, é possível obter a seguinte informação, comum a todos os níveis da mesma:

$$\bullet \quad 2d \quad (47)$$

$$\bullet \quad UL \times N \quad (48)$$

$$\bullet \quad D \times (N - 1) \quad (49)$$

Assim, deduz-se a seguinte expressão que permite calcular, Equação 50, com base no comprimento do transportador, o número de paletes que o transportador consegue carregar simultaneamente:

$$\begin{aligned} 2d + UL \times N + D \times (N - 1) &\leq L \\ \Leftrightarrow UL \times N + DN &\leq L - 2d + D \\ \Leftrightarrow N(UL + D) &\leq L - 2d + D \\ \Leftrightarrow N &\leq \frac{L - 2d + D}{UL + D} \end{aligned} \quad (50)$$

Com esta equação, torna-se então possível calcular o número de paletes que um transportador pode carregar simultaneamente. Nos casos raros de transportadores mais pequenos, onde todos os parâmetros considerados, tornam a carga efetivamente mais comprida do que o próprio transportador, assume-se sempre que o transportador consegue suportar no mínimo uma única paleta. No entanto, é recomendável que a paleta se mova, não sendo aconselhável que esta fique parada em cima do mesmo durante um longo período de tempo. Para o exemplo que se está a construir, é possível observar na Figura 21, que para os seguintes parâmetros, é possível colocar 2 paletes no transportador.

Roller Conveyor - RCV	
Roller Pitch	198,4
SSL or LSL	SSL - Short Side Leading
RCV Width (W) [mm]	800
RCV Length (L) [mm]	3600
Safety Distance (d) [mm]	100
UL Safety Distance (D) [mm]	100
UL Length (UL) [mm]	1300
Max. Nr. Of Pallets	2
Velocity (v) [m/s]	
Acceleration (a) [m/s ²]	
Conveyor Type	
Cycle Time [s]	
Throughput [UL/h]	

Figura 21. Continuação Exemplo - Transportador de Rolos

O parâmetro seguinte é a velocidade, v , expressa em metros por segundo, que pode ser definida através de uma lista suspensa entre valores que são aplicados na empresa acolhedora, que variam entre os 0,2 e os 0,6 ms^{-1} .

Por outro lado, a aceleração, a , expressa em metros por segundo ao quadrado, pode ser definida através de escrita numérica. De recordar, que estes valores devem ser valores realistas e devem estar em conformidade com o utilizado na indústria e na empresa acolhedora, sendo o mais comum, para a empresa acolhedora, 0,5 ms^{-2} .

De modo a obter o tempo de ciclo e a cadência é necessário escolher o tipo de movimento que o transportador irá efetuar, *Conveyor Type*. Conforme terá sido deduzido no subcapítulo anterior, é possível escolher, através de uma lista suspensa, entre quatro movimentos:

- Tipo 1: Movimento Completo;
- Tipo 2: Movimento Acelerado;
- Tipo 3: Movimento Desacelerado;
- Tipo 4: Movimento Uniforme.

O movimento Tipo 4, irá alterar o número máximo de paletes que cabe em cima do transportador, fazendo com que este passe a um número decimal, que não se encontra arredondado por defeito.

Com estes parâmetros todos preenchidos, é então possível obter o tempo de ciclo, através das fórmulas deduzidas anteriormente e, conseqüentemente a cadência, expressa em paletes por hora, UL/h, através da Equação 51:

$$Cadência = \frac{1}{t_{ciclo}} \times N \times 3600 \quad (51)$$

Para além destes parâmetros, existem outros, como observado na Figura 22, que influenciam o tempo de ciclo e, conseqüentemente, a cadência. Estes parâmetros, expressos em segundos, s , estão associados à função que o sistema ou subsistema a ser considerado irá exercer e são únicos para cada cliente e solução, podendo ser medidos de forma empírica ou calculados de forma teórica. Assim, devem ser considerados os seguintes pontos:

- Tempos de Comunicação e Tempos Mortos, s ;
- Tempos de *Infeed*, s ;
- Tempos de *Outfeed*, s ;
- Tempos de Posicionamento, s ;
- Tempos de Verificação de Paletes, s ;
- Tempos de *Picking*, s ;

RCV Times	
Communication and Dead Times [s]	
Infeed Times [s]	
Outfeed Times [s]	
Positioning Times [s]	
Pallet Check Times [s]	
Picking Times [s]	
Total [s]	0

Figura 22. Tempos de Operação Extra - Transportador de Rolos

Deste modo, para o exemplo que se tem vindo a construir, um único transportador de rolos com os parâmetros definidos anteriormente e sem tempos extra considerados, será capaz de atingir uma cadência máxima teórica de 750 paletes por hora, conforme dita a Figura 23.

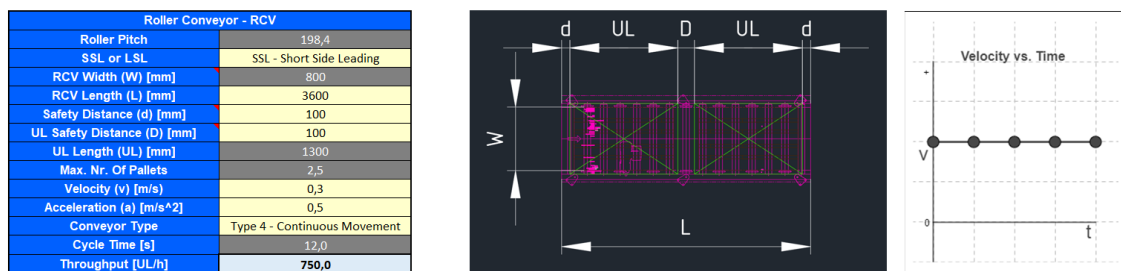


Figura 23. Finalização Exemplo - Transportador de Rolos, RCV

À semelhança do transportador de rolos, o transportador de correntes apresenta o mesmo formato e os mesmos pontos a serem considerados (Figura 24).

Chain Conveyor - CCV	
Nr. Of Stringers	2
SSL or LSL	
CCV Width (W) [mm]	
CCV Length (L) [mm]	
Safety Distance (d) [mm]	
UL Safety Distance (D) [mm]	
UL Length (UL) [mm]	
Max. Nr. Of Pallets	
Velocity (v) [m/s]	
Acceleration (a) [m/s ²]	
Conveyor Type	
Cycle Time [s]	
Throughput [UL/h]	

Figura 24. Coleta de Informação - Transportador de Correntes, CCV

No entanto, existem alguns fatores que irão ser diferentes ou irão reagir de forma diferente.

O primeiro parâmetro, número de longarinas, já se encontra preenchido, à semelhança do passo do transportador de rolos, através da informação preenchida nos parâmetros de carga da Figura 17 com a Tabela 3. Caso os parâmetros de carga fossem diferentes, o número de longarinas irá atualizar automaticamente para o número que melhor se adequa.

Por sua vez, o ponto referente ao comprimento do transportador, *CCV Length*, L, irá diferir do transportador de rolos através de uma lista suspensa fixa com valores de comprimentos entre os 1000 e os 5000 mm, com incrementos de 50 mm, uma vez um transportador de correntes não se encontra limitado por rolos e, conseqüentemente, pelo diâmetro e o passo entre os mesmos.

Do mesmo modo, na Figura 25, encontra-se presente uma tabela com tempos extra que podem influenciar o tempo de ciclo de um transportador de correntes.

CCV Times	
Communication and Dead Times [s]	
Infeed Times [s]	
Outfeed Times [s]	
Positioning Times [s]	
Pallet Check Times [s]	
Picking Times [s]	
Total	0

Figura 25. Tempos de Operação Extra - Transportador de Correntes

Assim, um transportador de correntes com os parâmetros definidos em cima e na Figura 29 consegue atingir uma cadência máxima teórica de 1035,9 paletes por hora.

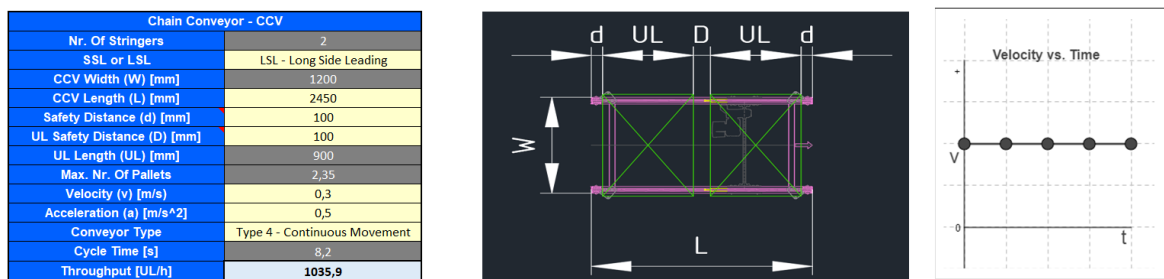


Figura 26. Exemplo - Transportador de Correntes, CCV

De seguida, encontra-se presente a mesa de transferência, TRT. À semelhança dos restantes equipamentos presentes na ferramenta, apenas modelos standard da mesa terão sido considerados, pelo que esses modelos conseguem ser resumidos na tabela 4:

Tabela 4. Diferentes Modelos de Mesas de Transferência, TRT

Diferentes Modelos – Mesa de Transferência, TRT			
Modelo	Rolos de Passagem	Comprimento [mm]	Largura [mm]
TRT-T1	1	1435	Variável
TRT-T2	2	1595	Variável
TRX-T1	1	1435	Variável
TRX-T2	2	1595	Variável

Os modelos cujo sufixo se encontra acompanhado de T1, têm presentes um rolo de passagem em cada extremidade da mesa de transferência, enquanto modelos com T2, com o objetivo de preencher espaços maiores, devido aos passos presentes nos transportadores de rolos, encontram-se com dois rolos de passagem em cada extremidade da mesa. Por sua vez, a principal diferença entre os modelos TRT e TRX, consegue ser observada através do formato da própria mesa. Como o nome de cada modelo indica, uma mesa em “T” será capaz de realizar transferência apenas numa direção. No entanto, uma mesa em “X”, devido à sua composição aberta, permite que o transportador de correntes presente na mesa não só entre, como a ultrapasse, permitindo assim a transferência em mais do que uma direção.

Por sua vez, encontra-se então presente, na Figura 27, a tabela de coleta de informações acerca da mesa de transferência.

Transfer Table - TRT	
Model	
TRT Width (W) [mm]	900
TRT Length (L) [mm]	
Safety Distance (d) [mm]	
UL Length (UL) [mm]	1300
Max Nr. Of Pallets	1
Roller Velocity [m/s]	0,3
Roller Acceleration [m/s ²]	0,5
Chain Velocity [m/s]	0,3
Chain Acceleration [m/s ²]	0,5
Lift Movement [s]	
Conveyor Type	
Percentage of Transfer [%]	
Cycle Time [s]	
Throughput [UL/h]	

Figura 27. Coleta de Informações - Mesa de Transferência, TRT

Através de uma lista suspensa, torna-se possível preencher o primeiro parâmetro, o modelo. Este parâmetro é alusivo à Tabela 4, onde se encontram definidos os quatro diferentes modelos de mesas de transferência.

O seguinte fator a ser considerado, a largura da mesa de transferência, *TRT Width*, *W*, pode ser calculado e preenchido de forma automaticamente, tendo em consideração a largura obtida no preenchimento do transportador de rolos, incluindo uma distância de segurança.

Após se encontrar preenchido o modelo, os seguintes parâmetros serão preenchidos automaticamente:

- Comprimento da mesa de transferência, *TRT Length*, *L*;
- Distância de segurança, *Safety Distance*, *d*.

Estes pontos são expressos em milímetros e são calculados intercalando a informação do modelo na Tabela 4 e fazendo o cálculo do comprimento da mesa tendo em consideração que esta apenas transportará uma paleta de cada vez, respetivamente.

De seguida, através de uma busca de informações nas tabelas de coleta de informação dos transportadores de rolos e corrente, encontram-se pré preenchidos os seguintes fatores:

- Comprimento da Carga, *UL Length*, *UL*, [mm];
- Número de Paletes, *Max. Nr. Of Pallets*;
- Velocidade do Transportador de Rolos, *Roller Velocity*, v_{rolos} , [ms⁻¹];
- Aceleração do Transportador de Rolos, *Roller Acceleration*, a_{rolos} , [ms⁻²];
- Velocidade do Transportador de Correntes, *Chain Velocity*, $v_{\text{correntes}}$, [ms⁻¹];
- Aceleração do Transportador de Correntes, *Chain Acceleration*, $a_{\text{correntes}}$, [ms⁻²];

Conforme se encontra na Figura 28, os parâmetros que dizem respeito a velocidades e aceleração têm presentes, à direita, a possibilidade de alterar os seus valores para outros que não os mesmos utilizados nos transportadores de rolos e correntes. O tamanho da carga é retirado diretamente da tabela de coleta de informações do transportador de rolos, enquanto o número de paletes, conforme mencionado anteriormente, permanece a unidade.

Transfer Table - TRT	
Model	TRX-T2
TRT Width (W) [mm]	900
TRT Length (L) [mm]	1595
Safety Distance (d) [mm]	147,5
UL Length (UL) [mm]	1300
Max Nr. Of Pallets	1
Roller Velocity [m/s]	0,3
Roller Acceleration [m/s ²]	0,5
Chain Velocity [m/s]	0,3
Chain Acceleration [m/s ²]	0,5
Lift Movement [s]	
Conveyor Type	
Percentage of Transfer [%]	
Cycle Time [s]	
Throughput [UL/h]	

Figura 28. Exemplo - Mesa de Transferência, TRT

Posterior a todos estes parâmetros, encontra-se presente o movimento de subida e descida, *Lift Movement*, referente ao tempo, que os rolos da mesa de transferência demoram a subir ou a descer, quando se irá dar início à transferência da carga. Por norma, este valor ronda os 3 s.

Novamente, e à semelhança de todos os equipamentos presentes na ferramenta, encontra-se o fator do tipo de movimento que a mesa irá efetuar quando se comporta como um simples transportador de rolos.

Por último, conforme terá sido indicado no último subcapítulo, considerou-se crucial incluir um parâmetro onde seja possível indicar, de forma aproximada, uma percentagem que dita a frequência com que a mesa de transferência efetua, efetivamente, transferência de cargas.

Assim, é possível deduzir as seguintes equações, com base no tipo de movimento que a mesa terá quando age como um transportador normal (Equações 52, 53, 54 e 55).

- Tipo 1: Movimento Completo:

$$t_{ciclo} = t_{aux} + \% \times \left(2 \times t_{subida/descida} + \frac{l/2}{v_{rolos}} + \frac{v_{rolos}}{a_{rolos}} + \frac{w/2}{v_{correntes}} + \frac{v_{correntes}}{a_{correntes}} \right) + (1 - \%) \times \left(\frac{l}{v_{rolos}} + \frac{v_{rolos}}{a_{rolos}} \right) \quad (52)$$

- Tipo 2: Movimento Acelerado:

$$t_{ciclo} = t_{aux} + \% \times \left(2 \times t_{subida/descida} + \frac{l/2}{v_{rolos}} + \frac{v_{rolos}}{a_{rolos}} + \frac{w/2}{v_{correntes}} + \frac{v_{correntes}}{a_{correntes}} \right) + (1 - \%) \times \left(\frac{l}{v_{rolos}} + \frac{1}{2} \times \frac{v_{rolos}}{a_{rolos}} \right) \quad (53)$$

- Tipo 3: Movimento Desacelerado

$$t_{ciclo} = t_{aux} + \% \times \left(2 \times t_{subida/descida} + \frac{l/2}{v_{rolos}} + \frac{v_{rolos}}{a_{rolos}} + \frac{w/2}{v_{correntes}} + \frac{v_{correntes}}{a_{correntes}} \right) + (1 - \%) \times \left(\frac{l}{v_{rolos}} + \frac{1}{2} \times \frac{v_{rolos}}{a_{rolos}} \right) \quad (54)$$

- Tipo 4: Movimento Contínuo:

$$t_{ciclo} = t_{aux} + \% \times \left(2 \times t_{subida/descida} + \frac{l/2}{v_{rolos}} + \frac{v_{rolos}}{a_{rolos}} + \frac{w/2}{v_{correntes}} + \frac{v_{correntes}}{a_{correntes}} \right) + (1 - \%) \times \left(\frac{l}{v_{rolos}} \right) \quad (55)$$

Conforme terá sido mencionado no subcapítulo anterior, a ferramenta tem presente em si, no movimento de tipo 1 e no movimento de tipo 2, a verificação de que se atinge a velocidade constante para os casos em que ocorre transferência ou não. Quando se verifica que não se atingiu a velocidade constante, as fórmulas serão alteradas nas corretas secções, com base no que terá sido deduzido anteriormente.

Com todos estes parâmetros preenchidos torna-se então possível obter o tempo de ciclo e, consequentemente, a cadência da mesa de transferência. À semelhança dos restantes equipamentos, encontra-se presente uma tabela com os tempos de operação extra a ser considerados no tempo de ciclo da mesma (Figura 29).

TRT Times	
Communication and Dead Times [s]	
Infeed Times [s]	
Outfeed Times [s]	
Positioning Times [s]	
Pallet Check Times [s]	
Picking Times [s]	
Total	0

Figura 29. Tempos de Operação Extra - Mesa de Transferência

Novamente, para as condições de carga definidas no exemplo que se tem vindo a construir desde o início da Figura 17, bem como para os fatores a serem considerados neste equipamento, sem considerar tempos de operação extra, torna-se possível obter uma cadência máxima teórica de 416,8 paletes por hora (Figura 30).

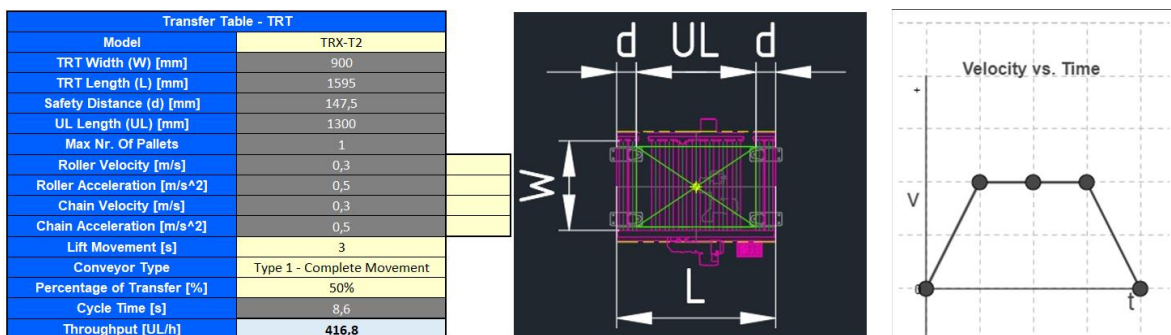


Figura 30. Finalização Exemplo - Mesa de Transferência, TRT

Finalmente, o último equipamento presente na ferramenta é a Mesa Rotativa, RTB. Este equipamento possui apenas dois modelos *standard* que terão sido considerados no processo de desenvolvimento da ferramenta:

- Mesa Rotativa de Rolos, RTB – RCV;
- Mesa Rotativa de Correntes, RTB – CCV.

Assim, encontra-se presente na Figura 31, a tabela de coleta de informações relativa à mesa rotativa.

Rotating Table - RTB	
Model	
RTB Width (W) [mm]	900
RTB Length (L) [mm]	
Safety Distance (d) [mm]	
UL Length (UL) [mm]	1300
Max Nr. Of Pallets	1
Roller / Chain Velocity [m/s]	
Roller / Chain Acceleration [m/s ²]	
Rotation Time 90° [s]	
RTB Rotation [°]	
Rotation Time [s]	
Conveyor Type	
Percentage of Transfer [%]	
Cycle Time [s]	
Throughput [UL/h]	

Figura 31. Coleta de Informações - Mesa Rotativa, RTB

Deste modo, conforme terá sido mencionado anteriormente, torna-se possível o preenchimento do primeiro parâmetro, o do modelo.

Por sua vez, o seguinte ponto a ser considerado, a largura da mesa rotativa, *RTB Width*, *W*, é obtido de forma automaticamente, tendo em consideração a largura obtida no preenchimento do transportador de rolos ou de correntes, com base no modelo que se escolher, incluindo uma distância de segurança.

Após se encontrar preenchido o modelo, à semelhança do que acontece com a mesa de transferência, os seguintes parâmetros serão preenchidos automaticamente:

- Comprimento da mesa rotativa, *RTB Length*, *L*;
- Distância de segurança, *Safety Distance*, *d*.

Estes pontos encontram-se expressos em milímetros e conseguem ser obtidos intercalando o modelo escolhido, com as tabelas de coleta de informação dos restantes equipamentos transportadores de paletes.

Por sua vez, os seguintes parâmetros também passam a estar automaticamente preenchidos:

- Comprimento da Carga, *UL Length*, *UL*, [mm];
- Número de Paletes, *Max. Nr. Of Pallets*;
- Velocidade do Transportador de Rolos/Correntes, *Roller/Chain Velocity*, *v*, [ms⁻¹];
- Aceleração do Transportador de Rolos/Correntes, *Roller/Chain Acceleration*, *a*, [ms⁻²];

À semelhança do que acontece com a mesa de transferência, os parâmetros de velocidade e aceleração são obtidos automaticamente com base no modelo de mesa rotativa que terá sido escolhido. No entanto, é possível, inserir valores diferentes destes que irão sobrepor no cálculo do tempo de ciclo. Para além disso, o número de paletes permanece o mesmo definido na mesa de transferência, uma vez que estes equipamentos apenas transportam uma paleta de cada vez (Figura 32).

Rotating Table - RTB	
Model	RTB - CCV
RTB Width (W) [mm]	1300
RTB Length (L) [mm]	1825
Safety Distance (d) [mm]	462,5
UL Length (UL) [mm]	900
Max Nr. Of Pallets	1
Roller / Chain Velocity [m/s]	0,3
Roller / Chain Acceleration [m/s ²]	0,5
Rotation Time 90° [s]	
RTB Rotation [°]	
Rotation Time [s]	
Conveyor Type	
Percentage of Transfer [%]	
Cycle Time [s]	
Throughput [UL/h]	

Figura 32. Exemplo - Mesa Rotativa, RTB

De seguida, encontra-se presente o fator associado ao tempo de rotação da mesa em um ângulo de 90°, *Rotation Time 90°*. Este tempo, por norma, de 3 s, é calculado matematicamente, ou obtido de forma empírica, podendo também ser ajustado, às necessidades do cliente.

Posteriormente, com o objetivo de ir ao encontro de uma cadência o mais realista possível, encontra-se presente o parâmetro que irá ditar, em média, qual o ângulo de rotação que mais se repete no processo de transferência na mesa rotativa em análise, *RTB Rotation*, °. Este ângulo poderá ser escolhido através de uma lista suspensa, com ângulos que variam entre os 90 e os 270°. Caso existam múltiplos ângulos que a mesa realiza com a mesma frequência, opta-se pelo maior dos ângulos, uma vez que este irá levar a simulação a uma situação limite, precavendo possíveis imprevistos.

Tendo em consideração estes fatores, é calculado automaticamente, para o ângulo definido, o tempo de rotação, *Rotation Time*, expresso em segundos, s.

Deste modo, e à semelhança de todos os equipamentos presentes na ferramenta, encontra-se novamente presente o fator do tipo de movimento que a mesa irá efetuar quando se comporta como um simples transportador de rolos ou de correntes.

Por último, conforme terá sido indicado no último subcapítulo para a mesa de transferência e mesa rotativa, considerou-se decisivo incluir um parâmetro onde seja possível indicar, de forma aproximada, uma percentagem que dita o número de vezes que a mesa rotativa efetua, efetivamente, transferência de cargas em 90° ou mais.

Por fim, é possível deduzir as seguintes equações, com base no tipo de movimento que a mesa terá quando age como um transportador normal (Equações 56, 57, 58 e 59).

- Tipo 1: Movimento Completo:

$$t_{ciclo} = t_{aux} + \% \times \left(2 \times t_{rotação} + \frac{l/2}{v} + \frac{v}{a} + \frac{l/2}{v} + \frac{v}{a} \right) + (1 - \%) \times \left(\frac{l}{v} + \frac{v}{a} \right) \quad (56)$$

- Tipo 2: Movimento Acelerado:

$$t_{ciclo} = t_{aux} + \% \times \left(2 \times t_{rotação} + \frac{l/2}{v} + \frac{v}{a} + \frac{l/2}{v} + \frac{v}{a} \right) + (1 - \%) \times \left(\frac{l}{v} + \frac{1}{2} \times \frac{v}{a} \right) \quad (57)$$

- Tipo 3: Movimento Desacelerado

$$t_{ciclo} = t_{aux} + \% \times \left(2 \times t_{rotação} + \frac{l/2}{v} + \frac{v}{a} + \frac{l/2}{v} + \frac{v}{a} \right) + (1 - \%) \times \left(\frac{l}{v} + \frac{1}{2} \times \frac{v}{a} \right) \quad (58)$$

- Tipo 4: Movimento Contínuo:

$$t_{ciclo} = t_{aux} + \% \times \left(2 \times t_{rotação} + \frac{l/2}{v} + \frac{v}{a} + \frac{l/2}{v} + \frac{v}{a} \right) + (1 - \%) \times \left(\frac{l}{v} \right) \quad (59)$$

Tal como terá sido mencionado para a mesa de transferência, a ferramenta tem presente, no movimento de tipo 1 e no movimento de tipo 2, a verificação de que se atinge a velocidade constante para os casos em que ocorre transferência ou não. Quando se verifica que não se atingiu a velocidade constante, as fórmulas serão alteradas nas corretas secções, com base no que terá sido deduzido no subcapítulo anterior.

Com todos estes parâmetros preenchidos torna-se então possível obter o tempo de ciclo e, conseqüentemente, a cadência da mesa rotativa. À semelhança dos restantes equipamentos, encontra-se presente uma tabela com os tempos de operação extra a ser considerados no tempo de ciclo da mesma (Figura 33).

RTB Times	
Communication and Dead Times [s]	
Infeed Times [s]	
Outfeed Times [s]	
Positioning Times [s]	
Pallet Check Times [s]	
Picking Times [s]	
Total	0

Figura 33. Tempos de Operação Extra - Mesa Rotativa

Assim, para as condições de carga definidas, bem como para os fatores a serem considerados neste equipamento, sem considerar tempos de operação extra, torna-se possível obter uma cadência máxima teórica de 360,6 paletes por hora, conforme poderá ser observado na Figura 34.

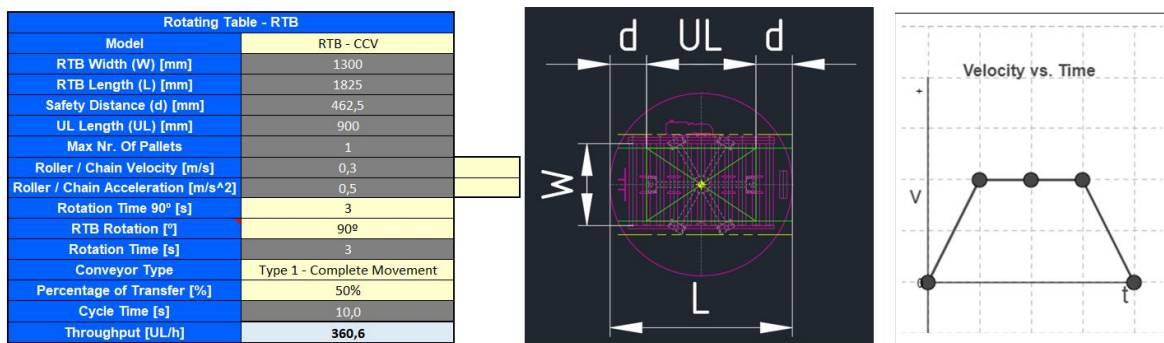


Figura 34. Finalização Exemplo - Mesa Rotativa, RTB

Uma vez analisados todos os equipamentos presentes na ferramenta, dá-se por concluída a página de *Header*. Conforme terá sido mencionado no início deste subcapítulo, e tal como o próprio nome da folha indica, a página *System*, irá analisar sistemas e subsistemas de transportadores completos, com o objetivo final de calcular a cadência total desses mesmos sistemas. Para além disso, esta página será capaz de identificar o número máximo de paletes que esse sistema consegue suportar, bem como identificar pontos de estrangulamento em diferentes equipamentos.

Deste modo, a página *System* é inicialmente composta por um parâmetro de preenchimento do nome do sistema a ser analisado. Estes sistemas, conforme terá sido mencionado ao longo desta dissertação, podem ser sistemas de *Infeed*, *Outfeed*, entregas a transelevadores, zonas de *picking*, *buffers*, entre outros. Ao lado deste ponto encontram-se três células de análise de resultados:

- Número máximo de Paletes;
- Maior tempo de ciclo;
- Cadência do Sistema;

Por sua vez, como se pode verificar na Figura 35, ao lado destes parâmetros encontram-se dois botões, cujos propósitos irão ser explicados no decorrer deste subcapítulo.

Subsystem Title	Total Nr. Of Pallets	Cycle Time [s]	Throughput [UL/h]

Figura 35. Título e Análise de Resultados da Página *System*

Uma vez preenchido o título atribuído ao sistema, torna-se possível preencher a tabela com cada transportador que se encontra no sistema a analisar. Para que o preenchimento destes equipamentos seja realizado de forma correta, são considerados alguns dos parâmetros previamente preenchidos na página inicial. Estes parâmetros são preenchidos sequencialmente com o objetivo de evitar erros, tendo sempre em consideração a padronização dos processos da empresa acolhedora e a melhoria contínua.

Assim, o primeiro parâmetro a preencher é o equipamento que terá sido escolhido. Este parâmetro apresenta-se como *Conveyor* e demonstra a seguinte lista suspensa (Figura 36).

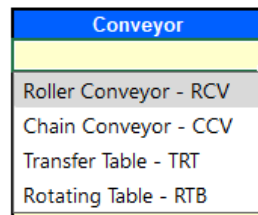


Figura 36. Parâmetro Equipamento

De seguida, o fator que deve ser preenchido é referente ao movimento que o equipamento irá realizar, *Type*, quando se comporta como um transportador normal, conforme poderá ser observado na Figura 37.

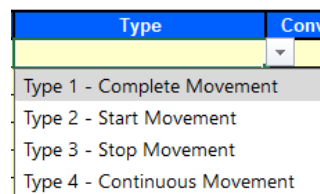


Figura 37. Parâmetro Tipo de Movimento

O ponto seguinte, referente ao modelo e/ou ao comprimento do transportador, só se encontra desbloqueado assim que é definido qual o equipamento que se irá especificar naquela linha. Este ponto apresenta uma lista suspensa dinâmica, que varia conforme o equipamento escolhido. Para o transportador de rolos irá aparecer uma lista dinâmica de comprimentos, que irá variar com base no passo do transportador definido na página anterior da ferramenta. Para transportadores de correntes irá aparecer a lista suspensa de comprimentos, enquanto para as mesas de transferência e mesas rotativas, irão aparecer os respetivos modelos, uma vez que esses modelos têm comprimentos pré-definidos associados (Figura 38).

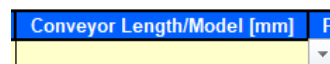


Figura 38. Parâmetro Modelo/ Comprimento

O seguinte fator, associado à percentagem de transferência, *Percentage of Transfer*, %, encontra-se acompanhado de uma formatação dinâmica, onde apenas passará a ser uma célula amarelo-clara e, passível de ser preenchida pelo utilizador, quando terá sido escolhido um modelo de mesa de transferência ou de mesa rotativa, conforme poderá ser verificado na Figura 39.

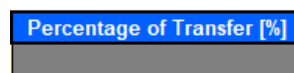


Figura 39. Parâmetro Percentagem de Transferência

Aplicando a mesma formatação, o seguinte ponto, ângulo de rotação, *Rotation Angle*, °, apenas se encontra desbloqueado quando o equipamento escolhido se tratar de uma mesa rotativa (Figura 40).

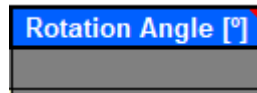


Figura 40. Parâmetro
Ângulo de Rotação

Por último, os seguintes parâmetros a serem preenchidos, são em tudo semelhantes às tabelas de tempos de operação extra dos equipamentos. Estes tempos, conforme terá sido mencionado anteriormente, encontram-se associados ao equipamento definido no primeiro ponto e à utilização que o sistema a considerar terá na totalidade da solução. Estes parâmetros são passíveis de ser observados na Figura 41.

Communication and Dead Times [s]	Infeed Times [s]	Outfeed Times [s]	Positioning Times [s]	Pallet Check Times [s]	Picking Times [s]

Figura 41. Parâmetros Tempos de Operação Extra

Por último, a tabela contém uma lista de resultados individuais, que permite aos utilizadores identificar pontos de estrangulamento no sistema referentes a equipamentos e à posição dos mesmos no *layout*, permitindo saber as principais zonas cruciais que deverão ser alteradas de modo a otimizar a solução. Estes resultados indicam o tempo total de operações extra, o número máximo de paletes que cabe no equipamento definido, o tempo de ciclo do mesmo e, por fim, a cadência (Figura 42).

Total Time [s]	Max. Nr of Pallets	Cycle Time [s]	Throughput [UL/h]

Figura 42. Parâmetros Resultados Individuais

Uma vez preenchidos os vários equipamentos do sistema, o utilizador necessita apenas de premir o botão de Cálculo de Cadência, *Calculate Throughput*, de forma a obter os resultados individuais e coletivos do sistema em questão (Figura 43).



Figura 43. Botão de Cálculo de
Cadência

Caso queira adicionar o sistema à página de *Total*, o utilizador deve premir o botão de gerar uma nova folha, *Generate New Sheet*, onde uma caixa de texto irá averiguar se quer guardar o seu progresso ou simplesmente limpar a folha.



Figura 44. Botão de Gerar Nova
Página

Quando o sistema é guardado, a folha *System* é limpa para que se torne possível analisar um novo sistema. No entanto os seguintes parâmetros são adicionados à página *Total* (Figura 45):

- Nome do Sistema;
- Número máximo de Paletes;
- Cadência do Sistema;

Subsystem	Max Nr. Of Pallets [UL]	Maximum Throughput [UL/h]

Figura 45. Parâmetros Página Total

Por sua vez, irá ser gerada uma folha de lista de equipamentos do sistema em análise, onde estarão preenchidos os seguintes parâmetros individuais acerca de cada equipamento (Figura 46):

- Equipamento;
- Tipo de Movimento;
- Comprimento e/ou Modelo;
- Cadência.

Conveyor	Type	Conveyor Length/Model [mm]	Throughput [UL/h]

Figura 46. Parâmetros Página de Lista de Equipamentos

Por fim, à medida que este processo é repetido, irão ser adicionas as cadências de cada sistema ou subsistema à página de *Total*, onde se encontrará presente, de forma semelhante à página *System*, várias células de análise de resultados que irão permitir analisar qual dos sistemas presentes em toda a solução é o ponto de estrangulamento, que irá ditar a cadência total da solução desenhada. Estes parâmetros de análises de resultados, podem ser verificados na Figura 47.

Total Nr. Of Pallets [UL]	System Throughput [UL/h]

Figura 47. Parâmetros Análise de Resultados da Página Total

Com o principal objetivo de facilitar a visualização, apresentação e entendimento dos processos da ferramenta e o funcionamento da mesma, tem vindo a ser construído um exemplo prático, desde o início deste subcapítulo. Aproveitando os conceitos e parâmetros definidos acerca da carga e dos equipamentos na página *Header*, é possível, prosseguir com o exemplo que irá determinar a utilização das páginas *System* e *Total*.

Assim, com o auxílio do *software AutoCAD* e com a vasta livreria de equipamentos *standard* da empresa acolhedora, tornou-se possível desenhar um sistema exemplo, conforme se poderá verificar na Figura 48, que irá ser analisado pela ferramenta em questão.

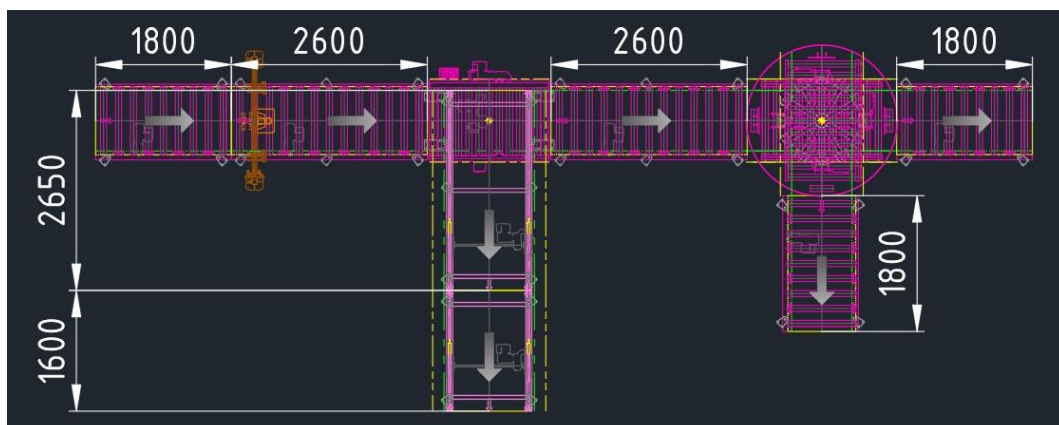


Figura 48. Sistema Exemplo

Deste modo, uma vez que se encontram preenchidas as medidas de cada equipamento, torna-se possível preencher a página *System* da seguinte maneira (Figura 49).

Conveyor	Type	Conveyor Length/Model [mm]	Percentage of Transfer [%]	Rotation Angle [°]	Communication and Dead Times [s]	Infeed Times [s]	Outfeed Times [s]	Positioning Times [s]	Pallet Check Times [s]	Picking Times [s]
Roller Conveyor - RCV	Type 1 - Complete Movement	1800			1,00	10,00				
Roller Conveyor - RCV	Type 1 - Complete Movement	2600			1,00			1,00	1,00	
Transfer Table - TRT	Type 2 - Start Movement	TRT-T2	10%		1,00					
Roller Conveyor - RCV	Type 4 - Continuous Movement	2600								
Rotating Table - RTB	Type 4 - Continuous Movement	RTB - RCV	50%	90°	1,00					
Roller Conveyor - RCV	Type 3 - Stop Movement	1800					10,00			

Figura 49. Preenchimento System Parte 1

Uma vez que este sistema não aparenta ser um sistema simples fechado ou em *loop*, as secções verticais onde existe transferência, terão de ser analisadas individualmente.

Deste modo, após ser premido o botão de calcular a cadência, é possível analisar os resultados individuais, na Figura 50, e os coletivos, presentes na Figura 51.

Total Time [s]	Max. Nr. of Pallets	Cycle Time [s]	Throughput [UL/h]
11,0	1	17,60	204,5
3,0	1	12,27	293,5
1,0	1	7,19	500,6
0,0	1	8,67	415,4
1,0	1	11,27	319,5
10,0	1	16,30	220,9

Figura 50. Análise dos Resultados Individuais

Subsystem Title	Total Nr. Of Pallets	Cycle Time [s]	Throughput [UL/h]
Exemplo Pt.1	6	17,60	204

Figura 51. Análise dos Resultados Coletivos

Por sua vez, após ser premido o botão de gerar nova folha, irá ser gerada a seguinte página de lista de equipamentos (Figura 52 e Figura 53).

Equipment List Exemplo Pt.1

Figura 52. Título Folha Gerada

Exemplo Pt.1			
Conveyor	Type	Conveyor Length/Model [mm]	Throughput [UL/h]
Roller Conveyor - RCV	Type 1 - Complete Movement	1800	204,5
Roller Conveyor - RCV	Type 1 - Complete Movement	2600	293,5
Transfer Table - TRT	Type 2 - Start Movement	TRT-T2	500,6
Roller Conveyor - RCV	Type 4 - Continuous Movement	2600	415,4
Rotating Table - RTB	Type 4 - Continuous Movement	RTB - RCV	319,5
Roller Conveyor - RCV	Type 3 - Stop Movement	1800	220,9

Figura 53. Lista de Equipamentos - Exemplo Parte 1

É possível repetir este processo para as restantes secções verticais do sistema em análise. Estas secções irão ter as suas próprias listas de equipamentos e irão, à semelhança da primeira parte do exemplo, ser adicionadas à página *Total* (Figura 54).

Total Nr. Of Pallets [UL]	System Throughput [UL/h]
10	204

Subsystem	Max Nr. Of Pallets [UL]	Maximum Throughput [UL/h]
Exemplo Pt.1	6	204
Exemplo Pt.2	3	225
Exemplo Pt.3	1	216

Figura 54. Análise de Resultados Total

Deste modo, é possível observar que o ponto de estrangulamento se encontra presente na primeira parte do exemplo, mais precisamente, no primeiro transportador. O tempo de ciclo, associado aos tempos extra de operação tornam-se superiores aos tempos da mesa de transferência e da mesa rotativa, algo que é bastante incomum de se presenciar. Porém, a mesa de transferência encontrava-se presente como método de rejeição de paletes, caso estas não fossem aprovadas no controlo dimensional e de peso da paleta, enquanto a mesa rotativa, apesar de realizar transferência 50% das vezes, quando agia como um transportador normal fazia uso do movimento Tipo 4 – Movimento Uniforme.

Assim, é possível tirar deste exemplo uma de muitas possíveis conclusões. Esta conclusão dita que por muito que se considerem todos os tempos extra e por muito que os transportadores sejam o mais eficiente possíveis, é impossível eliminar a presença humana neste tipo de sistemas, que leva, em muitos casos, a ineficiências e a diminuições nas possíveis cadências do sistema. Continuam a existir, no entanto vários fatores mecânicos que diferem de equipamento para equipamento, que causam também certos pontos de estrangulamento dentro destas soluções.

Por fim, conclui-se que a totalidade do sistema consegue movimentar 204 paletes por hora, sendo que o sistema consegue realizar um *buffer* de aproximadamente 10 paletes.

Uma vez concluída a ferramenta de cálculo de cadências em transportadores de paletes, procedeu-se à implementação da mesma na empresa acolhedora. Efetivamente, a ferramenta foi adicionada à livreria da empresa, onde se encontra de momento acessível a todos os colaboradores da equipa de *Sales e Solution Design*. Por fim, de modo a capacitar estes colaboradores para a utilização desta ferramenta, foram agendadas e posteriormente realizadas múltiplas sessões de formação, bem como de esclarecimento de dúvidas. Para além disso, conforme terá sido mencionado anteriormente, a empresa promove uma cultura de comunicação e de melhoria contínua, pelo que todas as possíveis correções, propostas de melhoria e futuras iterações da ferramenta serão discutidas em reuniões agendadas para o propósito.

3.4. Exemplo Prático com um Software de Simulação de Sistemas

Com o objetivo de validar a ferramenta, procurou-se utilizar um software de simulação, que permita validar os tempos de ciclo e as cadências dos diferentes equipamentos e modelos, enquanto estes efetuam diferentes movimentos.

Assim, e com o propósito de simplificar e direcionar a vasta e possível aplicação de software de simulação, bem como de simplificar os exemplos fornecidos, optou-se por realizar uma validação individual dos equipamentos, uma vez que esta validação, irá fundamentar as cadências obtidas na ferramenta para sistemas completos e soluções inteiras. Efetivamente, a composição da ferramenta tem sempre por base uma verificação individual dos equipamentos, identificando os que serão considerados gargalos para o sistema. Estes gargalos irão definir a cadência dos sistemas e das soluções, pelo que se comprova que estas verificações individuais, apesar de mais simples do que sistemas completos analisados extensivamente, permitirão validar a precisão e exatidão da ferramenta, bem como a aplicabilidade da norma de suporte, VDI 3978, à ferramenta e a situações de contexto real.

A validação e verificação empírica da ferramenta terá sido uma vantagem enorme no que toca à aprovação e validação da mesma para uso em contexto real, porém, o seu conteúdo e resultados

não podem ser divulgados para a presente dissertação, uma vez que a partilha de informações sensíveis acerca dos clientes e das soluções implementadas pela empresa acolhedora não é permitida. Por este motivo, como método adicional de análise, verificação de resultados e validação da ferramenta, recorreu-se à utilização de software de simulação, como o *Flexsim*, uma vez que são uma abordagem comumente utilizada.

O software *Flexsim* apenas dispõe de transportadores em reta ou em curva, não estando presentes mesas de transferência ou mesas rotativas. Por esta razão, estes equipamentos irão ser simplificados e analisados através de transportadores de rolos e correntes, tendo em consideração o seu funcionamento e comportamento básico de transportadores.

Deste modo, com o objetivo de simplificar e uniformizar os exemplos fornecidos, é então possível analisar, através do *Flexsim*, os transportadores e carga ilustrados no subcapítulo anterior.

À semelhança da carga da Figura 17 e do transportador de rolos da Figura 23, torna-se possível, através do *Flexsim*, simular o seguinte sistema de transportador de rolos, presente na Figura 55.

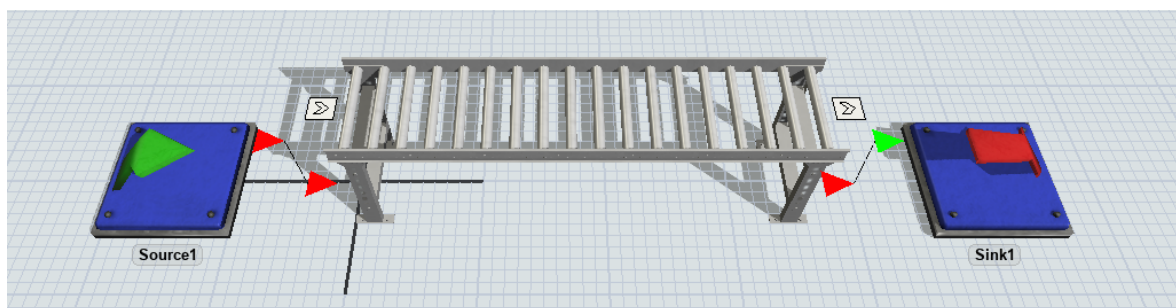


Figura 55. Simulação Flexsim - Transportador de Rolos, RCV

Este sistema, como se verifica na Figura 56, apresenta as seguintes características de transporte definidas.

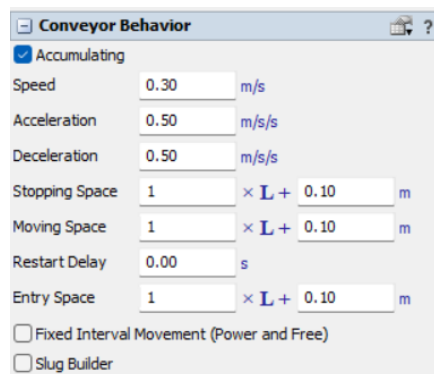


Figura 56. Simulação Flexsim - Características Transportador Rolos

A simulação, realizada através de uma análise temporal, com duração de uma hora, apresenta os seguintes resultados no que toca à cadência – 769 paletes/hora, ao tempo de ciclo – 12 s, e ao número médio de paletes em cima do transportador – 2,57 paletes (Figura 57).

Statistics				
State conveying				
Throughput				
Input		Output		
772.00		769.00		
Content				
Curr	Min	Max	Avg	
3.00	0.00	3.00	2.57	
Staytime				
Min	Max		Avg	
12.00	12.00		12.00	

Figura 57. Simulação Flexsim - Resultados Transportador Rolos

Por sua vez, para as mesmas características de carga e para o exemplo da Figura 26, simulou-se o seguinte transportador de correntes, presente na Figura 58.

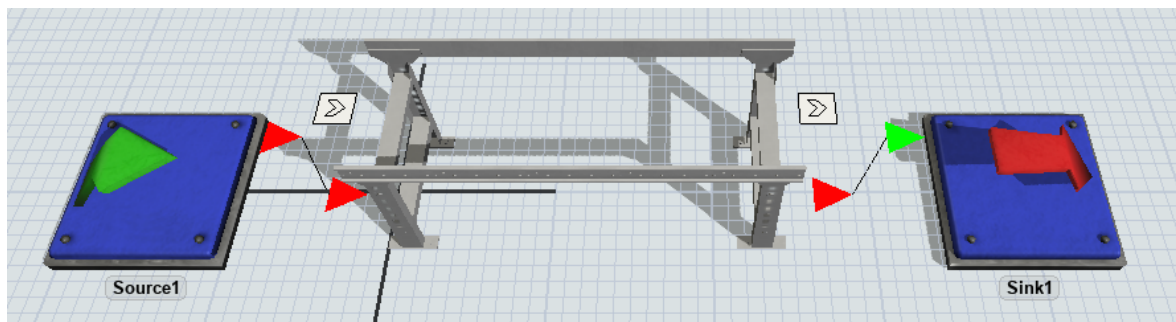


Figura 58. Simulação Flexsim - Transportador de Correntes, CCV

Para as mesmas condições de transporte obtidas na Figura 56 e à semelhança do transportador de rolos, a simulação realizada apresenta resultados de cadência – 1078 paletes/hora, tempo de ciclo – 8,17 s e o número médio de paletes em cima do transportador – 2,45, como se pode confirmar pela análise da Figura 59.

Statistics				
State conveying				
Throughput				
Input		Output		
1080.00		1078.00		
Content				
Curr	Min	Max	Avg	
2.00	0.00	3.00	2.45	
Staytime				
Min	Max		Avg	
8.17	8.17		8.17	

Figura 59. Simulação Flexsim – Resultados Transportador de Correntes

3.5. Avaliação dos Resultados

Após a implementação da ferramenta de cálculo de cadências em transportadores de paletes na empresa acolhedora, é importante realizar uma avaliação dos resultados alcançados. Ao logo deste projeto, verificou-se uma melhoria dos processos de desenvolvimento, orçamentação e entrega de soluções e propostas contratuais, com a introdução da ferramenta na livreria da empresa.

Efetivamente, observou-se uma automatização do cálculo de cadências em transportadores de paletes, bem como uma melhoria geral, por parte da equipa de *Solution Design*, na compreensão da quantidade de equipamentos necessários durante o desenvolvimento de soluções. Por sua vez, a *Körber Supply Chain PT*, beneficiou de uma padronização dos seus processos no cálculo de cadências e uma melhoria na sua livreria de ferramentas associada ao portfólio de equipamentos da empresa.

Adicionalmente, uma abordagem prática a projetos internos, atuais e previamente realizados, permitiu verificar que os resultados obtidos e a eficácia da implementação da ferramenta podem variar com base no tamanho e complexidade dos mesmos. Neste contexto, é possível observar que os ganhos e benefícios associados à utilização da ferramenta, tendem a ser mais substanciais quando aplicados a projetos de menor escala, enquanto se tornam menos notáveis em projetos de maior envergadura. Em projetos de menor escala, por natureza, estão associados recursos limitados, soluções mais pequenas e um menor número de partes interessadas, que geralmente possuem um âmbito mais definido. Os benefícios da ferramenta são mais evidentes e rápidos, permitindo à equipa um tempo de adaptação mais curto, o que acelera a obtenção de resultados positivos.

Por outro lado, em projetos de maior escala, a complexidade dos mesmos tem tendência a aumentar, tornando a implementação de ferramentas um desafio, uma vez que requer uma análise mais profunda das necessidades específicas de cada fase do projeto, bem como um alinhamento entre múltiplos intervenientes.

No entanto, é importante salientar que a implementação de ferramentas em projetos de maior escala não é desaconselhada. Pelo contrário, quando devidamente planeada e executada, pode levar a melhorias substanciais na gestão e no dimensionamento de projetos complexos. No entanto, é crucial que a empresa esteja preparada para enfrentar desafios adicionais, tais como a necessidade de uma estratégia de implementação mais detalhada e um acompanhamento rigoroso dos processos e da solução com o cliente.

A utilização de um *software* de simulação, como o *Flexsim*, desempenhou um papel fundamental na validação da ferramenta, permitindo a verificação de vários equipamentos. O presente estudo consistiu na elaboração de modelos detalhados de processos e equipamentos, incluindo a representação precisa dos mesmos para fins de análise. Cada equipamento foi configurado com parâmetros realistas, tal como definidos na ferramenta, com base em exemplos concretos. Desta forma, com o intuito de avaliar e comparar o desempenho dos equipamentos num contexto real, foram realizados testes de comparação com a ferramenta.

Neste contexto, ao comparar os resultados obtidos na Figura 57 com o exemplo ilustrado na Figura 23, observa-se que tempo de ciclo permanece constante, enquanto as cadências divergem. Esta discrepância reflete-se num desvio percentual de 2,53%, indicando um aumento na capacidade efetiva do transportador, dado que o valor obtido na simulação foi superior ao da ferramenta.

Por sua vez, os resultados representados na Figura 59, quando comparados com o exemplo demonstrado na Figura 26, evidenciam um tempo de ciclo relativamente similar, embora haja novamente uma variação na cadência obtida. Esta diferença manifesta-se através de um desvio percentual de 4,06%, o que aponta para um aumento da capacidade efetiva do transportador, como já observado anteriormente.

Esta análise comparativa permitiu constatar que a discrepância entre os resultados da simulação e da ferramenta se revela insignificante, uma vez que os valores apresentados permanecem dentro de margens aceitáveis e próximas da realidade.

4. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

4.1. Conclusões

No decorrer desta dissertação, foi desenvolvida e apresentada uma ferramenta de cálculo de cadências em transportadores de paletes, concebida para auxiliar a equipa de *Solution Design* da *Körber Supply Chain* PT na otimização dos seus processos de desenvolvimento, orçamentação e entrega de soluções.

A ferramenta criada tem por base a norma VDI 3978 e visa automatizar o cálculo de cadências em transportadores de paletes, fornecendo uma abordagem sistemática e uniforme para determinar o desempenho desses equipamentos em diferentes cenários operacionais. A sua implementação na empresa acolhedora resultou em melhorias significativas nos processos de desenvolvimento de soluções, bem como na compreensão da quantidade de equipamentos necessários em diferentes projetos.

Um dos principais contributos desta ferramenta reside na sua capacidade de identificar gargalos em sistemas de transportadores, permitindo à equipa de *Solution Design* tomar decisões informadas sobre a configuração dos equipamentos. Esta funcionalidade tem potencial para melhorar substancialmente a eficiência e gestão dos projetos, especialmente em situações de menor escala, onde os recursos são mais limitados e os benefícios da ferramenta se tornam mais evidentes, ou, em situações mais complexas, onde é necessário um alinhamento constante entre vários intervenientes, bem como um planeamento de implementação estratégica detalhado.

Para além disso, a validação empírica desta ferramenta, utilizando o software de simulação *Flexsim*, permitiu comparar os resultados obtidos com os da ferramenta em diferentes cenários operacionais. Os resultados demonstraram uma consistência notável, com discrepâncias não significativas nas cadências, o que reforça a eficácia da ferramenta na previsão do desempenho de sistemas de transportadores de paletes.

Assim, a presente dissertação apresentou uma ferramenta valiosa para a *Körber Supply Chain* PT, contribuindo para uma abordagem mais eficiente, uniforme e desprovida de erros, no cálculo de cadências em transportadores de paletes. O seu potencial para melhorar os processos de desenvolvimento e orçamentação de soluções, bem como a sua capacidade de identificar gargalos no sistema, posicionam esta ferramenta como uma mais-valia que deve ser utilizada durante o desenvolvimento de toda a solução, de forma a obter um acompanhamento eficaz e uma validação final, em projetos desta natureza.

Por fim, conclui-se que este projeto cumpriu com o seu objetivo de desenvolver e implementar uma ferramenta prática e eficaz para a melhoria dos processos de cálculo de cadências em transportadores de paletes, com potencial para melhorar significativamente a eficiência operacional da empresa acolhedora.

4.2. Trabalhos Futuros

À medida que esta ferramenta de cálculo de cadências em transportadores de paletes se estabelece como uma valiosa adição às práticas da *Körber Supply Chain PT*, é fundamental considerar oportunidades de desenvolvimento e aperfeiçoamento para o futuro.

Para atender às necessidades do grupo *Körber*, que se encontra presente em todo o mundo, a implementação de uma lista suspensa que altere o idioma da ferramenta é algo a considerar. Isto garantiria que a ferramenta seja acessível e compreensível por utilizadores de diversas origens e regiões, facilitando a colaboração e a eficácia das análises num ambiente global.

Por sua vez, uma expansão significativa da ferramenta poderia envolver a inclusão de novos equipamentos específicos, como transportadores próprios de *Infeed* e *Outfeed*, entre outros. Isto possibilitaria uma análise mais detalhada e abrangente destes sistemas, aprofundando a compreensão dos mesmos.

Para além disso, a evolução da ferramenta poderá passar por uma simplificação na análise dos sistemas de transporte que incluem mesas de transferência ou mesas rotativas. O objetivo principal seria eliminar a necessidade de dividir manualmente o sistema em partes separadas, que irão ser analisadas, sempre que esses equipamentos se encontram presentes.

Efetivamente, esta simplificação poderia também ocorrer ao permitir que os utilizadores importem diretamente a lista de equipamentos para análise, através de software como o *AutoCAD* ou *CAD2XL*, e após a análise, exportem a lista de equipamentos de cada sistema diretamente para a ferramenta de orçamentação.

A introdução de novos parâmetros, à medida que se simplificam outros, é algo que pode passar pelo processo de evolução da ferramenta, tornando a sua configuração mais precisa e intuitiva.

Finalmente, é crucial continuar a aprimorar a ferramenta para atender às eventuais normas complementares que possam ser adquiridas futuramente pela empresa acolhedora. Estas normas têm o potencial de introduzir modificações ou adições nos cálculos e diretrizes a serem seguidas, garantindo que a ferramenta permaneça atualizada e alinhada com as melhores práticas do setor.

A evolução contínua da ferramenta de cálculo de cadências em transportadores de paletes representa um compromisso de qualidade e melhoria contínua das práticas da equipa *de Solution Design* e da *Körber Supply Chain PT*, assegurando uma adaptação eficiente às necessidades emergentes da Indústria.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ashayeri, J., & Gelders, L. F. (1985). Invited Review Warehouse design optimization. *European Journal of Operational Research*, 21, 285–294.
- Atieh, A. M., Kaylani, H., Al-Abdallat, Y., Qaderi, A., Ghoul, L., Jaradat, L., & Hdairis, I. (2016). *Performance Improvement of Inventory Management System Processes by an Automated Warehouse Management System*. 41. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.12.122>
- Ballou, R. H. (2006). *Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos/Logística Empresarial*. Bookman.
- Barbosa, J. P. L. (2009). *Armazém de expedição: Diagnóstico e Outsourcing Distebe, SA*.
- Barreto, F. M. C. (2021). *Desenvolvimento de uma estratégia de automação num operador logístico*.
- Baskerville, R. L., & Wood-Harper, A. T. (1996). *A Critical Perspective On Action Research As A Method for information Systems Research*.
- Bertaglia, P. R. (2016). *Logística e Gerenciamento da Cadeia de Abastecimento (3ª)*. Editora Saraiva. https://books.google.pt/books?hl=pt-PT&lr=&id=HKJnDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PT2&dq=cadeia+de+abastecimento+e+log%C3%ADstica&ots=LzGvfuW8gS&sig=x_QeAjbWSzTcbLqwyXn_dCrA9E&redir_esc=y#v=onepage&q=cadeia%20de%20abastecimento%20e%20log%C3%ADstica&f=false
- Carvalho, J. P. P. (2013). *Logística E Gestão Da Cadeia De Abastecimento*.
- Cormier, G., & Gunn, E. A. (1996a). On coordinating warehouse sizing, leasing and inventory policy. *IIE Transactions (Institute of Industrial Engineers)*, 28(2), 149–154. <https://doi.org/10.1080/07408179608966260>
- Cormier, G., & Gunn, E. A. (1996b). Simple Models and Insights for Warehouse Sizing. *Journal of the Operational Research Society*, 47. www.jstor.org
- Cunha, F. (2022, July 1). *Sistemas e Tipos de Armazenagem*. <https://wms-tech.com.br/blog/sistemas-e-tipos-de-armazenagem/>
- DeSutter, D., & Gao, S. (2021). *The Secret Recipe for Modeling Warehouse Throughput*. Massachusetts Institute Of Technology.
- Ekren, B. Y., & Heragu, S. S. (2010). Simulation-based regression analysis for the rack configuration of an autonomous vehicle storage and retrieval system. *International Journal of Production Research*, 48(21), 6257–6274. <https://doi.org/10.1080/00207540903321665>
- Guedes, F. M. (2023, July). *Breve Resumo Sobre os Fundamentos da Logística*. Gestão Da Cadeia de Suprimentos. <https://www.passeidireto.com/arquivo/4261911/breve-resumo-sobre-os-fundamentos-da-logistica>
- Geraldes, A. de S. F. (2019). *Aplicação de Lean Manufacturing no desenho e montagem de transelevadores*.
- Gu, J. (2005). *The Forward Reserve Warehouse Sizing And Dimensioning Problem*. School of Industrial and Systems Engineering.
- Gu, J., Goetschalckx, M., & McGinnis, L. F. (2010). Research on warehouse design and performance evaluation: A comprehensive review. *European Journal of Operational Research*, 203(3), 539–549. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2009.07.031>
- Guedes, A. P., Arantes, A. J. M., Martins, A. L., Póvoa, A. P. B., Luís, C. A., Dias, E. B., Dias, J. C. Q., Menezes, J. C. R. de, Carvalho, J. C. de, Ferreira, L. M. D. F., Carvalho, M. do S., Oliveira, R. C., Azevedo, S. G., & Ramos, T. (2017). *Logística e Gestão da Cadeia de Abastecimento (M. Robalo, Ed.; 2nd ed.)*. Edições Sílabo, Lda. www.silabo.pt
- Junior, J. Y. S., & Corrêa, H. L. (2006). *Cadeia De Abastecimento: Gestão Do Estoque Pelo Distribuidor*.

- Lerher, T., Borovinsek, M., Ficko, M., & Palcic, I. (2017). Parametric study of throughput performance in SBS/RS based on simulation. In *International Journal of Simulation Modelling* (Vol. 16, Issue 1). Vienna University of Technology. [https://doi.org/10.2507/IJSIMM16\(1\)8.372](https://doi.org/10.2507/IJSIMM16(1)8.372)
- Machado, A., & Sellitto, M. A. (2012). *Benefícios Da Implantação e Utilização De Um Sistema De Gerenciamento de Armazéns Em Um Centro de Distribuição* (Vol. 12, Issue 1).
- Makkar, S., Devi, G. N. R., & Solanki, V. K. (2020). Applications of Machine Learning Techniques in Supply Chain Optimization. In *ICICCT 2019 – System Reliability, Quality Control, Safety, Maintenance and Management* (pp. 861–869). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-13-8461-5_98
- Marchet, G., Melacini, M., Perotti, S., & Tappia, E. (2013). Development of a framework for the design of autonomous vehicle storage and retrieval systems. *International Journal of Production Research*, 51(14), 4365–4387. <https://doi.org/10.1080/00207543.2013.778430>
- Masters, J. (1995). *The History Of Action Research*. <http://www.behs.cchs.usyd.edu.au/arow/Reader/rmasters.htm>
- McGuire, P. M. (2009). *Conveyors Application, Selection, and Integration* (A. B. Badiru, Ed.). CRC Press.
- Mecalux. (2022). *Manual de Armazenagem*. <https://www.mecalux.pt/manual-de-armazenagem/armazem>
- Melo, I. H. B. da S., & Oliveira, M. V. de S. S. (2006). *Automação da armazenagem: o caso da Multi Distribuidora*.
- Min, H. (2006). The applications of warehouse management systems: an exploratory study. *International Journal of Logistics Research and Applications*. <https://doi.org/10.1080/13675560600661870>
- Ning, Z., Lei, L., Saipeng, Z., & Lodewijks, G. (2016). An efficient simulation model for rack design in multi-elevator shuttle-based storage and retrieval system. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 67, 100–116. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2016.03.007>
- PalletOnline. (2021, November 9). *The Ultimate Pallet Packing Guide*. <https://Palletonline.Co.Uk/Blog/Ultimate-Pallet-Packing-Guide>.
- Paoleschi, B. (2014). *Estoques e Armazenagem* (1ª). Érica Ltda. https://books.google.pt/books?hl=pt-PT&lr=&id=HYdiDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PT4&dq=tipos+de+armazéns&ots=416MMisN4g&sig=yqARMyxaWuxxjtFPKwsEHXHS4M&redir_esc=y#v=onepage&q=tipos%20de%20armazéns&f=false
- Pereira, G. F. M. (2015). *Planeamento e Implementação De Ações De Melhoria Num Armazém De Componentes*.
- Pereira, J. C. V. (2011). *Cálculo de Ciclos de Trabalho em Sistemas Automáticos de Armazenamento*.
- Raca, D., Zahran, A. H., Sreenan, C. J., Sinha, R. K., Halepovic, E., Jana, R., & Gopalakrishnan, V. (2020). On Leveraging Machine and Deep Learning for Throughput Prediction in Cellular Networks: Design, Performance, and Challenges. *IEEE Communications Magazine*, 58(3), 11–17. <https://doi.org/10.1109/MCOM.001.1900394>
- Ramaa, A., Subramanya, K. N., & Rangaswamy, T. M. (2012). Impact of Warehouse Management System in a Supply Chain. In *International Journal of Computer Applications* (Vol. 54, Issue 1).
- Robson, M. (2016). Action research: principles and practice. *Action Learning: Research and Practice*, 13(3), 283–285. <https://doi.org/10.1080/14767333.2016.1220174>

- Rodrigues, E. F., Fernandes, A. R., Formigoni, A., Monteiro, R., & Campos, I. P. de A. (2011). *Logística Integrada Aplicada a um Centro de Distribuição: Comparativo do Desempenho do Processo de Armazenagem Após a Implementação de um Sistema de Gerenciamento de Armazém (wms)*.
- Salah, B., Alnahhal, M., & Ahmad, R. (2022). Automated stacker cranes: A two-step storage reallocation process for enhanced service efficiency. *Processes*. <https://doi.org/10.3390/pr10010002>
- Sell, A. R., Hamann, E., & Nolasco, L. E. (2013). *Projeto e Implementação de um Sistema Automático de Armazenamento: Transelevador Didático*.
- Shmueli, G., Bruce, P. C., Yahav, I., Patel, N. R., & Lichtendahl Jr. Kenneth C. (2017). *Data Mining for Business Analytics: Concepts, Techniques, and Applications in R* (1st ed.). Wiley.
- Shukla, R. (2014). *Machine Learning Ecosystem: Implications for business strategy centered on machine learning*.
- Stadtler, H. (2008). *Supply Chain Management-An Overview*.
- Verein Deutscher Ingenieure. (2018). *VDI 3978 - 2018 Throughput and calculation of cycle time of piece good conveyor systems*.
- Volta, A. A. N. da. (2020). *Melhoria Do Processo e Fluxo De Trabalho Na Produção De Transportadores De Paletes*.
- Walter, M. (2009). *Participatory Action Research*.
- Williams, E. J., & Gevaert, A. (1997). *Pallet Optimization And Throughput Estimation Via Simulation*.
- Williams, E. J., & Khoubyari, S. (1996). Modeling Issues In a Shipping System. *Winter Simulation Conference*.
- Zaerpour, N., Volbeda, R., & Gharehgozli, A. (2019). *Automated or Manual Storage Systems: Do Throughput and Storage Capacity Matter?*
- Zou, B., Xu, X., Gong, Y., & De Koster, R. (2016). Modeling parallel movement of lifts and vehicles in tier-captive vehicle-based warehousing systems. *European Journal of Operational Research*, 254(1), 51–67. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.03.039>