

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO



**FEUP**

# **Cálculo de Ciclos de Trabalho em Sistemas Automáticos de Armazenamento**

**João Couto Veloso Pereira**

Tese submetida no âmbito do  
Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores  
Major de Automação

Orientador: Américo Lopes de Azevedo (Prof. Dr.)

Fevereiro de 2011



# **Cálculo de Ciclos de Trabalho em Sistemas Automáticos de Armazenamento**

**João Couto Veloso Pereira**

Tese submetida no âmbito do  
Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores  
Major de Automação

Aprovado em provas públicas pelo Júri:

Presidente: Maria do Rosário Pinho Professor Associado

---

Arguente: Luis Miguel da Silva Dias Professor

---

23 de Fevereiro de 2011



# Resumo

A fase de concepção de um sistema automático de armazenagem constitui um trabalho complexo, devido à elevada interdependência das variáveis em jogo. Perante a realidade actual de forte concorrência na área de sistemas automáticos de armazenagem, a concepção de um sistema fiável e optimizado, deve ser sustentada, em um curto espaço de tempo, por resultados comprováveis. A apresentação de diversas configurações associadas a soluções tecnológicas viáveis, como por exemplo armazenagem em profundidade, combinação simultânea de sistemas de manipulação de carga, ou até estratégias de organização suportadas por sistemas de gestão de armazéns, é de importância determinante para encontrar um ponto de equilíbrio entre solução e o custo de investimento.

Este trabalho aborda a temática de ciclos de trabalho de armazéns automáticos, mais concretamente armazéns operados por transelevadores. Por sua vez existem inúmeras variantes para uma solução de armazém automático com transelevador, para a qual uma abordagem de tempos de ciclo com recurso a modelos analíticos, apresenta ser uma alternativa económica no planeamento destes armazéns.

A validação de resultados dos modelos analíticos estudados e integrados numa plataforma de cálculo, foi suportada por modelos de simulação, respectivamente desenvolvidos em *Anylogic*. O recurso à simulação permite observar visualmente a evolução de ciclos de trabalho de um armazém automático e a respectiva performance.



# Abstract

The design phase of an automated S/R system, is a complex work due the high interdependence of variables. Given the current situation of strong competition in the area of automated S/R systems, the design of a reliable and optimized system must be sustained with reliable results with a very short *lead time*. The presentation of different configurations, associated with viable technological solutions such as deep storage, combination of multiple load handling devices, or even organization strategies embedded with a Warehouse Management System, is of major importance to find a balance between solution and the cost of investment.

This work addresses the issue of cycles times of automated warehouses, specifically warehouses operated by automated stacker-cranes. In turn there are numerous variants to a solution of automated warehouse with stacker crane, for which an approach to the cycle time using analytical models, has to be an economical alternative in the planning of these warehouses.

The validation of the studied analytic models and corresponding integration in a calculation platform, was supported by simulation models developed with *Anylogic* simulation software. The use of simulation allows to visually observe the progress of work cycles of an automated warehouse and their corresponding performance.





# Agradecimentos

À Ana pela paciência interminável e aos meus pais pelo apoio incansável.

João Pereira



# Conteúdo

<b>Resumo</b>	<b>i</b>
<b>Abstract</b>	<b>iii</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Contexto . . . . .	1
1.2 Problema . . . . .	2
1.2.1 Variáveis de índole técnica . . . . .	2
1.2.2 Variáveis de índole organizacional . . . . .	3
1.3 Objectivos . . . . .	4
1.4 Metodologia . . . . .	4
1.5 Estrutura da Dissertação . . . . .	5
<b>2 Sistemas Automáticos de Armazenamento</b>	<b>7</b>
2.1 Introdução a Sistemas de Armazenamento . . . . .	7
2.1.1 Serviços de um Armazém . . . . .	8
2.1.2 Funções básicas de sistemas de armazenamento . . . . .	11
2.1.3 Tipos de Armazéns . . . . .	13
2.2 Armazéns de Alta densidade - High-bay Warehouse (HBW) . . . . .	16
2.3 Sistemas automáticos de movimentação em armazéns . . . . .	19
2.3.1 Transelevadores . . . . .	21
2.3.2 Determinação de ciclos de trabalho e Directivas . . . . .	25
2.3.3 Armazéns com mudança de ala de transelevador . . . . .	26
2.4 Transelevadores com ponte de transferência . . . . .	26
<b>3 Ciclos de Trabalho e Estratégias de Armazenamento</b>	<b>29</b>
3.1 Performance de sistemas automáticos de armazenamento - Terminologia . . . . .	29
3.1.1 Ciclo Simples, Ciclo Combinado . . . . .	30
3.1.2 Tempo de ciclo médio de um ciclo simples . . . . .	35
3.1.3 Tempo de ciclo médio de um ciclo combinado . . . . .	41
3.1.4 Directivas para Cálculo de Tempos de Ciclo . . . . .	45
3.2 Modelos analíticos para cálculo de tempos de ciclo . . . . .	47
3.2.1 Configurações . . . . .	47
3.2.2 Cálculo de tempo de ciclos para sistemas automáticos de armazenagem . . . . .	48
3.2.3 Modelos para armazenamento em simples profundidade . . . . .	49
3.2.4 Modelos Analíticos para armazenamento em dupla profundidade . . . . .	49

3.3	Descrição Geral de Diferentes Estratégias . . . . .	51
3.3.1	Estratégias de Ocupação . . . . .	51
3.3.2	Estratégias de movimentação . . . . .	52
3.4	Princípios de Otimização . . . . .	53
3.4.1	Redução de tempos de ciclo . . . . .	53
<b>4</b>	<b>Modelos de Simulação para determinação de tempos de ciclo</b>	<b>55</b>
4.1	Sistema . . . . .	56
4.2	Modelação . . . . .	57
4.2.1	Parâmetros de Entrada . . . . .	57
4.2.2	Variáveis de Saída . . . . .	59
4.3	Simulação . . . . .	59
4.4	Métodos de Simulação . . . . .	62
4.5	Simulação de sistema automático de armazenamento . . . . .	64
4.5.1	Modelo de simulação de ala de simples profundidade . . . . .	65
4.5.2	Modelo de simulação de ala de dupla profundidade . . . . .	70
4.5.3	Modelo de Simulação de simples/dupla profundidade distribuído baseado em zonas . . . . .	74
4.5.4	Dados de Entrada, Animação, Dados de Saída . . . . .	76
4.6	Verificação e Validação de Modelo . . . . .	80
<b>5</b>	<b>Plataforma de Cálculo de ciclos de trabalho de armazéns automáticos</b>	<b>83</b>
5.1	Composição da plataforma de cálculo . . . . .	83
5.1.1	Rack Definition - Determinação de Espaço para armazém . . . . .	83
5.1.2	RackCoord - Determinação de tempos de ciclo utilizando VBA . . . . .	84
5.1.3	CT-Tools . . . . .	85
5.1.4	FEM 9.851 . . . . .	85
5.2	Avaliação de Resultados . . . . .	86
5.2.1	Configuração de ala simples profundidade . . . . .	86
5.2.2	Configuração de ala dupla profundidade . . . . .	86
5.2.3	Configuração por Zonas A e B . . . . .	87
<b>6</b>	<b>Conclusões e Desenvolvimentos Futuros</b>	<b>89</b>
6.1	Conclusões . . . . .	89
6.2	Desenvolvimentos futuros . . . . .	90
	<b>Referências</b>	<b>91</b>
	<b>A Figuras</b>	<b>93</b>

# Lista de Figuras

2.1	Conflito de Objectivos na Gestão de Armazéns . . . . .	10
2.2	Ligação de funções básicas de sistemas de armazenamento com fluxo de material orientado . . . . .	11
2.3	Armazenagem sobre piso . . . . .	13
2.4	Armazenagem por estante de gravidade . . . . .	13
2.5	Armazenagem por estante de canal . . . . .	14
2.6	Armazenagem por estante dinâmica . . . . .	15
2.7	Armazém Automático com ponte de transferência . . . . .	16
2.8	Armazém com mudança de ala de transelevador . . . . .	17
2.9	Armazém automático com um transelevador por ala zonas de entrada/saída separadas . . . . .	17
2.10	Sistematização de Sistemas de Armazenamento . . . . .	18
2.11	Sistemas de Transporte em Armazéns . . . . .	20
2.12	Transelevador Duplo Mastro, Mastro simples . . . . .	21
2.13	Transelevador . . . . .	22
2.14	Garfos Telescópicos . . . . .	23
2.15	Sistemas de extracção para extracção de cargas leves . . . . .	24
2.16	Transelevador com capacidade de mudança de ala . . . . .	26
2.17	Ponte de transferência . . . . .	27
3.1	Modelação de de ciclo de trabalho . . . . .	30
3.2	Ciclo Simples e Ciclo Combinado . . . . .	31
3.3	Sequência de Ciclo Simples de Armazenagem/Desarmazenagem . . . . .	32
3.4	Sequência de Ciclo Combinado . . . . .	32
3.5	Exemplos de movimentação de Transtocador/plataforma de elevação . . . . .	33
3.6	Isócrona com $t_z=t_x=const.$ para todas as posições de armazenamento na linha A-B-C . . . . .	34
3.7	Evolução do tempo de ciclo em x a), z b), y c) de um ciclo simples . . . . .	35
3.8	Característica Velocidade-tempo . . . . .	37
3.9	Divisão de Area: a) $\frac{v_x}{v_z}H \geq L$ b) $\frac{v_x}{v_z}H \leq L$ . . . . .	39
3.10	Evolução temporal de ciclo combinado . . . . .	44
3.11	Exemplos de Configurações de Armazenamento . . . . .	47
3.12	Redução de Tempos de Ciclo Recorrendo a vários Garfos . . . . .	47
3.13	Estratégias de Armazenamento . . . . .	51
4.1	Representação esquemática de um sistema . . . . .	56
4.2	Layout de Teste . . . . .	58

4.3	Parâmetros Técnicos . . . . .	59
4.4	Parâmetros de Operação . . . . .	60
4.5	Utilização de Simulação . . . . .	62
4.6	Simulação com programa WirthSIM . . . . .	63
4.7	Abordagem de Software de Simulação <i>AnyLogic</i> . . . . .	64
4.8	Processamento de Pedido de Operação . . . . .	66
4.9	Módulo Operação de Armazenamento simples profundidade . . . . .	66
4.10	Módulo Operação de Desarmazenamento simples profundidade . . . . .	66
4.11	Seleccção de operação . . . . .	67
4.12	Objecto - Store_1stDepth . . . . .	69
4.13	Módulo de Recursos . . . . .	69
4.14	Módulo Operação de Armazenamento dupla profundidade . . . . .	71
4.15	Módulo Operação de Desarmazenagem dupla profundidade . . . . .	72
4.16	Processamento de Pedido de Operação por Zona . . . . .	74
4.17	Seleccção de Operação baseado em Zonas . . . . .	75
4.18	Módulo Operação de armazenagem dupla profundidade baseado em zonas . . . . .	75
4.19	Módulo operação de desarmazenagem dupla profundidade baseado em zonas . . . . .	76
4.20	Parâmetros dinâmicos . . . . .	77
4.21	Parâmetros Estáticos . . . . .	77
4.22	Mapeamento de Posições e Coordenadas . . . . .	78
4.23	Mapeamento de Posições e Coordenadas . . . . .	78
4.24	Animação de Estante - Dupla Profundidade armazenamento por zona . . . . .	79
4.25	Ultimas posições acedidas . . . . .	79
4.26	Estado de Ala . . . . .	80
4.27	Estatísticas . . . . .	80
A.1	Rack Definition - Determinação de Espaço para armazém . . . . .	93
A.2	RackCoord - Determinação de tempos de ciclo utilizando VBA . . . . .	94
A.3	RackCoord - Tempo de viagem médio entre origem e posição aleatória na estante/ tempo de viagem médio entre duas posições na estante . . . . .	95
A.4	RackCoord - Tempo de ciclo para armazém dividido em zonas . . . . .	95
A.5	CT-Tools - Comparação entre Métodos de cálculo de tempos de ciclo . . . . .	96
A.6	FEM 9.851 - Folha de cálculo segundo norma FEM 9.851 . . . . .	97
A.7	Gráfico:Tempo de ciclo simples Simples Profundidade vs comprimento de ala . . . . .	98
A.8	Gráfico:Tempo de ciclo combinado vs comprimento de ala . . . . .	99
A.9	Gráfico:Tempo de ciclo simples Simples Profundidade vs velocidade . . . . .	102
A.10	Gráfico:Tempo de ciclo combinado Simples Profundidade vs velocidade . . . . .	103
A.11	Gráfico: Tempo de ciclo simples Dupla Profundidade vs Comprimento . . . . .	105
A.12	Gráfico:Tempo de CS de saída de Dupla Profundidade vs comprimento de ala . . . . .	106
A.13	Gráfico:Tempo de CC de Dupla Profundidade vs comprimento de ala . . . . .	107
A.14	Gráfico:Tempo de CS de Dupla Profundidade vs velocidade . . . . .	109
A.15	Gráfico:Tempo de CS de Dupla Profundidade vs velocidade . . . . .	110
A.16	Gráfico:Tempo de CC de Dupla Profundidade vs velocidade . . . . .	111

# Lista de Tabelas

A.1	Tempo de ciclo Simples Profundidade vs comprimento de ala . . . . .	100
A.2	Tempo de ciclo Simples Profundidade vs velocidade . . . . .	101
A.3	Tempo de ciclo de Dupla Profundidade vs velocidade . . . . .	104
A.4	Tempo de ciclo ABC de Dupla Profundidade vs velocidade . . . . .	108





# Abreviaturas e Símbolos

UC	Unidade de carga
TM	Taxa de manipulação
SRM	Storage and retrieval machine - Transelevador
w	Shelf unit parameter
$E(t_l)$	valor esperado de percurso
$E(t_{ciclo})$	valor esperado de ciclo



# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Contexto

A fase de concepção de um sistema automático de armazenagem constitui um trabalho complexo, devido à elevada interdependência das variáveis em jogo. Perante a realidade actual de forte concorrência na área de sistemas automáticos de armazenagem, a concepção de um sistema fiável e otimizado, deve ser sustentada em um curto espaço de tempo por resultados comprováveis. A apresentação de diversas configurações associadas a soluções tecnológicas viáveis, como por exemplo armazenagem em profundidade, combinação simultânea de sistemas de manipulação de carga, ou até estratégias de organização suportadas por sistemas de gestão de armazéns, é de importância determinante para encontrar um ponto de equilíbrio entre solução e o custo de investimento.

De forma a encontrar a configuração óptima de um armazém automático é necessário calcular o fluxo por unidade de tempo para diferentes configurações de armazenamento. A capacidade de manipulação de unidades de carga depende de uma grande variedade de parâmetros. Para além de grandezas estáticas e dinâmicas (exemplo: dimensões do armazém e a dinâmica de um transelevador), a capacidade é também determinada pela taxa de ocupação e estratégia de armazenamento. Procedimentos de cálculo existentes para a determinação da taxa de manipulação estão limitados a alguns tipos de configuração de armazenamento e assumem certos pressupostos para estratégias de armazenamento.

À parte de parâmetros de natureza técnica ou de estratégia de armazenamento, a fase do processo de concepção é dificultado através da mudança rápida dos mercados que provoca modificações rápidas das condições fronteira. Só quando é trazido para a esfera da decisão um cenário com flexibilidade de expansão, será possível para o utilizador/cliente escolher o sistema mais económico a longo prazo. Devido ao elevado custo de investimento e o longo tempo de amortização, é importante considerar para um investimento a longo prazo aspectos de expansão futura, tanto a um nível quantitativo como qualitativo. Isto só é possível se existir uma análise aberta de diferentes variantes do sistema de ar-

mazenamento, que não provoque uma explosão de custo na fase de concepção. Por esta razão o cálculo da capacidade de armazenamento deve ser flexível a alterações de configuração/ conceito, permitindo uma vantagem competitiva por não recorrer a ferramentas que requerem uma parametrização complexa de uma nova configuração.

## 1.2 Problema

Qualquer concepção de sistemas de armazenamento é determinada por duas grandezas fundamentais. Estas são:

- Capacidade de Armazenamento - numero de posições de armazenamento;
- *Taxa de Manipulação* - fluxo de unidades de carga por unidade de tempo.

O número de posições necessário para armazenamento de unidades de carga é determinado por factores de ordem operacional, como por exemplo tamanho de lotes de produção, stock de segurança, capacidade de expedição. É uma grandeza estática e não contribui para a complexidade da fase de concepção.

A determinação, mais concretamente, o cálculo da taxa de manipulação de um conceito de armazenamento, constitui, devido a grande variedade de variáveis dependentes, um problema complexo. As variáveis associadas ao cálculo da Taxa de Manipulação de um sistema de armazenamento podem ser divididas entre variáveis de índole técnica e variáveis de índole organizacional.

### 1.2.1 Variáveis de índole técnica

As variáveis de índole técnica estão associadas à configuração física de um armazém bem como a dinâmica do equipamento que é utilizado nas operações de armazenamento. Estas variáveis podem ser descritas da seguinte forma:

- Comprimento, altura e número de alas: Quanto mais comprida e alta uma ala é, menor é a Taxa de Manipulação para as mesmas condições fronteira. Do número de posições e das dimensões de cada alvéolo (dimensões da posição de armazenamento) resulta o número total de alas;
- Cinemática do transelevador: A TM em uma ala depende da aceleração e da velocidade máxima de um transelevador. Micro ciclos como os tempos de posicionamento, carga/descarga, comutação, também influenciam o tempo de ciclo de trabalho;
- Configuração profundidade - manipuladores de carga: Outros factores que influenciam o tempo de ciclo de trabalho de um transelevador, são a profundidade da ala e o

tipo de sistema/combinção de manipuladores de carga. Actualmente é possível encontrar transelevadores com manipuladores de carga em série ou em paralelo. Este ponto tem uma influência decisiva no ciclo de trabalho de uma ala. A utilização de vários manipuladores de carga em um transelevador faz com que o ciclo de trabalho diminua. No armazenamento em dupla profundidade resultam dois efeitos, por um lado aumenta o ciclo de tempo quando a unidade de carga pretendida se encontra na segunda profundidade bloqueada pela unidade de carga da primeira profundidade, por outro lado os trajectos a percorrer diminuem comparativamente a um sistema de simples profundidade com a mesma capacidade de armazenagem. Dependendo da capacidade de armazenagem pretendida, a escolha da configuração é influenciada pela taxa de volume útil. A escolha de dupla profundidade aumenta consideravelmente este índice face a uma solução equivalente de simples profundidade;

- Posição de pontos de E/S. O posicionamento estratégico dos pontos de entrada saída para as unidades de carga, pretende reduzir os trajectos a percorrer pelo transelevador, de forma a melhorar os ciclos de trabalho.

### 1.2.2 Variáveis de índole organizacional

Para a avaliação de um sistema de armazenagem não podem ser só contemplados aspectos técnicos. Um factor determinante para o ciclo de trabalho de um sistema de armazenagem é a estratégia de armazenagem.

A influência da estratégia para atribuição de posição, só é pesquisada em modelos matemáticos para a situação de armazenagem de simples profundidade. Um procedimento que permita englobar variações técnicas e de estratégia de armazenagem, não existe na área de concepção de sistemas automáticos. Desta forma muitas vezes são utilizados valores extrapolados que não garantem um resultado viável.

O efeito de aumento da taxa de manipulação de um transelevador através de estratégias de organização inteligente é conhecido, mas a sua avaliação quantitativa é complexa. Desta forma é raro incluir na decisão de concepção esta abordagem.

As variáveis de índole organizacional podem ser categorizadas da seguinte forma:

- Distribuição ABC/ zonas rápidas: A colocação de zonas de rápidas, nas quais, artigos com elevada probabilidade de rotação são colocados perto das E/S, é uma prática frequentemente utilizada e de pouca complexidade, resultando em um aumento da taxa de manipulação de um transelevador;
- Optimização de percursos com vários manipuladores de carga: Uma possibilidade de optimização de percursos é relevante quando adoptada uma solução de transelevador equipado com vários manipuladores de carga;

- Taxa de ocupação : Para um sistema de armazenagem em dupla profundidade a taxa de ocupação tem uma influência decisiva para o ciclo de trabalho. Para uma taxa de ocupação elevada o tempo de percurso aumenta devido à necessidade de recolocar uma unidade de carga que bloqueie o acesso a uma segunda profundidade;
- Combinação de pares de unidades de carga para armazenamento : Emparelhar unidades de carga recorrendo a transelevadores equipados com dois manipuladores de carga resulta em um aumento de  $TM$  do sistema.

Do ponto de vista da viabilidade económica, a escolha da melhor solução deve ser sustentada por índices de performance. Não menos importantes, algoritmos de optimização de um sistema de organização inteligente, devem ser traduzidos em um resultado quantitativo.

As diversas variáveis em jogo, necessárias para a determinação de um sistema de armazenagem, a sua complexidade e as suas interdependências, tornam aparentemente impossível, que todas as variantes técnicas e de organização sejam sintetizadas num modelo matemático exacto. Com os métodos modernos de simulação de sistemas de fluxo de material, é possível a representação destas variantes.

### 1.3 Objectivos

O objectivo deste projecto/dissertação é o desenvolvimento de um pacote de ferramentas que permitam determinar ciclos de trabalho de sistemas automáticos de armazenagem para um conjunto de configurações, considerando também estratégias de organização/armazenamento. O enfoque será o equipamento transelevador que para muitos sistemas de armazenagem automatizado configura o gargalo do sistema.

### 1.4 Metodologia

A metodologia seguida para a elaboração deste trabalho foi.

- Levantamento de modelos analíticos para o cálculo de ciclos de trabalho de sistemas de armazenagem;
- Estudo aprofundado de modelos analíticos para o cálculo de ciclos de sistemas de armazenagem;
- Desenvolvimento de modelos de simulação de sistemas de armazenagem em ambiente *Anylogic*;
- Análise e Validação de resultados de simulação e modelos analíticos de ciclos de trabalho de sistemas de armazenagem;

- Desenvolvimento de plataforma para cálculo de ciclos de trabalho de um sistema de armazenamento.

## 1.5 Estrutura da Dissertação

A presente dissertação está estruturada em 6 capítulos. O capítulo 2 descreve o estado de arte de sistemas automáticos de armazenamento. Para a introdução do estado de arte de sistemas automáticos são apresentados os conceitos gerais de um sistema de armazenamento tanto do ponto de vista funcional bem como operativo. O capítulo 3 apresenta as bases de cálculo de ciclos de trabalho de sistemas de armazenamento. A base teórica para o cálculo de ciclos de trabalho, mais concretamente, ciclos de trabalho de transelevadores, foi baseado em diferentes abordagens que inclui normas, estudos e literatura técnica referente ao cálculo de cadências. O capítulo 4 apresenta o estudo de simulação realizado, baseado em ambiente *Anylogic*. O capítulo 4 pretende, em uma primeira parte, apresentar paradigmas de simulação com enfoque na simulação de um sistema de armazenamento. Grande parte é dedicado a apresentar o modelo de simulação desenvolvido em ambiente *Anylogic*. O capítulo 5 apresenta a plataforma de cálculo desenvolvida, bem como uma análise de resultados de experiências realizadas. No último capítulo 6 são apresentadas as conclusões do trabalho desenvolvido bem como as principais conclusões e perspectivas de desenvolvimentos futuros.





## Capítulo 2

# Sistemas Automáticos de Armazenamento

O seguinte capítulo engloba uma introdução ao estado de arte de sistemas automáticos de armazenamento. A primeira abordagem será o enquadramento de sistemas de armazenamento na cadeia logística (*supply-chain*). O estado de arte de sistemas de armazenamento engloba diferentes domínios da logística e em termos de soluções podem ser encontradas as mais variadas alternativas o que faria um estudo aprofundado ir muito além do que se pretende. O objectivo deste capítulo é introduzir aspectos gerais de sistemas de armazenamento e explorar as soluções de sistemas automáticos de armazenamento com enfoque no equipamento transtocador. Uma vez exploradas estas variantes de sistemas de armazenamento será possível introduzir a temática de ciclos de trabalho.

### 2.1 Introdução a Sistemas de Armazenamento

Embora os sistemas logísticos não devam ser desenhados para manter inventário durante um longo período de tempo, existem ocasiões onde o armazenamento de inventário é justificado numa base de custo e serviço [1].

O ambiente empresarial é hoje em dia marcado por uma competitividade global com uma demanda “fortemente” variável pela especificidade dos consumidores [2]. As empresas estão obrigadas a reagir rapidamente aos desejos de consumidores, que se caracterizam pela exigência de produtos específicos com tempos de entrega curtos e a preços baixos. Devido à adaptação dos mercados ao crescente aumento das exigências dos consumidores, o ciclo de vida de um produto foi reduzido e a multiplicidade de variantes cresceu, resultando em uma complexidade de processos na produção e distribuição de

material [3]. Sistemas logísticos de elevada performance podem abrir hoje em dia novos mercados, ao mesmo tempo que o mercado de consumo exige rapidez, qualidade e minimização de custos nos serviços logísticos [4]. Neste contexto armazéns e sistemas de transferência perfazem um elemento chave no fluxo de material entre produtores e consumidores.

O processo elementar de um sistema de armazenamento e distribuição de material é tão comum como simples. Um artigo que é recebido é posto de parte até que seja solicitado. Quando solicitado é transferido do sitio onde está armazenado para o local onde é necessário. Desta forma a sequência elementar de um sistema deste tipo é receber, armazenar, retirar, enviar. Na prática esta sequência aparentemente simples, transforma-se em um processo complexo com necessidades de controlo e optimização, quando adicionamos os requisitos de tempo, qualidade, custos bem como o encadeamento com factores externos. Alguns factores são:

- na entrada de material, as encomendas que chegam muitas vezes não são planeáveis ou chegam de forma irregular com picos marcantes;
- a variedade de material exige, devido às suas dimensões, pesos, exigências de temperatura, etc. uma grande variedade de tecnologias de transporte, armazenagem e gestão, que por sua vez têm de ser desenvolvidos e operacionalizados;
- a rotatividade entre artigos difere bastante e acarreta elevadas variações temporais;
- do lado da demanda podem ser requisitadas pequenas quantidades, que por sua vez têm de ser consolidadas num curto espaço de tempo e colocadas na zona de expedição para serem enviadas como uma única unidade de expedição;
- simultaneamente centenas de ordens tem de ser processadas, onde a sequência das ordens de acordo com a posição do cliente, o tipo de ordem, o tipo de encomenda, a janela temporal e capacidades de pessoal e tecnológicas tem de ser optimizadas;
- os parâmetros do sistema não permanecem constantes, mas sofrem alterações em relação a fluxo de quantidades, estrutura de ordens, variação de artigos, etc.

### 2.1.1 Serviços de um Armazém

Os armazéns destinam-se a disponibilizar produtos em um determinado ponto no tempo. Este estado implica, numa primeira análise, um período de tempo onde não há valor acrescentado [5]. Na prática, devido a uma grande variedade de razões, este tempo torna-se benéfico na cadeia logística. De acordo com a directiva VDI 2411 [6] o armazenamento é toda a estadia planeada no fluxo de material. O armazém é um espaço/área que guarda volumes na forma de matéria-prima, produtos intermédios e/ou produtos finais, que são agrupados em quantidade e/ou valor. O processo principal num armazém

é o armazenamento de unidades de carga, conservar, organizar as posições de armazenamento e disponibilizar unidades de carga. Adicionalmente pode ser realizado no armazém o “picking” de unidades de carga completas.

Do ponto de vista logístico o armazenamento estratégico é visto como um processo planeado com dois vectores essenciais: tempo e espaço. Algumas razões que explicam a utilização de armazéns são:

- entradas/saídas assíncronas entre sistemas ou processos;
- equilíbrio de quantidades como por exemplo no âmbito de lotes económicos para fabricação;
- garantir um bom factor de utilização de equipamentos de custo intensivo como por exemplo em avarias, gargalos na expedição, problemas de transporte, etc;
- beneficiar de preços de desconto na compra de quantidades económicas ;
- optimização de capacidades de transporte;
- variações sazonais no comportamento das vendas;
- garantir uma taxa de serviço elevada através da resposta rápida de pedidos, em geral garantir capacidade de fornecimento;
- armazenamento para adicionar valor (associado a processos de amadurecimento na industria farmacêutica, alimentar..) ou devido a especulação;
- realização de funções adicionais, como por exemplo disponibilização para “picking”.

A par dos diferentes objectivos estão os custos de armazenamento, condicionados por capital, equipamento, pessoal, gestão. Na maior parte dos casos o armazenamento é visto como um processo adicional na cadeia de valor acrescentado de uma empresa. Contudo excesso de armazenamento esconde estruturas ineficientes e gargalos de diferentes processos, provocando custos adicionais. Desta forma o objectivo principal é reduzir o nível de inventário para um mínimo necessário, para conseguir garantir um nível óptimo de armazenamento. As relações qualitativas estão ilustradas na Figura 2.1.

As estratégias mais modernas de logística, preconizam o objectivo de substituir inventário por informação e disponibilizar o material necessário de forma sincronizada com o consumo (conceito Just-In-Time). Para a aplicação de um conceito deste tipo, não é só necessário o envio de material, por parte de um fornecedor, num momento exacto mas também a adaptação dos processos produtivos a este tipo de estrutura. Este conceito é normalmente utilizado em sistemas que apresentem ordens de encomenda para produção em

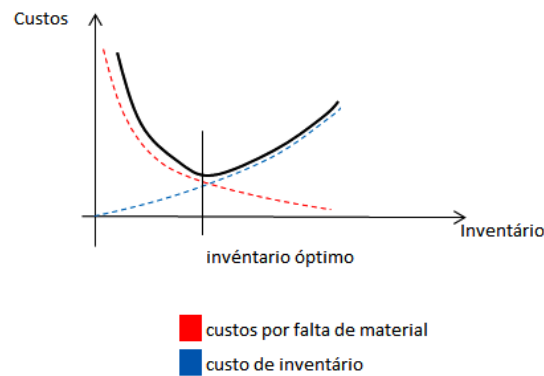


Figura 2.1: Conflito de Objectivos na Gestão de Armazéns

série, como por exemplo na industria automóvel. Grande parte das empresas, principalmente onde existem produtos altamente personalizados, não podem abdicar da integração de um armazém no sistema de fluxo de material.

Os armazéns podem ser definidos por diferentes critérios. De acordo com a função no processo de valor acrescentado podemos distinguir entre:

- armazéns de matéria prima, para o abastecimento da produção com material de acordo com as ordens de produção;
- armazéns de produção fazem de *buffers* entre processos produtivos de acordo com as fases de produção e montagem;
- armazéns de distribuição guardam e conservam produtos de uma empresa para distribuição a clientes.

De acordo com o tipo, como primeira prioridade a função armazenamento destina-se a estabelecer uma ponte temporal ou para a troca da estrutura da unidade de carga entre a entrada e saída de um armazém. Se a estrutura da unidade de carga se mantiver igual entre a entrada e a saída, então temos um armazém de unidade de carga. Desde que a estrutura seja modificada, designa-se o armazém de "picking".

Armazéns de matéria-prima são utilizados para equilibrar as variações na procura e permitem que durante um longo período de tempo, material esteja disponível para a produção. Uma característica típica de armazéns de matéria-prima são as entradas e saídas irregulares. O *throughput* de um armazém de matéria-prima é baixa comparativamente a armazéns que fazem de *buffers*. Armazéns de produção servem para equilibrar variações entre entradas e saídas durante curtos espaços de tempo e são utilizados entre sequências no processo de produção. A principal característica de armazéns de produção é a variabilidade reduzida nas operações de entrada e saída. O *throughput* é consequentemente

elevado. Tanto armazéns de matéria-prima como armazéns de produção servem principalmente para estabelecer uma “ponte temporal”. Armazéns de distribuição a par da função de *stock*, destinam-se à modificação de uma unidade de carga entre a operação de entrada e saída. Neste tipo de armazém são realizadas operações de “picking”, sortimento e consolidação. Armazéns de distribuição podem ser encontrados nas indústrias para o armazenamento de matéria-prima, produtos semi-acabados bem como produtos-acabados, sempre que sejam necessárias determinadas quantidades de uma unidade de carga. A característica principal são as operações regulares de entrada e saída. Contudo as taxas de manipulação podem ser muito diferentes. Armazéns de distribuição são utilizados por exemplo para uma estadia a curto prazo de unidades de carga e estão concebidos para elevadas taxas de manipulação ao invés de uma elevada capacidade de armazenamento. Entre a entrada e a saída de unidades de carga é frequente o sortimento de produtos. Armazéns de acumulação têm a função contrária, onde determinadas quantidades de material são agrupadas para formar uma unidade de carga.

Às funções de de armazenamento, mais concretamente na cabeceira do armazém, também são incluídas o acondicionamento de produtos e a constituição de unidades de carga, bem como o interface de movimentação de unidades de carga com o fluxo de material interno e externo.

### 2.1.2 Funções básicas de sistemas de armazenamento

Cada sistema de armazenamento engloba, independentemente do tipo e concretização, funções elementares para a movimentação de unidades de carga. As funções básicas de todos os sistemas de armazenamento, que são combinadas entre a escolha e sequência de cada sistema, são entrada de material, identificação, armazenamento, *picking*, saída, expedição. Estas funções básicas descrevem simultaneamente o fluxo de material num armazém (Figura 2.2).

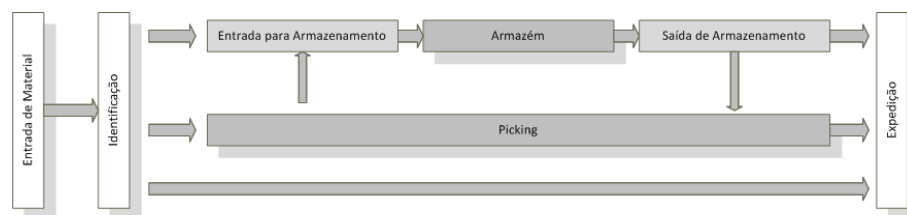


Figura 2.2: Ligação de funções básicas de sistemas de armazenamento com fluxo de material orientado

Com a entrada e identificação de uma unidade de carga, a integridade da informação associada é verificada e após uma comunicação do sistema de gestão de armazém (SGA), é atribuída à unidade de carga um destino que tanto pode ser para o armazém, para a

zona de *picking*, ou enviado directamente para a zona de expedição (*cross-docking*). Estas operações de armazenamento, dependendo do sistema de armazenamento, podem ser realizadas manualmente, semi-manual com auxílio de empilhador, ou totalmente automático com sistema de transportadores automáticos como p.ex. um transelevador. Para uma operação de saída, ordem de saída, uma unidade de carga é transportada para a zona de *picking* ou directamente para a zona de expedição. Funções da zona de expedição são principalmente o acondicionamento de mercadorias, e preparação de documentos de expedição. Funções da zona de *picking* é a composição de pequenas quantidades associadas às unidades de carga armazenadas. A recolha de artigos e o *picking* de unidades de carga é controlado por ordens, onde estão descritas as quantidades de artigos a serem recolhidos e a sequência com que devem ser recolhidos. A recolha pode ser realizada directamente da posição de armazenamento (*Person-to-goods*) ou uma unidade de carga pode ser transportada para um posto de *picking* onde um operador recolhe os artigos pedidos (*Goods-to-Person*).

Após as operações de movimentação num armazém, estas são registadas no SGA, que independentemente do sistema utilizado, permitem um controlo permanente das existências no armazém e registar todas os movimentos nas diferentes zonas de um armazém. Os requisitos operacionais e económicos são conseguidos através das estratégias adoptadas, que permitam tempos de acesso elevados, percursos e tempos de transporte reduzidos, bem como uma elevada taxa de saída para uma utilização uniformemente distribuída de recursos. Ao mesmo tempo, dependendo das características de cada artigo, devem ser consideradas sob certas condições os dados de existências como sejam prazos de validade. A atribuição de uma posição de armazenamento para um dado artigo é orientado por estes critérios e determina em primeiro lugar a melhor posição de armazenamento livre, como por exemplo a atribuição segundo a rotatividade de um artigo (distribuição ABC). Em alguns casos é aconselhável a distribuição por diferentes zonas do armazém, garantindo redundância de acesso ao mesmo tipo de artigo. Para além disto podem ser adoptados algoritmos complexos para atribuição de posição, sequência em que ordens devem ser realizadas, bem como a alocação de equipamento para ordens de movimentação. Sistemas de armazenamento automático conseguem reorganizar um armazém em horas de vazio. Já que não existe custos de pessoal, os custos associados são custos energéticos e de manutenção do equipamento automático. A vantagem são tempos de acesso reduzidos para os movimentos mais frequentes e após a reorganização, consegue-se obter tempos de acesso reduzidos para armazéns com uma taxa de ocupação elevada. O principio para a reorganização são os dados acerca da rotatividade de artigos durante um período de tempo. Os tempos de transporte estão definidos para um sistema automático de armazenamento, o que faz com que a possibilidade de optimização seja maior do que para um sistema de armazenamento manual. Saídas de armazém programadas, que têm de ser realizadas até um determinado momento, podem ser melhor planeadas e com uma elevada

taxa cumprimento de prazos.

### 2.1.3 Tipos de Armazéns

A par das funções de armazenamento, armazéns são classificados segundo o tipo construtivo, isto é, as suas características técnicas. As construções mais comuns ilustradas nas figuras são:

- armazenagem sobre piso (fig. 2.3);
- armazenagem por estante;
- armazenagem por estante de gravidade ou canal (fig. 2.4, 2.5);
- armazenagem por estante dinâmica (fig. 2.6).



Figura 2.3: Armazenagem sobre piso

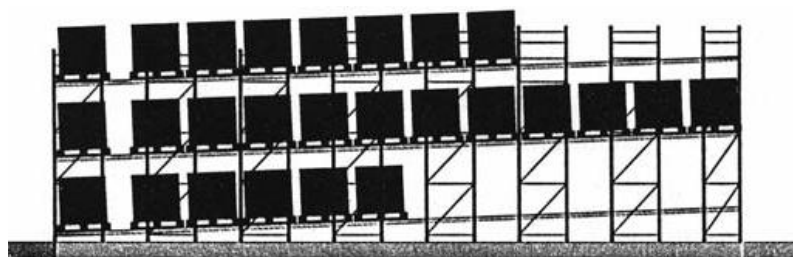


Figura 2.4: Armazenagem por estante de gravidade

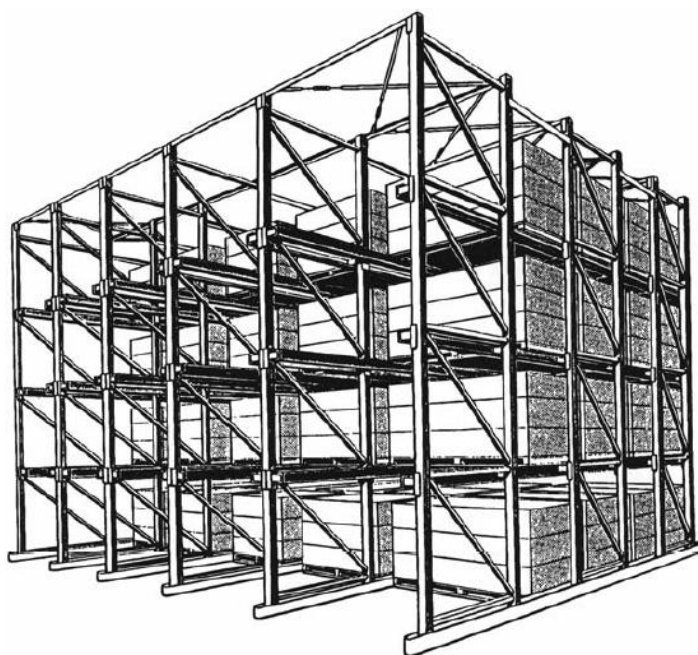


Figura 2.5: Armazenagem por estante de canal

Outros tantos tipos de armazenamento podem ser encontrados no mercado. As características técnicas dos tipos de armazéns do ponto de vista de fluxo de material relaciona-se com:

1. a disposição construtiva das posições de armazenamento:
  - posições de armazenamento estacionárias para empilhamento de unidades de carga (p.ex. sobre o piso);
  - Alvéolos em estantes fixas ou móveis ;
2. o tipo de equipamento utilizado para manipulação nas posições de armazenamento :
  - Empilhador convencional;
  - Empilhadores retrácteis, Empilhadores bilaterais e trilaterais;
  - transelevadores, transelevadores com satélite, etc;
  - Outros;
3. o sistema de transportadores na zona entrada e saída de um armazém :
  - transportadores contínuos; p.ex. transportadores de rolos, correntes, correias, tela;



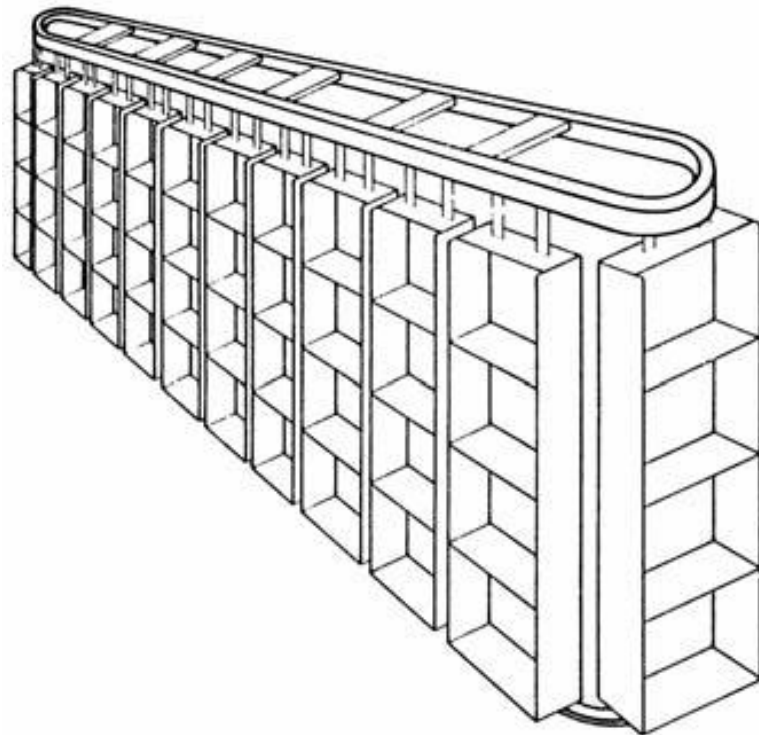


Figura 2.6: Armazenagem por estante dinâmica

- transportadores descontínuos; p.ex. carro de transferência, electrovias;
- sistemas automáticos de transporte, AGVs, empilhadores;
- Outros.

A decisão para um tipo de armazém e as suas características técnicas depende de diversos parâmetros. Um parâmetro determinante são as características do produto a armazenar e o tipo de suporte utilizado para uniformizar o produto, como seja por exemplo a utilização de paletes. Produtos alimentares, químicos, têxteis colocam outro tipo de requisitos face a produtos eléctricos, mecânicos. Deve-se ter em atenção, que as exigências tecnológicas para o armazenamento de diferentes tipos de unidades de carga (armazenagem heterogénea) e diferentes tipos de artigos, aumentam os requisitos de equipamentos que por sua vez aumentam o custo do sistema.

Para além das características do material a armazenar é necessário para a escolha de um tipo de armazém, saber o tempo de permanência e o tempo de acesso a uma unidade de carga, bem como as funções adicionais como seja o sistema de "picking". Também devem ser considerados aspectos geográficos como por exemplo custo por m<sup>2</sup> ou restrições dimensionais, condições ecológicas, requisitos construtivos, etc.

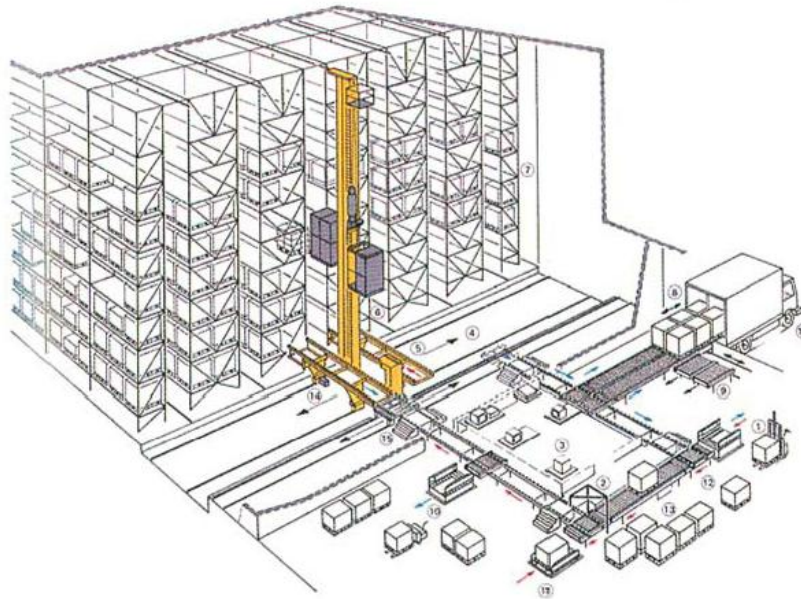


Figura 2.7: Armazém Automático com ponte de transferência

Nas figuras 2.7, 2.8, 2.9 estão representados três conceitos de armazéns automáticos. A figura 2.7 ilustra um sistema de armazenamento com um transelevador a servir todas as alas. Para tal um equipamento mecânico de suporte aos transelevadores (ponte de transferência), permite retirar um transelevador da ala onde está a operar e transferir para outra ala. A figura 2.8 ilustra uma alternativa para a utilização de um transelevador em múltiplas alas. Esta solução apresenta um transelevador em curva. Nos dois casos abdica-se de tempos curtos para o acesso a unidades de carga, mas apresenta-se como uma solução económica. Utilizando um transelevador por cada ala (figura 2.9) os tempos de acesso a unidades de carga são bastante curtos para uma mesma capacidade, mas o custo de investimento aumenta.

## 2.2 Armazéns de Alta densidade - High-bay Warehouse (HBW)

A figura 2.9 ilustra uma sistematização possível de diferentes tipos de armazéns. Na prática armazéns de estante apresentam a solução mais frequente para um sistema automático de armazenamento. Por um lado este tipo de armazenamento permite o acesso directo às posições de armazenamento, por outro permite, devido à possibilidade de atingir actualmente alturas de 40m, uma elevada taxa de ocupação por área de armazenamento. Os

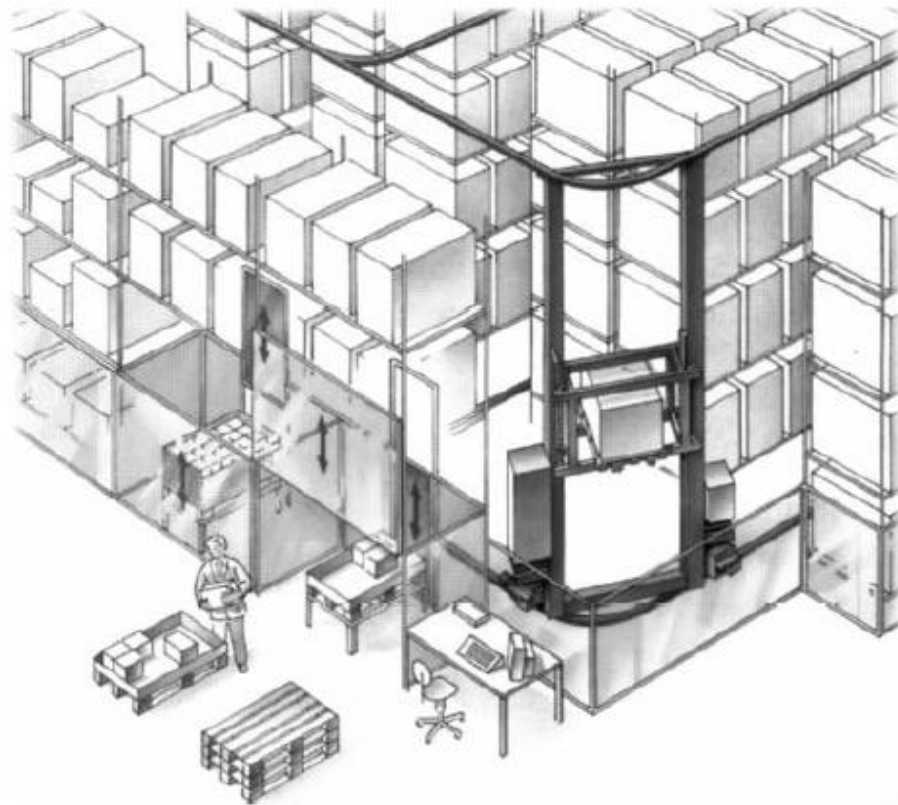


Figura 2.8: Armazém com mudança de ala de transelevador

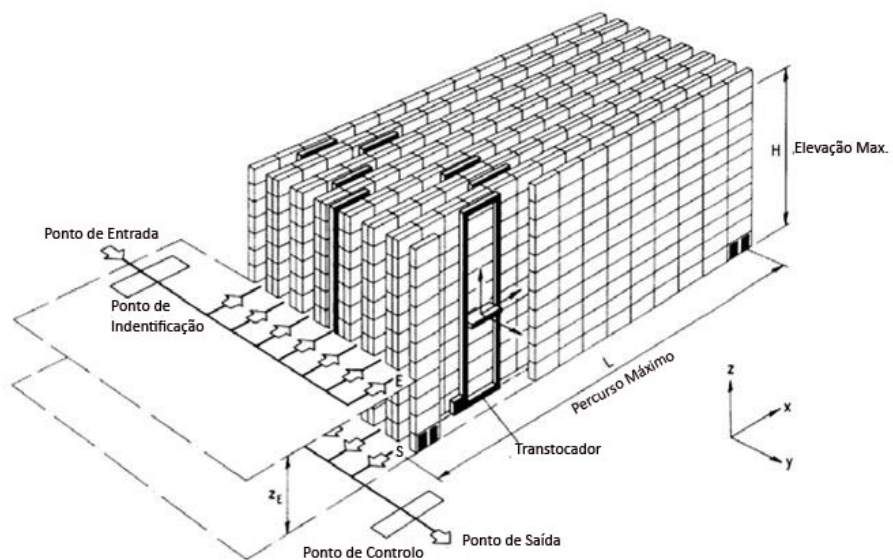


Figura 2.9: Armazém automático com um transelevador por ala zonas de entrada/saída separadas

<u>Funcional</u>	<u>Segundo tipo de Carga</u>	<u>Segundo Altura</u>
Armazém de Matéria Prima	Carga Solta	Armazém de altura baixa
Armazém de Produção	Carga Unitizada	Armazém de altura média
Armazém de Distribuição	Carga a Granel	Armazém de altura alta
<u>Construtivo</u>	<u>Segundo suporte de carga</u>	
Armazenamento sobre Piso,	Armazém de Paletes	
Estante Estática	Armazém de Caixas	
Estante Dinâmica	Armazém de Contentores	
	Armazém de Cassetes	

Figura 2.10: Sistematização de Sistemas de Armazenamento

sistemas automáticos de armazenamento em estante conseguem atingir comparativamente a sistemas de armazenamento compacto, uma elevada taxa de manipulação.

Dentro deste tipo de armazenamento, armazéns com uma altura superior a 12m costumam ser designados de armazéns de alta densidade - *High-bay Warehouses* (HBW). O equipamento utilizado para a movimentação de unidades de carga depende principalmente da altura das alas, os custos e o *throughput* pretendido. O equipamento mais utilizado devido à capacidade de atingir elevadas alturas e velocidades são os transelevadores. Para alturas até um máximo de 15m podemos encontrar empilhadores que apresentam preços mais apelativos face a uma solução com transelevador, mas são mais lentos. As vantagens de um HBW é a possibilidade de ter armazéns até a uma altura de 40m e alas de 150m de comprimento, operadas cada uma com um transelevador. É possível obter taxas de manipulação com mais de 100 ciclos combinados/h.

Na indústria é comum encontrar alas com uma profundidade até 100 posições. Em altura existe uma modificação da forma construtiva a partir dos 20m. Partindo de um edifício para armazenagem, que realizará apenas essa função, é utilizada uma estrutura em betão até esta altura, onde depois é instalado o sistema de armazenamento. Acima desta altura são construídos armazéns autoportantes. Para armazéns autoportantes a própria estrutura suporta o peso da cobertura e dos fechamentos laterais, uma vez que constituem em si mesmo um robusto edifício armazém, proporcionando uma considerável economia ao eliminar o gasto do armazém convencional. Em geral é possível planear um armazém para armazenar paletes tanto em comprimento como em largura. Economicamente faz mais sentido armazenar as paletes em comprimento pois o percurso para o transelevadores é menor o que aumenta a taxa de manipulação. Para um mesmo comprimento de ala é possível armazenar mais um terço de paletes face a uma solução de armazenamento em largura.

## 2.3 Sistemas automáticos de movimentação em armazéns

Para movimentar, isto é, permitir a movimentação de elementos entre dois pontos a uma curta distância, são necessários equipamentos de movimentação ou transporte [7]. Estes equipamentos movimentam cargas dentro de espaços limitados como por exemplo entre células de produção, armazéns, aeroportos. Para além da função de movimentação (alteração de local), estes equipamentos cumprem outras funções como distribuição, sortimento, acumulação ou “picking”.

De acordo com a função são distinguidos três operações base: Transporte, Transbordo, Armazenamento. Os equipamentos de movimentação/transporte podem ser divididos entre transportadores contínuos e transportadores descontínuo.

**Transportadores contínuos** Transportadores contínuos permitem segundo [4] um fluxo contínuo, respectivamente, um fluxo de unidades discretas contínuo. Estes equipamentos trabalham principalmente em modo estacionário. O carregamento e descarregamento é realizado durante a operação, isto é, uma linha de transportadores pode transportar enquanto esta é carregada ou descarregada em posições definidas. Os transportadores contínuos permitem o transporte de várias unidades entre vários pontos, sem que o equipamento de transporte tenha de voltar à posição inicial.

**Transportadores descontínuos** Em fluxos descontínuos de material são utilizados transportadores descontínuo. Aqui os ciclos de trabalho são definidos pelos tempos de ciclo realizados. Os accionamentos trabalham normalmente em modo transitório. As operações de carga/descarga são realizadas quando o equipamento está parado. Já que transportadores descontínuos podem não ter um posicionamento fixo, faz com que sejam mais flexíveis nos percursos de transporte comparativamente a transportadores contínuos. Contudo, transportadores descontínuos com elevadas velocidades de transporte não atingem um *throughput* elevado face a transportadores contínuos.

A figura 2.11 ilustra uma classificação possível de equipamentos de transporte automático de euro-paletes. Em particular, equipamentos de transporte descontínuo apresentam diversas soluções que por sua vez podem ser classificados por carril, livre ou suspenso. Transportadores sobre carril possuem uma estrutura móvel e uma estrutura fixa que é o carril. Este tipo de transportador coloca muitas vezes restrições ao livre transito de outros equipamentos. Contudo soluções construtivas que permitam maior flexibilidade como p.ex. a utilizações de carril embutido para a passagem de outros equipamentos. Equipamentos de transporte livres têm um grau de liberdade maior em termos de movimentos pois não estão limitados por nenhum carril. Para além disso não colocam

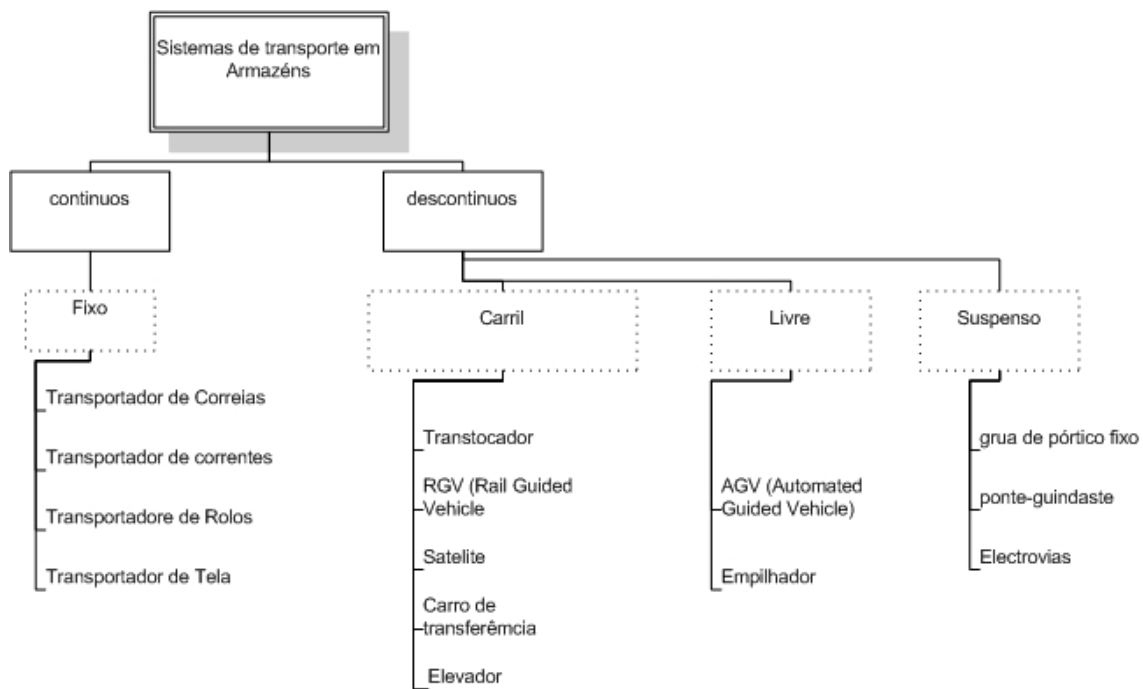


Figura 2.11: Sistemas de Transporte em Armazéns

impedimentos a outros equipamentos. Equipamentos de transporte suspensos são guiados por carris que estão fixados a estruturas laterais, que tanto pode ser uma estante ou pilares de um edifício. Uma das principais características é a zona de trabalho se situar acima de outros equipamentos. Uma classificação deste tipo pode ser realizada tanto para equipamentos de transporte descontínuos como para equipamento contínuos, mas como é raro encontrar equipamentos de transporte contínuos suspensos, esta classificação não foi explorada. Equipamentos de transporte contínuos são utilizados em sistemas automáticos de armazenamento como interface de entrada e saída de unidades de carga com o transelevador. O transporte de paletes por exemplo é realizado normalmente por transportadores de rolos ou correntes até ao transelevador. Nos sistemas de transporte de unidades de carga, dentro de um armazém bem como fora, são necessários diferentes requisitos. Por um lado o sistema de transportadores dentro de um armazém deve ser minimizado em quantidade para manter baixos os custos de investimento de um armazém automático. Por outro lado, uma solução compacta deve garantir a liberdade de manutenção e uma segurança funcional absoluta, quando uma unidade de transporte não estiver bem colocada em um equipamento de transporte ou quando uma unidade de carga apresentar defeitos no suporte para transporte (p.ex. paleta defeituosa). Apesar de o controlo dimensional de uma unidade de carga ser realizado antes da unidade iniciar o percurso para armazenamento, pode acontecer alguma anomalia durante o processo de armazenamento (p.ex. cargas instáveis ...). Para certos cenários onde não há a possibilidade de um acesso directo

a uma unidade de carga, pode acabar em bloqueios de canais de armazenamento. Para sistemas de transporte fora do sistema de armazenamento é valorizado, a par dos custos de investimento, a velocidade de transporte e a precisão de posicionamento.

### 2.3.1 Transelevadores

Um transelevador é um equipamento de movimentação/transporte de operação manual ou automática em sistemas de armazenamento por estante. Em geral são guiados por um carril montado no piso de um armazém e uma guia superior. Os transelevadores são utilizados para aceder a unidades de carga em estantes configuradas em um sistema de alas. Com a evolução dos transelevadores a densidade de armazenamento aumentou significativamente e actualmente é possível encontrar armazéns até 40m de altura e alas de 150m. Em termos construtivos os transelevadores podem ser caracterizados pelo número de mastros - mastro simples ou duplo mastro 2.12. Os accionamentos são eléctricos e

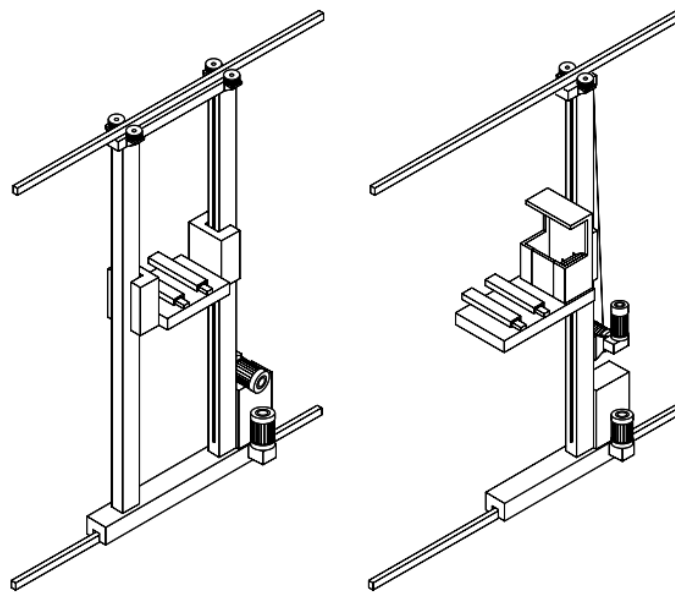


Figura 2.12: Transelevador Duplo Mastro, Mastro simples

os condutores de corrente tanto podem ser realizado por cabos de manobra ou calha de alimentação. O transelevador é constituído pelos grupos máquina de translação, mastro, plataforma de elevação, garfo (sistema de extracção de carga), e controlo 2.13. O mastro é normalmente construído por perfis tubulares de aço. Para transelevadores de cargas leves são utilizados perfis de alumínio extrudido. A máquina de translação é constituída por rodas, roletes de guiamento lateral, accionamento de translação. Ao mastro está ligada a plataforma de elevação que é movimentada por um accionamento colocado na parte inferior do mastro, tanto por razões de manutenção como de concepção. Na plataforma



de elevação estão os garfos e no caso de operação manual pode possuir uma cabine para um operador.

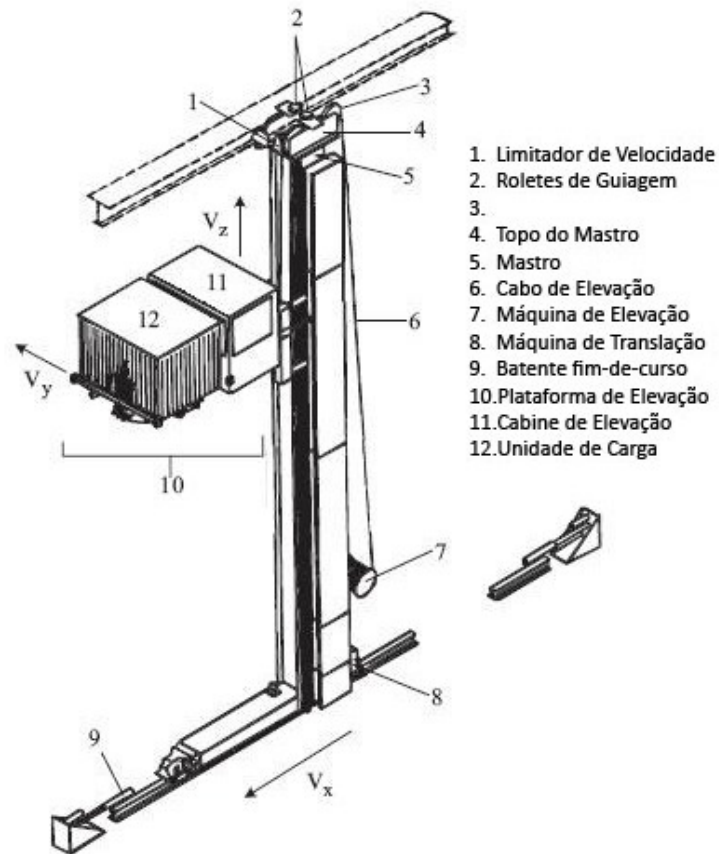


Figura 2.13: Transelevador

Os transelevadores são utilizados no armazenamento de unidades de carga cujo suporte de carga seja idealmente normalizado, como por exemplo euro paletes, paletes industriais, contentores, caixas de acordo com a configuração de estante adequada. Em sistemas de "picking" seguem normalmente o princípio de "person to load". Para o armazenamento destes suportes de unidades de carga são utilizados sistemas de extracção de carga distintos. O tipo e quantidade que podem ser colocados numa plataforma de elevação, influenciam em grande parte a performance e o funcionamento do sistema, bem como o tipo de interfaces de entrada/saída de armazém. Em geral quando são utilizadas paletes (utilizadas para unidades de carga superiores a 300 kg), a unidade de carga é manipulada por garfos telescópicos (fig. 2.14). Desta forma não é realizado nenhum movimento relativo entre posição de armazenamento e unidade de carga, o que faz com que a estante não tenha de suportar forças horizontais. Contudo este processo exige, devido aos movimentos sequenciais (posicionamento no alvéolo -> extensão dos garfos -> pequena elevação



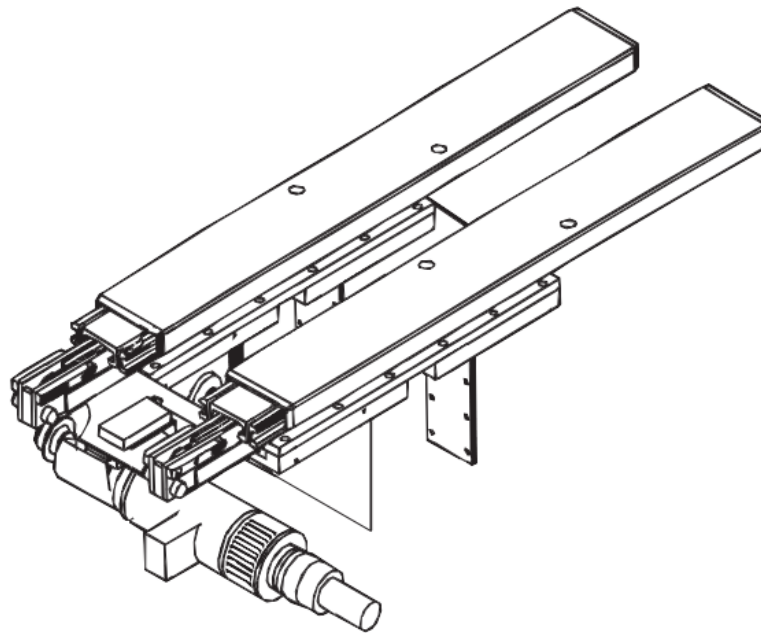


Figura 2.14: Garfos Telescópicos

da plataforma -> recolha dos garfos) um tempo de transferência significativo. Para unidades de carga não uniformizadas na área de cargas pesadas, que necessitam de uma grande superfície contínua, para manipular p.ex. bobines de papel, o princípio de garfos telescópicos podem não ser a solução mais conveniente. Para além disto outras soluções podem ser adoptadas para o sistema de extracção de carga, que permitam a manipulação de unidades de carga não uniformizadas. Na área de cargas leves (caixas, tabuleiros, ...) existem outras alternativas para o sistema de extracção de unidades de carga, onde o “puxar” ou “empurrar” de unidades de carga não apresentam dificuldade (assumindo superfícies lisas da unidade de carga e superfícies de baixo atrito). As figuras seguintes ilustram diversas alternativas para este tipo de sistema (fig. 2.15).

Transelevadores são utilizados principalmente em sistemas da alta densidade. Por sua vez também são utilizados em sistemas de armazenamento por estante de gravidade ou canal, utilizando “shuttles” que uma vez tendo o transelevador posicionado num canal, percorrem o mesmo para o acesso à unidade de carga pretendida. transelevadores para cargas leves (mini-loads) são uma solução comum para a manipulação de caixas, tabuleiros...

O controlo de transelevadores pode ser realizado manualmente por um operador embarcado em cabine, semi-manual, onde o transelevador é controlado por painel de controlo, ou automático. As soluções utilizadas para a transmissão de dados pode ser, wireless, cabo de manobra, calha eléctrica, ou infravermelhos e em algumas excepções por indução. Em sistemas de “picking” os pedidos são introduzidos visualmente num terminal



Figura 2.15: Sistemas de extracção para extracção de cargas leves

por um operador e transmitidos para o transelevador. Este tipo de operação é automática, onde o transelevador movimenta-se e posiciona-se automaticamente. Para a este tipo de sistema a remoção de um artigo de uma unidade de carga é realizado manualmente. Sistemas de “picking” completamente automáticos necessitam sistemas de sensores e robôs complexos para o acesso a artigos em uma unidade de carga. Em geral o peso mais comum é de 1000 kg para unidades de carga embora existam sistemas até 5000 kg. transelevadores uniformizados, dependendo da aplicação e construção, conseguem atingir velocidades de 240 m/min (Paletes) e 360 m/min para “mini-loads”, velocidades de elevação aprox. 80 m/min (Paletes) e 120 m/min em “mini-loads”, acelerações aproximadamente  $1 \text{ m/s}^2$  (Paletes) e  $3 \text{ m/s}^2$  e acelerações de elevação de aproximadamente  $2 \text{ m/s}^2$ . Uma das limitações para as acelerações permitidas são a própria unidade de carga, onde qualquer deslocamento relativamente ao suporte de apoio pode ser grave. Para atingir estas performances são utilizados sistemas de tracção com vários accionamentos. A performance de um transstocador, para além das características dinâmicas, depende muito da estratégia adoptada, onde em muitas situações pretende-se atingir um tempo de ciclo duplo reduzido ( cada ciclo de entrada é combinado com um ciclo de saída), onde o elemento limitador são as exigências do sistema. Em geral a componente de ciclo combinado está abaixo dos 20% (VDI 3561a, VDI 3561b, VDI 3561d ou FEM 9.851). A par do sistema de extracção de carga, que transportem unicamente uma unidade de carga, são concebidos

sistemas de carga múltiplos com capacidade para transportar duas até três unidades de carga (Paletes), respectivamente, seis ou mais unidades de carga (mini-loads), de forma a aumentar a taxa de manipulação, embora dependa muito de uma configuração de estante. A eficiência de um transelevador também se mede pelo percurso útil, isto é, os percursos mínimos e máximos que um transelevador consegue alcançar. Os percursos úteis também influenciam a taxa de utilização volumétrica de um armazém. No dimensionamento de uma configuração de estante, tem-se de ter em conta o curso do primeiro nível (altura do primeiro nível), curso do último nível (altura do último nível) e os fins-de curso nos dois extremos de uma ala, determinados pelo sistema de frenagem de emergência, isto é, mecanismo que absorção de colisão. A evolução no desenho de transelevadores tende para a minimização destes cursos.

### 2.3.2 Determinação de ciclos de trabalho e Directivas

O determinação exacta de ciclos de trabalho de sistemas com transelevadores é complexo, por depender muito da estrutura de um artigo e da estratégia de armazenamento associada, bem como da taxa de ocupação de um armazém. Para cálculos aproximados estão à disposição vários procedimentos, com os quais se pode obter e comparar valores característicos. O método clássico de cálculo segundo a FEM 9.851 é normalmente utilizado como uma norma. Mais amplamente a directiva VDI 4480a tenta calcular a performance com base no "throughput" do sistema total. Nestes casos é necessário recorrer a técnicas de simulação, que contemplem as diferentes estratégias de operação bem como diferentes cargas no sistema.

Em uma situação típica a performance de um sistema de armazenamento com transelevadores é de tal forma dimensionado, para que a performance necessária de entrada e saída por ala, corresponda exactamente à utilização de um transelevador. Em certos casos práticos a carga do sistema por ala é consideravelmente menor que a performance teórica de um transelevador. Motivos para estas situações são considerações de layout ou modernização de armazéns com transelevadores de última geração. Nestas situações pede-se a utilização de transelevadores em múltiplas alas. Para esta solução encontram-se transelevadores em alas com curvas, agulhagens ou carro de transferência de um transelevador convencional. A performance de tais sistemas depende muito da solução utilizada para o tempo de comutação de ala, isto é, da quantidade de entradas/saídas a realizar entre a comutação de alas. Esta é influenciada principalmente pela estratégia de armazenamento. Estes sistemas requerem uma análise específica com apoio de simulação para comprovar a performance requerida.

### 2.3.3 Armazéns com mudança de ala de transelevador

Transelevadores com capacidade de mudança de ala, comparativamente aos transelevadores convencionais, possuem uma máquina de translação com um sistema de pivots que permite a guiagem por carril em curva e agulhagem para diferentes alas .

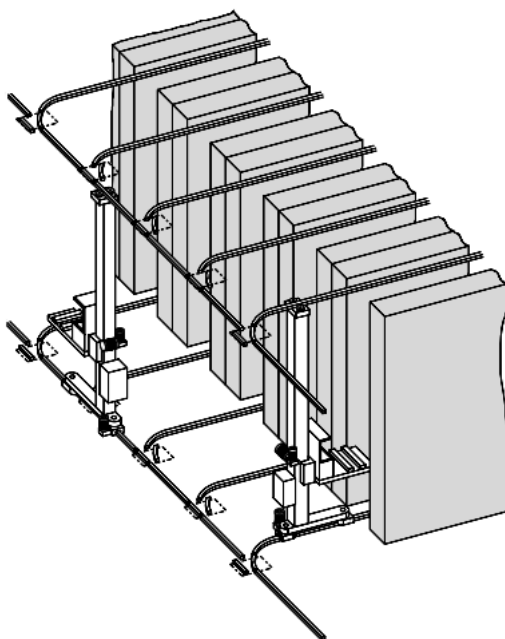


Figura 2.16: Transelevador com capacidade de mudança de ala

A comutação de ala pode ser realizada tanto na cabeceira de uma ala como no outro extremo, ou até nos dois, para tal toda a configuração de transportadores de entrada/saída deve ser contemplada. Principalmente, deve ser previsto o percurso de todas as alas de forma a permitir um desdobramento das estratégias de armazenamento como seja por exemplo a distribuição ABC. transelevadores com curva são utilizados quando a operação em uma ala não “esgota” a capacidade do transelevador. Para a utilização deste tipo de solução deve-se ter em conta os longos tempos de ciclo e as elevadas perdas de volume de armazenamento.

## 2.4 Transelevadores com ponte de transferência

Uma outra solução para a utilização de um transelevador em várias alas, é o recurso a uma ponte de transferência.

Uma ponte de transferência recebe um transelevador completo e desloca-se até à ala pretendida. Para melhorar o tempo de ciclo de entradas e saídas, a ponte de transferência

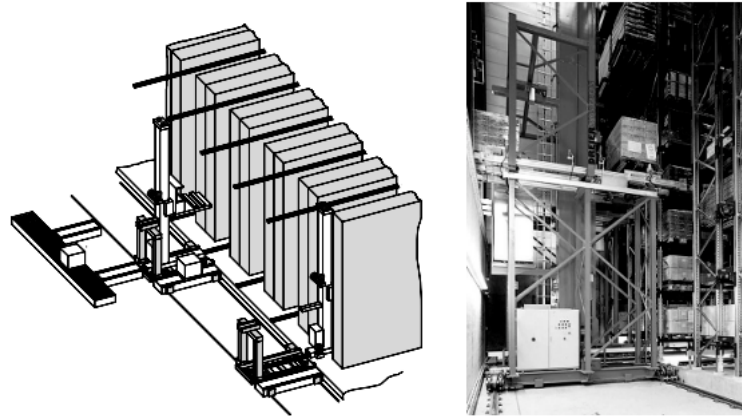


Figura 2.17: Ponte de transferência

pode estar equipada com transportadores de entrada/saída, de forma a transferir unidades de carga durante o processo de transferência para outra ala.



## Capítulo 3

# Ciclos de Trabalho e Estratégias de Armazenamento

Sistemas automáticos de armazenamento são actualmente um *standard* para muitas empresas. Estes sistemas englobam máquinas exclusivas, concebidas por regras claras de planeamento e operacionais.

A automação num sistema de fluxo de material significa a utilização de equipamento electromecânico, electrónica e sistemas baseados em computadores, de forma a estabelecer um interface entre múltiplas operações para operar e controlar processos de produção e serviços. A automação permite que equipamentos ou sistemas funcionem com pouca ou nenhuma intervenção por parte de um operador. Melhora a segurança, eficiência operacional, previsibilidade, aumentando ao mesmo tempo a resposta do sistema. A automação em certa medida reduz custos operacionais [8].

Um ponto essencial para a avaliação de performance de um sistema automático de armazenamento é o tempo de ciclo, respectivamente, o tempo de ciclo simples e ciclo combinado, quando as dimensões de uma estante e os parâmetros cinemáticos estão especificados. Para o desenvolvimento do sistema de fluxo de material deve ser procurado um conceito que permita atingir o tempo de ciclo pedido com um nível de investimento (e custo de operação) aceitável.

### 3.1 Performance de sistemas automáticos de armazenamento - Terminologia

Uma grandeza que descreve a performance de um armazém automático é a taxa de manipulação (handling rate). A directiva FEM 9.851 [9] define a taxa de manipulação

como “o número de unidades de carga que são armazenadas e desarmazenadas por unidade de tempo”. Na prática a taxa de manipulação é apresentada como o número de ciclos simples e combinados por unidade de tempo. De forma a simplificar a análise de performance, a taxa de manipulação pode ser calculada para diferentes zonas de operação. Posteriormente estes valores podem ser incluídos em uma análise global do sistema de armazenamento. O cálculo da taxa de manipulação é um problema complexo e é normalmente calculado através do tempo de ciclo. O tempo de ciclo define-se segundo a directiva FEM 9.851 [9] como um período de tempo para a realização de uma sequência de movimentos. Para o tempo de ciclo diferencia-se normalmente entre ciclo simples e ciclo combinado. O tempo de ciclo é entendido como um tempo médio entre vários ciclos de armazenagem/desarmazenagem em um armazém. Desta forma a taxa de manipulação é inversamente proporcional ao tempo de ciclo referenciado a uma hora de trabalho.

### 3.1.1 Ciclo Simples, Ciclo Combinado

No que concerne um ciclo de trabalho, refere-se em geral a todos os sistemas de transportadores de operação descontínua (pág. 20), que de certa forma realizam um percurso cíclico. O tempo necessário para um ciclo de trabalho, ou tempo de ciclo, engloba sempre um período de tempo “em carga” e um período de tempo em “vazio”. Quando um ciclo de trabalho de um transelevador é realizado entre várias posições de armazenamento, define-se então um ciclo de trabalho médio com um tempo de ciclo médio. Para tal é necessário desenvolver um modelo de acordo com o equipamento esquematizado na figura 2.13 e o plano vertical de uma estante. Para uma estante com altura máxima de elevação  $H$  e comprimento máximo  $L$ , temos  $m$  posições de armazenamento divididas em  $n_x$  colunas e  $n_z$  níveis uniformemente distribuídos conforme o esquema 3.1.

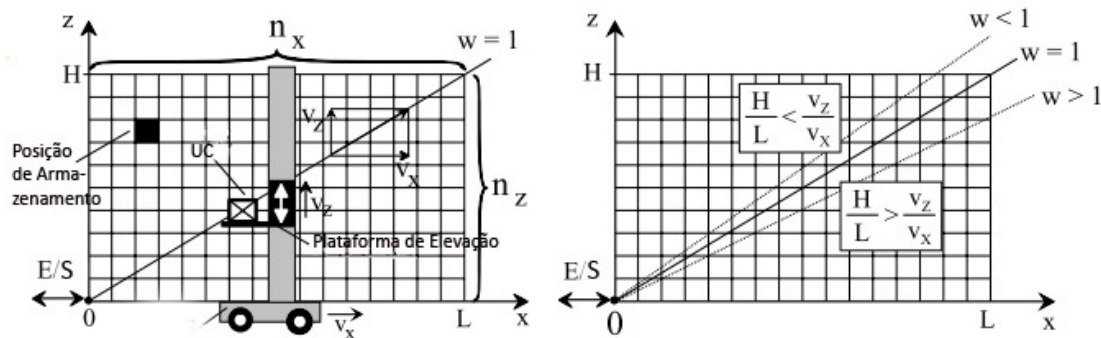


Figura 3.1: Modelação de de ciclo de trabalho

Os pontos de entrega para as entradas e saídas (E/S) no armazém, é o ponto inferior esquerdo ( $x=0, z=0$ ). É neste ponto que deve ter início toda a análise para o cálculo de



ciclo de trabalho de um transelevador.

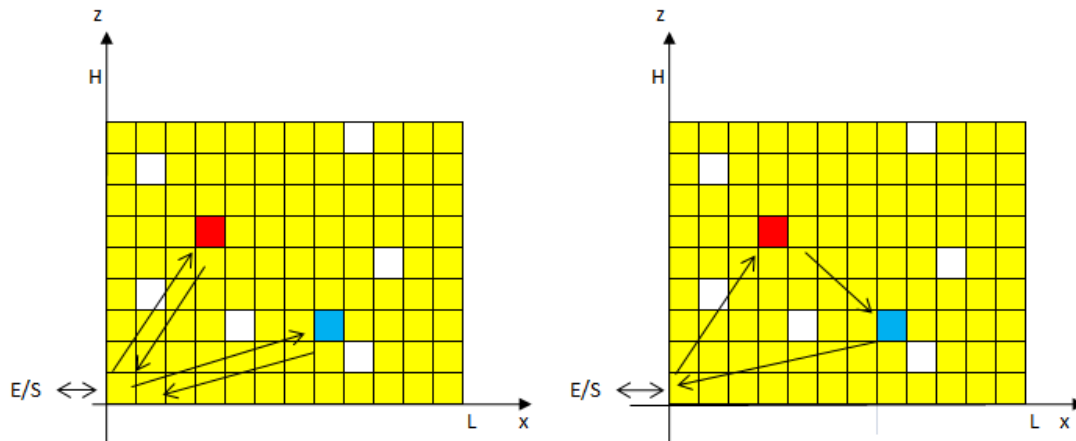


Figura 3.2: Ciclo Simples e Ciclo Combinado

Para a análise de um ciclo de trabalho assume-se sempre que o SRM está posicionado no ponto E/S. O SRM pode realizar dois tipos de ciclos simples. Um ciclo simples de armazenagem e um ciclo simples de desarmazenagem. Para um ciclo simples de armazenagem o retorno do SRM para a posição  $(x=0, z=0)$  é realizado em vazio, por sua vez, uma operação de desarmazenagem o percurso, desde a posição E/S até à posição na estante, é realizado em vazio. Com a combinação da posição de armazenagem com a posição de desarmazenagem é realizado um ciclo combinado.

Um ciclo simples de armazenamento de uma UC tem início com a sequência de transferência de carga no ponto E/S para o SRM. A próxima sequência consiste na deslocação da unidade de carga. Devido aos accionamentos independentes de um SRM a trajectória da UC no SRM descreve um movimento simultâneo de translação horizontal e vertical. Uma vez posicionado na posição de armazenagem, dá-se início a sequência de transferência da UC. A figura 3.2 a) esquematiza a operação de entrada/saída de uma UC. A combinação de uma armazenagem com uma desarmazenagem traduz-se em um ciclo combinado (Figura 3.2 b)). A directiva FEM 9.851 divide os ciclos em diversas componentes (ver figuras 3.3, 3.4).

A figura 3.1 ilustra um SRM 2.13 com um movimento de translação horizontal a uma velocidade  $v_x$  segundo um eixo-x. A plataforma acoplada à coluna do SRM tem um movimento segundo um eixo-z a uma velocidade  $v_z$ . Os movimentos em x e z podem ser realizados simultaneamente. Se a translação horizontal e vertical iniciarem em sincronismo no ponto  $(x=0, z=0)$ , o percurso descrito de um ponto na plataforma, respectivamente, sistema de extracção de carga ou mais concretamente unidade de carga (UC),

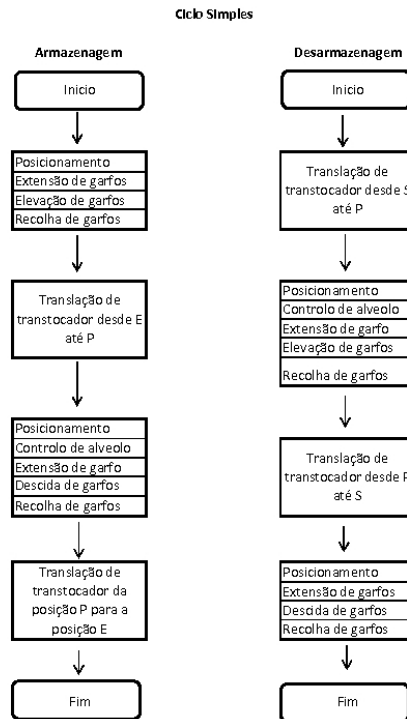


Figura 3.3: Sequência de Ciclo Simples de Armazenagem/Desarmazenagem

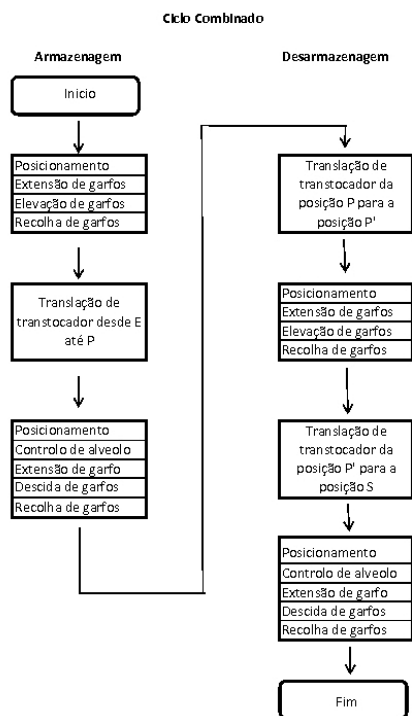


Figura 3.4: Sequência de Ciclo Combinado

corresponde a uma recta com a equação:

$$z = \frac{v_z}{v_x} \cdot x \quad (3.1)$$

sendo  $v_z$  e  $v_x$  valores máximos.

Os tempos de percurso são determinados pela extensão do percurso horizontal ou vertical, o que leva a definir o parâmetro  $w$  [10] de um armazém como:

$$w = \frac{H}{L} \cdot \frac{v_x}{v_y} \quad (3.2)$$

Caso a recta “corte” o canto superior direito, conforme a figura 3.1, então caracteriza-se a relação entre a geometria da estante e o transtocador com o parâmetro  $w=1$ .

A figura 3.5 ilustra exemplos de ciclos simples e combinado. No exemplo de ciclo de armazenagem a) é possível verificar que após o SRM atingir o ponto (1), só é necessário um movimento de elevação para atingir a posição de armazenagem desejada (2). Para o retorno verifica-se igualmente que o movimento em  $z$  é determinante para o tempo de ciclo final. Esta análise permite concluir que o tempo  $t_z$  é o tempo crítico para o ciclo de trabalho quando a posição de armazenagem está na área maior que  $z$ . Para o ciclo de desarmazenagem a mesma análise pode ser feita e para este caso o tempo  $t_x$  é crítico para o ciclo de trabalho.

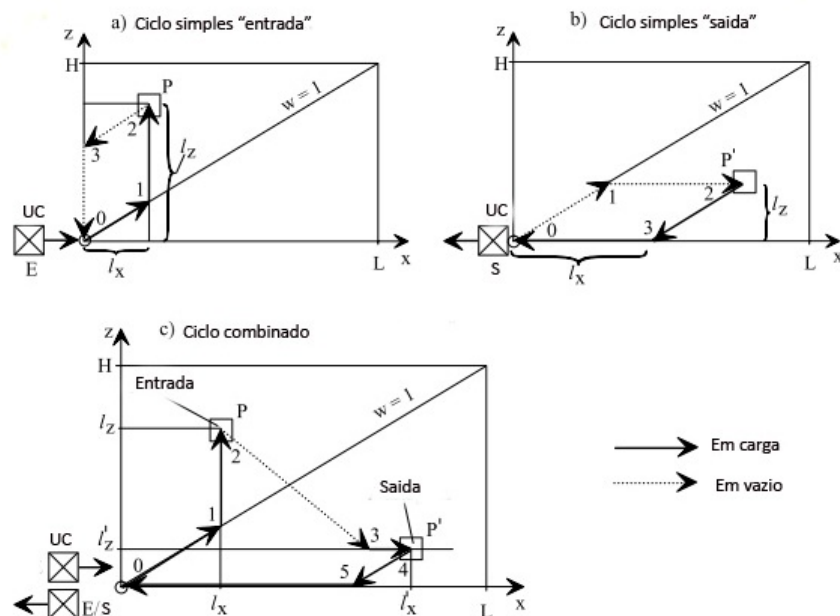


Figura 3.5: Exemplos de movimentação de Transtocador/plataforma de elevação

Uma outra conclusão que se pode retirar da análise da figura 3.6, considerando independentes os movimentos em  $x$  e  $z$ , é a de que todas as posições de armazenamento a uma altura  $l_z$  até à intercepção com a recta  $w$  3.2(segmento A-B), possuem o mesmo tempo de ciclo para o caso de um ciclo simples. O mesmo acontece para o eixo- $z$ . Os segmentos ilustrados na figura 3.6 designam-se isócronas.

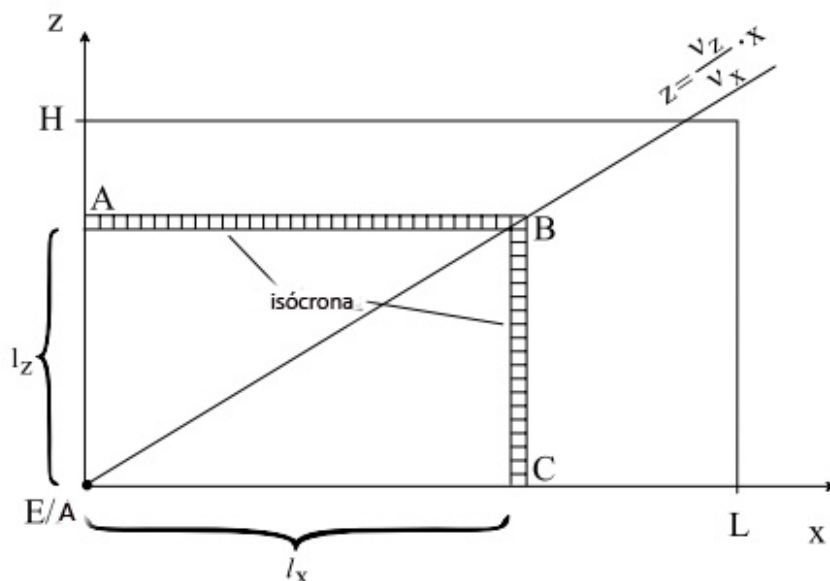


Figura 3.6: Isócrona com  $t_z=t_x=const.$  para todas as posições de armazenamento na linha A-B-C

Para os sistemas de extracção de carga é necessário definir o tipo de sistema a ser utilizado. O sistema de extracção de carga mais utilizado é o garfo telescópico, cuja componente no tempo de ciclo será explicado. Para a transferência de uma unidade de carga de uma posição de armazenamento, os garfos telescópicos têm-se de posicionar correctamente e estender os garfos segundo eixo- $y$  nos túneis (por vezes não possível) de uma paleta. A parte superior dos garfos tem de ter uma distancia de segurança segundo  $z$  com a aresta inferior da paleta. Após esta sequência a plataforma é elevada uns milímetros, segundo o eixo  $z$ , de forma a vencer uma flecha e os garfos possam recolher. Com esta descrição é possível definir um ciclo de trabalho do sistema de extracção de carga, constituído por uma extensão/recolha, elevação/descida. Como parte integrante de um ciclo de trabalho de um transtocador, é necessário contabilizar duas vezes este ciclo para a transferência de carga na posição de entrada/saída e para a posição na estante. Para o cálculo de um ciclo combinado é necessário contabilizar quatro vezes o ciclo de um garfo.

A figura 3.7 ilustra em síntese a sobreposição de movimentos de translação, elevação e do sistema de extracção de carga. As fases ilustradas para a translação a): Pausa (1),

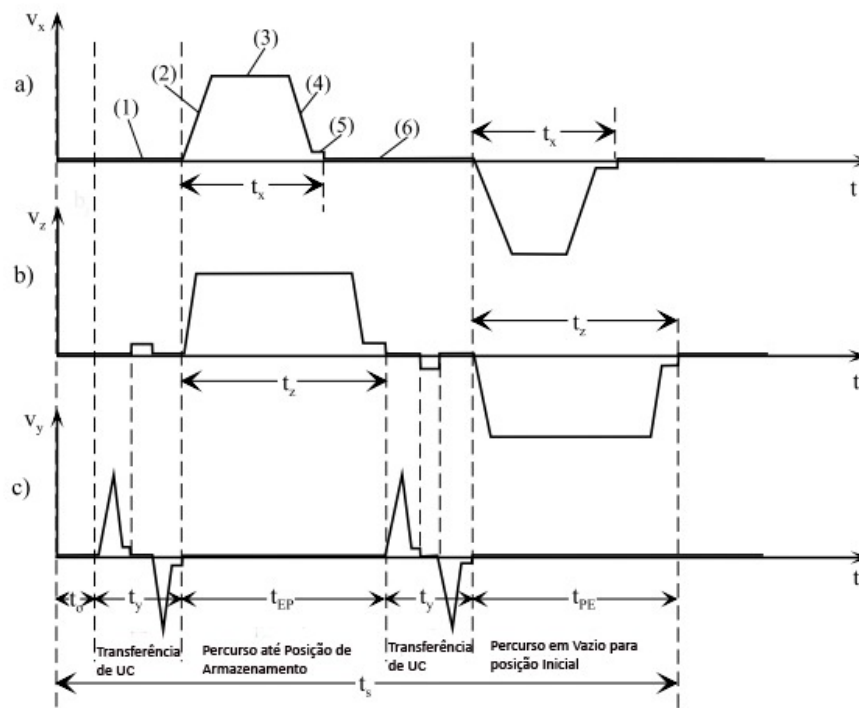


Figura 3.7: Evolução do tempo de ciclo em x a), z b), y c) de um ciclo simples

aceleração (2), velocidade constante (3), desaceleração (4), posicionamento a velocidade reduzida na posição destino (5), pausa(6), repetem-se em x,z e y . Para o cálculo de um ciclo de trabalho de um SRM são utilizadas as relações ilustradas 3.7 e a sobreposição.

### 3.1.2 Tempo de ciclo médio de um ciclo simples

O tempo de ciclo de um SRM para um ciclo simples, pode ser avaliado de acordo com o que foi ilustrado anteriormente.

$$t_{ciclo} = t_0 + 2 \cdot t_y + 2 \cdot \text{MAX}[t_x; t_z] \quad (3.3)$$

com:

- $t_0$  = tempos mortos do tempo de ciclo, p.ex. tempo de reacção, comutação, tempo de resposta de sensores, etc... (é visto como um tempo constante)
- $t_y$  = tempo para o ciclo de trabalho do sistema de extracção de carga. É considerado constante, porque o percurso  $l_y$  em y é constante
- $\text{MAX}[t_x; t_z]$  = é considerado o tempo maior entre  $t_x$  e  $t_z$  dependendo da distância percorrida

O valor esperado de cada tempo de ciclo  $t_{ciclo}$  entre uma entrada/saída e todas as posições de armazenamento na estante é:

$$E(t_{ciclo}) = \sum_{i=1}^m t_{ciclo_i} \cdot p_i \quad (3.4)$$

sendo  $p_i$  a probabilidade de ir à  $i$ -ésima posição. Considerando que o tempo médio de ciclo no plano vertical da estante, assume uma distribuição uniforme das posições a aceder temos para  $p_i$ :

$$p_i = \frac{1}{m} = \text{constante} \quad (3.5)$$

A equação 3.3 define como estocásticos os tempos dependentes da distância  $t_x, t_z$ , enquanto a  $t_0$  e  $t_y$  permanecem constantes. Desta forma o tempo de ciclo médio é em grande parte determinado pelo valor esperado do maior tempo de percurso entre uma posição de entrada/saída e todas as posições de armazenamento  $m$ . Simplificando temos:

$$t_l = \text{MAX}[t_x; t_z] \quad (3.6)$$

e com a equação 3.4, e usando o mesmo princípio da equação 3.5 temos:

$$E(t_l) = \sum_{i=1}^m \frac{t_{l,i}}{m} \quad (3.7)$$

Os tempos  $t_{l,i}$  são determinados a partir da análise velocidade-tempo do movimento de translação horizontal e vertical para todas as posições de armazenamento. Na ilustração da figura 3.8 está representado a evolução real da velocidade  $v=f(t)$  e uma simplificação. A simplificação lineariza o intervalo de aceleração, desaceleração e o intervalo a velocidade constante reduzida é desprezado. Para esta simplificação obtém-se um trapézio 0,1,2,3 como característica de velocidade-tempo. Outra simplificação é considerar os intervalos de aceleração/desaceleração iguais  $a$ :

$$a_1 = a_2 = a = \frac{2 \cdot |a_1 \cdot a_2|}{a_1 + |a_2|} \quad (3.8)$$

Para esta simplificação a distância percorrida é:

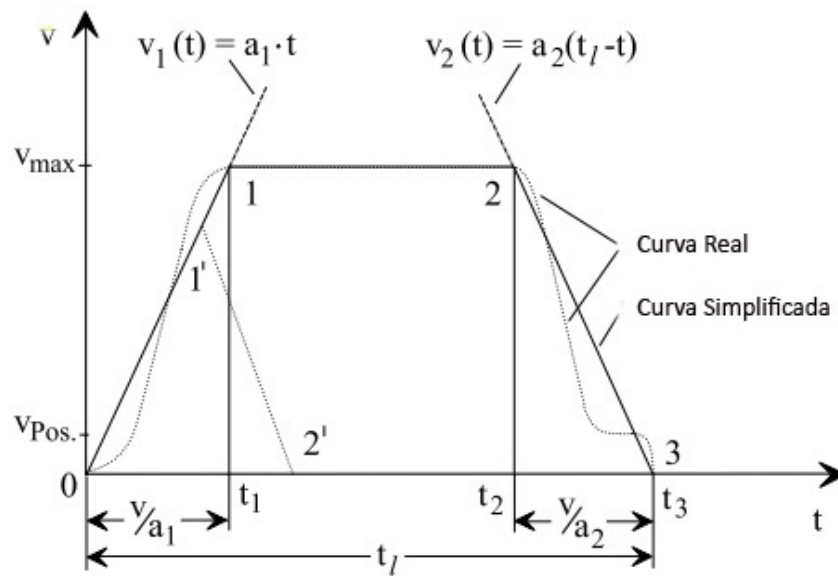


Figura 3.8: Característica Velocidade-tempo

$$l = \int_0^{t_l} v(t) dt = v \cdot t_l - \frac{v^2}{a} \quad (3.9)$$

com  $v=v_{max}$ . Isto implica que o tempo de percurso é

$$t_l = \frac{l}{v} + \frac{v}{a} \quad \text{para} \quad l \geq \frac{v^2}{a} \quad (3.10)$$

Para a equação 3.10 o termo  $\frac{v}{a}$  é constante com  $v = v_{max} = const$  e  $a = const$  para o intervalo de aceleração/desaceleração, enquanto  $\frac{l}{v}$  representa a componente que varia com a distancia percorrida. No caso  $l \leq \frac{v^2}{a}$  a forma de trapézio passa a ser um triângulo representado por exemplo pelos pontos 0,1'.2'. Este comportamento de velocidade caracteriza um percurso entre dois pontos próximos. Para este caso a distância percorrida é:

$$l = a \cdot \left(\frac{t_l}{2}\right)^2 \quad (3.11)$$

e o tempo necessário é:

$$t_l = 2 \cdot \sqrt{\frac{l}{a}} \quad (3.12)$$

Para o tempo médio de ciclo é utilizada a equação 3.10. Para as posições de armazenamento próximas por exemplo do ponto E/S, a equação 3.10 não corresponde à evolução temporal da velocidade. Como estas posições representam uma percentagem pequena face à totalidade do plano vertical de armazenamento, este erro pode ser desprezado. Para o valor esperado de tempo de percurso temos então:

$$E(t_l) = \sum_{i=1}^m \frac{1}{m} \cdot \text{MAX} \left[ \frac{x}{v_x} + \frac{v_x}{a_x}; \frac{z}{v_z} + \frac{v_z}{a_z} \right] \quad (3.13)$$

Este valor esperado pode ser calculado numericamente calculando todas as coordenadas x,z das posições de armazenamento  $i=1,2,\dots,m$  e utilizando a equação 3.3.

Para uma solução analítica temos:

$$m = \frac{A}{\Delta A} = \frac{L \cdot H}{\Delta x \cdot \Delta z} \quad (3.14)$$

com a notação infinitesimal temos:

$$m \rightarrow \infty \quad \Delta x \rightarrow dx \quad \Delta z \rightarrow dz \quad (3.15)$$

O modelo discreto de uma estante com um número finito de m posições de armazenamento é transformado em um modelo contínuo com um número infinitesimal de posições. Com esta modificação o somatório da equação 3.13 transforma-se na equação:

$$E(t_l) = \frac{1}{L \cdot H} \int \int_{A1 \cup A2 \cup A3} \text{MAX} \left[ \left( \frac{x}{v_x} + \frac{v_x}{a_x}; \frac{z}{v_z} + \frac{v_z}{a_z} \right) \right] dx dz \quad (3.16)$$

De forma a definir o domínio de integração e distinguir a componente temporal determinante para o tempo de ciclo, procede-se a uma divisão do plano em diferentes áreas 3.9.

O “percurso ideal” representado na figura 3.9 corresponde a isócrona ideal de movimento de um SRM com  $v_x$  e  $v_z$  máximos. O “percurso ideal” é o percurso máximo alcançável com velocidades máximas desde um extremo na estante até ao extremo oposto. A relação das duas velocidades que estabelece o declive da recta de “percurso ideal” é:

$$c = \frac{v_x}{v_z} \quad (3.17)$$



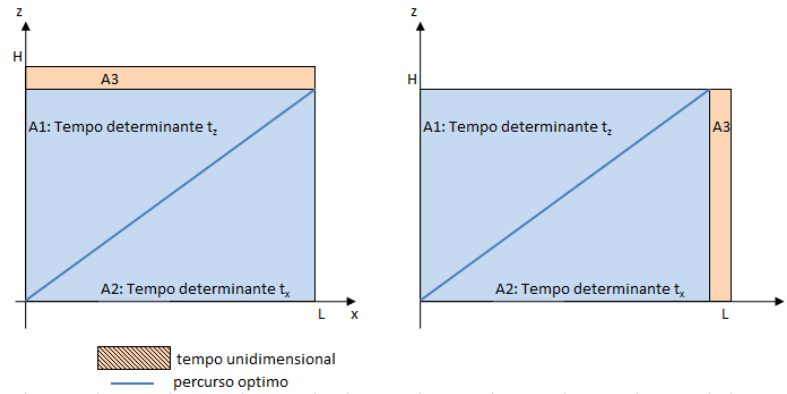


Figura 3.9: Divisão de Área: a)  $\frac{v_x}{v_z}H \geq L$  b)  $\frac{v_x}{v_z}H \leq L$

Com esta divisão a área A2 é determinada pela componente de tempo horizontal, enquanto para a área A1 a componente de tempo vertical é determinante. Esta divisão permite fazer a distinção de casos para a resolução do domínio de integração. Se o percurso do SRM for a isócrona, então um SRM que tenha o início do movimento no canto inferior esquerdo, atinge a posição no canto superior direito simultaneamente, enquanto para as outras posições são determinadas pelas maiores componentes de tempo.

Seja:

$$\frac{L}{v_x} = \frac{H}{v_z} \quad (3.18)$$

a recta de “percurso ideal” intercepta exactamente o canto superior direito da estante. Uma terceira área representa uma componente de tempo uni-dimensional.

$$\frac{L}{v_x} < \frac{H}{v_z} \quad (3.19)$$

a área adicional está representada na figura 3.9 a). Para esta área só é necessário considerar a componente vertical para o cálculo do valor esperado. Para o caso

$$\frac{L}{v_x} > \frac{H}{v_z} \quad (3.20)$$

ilustrado na figura 3.9 b), só é necessário considerar a componente horizontal para o cálculo do valor esperado. O critério de decisão para as diferentes áreas é em primeira análise a relação c de velocidades. Estas três áreas são consideradas para dois casos gerais distintos. Para o calculo do valor esperado é considerado que todas as posições de armazenamento têm a mesma probabilidade acesso, isto é, é considerada uma distribuição uniforme de posições de armazenamento.

1. Caso  $w < 1 \Rightarrow cH < L$

$$\begin{aligned}
 E(t_l) &= \frac{1}{LH} \left[ \int_0^{cH} \int_{\frac{1}{c} \cdot x}^H \cdot \left( \frac{z}{v_z} + \frac{v_z}{a_z} \right) dz dx + \right. \\
 &\quad \left. \int_0^{cH} \int_0^{\frac{1}{c} \cdot x} \cdot \left( \frac{x}{v_x} + \frac{v_x}{a_x} \right) dz dx + \right. \\
 &\quad \left. \int_{cH}^L \int_0^H \cdot \left( \frac{x}{v_x} + \frac{v_x}{a_x} \right) dz dx \right] \\
 &= \left( 1 - \frac{w}{2} \right) \frac{v_x}{a_x} + \frac{w}{2} \frac{v_z}{a_z} + \frac{L}{v_x} \left( \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \cdot w^2 \right) \quad (3.21)
 \end{aligned}$$

2. Caso  $w > 1 \Rightarrow H > \frac{L}{c}$

$$\begin{aligned}
 E(t_l) &= \frac{1}{LH} \left[ \int_0^L \int_{\frac{1}{c} \cdot x}^{\frac{L}{c}} \cdot \left( \frac{z}{v_z} + \frac{v_z}{a_z} \right) dz dx + \right. \\
 &\quad \left. \int_0^L \int_{\frac{L}{c}}^H \cdot \left( \frac{z}{v_z} + \frac{v_z}{a_z} \right) dz dx + \right. \\
 &\quad \left. \int_0^L \int_{\frac{x}{c}}^0 \cdot \left( \frac{x}{v_x} + \frac{v_x}{a_x} \right) dz dx \right] \\
 &= \left( \frac{1}{2w} \right) \frac{v_x}{a_x} + \left( 1 - \frac{1}{2w} \cdot \frac{v_z}{a_z} \right) + \frac{L}{v_x} \left( \frac{w}{2} + \frac{1}{6w} \right) \quad (3.22)
 \end{aligned}$$

3. Caso  $w = 1$

$$\begin{aligned}
 E(t_l) &= \frac{1}{LH} \left[ \int_0^L \int_{\frac{1}{c} \cdot x}^H \cdot \left( \frac{z}{v_z} + \frac{v_z}{a_z} \right) dz dx + \int_0^L \int_{\frac{x}{c}}^H \cdot \left( \frac{x}{v_x} + \frac{v_x}{a_x} \right) dz dx \right] \\
 &= \frac{1}{2} \left( \frac{v_x}{a_x} + \frac{v_z}{a_z} \right) + \frac{2}{3} \frac{L}{v_x} \quad (3.23)
 \end{aligned}$$

Uma interpretação geométrica da equação 3.23 pode ser inferida comparando com a equação 3.10 e a respectiva ilustração 3.8. A componente temporal

$$\frac{1}{2} \left( \frac{v_x}{a_x} + \frac{v_z}{a_z} \right) \quad (3.24)$$

corresponde ao tempo necessário de aceleração e desaceleração de meio ciclo. Esta componente é independente do percurso percorrido com a condição de  $l \geq \frac{v^2}{a}$ . Para a componente dependente do tempo a comparação com a equação 3.10 é:

$$\frac{2}{3} \frac{L}{v_x} = \frac{x}{v_x} \quad (3.25)$$

A coordenada correspondente é:

$$x = \frac{2}{3} \cdot L \quad (3.26)$$

e para a coordenada em z tem-se:

$$z = \frac{2}{3} \cdot H \quad (3.27)$$

As coordenadas x,z correspondem às posições de armazenamento ilustradas na figura 3.6, onde o tempo  $t_x \equiv t_z = E(t_l)$  corresponde ao tempo médio de meio ciclo.

Para o valor esperado de um ciclo simples de trabalho tem-se recorrendo à equação 3.3:

$$E(t_{\text{ciclo simples}}) = t_0 + 2 \cdot t_y + \left( \frac{v_x}{a_x} + \frac{v_z}{a_z} \right) + \frac{4 \cdot L}{3 \cdot v_x} \quad (3.28)$$

Para a verificação prática do tempo médio de ciclo de trabalho, determina-se o valor médio  $\bar{t}$  de várias viagens entre os pontos de entrada e saída e as posições de armazenamento nas isócronas  $x=\frac{2}{3}, z=\frac{2}{3}$ .

### 3.1.3 Tempo de ciclo médio de um ciclo combinado

Uma alternativa ao cálculo integral apresentado, é a utilização de uma abordagem estatística de acordo com o estudo realizado por Bolzer e Lippolt [11]. Esta abordagem é essencialmente prática para o cálculo da distância entre os pontos P e P' (ver figura 3.5). O primeiro passo para a resolução deste problema consiste em encontrar a função densidade de probabilidade das distâncias em x e em z. Seja  $X_1$  e  $X_2$  as posições na estante segundo o eixo-x. A distância entre estes pontos é  $X = |X_1 - X_2|$ . Assume-se, como anteriormente, que a escolha de  $X_1$  e  $X_2$  é aleatória, uniformemente distribuída entre (0,L). O espaço amostral fica representado por um quadrado no quadrante positivo com  $0 \leq X_1 \leq L$  e  $0 \leq X_2 \leq L$ . Para a função densidade de probabilidade conjunta temos:

$$f_{X_1, X_2}(x_1, x_2) = f_{X_1}(x_1) f_{X_2}(x_2) = \begin{cases} \frac{1}{L} \cdot \frac{1}{L} = \frac{1}{L^2} & \text{se } 0 \leq X_1, X_2 \leq L \\ 0 & \text{outos casos} \end{cases} \quad (3.29)$$

A distância  $X$  pode ser expressa como uma função de  $X_1$  e  $X_2$ ,  $X = |X_1 - X_2|$  e o espaço amostral correspondente ao evento  $(X \leq x)$  ou seja  $left|X_1 - X_2| \leq x$  pode ser definido como

$$F_X(x) \equiv P(X \leq x) = P(|X_1 - X_2| \leq x) \quad (3.30)$$

Para  $F_X(x)$ :

$$\begin{aligned} F_X(x) &= 2 \cdot \left( \int_0^x \int_0^{x_1} \frac{1}{L^2} dx_2 dx_1 + \int_x^L \int_{x_1-x}^{x_1} \frac{1}{L^2} dx_2 dx_1 \right) \\ &= \frac{2 \cdot L \cdot x - x^2}{L^2} \end{aligned} \quad (3.31)$$

diferenciando obtemos a função densidade de probabilidade:

$$f_X(x) = \frac{dF_X(x)}{dx} = \begin{cases} \frac{2(L-x)}{L^2} & 0 \leq x \leq L \\ 0 & \text{outos casos} \end{cases} \quad (3.32)$$

Para o eixo de  $z$  aplica-se a mesma análise e temos:

$$f_Z(z) = \frac{dF_Z(z)}{dz} = \begin{cases} \frac{2(H-z)}{H^2} & 0 \leq z \leq H \\ 0 & \text{outos casos} \end{cases} \quad (3.33)$$

Devido à independência a função densidade de probabilidade combinada das distâncias é composta pelo produto:

$$f(x, z) = \frac{4(L-x)(H-z)}{L^2 H^2} \quad (3.34)$$

O valor esperado da distância entre P e P' é determinado pela integração da função de densidade de probabilidade conjunta.

Para o valor esperado entre P e P' temos:

1. Caso  $w < 1 \Rightarrow cH < L$

$$\begin{aligned} E(t_{PP'}) &= \int_0^{cH} \int_{\frac{x}{c}}^H \left( \left( \frac{z}{v_z} + \frac{v_z}{a_z} \right) \cdot f(x, z) \right) dz dx + \\ &\quad \int_0^{cH} \int_0^{\frac{x}{c}} \left( \left( \frac{x}{v_x} + \frac{v_x}{a_x} \right) \cdot f(x, z) \right) dz dx + \\ &\quad \int_{cH}^L \int_0^H \left( \left( \frac{x}{v_x} + \frac{v_x}{a_x} \right) \cdot f(x, z) \right) dz dx \\ &= \left( \frac{1}{6} \cdot w^2 - \frac{1}{30} \cdot w^3 + \frac{1}{3} \right) \cdot \frac{L}{v_x} + \end{aligned}$$

$$\left(\frac{1}{6} \cdot w^2 - \frac{2}{3} \cdot w + 1\right) \cdot \frac{v_x}{a_x} + \left(\frac{2}{3} \cdot w - \frac{1}{6} \cdot w^2\right) \cdot \frac{v_z}{a_z} \quad (3.35)$$

2. Caso  $w > 1 \Rightarrow H > \frac{L}{c}$

$$\begin{aligned} E(t_{PP'}) &= \int_0^L \int_{\frac{x}{c}}^{\frac{L}{c}} \left( \left( \frac{z}{v_z} + \frac{v_z}{a_z} \right) \cdot f(x, z) \right) dz dx + \\ &\int_0^L \int_{\frac{L}{c}}^H \left( \left( \frac{z}{v_z} + \frac{v_z}{a_z} \right) \cdot f(x, z) \right) dz dx + \\ &\int_0^L \int_0^{\frac{x}{c}} \left( \left( \frac{x}{v_x} + \frac{v_x}{a_x} \right) \cdot f(x, z) \right) dz dx \\ &= \left( \frac{1}{6w^2} - \frac{1}{30w^3} + \frac{1}{3} \right) \cdot \frac{H}{v_z} + \\ &\left( \frac{1}{6w^2} - \frac{2}{3w} + 1 \right) \cdot \frac{v_z}{a_z} + \left( \frac{2}{3w} - \frac{1}{6w^2} \right) \cdot \frac{v_x}{a_x} \end{aligned} \quad (3.36)$$

3. Caso  $w = 1 \Rightarrow H = L$

$$\begin{aligned} E(t_{PP'}) &= \int_0^L \int_{\frac{x}{c}}^L \left( \left( \frac{z}{v_z} + \frac{v_z}{a_z} \right) \cdot f(x, z) \right) dz dx + \\ &\int_0^L \int_0^{\frac{x}{c}} \left( \left( \frac{x}{v_x} + \frac{v_x}{a_x} \right) \cdot f(x, z) \right) dz dx \\ &= \frac{1}{2} \left( \frac{v_x}{a_x} + \frac{v_z}{a_z} \right) + \frac{7}{15} \frac{L}{v_x} \end{aligned} \quad (3.37)$$

A figura 3.10 exemplifica a evolução de um ciclo combinado para as posições de armazenamento P e P'. O tempo de ciclo para a combinação de uma armazenagem em P e uma saída em P' é:

$$t_{ciclocombinado} = t_0 + 4 \cdot t_y + t_{EP} + t_{PP'} + t_{P'S} \quad (3.38)$$

com:

- $t_0$ =Tempos mortos
- $t_y$ =Tempo de ciclo do garfo
- $t_{EP}$ =tempo máximo para o percurso  $l_{EP}$
- $t_{PP'}$ =tempo para o percurso  $l_{PP'}$
- $t_{P'S}$ =tempo para o percurso  $l_{P'S}$

A figura 3.10 ilustra a sobreposição dos movimentos de translação horizontal a) elevação b) e garfo c) de um stocador a realizar um ciclo combinado. Recorrendo a equação 3.38 tem-se para o valor esperado do tempo de ciclo  $E(t_{ciclocombinado})$  com  $w=1$ :

$$E(t_{\text{ciclocombinado}}) = t_0 + 4 \cdot t_y + 3 \cdot \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{v_x}{a_x} + \frac{v_z}{a_z} \right) + 2 \cdot \frac{2}{3} \cdot \frac{L}{v_x} + \frac{7}{15} \frac{L}{v_x} \quad (3.39)$$

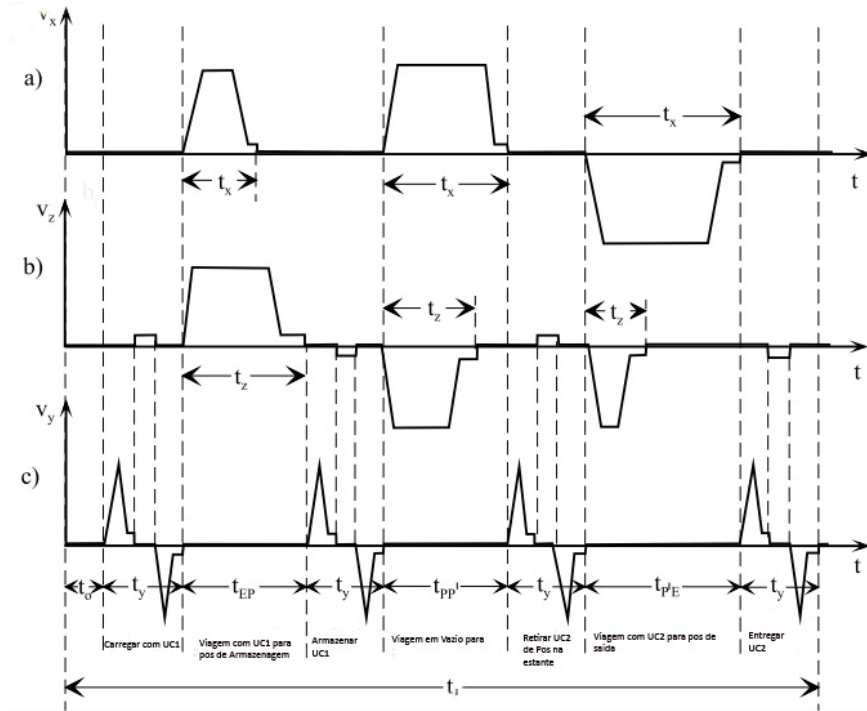


Figura 3.10: Evolução temporal de ciclo combinado

A equação 3.39 demonstra que as posições representativas para o valor esperado do tempo de ciclo combinado, correspondem às isócronas com  $x = \frac{2}{3}L$  e  $z = \frac{2}{3}H$  e as distâncias em x e z são:

$$|x_1 - x_2| = \frac{7}{15}L, \quad |z_1 - z_2| = \frac{7}{15}H \quad (3.40)$$

Os pontos representativos da directiva FEM 9.851 [9] são:

$$P\left(\frac{1}{5}L, \frac{2}{3}H\right), \quad P'\left(\frac{2}{3}L, \frac{1}{5}H\right) \quad (3.41)$$

enquanto que para a directiva VDI 3561 [12] os pontos representativos são:

$$P\left(\frac{1}{6}L, \frac{2}{3}H\right), \quad P'\left(\frac{2}{3}L, \frac{1}{6}H\right) \quad (3.42)$$

a diferença reside na aproximação:

$$\frac{7}{15}L \approx \frac{L}{2} \quad (3.43)$$

### 3.1.4 Directivas para Cálculo de Tempos de Ciclo

A importância do cálculo da taxa de manipulação no planeamento de um sistema de armazenamento e a complexidade da determinação de tempo de ciclo médio, levou a que a ordem de engenheiros alemã (VDI - Verein Deutscher Ingenieure) e a *Federation Européenne de la Manutention* (FEM) desenvolvessem directivas para permitir a comparação de performance entre diversos equipamentos e facilitasse a aceitação e a uniformização.

Directivas para o cálculo de tempos de ciclo:

- VDI 3561: Ciclos de Teste para comparação de performance e para aceitação de equipamentos de armazenamento em estante
- FEM 9.851: Comprovação de performance de transelevadores - Tempos de Ciclo
- VDI 4480: *Taxa de Manipulação* de sistemas automáticos de armazenamento com transelevadores dedicados a uma ala.

Estas directivas são úteis como ferramenta de planeamento de sistemas de armazenagem, mas não incluem factores de organização de armazenamento. Mais, são contempladas poucas configurações de armazenamento.

#### 3.1.4.1 VDI 3561

Conforme já foi referido, a directiva define dois pontos de armazenamento, representativos de todas as posições de armazenamento, dependentes do comprimento e altura do armazém (Método das Posições Representativas). É feita a distinção entre ciclo simples e ciclo combinado. O tempo calculado ou medido, necessário para a realização de um destes ciclos, serve principalmente como meio de comparação entre dois fornecedores ou para a aceitação da performance garantida. Embora seja utilizada para o dimensionamento de um armazém, para um planeamento rigoroso do fluxo de material, esta directiva não contempla nenhum factor de organização de armazém para além de um armazenamento aleatório.

Do título da directiva VDI 3561 “Ciclos de Teste para comparação de performance e para aceitação de equipamentos de armazenamento em estante” entende-se o significado de aplicação do Método das Posições Representativas.

O objectivo deste procedimento ou directiva é obtenção de um valor para o tempo de ciclo que defina claramente a performance de um sistema de armazenamento e que seja facilmente comprovável. São calculados taxas de ciclo de transelevadores e não taxas de ciclo de sistemas de armazenamento.

### 3.1.4.2 FEM 9.851

A directiva FEM 9.851 é também uma directiva para a avaliação de performance de transelevador com um sistema de manipulação de carga e uma unidade de carga. A versão mais recente inclui uma sugestão para o cálculo com dois manipuladores de carga em simples profundidade e uma sugestão para o armazenamento em dupla profundidade com um transelevador equipado com um manipulador de carga (nos dois casos a ala é de simples profundidade). Esta directiva também baseia-se no Método das Posições Representativas. Esta directiva não inclui nenhum factor de organização de armazenamento para além de um armazenamento aleatório. A directiva contém indicações de cálculo para o posicionamento de entradas e saídas em determinados pontos do armazém e considera uma distribuição uniforme para a probabilidade de visita a uma posição na estante. Tanto para a directiva VDI 3561 como para a FEM 9.851, assume-se um parâmetro  $w=1$ . Fora de uma janela entre 0,5 e 2, os valores obtidos não apresentam resultados fiáveis.

### 3.1.4.3 VDI 4480

Esta directiva inclui procedimentos de cálculo para pontos de entrada e saída em diferentes pontos do armazém. Inclui também uma sugestão para o cálculo do tempo de ciclo com armazenagem em múltipla profundidade com ala de simples profundidade. A condição mencionada para a FEM 9.851 aplica-se também nesta directiva. Ao título "*Throughput* de sistemas automáticos de armazenamento com transelevadores dedicados a uma Ala." deve-se salientar que esta directiva não inclui critérios de organização. O critério é mais uma vez o tempo de ciclo médio para o armazenamento aleatório.

Para uma determinação mais detalhada do fluxo de material em um armazém automático, a aplicabilidade destas directivas apresenta-se incompleta. Uma explicação possível para este facto é a data em que estas directivas foram elaboradas. O desenvolvimento tecnológico dos sistemas automáticos permite hoje em dia desenvolver sistemas que comparativamente aos anos 70 apresentam mais alternativas para uma solução final. As configurações de armazenamento em profundidade, a utilização de múltiplos sistemas de extracção de carga são hoje em dia frequentes e uma directiva ou ferramenta de cálculo são justificáveis. Um exemplo é a utilização recorrente em sistemas de armazenamento de caixas onde podem ser encontradas configurações de armazenamento em dupla profundidade com ala em dupla profundidade. Igualmente não são contempladas situações de Armazenamento Inteligente, como por exemplo estratégias de zonas rápidas. Parâmetros que contemplem estratégias de armazenamento também não são considerados. Isto significa que aspectos relevantes para a decisão de um sistema de armazenamento não são consideradas nestas directivas.



Em suma não existe um procedimento e ferramenta de planeamento que congregue uma análise consequente das soluções técnicas e de organização das variantes de sistemas de armazenamento.

## 3.2 Modelos analíticos para cálculo de tempos de ciclo

### 3.2.1 Configurações

A par dos desenvolvimentos técnicos de armazenamento existiu um forte desenvolvimento nos sistemas de extracção de carga. Não só a performance, como p.ex. as velocidades dos sistemas de extracção de carga, mas também novas configurações de armazéns beneficiaram de desenvolvimentos constantes. Desta forma é possível encontrar sistemas de extracção de carga que manipulam cargas paralelamente ou em série. A figura 3.11 esquematiza algumas soluções.

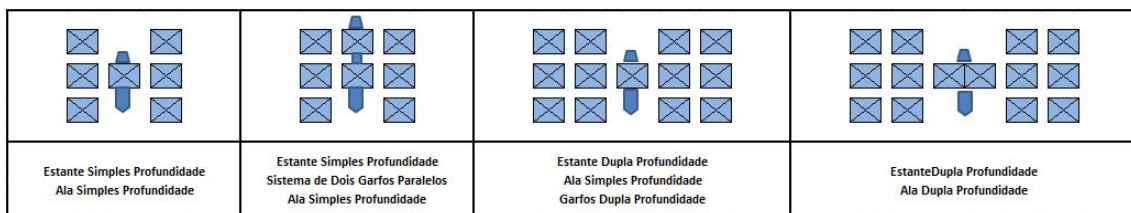


Figura 3.11: Exemplos de Configurações de Armazenamento

Em relação a configurações de armazéns, as configurações esquematizadas implicam alterações de profundidade de estante, quantidade de manipuladores de carga larga de ala. A configuração tem influência decisiva para o taxa de manipulação alcançável e utilização de volume disponível para armazenagem. Com a utilização de vários manipuladores de carga a taxa de manipulação aumenta já que a quantidade de unidades de carga manipuladas para um ciclo aumenta (fig. 3.12).

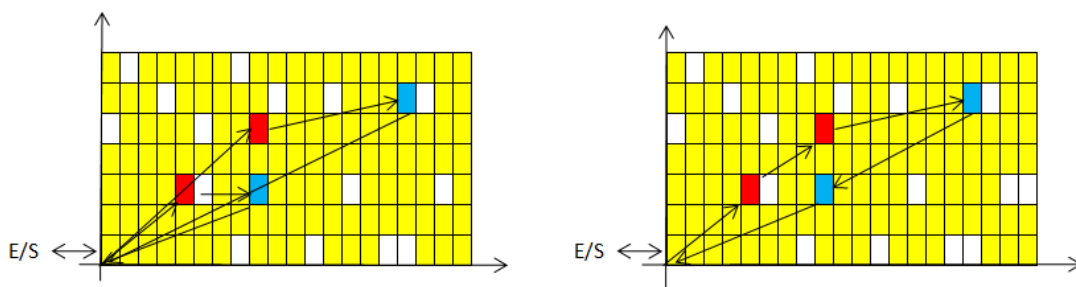


Figura 3.12: Redução de Tempos de Ciclo Recorrendo a vários Garfos

A utilização de manipuladores de carga que necessitam de uma ala com dupla profundidade (unidades de carga em série) , implica uma diminuição na taxa de utilização de volume já que a largura da ala para manipulação em série não está disponível para posições de armazenamento. Armazenamento em dupla profundidade aumenta a taxa de utilização de volume, mas o reposicionamento de unidades de carga de forma a permitir retirar a unidade de carga que se pretende da segunda profundidade, aumenta o tempo de ciclo.

### **3.2.2 Cálculo de tempo de ciclos para sistemas automáticos de armazenagem**

Como grandeza fundamental para a performance de um armazém automático, considera-se em geral a tempo médio de ciclo. Este tempo médio traduz o movimento completo para a entrada/saída do sistema.

O cálculo de taxa de manipulação de sistemas de armazenagem faz parte do tema logística desde à quase quatro décadas. As pesquisas realizadas são motivadas pelo significado da TM no desenvolvimento de um sistema automático de armazenagem. Um outro motivo são os custo de investimento e operacionais de um sistema de armazenamento, que aumentam consideravelmente quando para alcançar uma dada TM pretendida, é necessário utilizar mais um SRM. Para atingir a TM pretendida e ao mesmo tempo evitar um sobre dimensionamento, é necessário conhecer exactamente a performance do sistema de armazenamento desenvolvido. As palavras chave em termos de conhecimento são o cálculo de performance de diversas variantes incluindo a optimização conseguida recorrendo a estratégias de armazenamento.

As publicações sobre este assunto mostram que para um armazenamento em simples profundidade, ala de simples profundidade, um sistema de extracção de carga são os factores de influência mais pesquisados. Também para uma distribuição uniforme de acesso a posições, bem como estratégias de zonas e outras estratégias foram desenvolvidos modelos matemáticos.

Para o desenvolvimento destes modelos, o recurso a uma análise estocástica complexa, que considere todos factores de influência bem como uma descrição analítica de todas as variantes de armazenamento em um modelo matemático afigura-se quase impossível de realizar. A plausibilidade desta afirmação é demonstrada nas publicações que abordem as configurações mais simples para um armazém automático (uma ala em simples profundidade, estante simples profundidade, um manipulador de carga) em combinação com estratégias de armazenamento. Verifica-se que existem poucas sugestões ou até nenhuma para o cálculo analítico da taxa de manipulação. Especialmente para o armazenamento em dupla profundidade não existe até ao momento um procedimento analítico para o tempo de ciclo. Só a actual FEM 9.851 considera uma fórmula fechada para o cálculo do tempo médio de ciclo para armazenamento em dupla profundidade, que depende da

taxa de ocupação do armazém. Factores de influência como por exemplo utilização de pares na operação de armazenamento em dupla profundidade não são contemplados. Para combinações complexas de sistemas de armazenamento e organização de armazéns, como por exemplo a situação comum de armazéns de caixas e a utilização de *mini-loads*, não existem procedimentos para o cálculo de taxa de manipulação.

### 3.2.3 Modelos para armazenamento em simples profundidade

As primeiras formulas analíticas para a determinação do tempo médio de ciclo de sistemas automáticos de armazenamento foram dadas por Zschau (1963) e Schaab (1968). Gudehus publicou em 1972 um artigo onde apresentava uma fórmula para o valor esperado do tempo médio de ciclo de um ciclo combinado. O cálculo assume uma atribuição aleatória para a posição de armazenamento em um armazenamento em simples profundidade com um ponto de E/S no canto inferior esquerdo. Assume-se um parâmetro  $w$  próximo de 1. Então temos:

$$E(t_S)^{CicloCombinado} = 7 \cdot t_{mortos} + 4 \cdot t_{garfo} + 3 \cdot \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{v_x}{a_x} + \frac{v_y}{a_y} \right) + 2 \cdot \frac{2}{3} \cdot \frac{L}{v_x} + \frac{14}{30} \cdot \frac{L}{v_x} \quad (3.44)$$

A fórmula é constituída por cinco termos que podem ser observados num ciclo combinado: os tempos mortos ( $t_{mortos}$ ) e tempo dos garfos ( $t_{garfos}$ ), um termo para a aceleração bem como os termos para a viagem de armazenamento de uma unidade de carga, saída de uma unidade de carga e tempo de viagem entre ponto de entrada na estante e saída da estante.

Para poder contabilizar o parâmetro  $w \neq 1$  a fórmula foi desenvolvida para um parâmetro  $w \leq 1$ :

$$E(t_S)^{CicloCombinado} = 7 \cdot t_{mortos} + 4 \cdot t_{garfo} + 3 \cdot \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{v_x}{a_x} + \frac{v_y}{a_y} \right) + \left( \frac{4}{3} + \frac{w^2}{2} - \frac{w^3}{30} \right) \cdot \frac{L}{v_x} \quad (3.45)$$

A fórmula desenvolvida por Gudehus estabelece os dados para o cálculo de tempo de ciclo na directiva VDI 3561 e FEM 9.851. Geometricamente a fórmula determina duas posições relativas P e P'. Um ciclo combinado, que visita estas posições, pode ser visto como um ciclo representativo. O tempo de ciclo corresponde ao valor esperado do tempo médio de ciclo. A figura 3.5 ilustra colocação destas posições representativas.

### 3.2.4 Modelos Analíticos para armazenamento em dupla profundidade

Aos tempos que compõem um ciclo combinado em simples profundidade, são adicionados no caso de dupla profundidade, os tempos adicionais para reposicionamento de unidades de carga. Um cálculo analítico deste valor pode ser determinado com a adição de um percurso para o reposicionamento. Para tal é necessário distinguir entre o tempo

de reposicionamento realizado com a combinação de posições que estejam perto ou posições de posicionamento que estejam longe. Procedimento para o cálculo nesta situação, pode ser encontrado na FEM 9.851 e Lippolt [11]. Ao contrário da norma, que assume uma taxa de ocupação elevada e desta forma parte de uma probabilidade de 0,5 para ir à segunda profundidade, para Lippolt foi contemplada a taxa de ocupação no procedimento de cálculo.

$$E(t_S)_{DP}^{CC} = E(t_S)^{CSP} + E(t_R) + \frac{z}{1+z} \cdot \left( 2 \cdot \left( \frac{7}{15} \right)^{1-\frac{pR}{F^*}} \cdot \frac{1}{\sqrt{pR}} \right) \quad (3.46)$$

A componente para recolocação  $E(t_R)$  é desta forma dependente da taxa de ocupação  $z$ , do número de posições potenciais para reposicionamento  $pR$  e número de canais de armazenamento  $F^*$ .

Na directiva FEM 9.851 o cálculo do tempo de ciclo em dupla profundidade é apresentado como uma sugestão. Para além disso, se for utilizado o modelo simplificado de Lippolt, pode-se esperar resultados pouco fiáveis. Na directiva são representadas as posições de reposicionamento para cada posição representativa. O tempo de ciclo obtém-se de uma soma pesada das respectivas componentes de um ciclo:

$$E(t_S)_{DP}^{CC} = 2 \cdot t_{garfos,2.profundidade} + 4 \left( \frac{1}{2} \cdot t_{garfo,2.profundidade} \right) + 7 \cdot t_{morto} + 3 \cdot \frac{1}{2} \left( \frac{v_x}{a_x} + \frac{v_y}{a_y} \right) + 2 \cdot \frac{2}{3} \cdot \frac{L}{v_x} + \frac{14}{30} \cdot \frac{L}{v_x} \quad (3.47)$$

A performance e custos de um sistema de armazenamento dependem de estratégias com as quais o armazém vai funcionar. Com a escolha correcta de uma estratégia de armazenamento na fase de planeamento de um novo armazém, consegue-se uma redução no investimento e custos operacionais futuros [13]. Em armazéns existentes a utilização de estratégia de armazenamento podem melhorar o *Taxa de Manipulação* e a utilização de espaço. Dependendo da função e do objectivo as estratégias de armazenamento podem ser diferenciadas entre estratégias de ocupação e estratégias de movimentação.

A organização de um armazém é um factor determinante para atingir um *Taxa de Manipulação* elevada. A sequência de operações em um armazém é determinada por uma estratégia e complementa a organização de armazenamento escolhida. Estratégias de armazenamento importantes, que influenciam a performance de um armazém automático, são as estratégias de ocupação, constituídas por estratégias de alocação de alvéolos/posições na estante e reposicionamento, e estratégias de acesso aos alvéolos/posições, constituídas por estratégias de movimentação. Adicionalmente podem ser consideradas estratégias de sequência, que optimizam a sequência de pedidos de entrada/saída, bem como estratégias

de “vazio” onde são determinadas posições onde o transelevador deve-se posicionar no fim de um ciclo de forma a minimizar o tempo para o início de um próximo ciclo.



Figura 3.13: Estratégias de Armazenamento

### 3.3 Descrição Geral de Diferentes Estratégias

Na próxima secção serão descritas estratégias de armazenamento utilizadas em diferentes sistemas de armazenagem.

#### 3.3.1 Estratégias de Ocupação

As estratégias de ocupação são determinadas por um dado chave. Dependendo do artigo a ser armazenado, define-se uma zona para esse artigo e uma posição dentro dessa zona. O objectivo é optimização de espaço e percursos curtos para um ciclo de entrada/saída. As estratégias de ocupação mais importantes são:

- **concentração de artigos com elevada rotatividade:** Para reduzir o tempo médio de percurso do transelevador, as unidades de carga com elevada rotatividade são colocados em alvéolos/posições perto das Entradas/Saídas.
- **organização de alvéolos/posições reservadas:** para manter o inventário máximo esperado de um determinado artigo, alvéolos/posições fixos são reservados e não podem ser ocupados por unidade de carga de outros artigos.
- **atribuição aleatória de alvéolos/posições:** Posições que ficam vazias são utilizadas para a próxima unidade de carga a ser armazenada, independente do artigo em causa.
- **Organização mediante zonas fixas:** zonas específicas são reservadas para artigos específicos, ou certos alvéolos/posições são específicos para determinados lotes de unidades de carga.
- **estratégia uniformemente distribuída:** para garantir um acesso elevado a um artigo, a ocupação de um determinado artigo é distribuído por diversas alas. Com a alocação cíclica de alas obtém-se uma distribuição uniforme de artigos pelas alas.

- **Diferenciação de alvéolos:** Alvéolos dimensionados de acordo com as dimensões das unidades de carga
- **ocupação de alvéolos por lotes:** Alvéolos com várias posições de armazenamento (p.ex. em profundidade) são ocupados só com um artigo ou lote.
- **ocupação de alvéolos misto:** Alvéolos com várias posições de armazenamento são ocupados com um determinado número de artigos diferentes
- **para minimização de quebras de alvéolos:** Para alvéolos com múltiplas posições é procurado melhorar a taxa de ocupação e evitar ter mais que uma quebra de produto,

### 3.3.2 Estratégias de movimentação

Estratégias de movimentação determinam a sequência com que operações de entrada, reposicionamento e saída devem ser realizadas de forma a atingir uma elevada TM. As restrições mais importantes para estratégias de movimentação referem-se a operações de saída.

- **FIFO rígido (estratégia First-In-First-Out):** Em uma estratégia FIFO rígido as unidades de carga devem seguir na saída a mesma sequência com que foram armazenadas na entrada. A aplicação de um sistema FIFO inflexível requer um armazenamento em simples profundidade ou no caso de múltipla profundidade o ponto de entrada na estante e a saída tem de ser separados (p.ex. estante por canais onde a saída está no extremo oposto à entrada).
- **FIFO flexível:** De forma a evitar que prazos de validade expirem ou a criação de artigos obsoletos, o princípio FIFO deve movimentar/retirar os produtos que estão à mais tempo no armazém face aos artigos equivalentes que estão à menos tempo no armazém. Um sistema FIFO flexível proíbe em sistemas de múltipla profundidade, o armazenamento de unidades de carga em canais onde se encontrem artigos mais antigos.
- **LIFO (estratégia Last-In-First-Out):** Em sistemas de armazenamento onde as unidades de carga são armazenadas em canais (múltipla profundidade) a última unidade de carga a ser armazenada nesse canal é a primeira sair.

As estratégias de movimentação mais importantes são:

- **ciclo simples:** Se a entrada de unidades de carga é prioritário, então só se fazem ciclos simples de entrada; se a saída de unidades de carga são prioritárias então só se fazem ciclos simples de saída.
- **ciclo combinado:** De forma a melhorar o “Taxa de Saída” são combinadas as entradas no armazém com saídas. Se só existir um pedido de entrada e saída, é escolhida

uma posição de armazenamento perto da unidade de carga que vai sair. Existindo vários pedidos de entrada e saída são combinadas de forma a obedecer o mesmo principio para um pedido. O tempo de ciclo combinado   maior que o tempo de ciclo simples, mas são combinadas entradas e saídas o que aumenta o "Taxa de Saída".

- **ciclo de reposicionamento:** de forma a reposicionar unidades de carga para posições de acesso directo em sistemas de armazenamento e múltipla profundidade, são realizados ciclos de reposicionamento quando não existem pedidos programados de entrada/saída.
- **mudança de ala:** de forma a minimizar perda de performance devido a troca de ala e evitar tempos longos de entrada e saída, pedidos de entrada/saída são agrupados para um determinado tempo de ciclo  $T_{trocadeala}$ , atribuidos a uma ala que realizam as operações nas alas de forma cíclica. A frequência de troca de ala  $n_{trocadeala}=1/T_{trocadeala}$  é determinado pelo tempo máximo permitido de entrada e saída.
- **entrada:** para conseguir armazenar uma grande quantidade de unidades de carga o mais rápido possível, estas cargas são distribuídas ciclicamente para os transportadores de entrada na ala, ou são distribuídos para as alas que apresentem um buffer com menos ocupação.
- **saída:** as unidades de carga de saída com a prioridade mais elevada são as primeiras a serem colocadas nos "buffers" de saída.

## 3.4 Principios de Optimização

### 3.4.1 Redu o de tempos de ciclo

De forma a desenvolver uma estratégia de optimização podemos fixar os parâmetros da cinemática do transelevador, já que a distância entre dois pontos não pode ser reduzida com o simples aumento da velocidade e aceleração. Existem basicamente duas hipóteses para redu o do tempo de ciclo.

#### 3.4.1.1 Comprimento médio de percurso

Por um lado o percurso médio para os pontos de referência podem ser reduzidos. Para isto tem-se várias hipóteses   disposição. Para pontos previamente definidos   possível calcular o percurso mais curto. Esta estratégia é um problema clássico de Investigação Operacional mais concretamente "*Travelling Salesman Problem*". Uma outra hipótese para a redu o do percurso médio é a escolha estratégica das posições livres   escolha para um ciclo. Um exemplo é a colocação dos pontos de entrada/saída de forma a reduzir a distância entre os pontos de armazenamento e retirada de armazém. Se a rotatividade

de unidades de carga for conhecida, e constante ao longo de um determinado período de tempo, esta informação pode ser utilizada para a redução do percurso médio, colocando por exemplo as unidades de carga com maior rotatividade perto dos pontos de entrada e saída. Estas estratégias são conhecidas com estudos publicados para o caso de armazenamento em simples profundidade com um sistema de extracção de carga.

#### **3.4.1.2 Quantidade de percursos parciais de um ciclo**

Uma outra abordagem para a redução do tempo médio de ciclo é através da minimização da quantidade de percursos médios em um ciclo. Esta minimização é conseguida utilizando mais que um sistema de extracção de carga em posições que permitam a extracção de unidades de carga simultaneamente.



## Capítulo 4

# Modelos de Simulação para determinação de tempos de ciclo

Para atingir o objectivo do projecto, criar uma plataforma de cálculo que possibilite a um utilizador calcular ciclos de trabalho de um sistema automático de armazenamento, foi criado um modelo de simulação parametrizado. O presente capítulo tem como objectivo apresentar a composição e as funcionalidades dos modelos criados para simulação.

Estudos de simulação são realizados em diversas áreas da industria. A simulação permite obter mais segurança nos sistemas planeados, retirar mais informação sobre o comportamento de um sistema, ou compreender melhor o funcionamento de um sistema. A simulação é utilizada principalmente nas situações onde um processo real só consegue ser recriado ineficientemente, isto é, com recursos economicamente insustentáveis. Algumas situações onde a simulação deve ser utilizada são:

- variações temporais em um sistema;
- limites de métodos analíticos atingidos;
- experimentar em sistemas reais é economicamente não viável ou impossível;
- não há resultados empíricos do sistema real, o próprio sistema não existe;
- compreensão ou descrição do sistema através de equações simples com relações complexas é impossível .

O sentido de um estudo de simulação na perspectiva económica, é o de um sistema complexo de elevado investimento com vários elementos interligados entre si, constituir um problema de difícil avaliação. Assim um estudo de simulação justifica-se sempre que os custos que um mau planeamento possa acarretar. Nesta perspectiva a simulação acontece antes do investimento. Por outro lado a realização de um estudo de simulação

necessita tempo e por conseguinte gera custos. Por esta razão é necessário *pesar* se um estudo de simulação é necessário, isto é, se o sistema complexo a estudar justifica uma simulação.

## 4.1 Sistema

Uma vez que um problema esteja devidamente formulado, é necessário definir o sistema que se pretende modelar. Um sistema é composto por um grupo de elementos que recebem entradas e "fornecem" saídas. Os elementos determinam como o sistema converte as entradas em saídas. Um sistema pode pertencer a um ambiente que pode potencialmente afectar as entradas e saídas. A estrutura de funcionamento descrita pode ser ilustrada da seguinte forma.

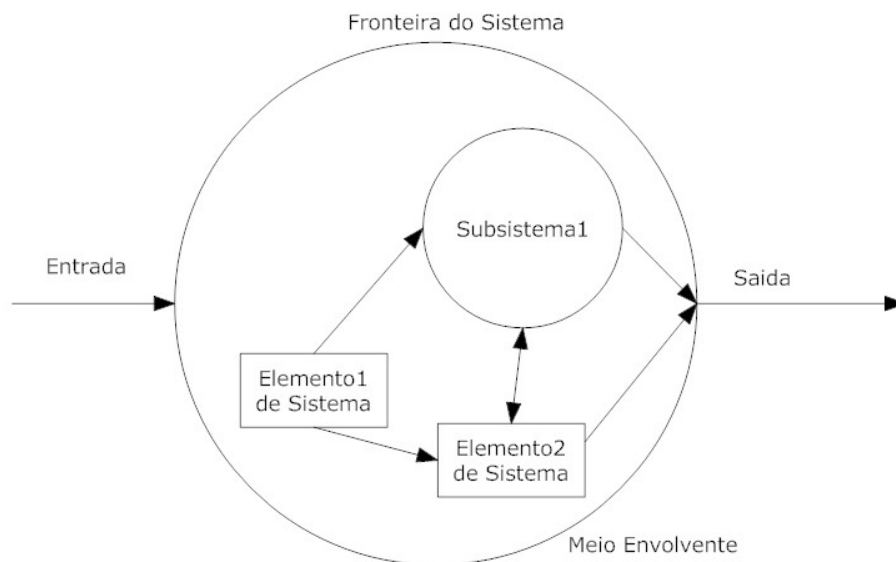


Figura 4.1: Representação esquemática de um sistema

A ilustração 4.1 representa esquematicamente um sistema. Um sistema está limitado do meio envolvente por uma fronteira e dividido em diversos elementos e subsistemas. Os pontos de interface de um sistema com o meio envolvente estão definidos como entrada e saída. A entrada representa pontos de entrada de grandezas (variáveis) no sistema, respectivamente, influência do meio envolvente no sistema. A saída por sua vez representa as grandezas de saída de um sistema ou influência do sistema no meio envolvente. Um sistema possui outras variáveis de estado que definem todos os estados possíveis de um sistema. Para a concretização de uma finalidade, um sistema pode ser simplificado às suas variáveis de sistema que permitem atingir essa finalidade.

A figura 4.2 ilustra a representação física de alguns elementos do sistema a simular. A figura 4.2 tem a finalidade de representar um modelo neutro no que concerne as grandezas estáticas como por exemplo o comprimento e a altura da estante. Em simulação estes valores são tratados como variáveis de entrada.

## 4.2 Modelação

A modelação de um sistema está muito próxima da composição de um modelo matemático. A análise de um sistema através de um modelo implica que a representação de um sistema que constitui o modelo será manipulável numericamente. O exercício de construção do modelo do sistema, tem início em um modelo conceptual equivalente à lógica aproximada do sistema real, que como tal constitui uma abstracção simplificada do mesmo. O processo de modelação implica:

- Identificação das entidades principais do sistema e dos seus atributos característicos;
- Identificação e representação das regras que governam o sistema que se quer simular;
- Captação da natureza das interacções lógicas do sistema ;
- Verificação de que as regras incorporadas no modelo são uma representação válida do sistema real;
- Representação do comportamento aleatório.

Para a modelação de um sistema de armazenamento é necessário definir as grandezas que influenciam a configuração de um sistema de armazenamento. No conjunto destas grandezas define-se um subconjunto de grandezas de entrada e de saída.

### 4.2.1 Parâmetros de Entrada

Um dos objectivos é poder avaliar diferentes configurações variando parâmetros de entrada.

Para descrever e distinguir diferentes sistemas de armazenamento automático, é conveniente fazer uma separação entre parâmetros técnicos e parâmetros de operação. Os parâmetros técnicos descrevem as características físicas do sistema. Estes parâmetros são p.ex., comprimento, altura, velocidade, aceleração, etc. Para parâmetros de operação temos as estratégias de armazenamento.

**Parâmetros Técnicos** Os parâmetros técnicos podem ser divididos em parâmetros geométricos e dinâmicos, onde a configuração do sistema pode ser definida nas grandezas geométricas 4.3.

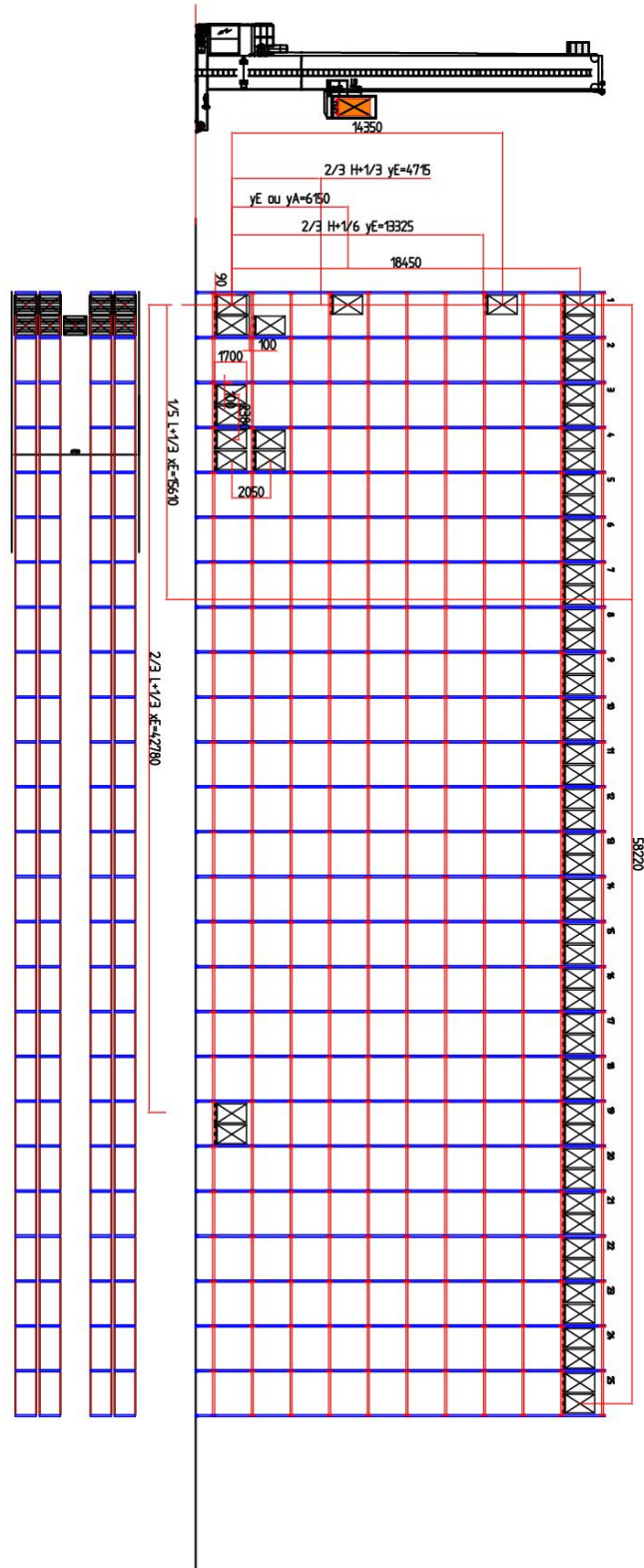


Figura 4.2: Layout de Teste



Figura 4.3: Parâmetros Técnicos

**Parâmetros de Operação** A par dos parâmetros técnicos, os parâmetros de operação são determinantes para a performance de um sistema de armazenamento automático 4.4 .

#### 4.2.2 Variáveis de Saída

Para o valores de saída tem-se como objectivo obter os resultados pretendidos da simulação. Para o cálculo de performance de um armazém automático é relevante obter valores para:

- Tempo de Ciclo simples de entrada;
- Tempo de Ciclo simples de saída;
- Tempo de Ciclo combinado;

### 4.3 Simulação

De forma a desenvolver um modelo de simulação é necessário um programa no qual seja possível aplicar o modelo de simulação. Apesar das várias possibilidades de classificação de programas de simulação, estes podem ser divididos em dois grupos principais.

Por um lado existem programas de simulação específicos, que para um utilizador não são necessários grandes conhecimentos de programação. Estes programas são normalmente limitados quanto à sua flexibilidade e capacidade, mas são bastante simples de

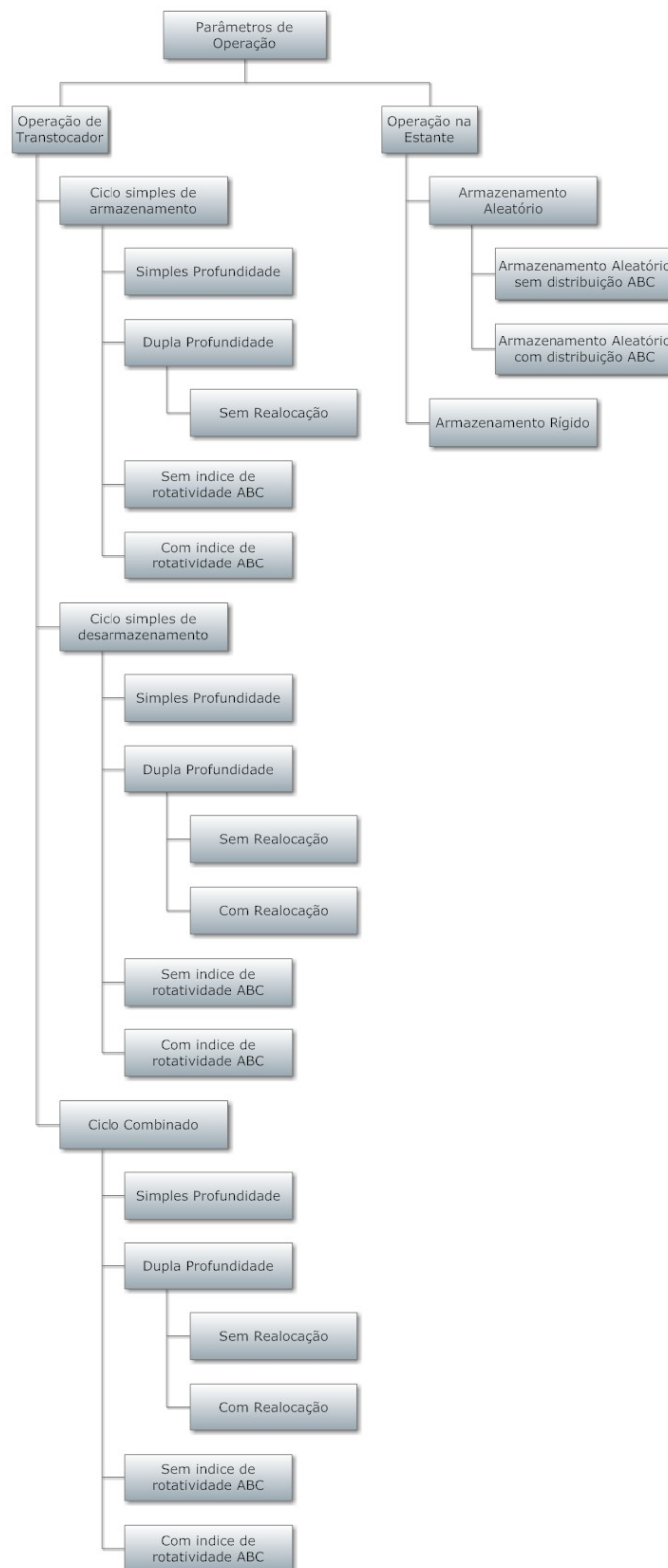


Figura 4.4: Parâmetros de Operação

utilizar e consegue-se gerar modelos de simulação com facilidade. Por outro lado existem programas de simulação que são mais generalistas. Com estes programas é possível desenvolver modelos de simulação muito próximos do sistema a simular, com recurso a uma linguagem de programação específica do programa de simulação e cujo grau de abstracção é elevado. Os conhecimentos para trabalhar com segurança o programa e a linguagem de programação, é mais exigente para o utilizador. Por esta razão estes programas de simulação são utilizados por pessoas especializadas que por sua vez se dedicam profissionalmente à simulação por encomenda.

Para a elaboração deste trabalho foi utilizado o programa de simulação Anylogic. Este programa é um misto dos dois tipos de classificação apresentada.

Simular no sentido mais lato significa experimentar não no sistema real, mas antes numa representação (modelo) desse sistema. A simulação tornou-se uma das ferramentas mais úteis em diferentes áreas de conhecimento com por exemplo na área de engenharia.

Frequentemente a simulação é utilizada na indústria para analisar sistemas de fluxo de material como por exemplo armazéns automatizados. Conforme já foi referido, antes de partir para um elevado investimento, devem ser avaliadas alternativas entre variantes de capacidade, layout, planos de produção e estratégias de controlo. Uma simulação permite identificar pontos críticos e gargalos de um sistema e corrigir antes da sua realização.

A figura 4.5 ilustra o posicionamento da simulação no contexto geral de análise de um sistema de fluxo de material. A simulação está entre fases que não são necessariamente de simulação. Inicialmente é representada a dinâmica do sistema, de forma a inferir dados, regras e restrições que traduzam o sistema real em um modelo. A fase seguinte deve permitir através de simplificações e abstracções chegar a um modelo simbólico que traduza o comportamento do sistema.

Para o "mapeamento" do modelo simbólico em um modelo de simulação (*Software*) existem diversas possibilidades. Uma das possibilidades mais trabalhosas é desenvolver um software de simulação recorrendo a linguagens de programação de alto nível (C,C#,Java,Basic,etc). Uma forma mais simples é recorrer a linguagens de simulação (GASP,GPSS,SIMULA,SIMIAN,etc) que estão embebidas em linguagens de programação de alto nível e possuem elementos específicos de simulação como por exemplo algoritmos para o controlo da sequência da simulação ou na criação de números aleatórios. Apesar desta vantagem, a linguagem de simulação só por si, requer muita experiência na implementação de um modelo de simulação executável. A alternativa mais simples é a utilização de simuladores orientados a blocos (p.ex. Anylogic, ARENA, AutoMod, FlexiSim,SIMIO,em-Plant, Wirthsim,etc). Alguns destes simuladores foram especificamente desenvolvidos para a simulação de sistemas de fluxo de material, onde existem bibliotecas específicas de elementos de fluxo de material como transportadores, transelevadores. Através de uma parametrização, estes elementos podem facilmente ser adaptados a um problema específico. Através de um editor gráfico estes elementos podem ser

interligados. Num passo seguinte são adicionados elementos dinâmicos que num sistema seguem determinadas regras de movimentação. A figura 4.6 ilustra um exemplo de simulação com o programa WirthSim. Neste exemplo é possível visualizar uma simulação de um sistema de transportadores. A figura apresenta o editor gráfico onde é construído o modelo de simulação, uma animação do sistema de transportadores e um gráfico com a cadência do sistema de transportadores.

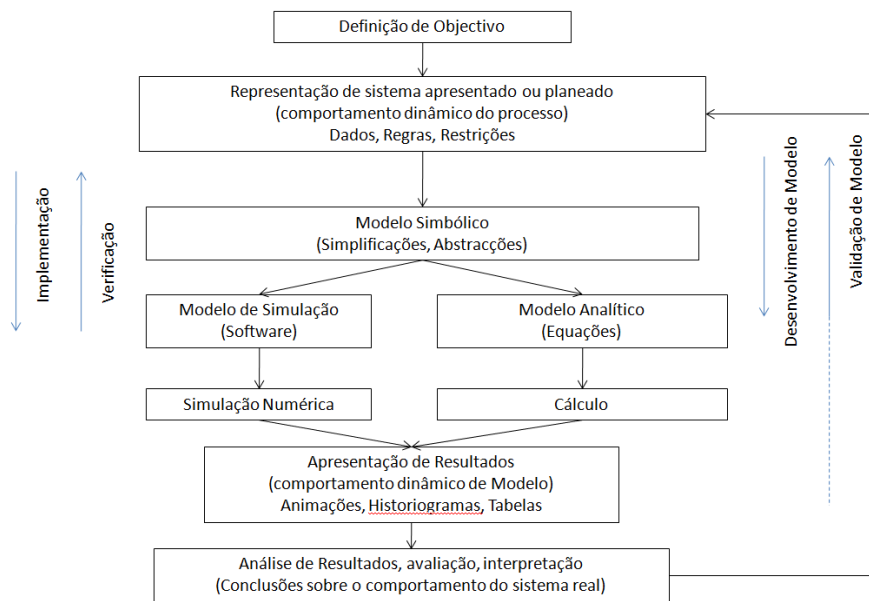


Figura 4.5: Utilização de Simulação

## 4.4 Métodos de Simulação

O método de simulação define-se na simulação como a forma com que a variável tempo é executada. O tempo de simulação representa a progressão do tempo real no modelo de simulação (relógio de simulação). Na execução de uma simulação, o modelo é executado por uma unidade de processamento, e o estado do modelo, descrita a partir dos estados dos elementos do modelo (vector de estado), altera-se com a evolução do tempo de simulação. Para a actualização do tempo dentro de um modelo é aplicável a metodologia de simulação contínua ou de eventos discretos. Na simulação contínua as variáveis de estado são mapeadas continuamente ao longo do tempo - o comportamento do sistema é descrito por um conjunto de equações diferenciais. Na simulação discreta as mudanças de estado são realizadas em pontos discretos no tempo. A progressão do tempo pode ser realizada de duas formas:



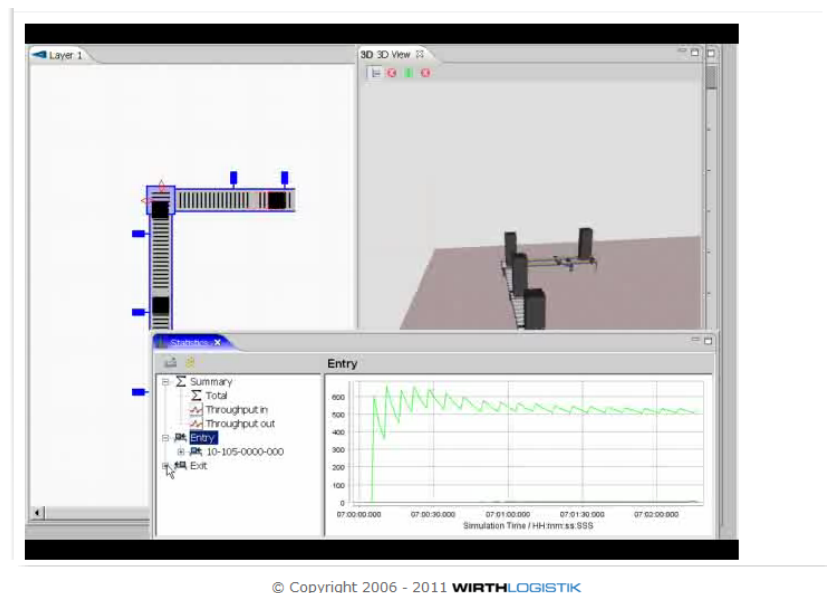


Figura 4.6: Simulação com programa WirthSIM

- orientada a eventos ou simulação discreta assíncrona (inglês: next event time advance mechanism);
- controlada pela variável tempo ou simulação discreta síncrona (inglês: fixed-increment time advance);

Enquanto numa simulação orientada a eventos, a mudança de estado no modelo de simulação, acontece com a entrada de eventos, o tempo de simulação para o caso da simulação discreta síncrona, avança com incrementos de tempo fixos.

Nos seguintes capítulos, e a metodologia seguida para os modelos de simulação foi o de simulação orientada a eventos, pelo qual será dado o enfoque. Na modelação discreta orientada a eventos o sistema a modelar é construído por Eventos, Processos e Actividades:

- Um evento é basicamente atómico e por conseguinte não divisível. A entrada de um evento acontece geralmente em pontos no tempo não equidistantes. Com a entrada de um evento o estado permanece até à entrada do próximo evento. A geração de um evento pode acontecer fora do modelo (exógeno), ou dentro do modelo devido a um estado anterior ou evento (endógeno);
- Uma actividade engloba uma operação fixa no tempo, que transforma o estado de um objecto. É caracterizada pelo início e fim de evento;
- Um processo descreve uma sequência ordenada no tempo de eventos, que está normalmente associada a um objecto de simulação específico.

Com a utilização desta terminologia e as perspectivas associadas é possível escolher diversos caminhos para a modelação.

Para a elaboração deste trabalho foi utilizado o *software* de simulação *AnyLogic*. O *software AnyLogic* permite utilizar os paradigmas de modelação mais comuns. Estes são:

- Modelação orientada a eventos ou processos discretos;
- Modelação de dinâmica de sistema;
- Modelação baseada em agentes.

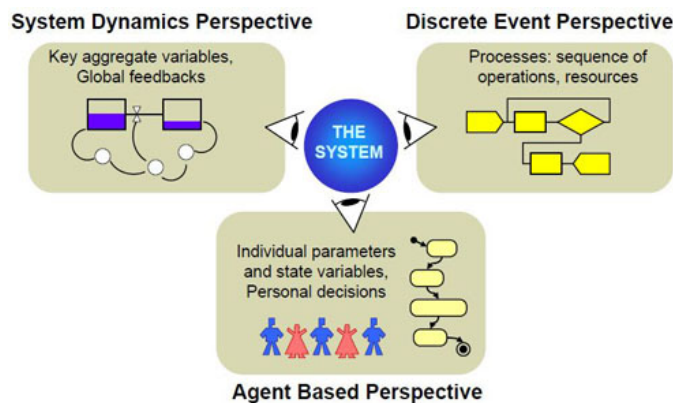


Figura 4.7: Abordagem de Software de Simulação *AnyLogic*

A modelação de dinâmica de sistema bem como modelação orientada a eventos discretos são paradigmas já antigos, comparativamente à modelação baseada em agentes. Do ponto de vista técnico a modelação de dinâmica de sistema focaliza-se principalmente em processo contínuos, a modelação orientada a eventos ou processos discretos bem como modelação baseada em agentes, tem uma evolução discreta no tempo, isto é, muda de um evento para outro. O *AnyLogic* permite a utilização destes paradigmas num único modelo. Não existe uma hierarquia definida.

## 4.5 Simulação de sistema automático de armazenamento

Um dos objectivos principais deste trabalho é utilizar a simulação para validar modelos analíticos de cálculo de ciclos de trabalho. Para o estudo de simulação em *AnyLogic* elaboram-se quatro modelos independentes, que se diferenciam da seguinte forma

- ala de simples profundidade;
- ala de simples profundidade / operação por zona A e B;
- ala dupla profundidade;

- ala dupla profundidade / operação por zona A e B.

Para estes modelos de simulação é possível variar parâmetros estáticos (altura, comprimento de ala) bem como os parâmetros dinâmicos (velocidade, aceleração). No conjunto é possível avaliar inúmeras configurações.

#### 4.5.1 Modelo de simulação de ala de simples profundidade

O modelo de simulação criado em *AnyLogic* tem como base a biblioteca *Enterprise Library*. A biblioteca *Enterprise Library* contém diversos objectos que são recorrentes em *softwares* de simulação como o ARENA, EM-PLANT, SIMIO, etc. Alguns destes elementos destacam-se:

- Source - Gera entidades. Normalmente é o ponto de entrada de um modelo orientado a eventos;
- Sink - Liberta entidades. Normalmente é o ponto de saída de um modelo orientado a eventos;
- Queue - Objecto que simula uma fila de espera ;
- Delay - Objecto que simula um atraso .

No contexto de simulação de sistemas de fluxo de material, à biblioteca *Enterprise Library* pertencem objectos móveis e estáticos de fluxo de material. Objectos móveis (unidades de carga), representam os objectos físicos ou lógicos, que se movimentam ao longo do modelo. Estas unidades são "transportadas" no modelo de simulação por objectos estáticos de fluxo de material (objecto de filas de espera, objecto de armazenagem, etc.). Para cada um destes objectos, estão disponíveis um conjunto de opções, entre elas, as opções de programação de eventos que são executadas aquando da entrada de uma entidade em um objecto estático.

##### 4.5.1.1 Fluxo de Modelo de Simulação

O fluxo de modelo de simulação pode ser ilustrado nas figuras 4.8, 4.9 e 4.10. O fluxo do modelo de simulação é definido pelo percorrer de entidades (objectos móveis) através dos diversos objectos estáticos do modelo. Por sua vez este fluxo está organizado por três módulos fundamentais. O primeiro módulo gere os pedidos de operação, o segundo módulo executa uma operação de armazenagem e um terceiro módulo executa uma operação de desarmazenagem.

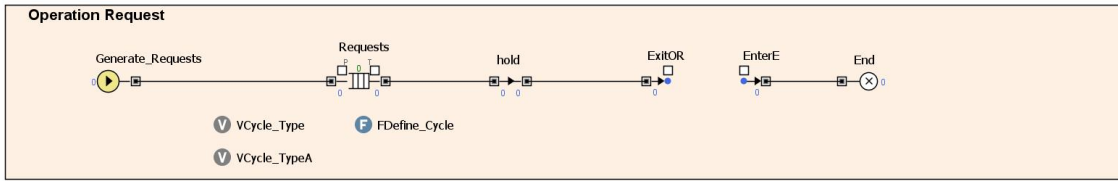


Figura 4.8: Processamento de Pedido de Operação

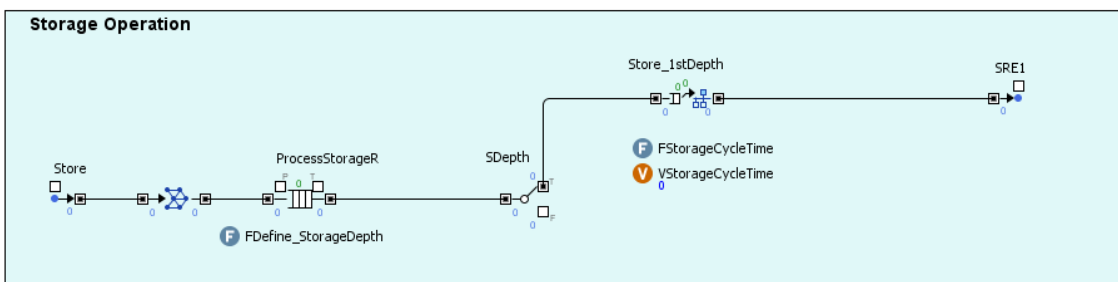


Figura 4.9: Módulo Operação de Armazenamento simples profundidade

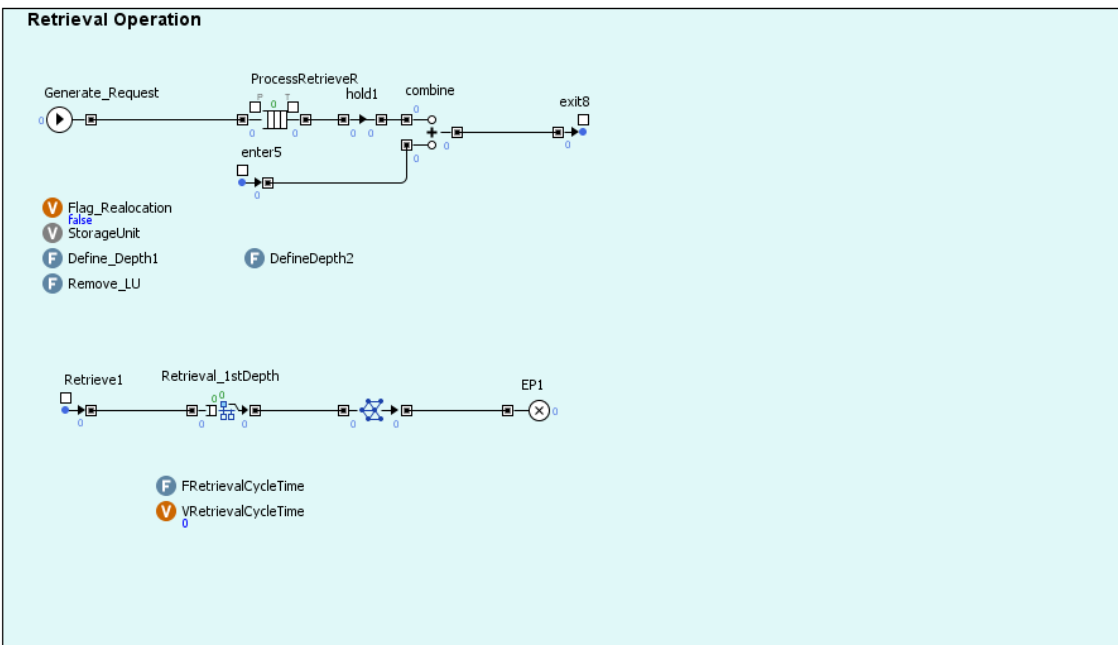


Figura 4.10: Módulo Operação de Desarmazenamento simples profundidade

#### 4.5.1.2 Módulo de gestão de pedidos de operação

A figura 4.8 ilustra o módulo onde é detectado e avaliado um pedido de operação. Com o início do relógio de simulação uma *entidade* é gerada pelo objecto *Generate\_Request*. Ao objecto *Generate\_Request* está associado uma taxa entre entradas de entidades. Para que não exista uma acumulação de pedidos de operação, é conveniente definir um valor para a taxa entre entradas menor ou igual à taxa de operação do sistema de armazenamento.

O pedido de operação é avaliado no objecto *Requests*.

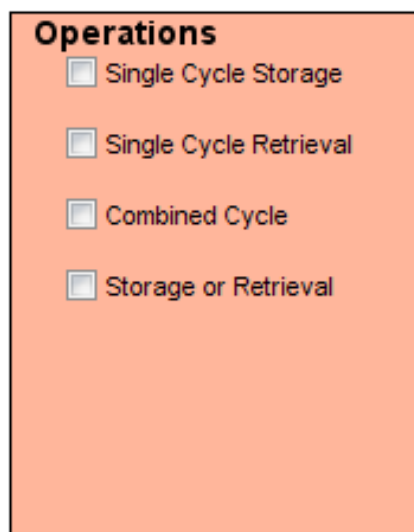


Figura 4.11: Selecção de operação

O objecto *Requests* para além de verificar o pedido de operação definido no menu 4.11, verifica o estado do armazém, isto é, verifica se armazém tem capacidade de armazenagem se for solicitado um ciclo de armazenagem; verifica se armazém tem unidades de carga para desarmazenar, caso seja solicitado um pedido de desarmazenagem; verifica se armazém tem capacidade de armazenagem, caso seja solicitado um pedido de ciclo combinado. O objecto *Requests* avalia o tipo de operação chamando a função 4.1. Para além da função de avaliar o tipo de operação a realizar, o objecto *Requests*, devido a ser um objecto *Queue*, comporta-se como uma fila de espera de pedidos, uma vez que quando chega um pedido pode estar em curso uma operação de armazenagem ou desarmazenamento.

Código 4.1: Função FDefine\_Cycle

```
if(Aisle1_1ªProfundidade.size()<Nr_Posicoes && CS_Entrada.isSelected()==
    true && CS_Saida.isSelected()==false && CS_Combinado.isSelected()==
    false) {
```

```

VCycle_Type=Ciclos_Tipos.get(0);}
else if(Aisle1_1ªProfundidade.size()>0 && CS_Entrada.isSelected()==false
    && CS_Saida.isSelected()==true && CS_Combinado.isSelected()==false){
VCycle_Type=Ciclos_Tipos.get(1);}
else if(Aisle1_1ªProfundidade.size()<Nr_Posições && CS_Entrada.isSelected
    ()==false && CS_Saida.isSelected()==false && CS_Combinado.isSelected()
    ==true){
VCycle_Type=Ciclos_Tipos.get(2);}
else if(CS_Entrada.isSelected()==false && CS_Saida.isSelected()==false &&
    CS_Combinado.isSelected()==false){
VCycle_Type=Ciclos_Tipos.get(3);}
else{
VCycle_Type=Ciclos_Tipos.get(3);}
return VCycle_Type;

```

#### 4.5.1.3 Módulo de operação de armazenagem simples profundidade

Código 4.2: Função Posição\_Armazenamento\_X\_Y\_1ªProfundidade

```

do{
VPosição_Armazenamento_X_Y_1ªProfundidade=uniform_discr(1,Nr_Positions);}
while(!Aisle1_1stDepth.isFree(0, (int)Posição_PosiçãoX(
    VPosição_Armazenamento_X_Y_1ªProfundidade)-1, (int)Posição_PosiçãoY(
    VPosição_Armazenamento_X_Y_1ªProfundidade)-1));
PosAX=(int)Posição_PosiçãoX.get(VPosição_Armazenamento_X_Y_1ªProfundidade)
    -1;
PosAY=(int)Posição_PosiçãoY.get(VPosição_Armazenamento_X_Y_1ªProfundidade)
    -1;
PosA=VPosição_Armazenamento_X_Y_1ªProfundidade;
PosADepth.setText("Storage Depth:"+1);
PosAXt.setText("Storage Position x:"+format(PosAX+1));
PosAYt.setText("Storage Position y:"+format(PosAY+1));
return VPosição_Armazenamento_X_Y_1ªProfundidade;

```

A figura 4.9 ilustra o módulo onde é realizada uma operação de armazenagem. Os objectos *ProcessStorageR* e *Store\_1stDepth* são os objectos principais do módulo de armazenagem. O objecto *ProcessStorageR* chama a função 4.2, que é responsável por atribuir uma posição de armazenagem aleatória. O objecto *Store\_1stDepth* 4.12 é um objecto especial da biblioteca *Enterprise Library* que coloca uma entidade em uma célula do objecto *Aisle1\_1stDepth* 4.13.

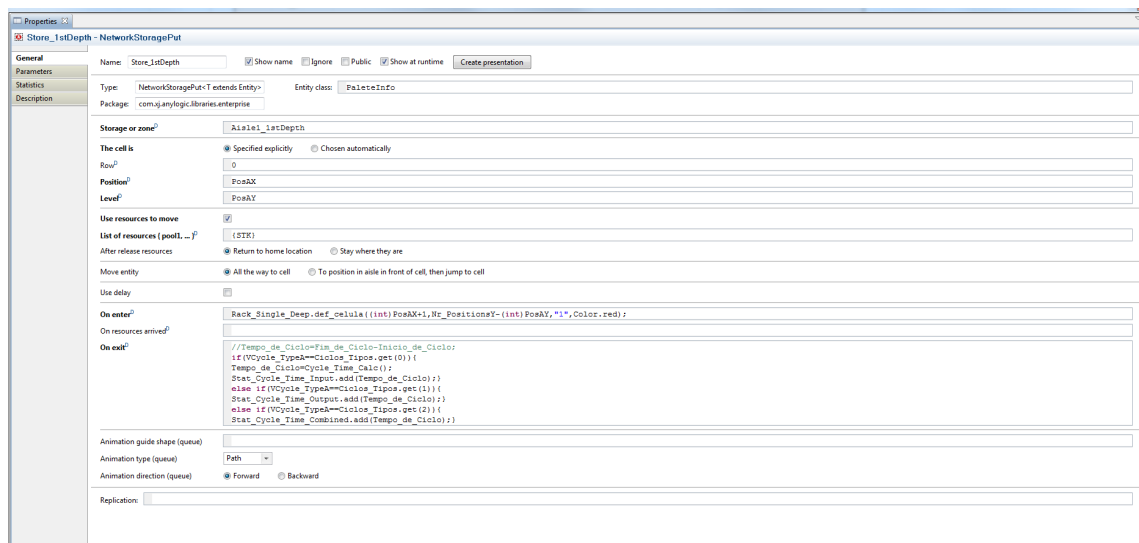


Figura 4.12: Objecto - Store\_1stDepth

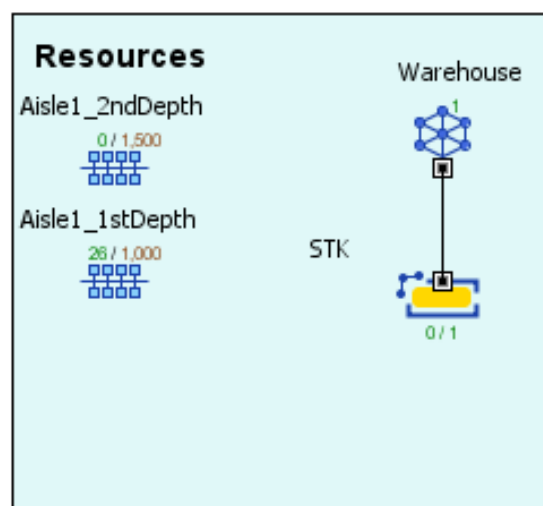


Figura 4.13: Módulo de Recursos

#### 4.5.1.4 Módulo de operação de desarmazenagem simples profundidade

A figura 4.10 ilustra o módulo onde é realizada a operação de desarmazenamento. À imagem do módulo *Storage Operation*, o objecto *ProcessRetrieveR* é responsável por definir a posição de desarmazenamento aleatória. A função 4.3 retorna para o objecto a posição de desarmazenagem.

Código 4.3: Função Posição\_Desarmazenamento\_X\_Y\_1ªProfundidade

```
do{
VPosição_Desarmazenamento_X_Y_1ªProfundidade=uniform_discr(1,Nr_Positions)
; }
while (Aisle1_1stDepth.isFree(0, (int)Posição_PosiçãoX(
VPosição_Desarmazenamento_X_Y_1ªProfundidade)-1, (int)Posição_PosiçãoY(
VPosição_Desarmazenamento_X_Y_1ªProfundidade)-1));
PosDX=(int)Posição_PosiçãoX.get(
VPosição_Desarmazenamento_X_Y_1ªProfundidade)-1;
PosDY=(int)Posição_PosiçãoY.get(
VPosição_Desarmazenamento_X_Y_1ªProfundidade)-1;
PosD=VPosição_Desarmazenamento_X_Y_1ªProfundidade;
PosDDeptht.setText("Storage Depth:"+1);
PosDXt.setText("Storage Position x:"+format(PosDX+1));
PosDYt.setText("Storage Position y:"+format(PosDY+1));
return VPosição_Desarmazenamento_X_Y_1ªProfundidade;
```

Uma vez que a operação a realizar é de desarmazenagem, é necessário requisitar a entidade que foi armazenada anteriormente. Uma vez definida a posição de desarmazenamento, o objecto *ProcessRetrieveR* chama a função a função *Remove\_LU* 4.4.

Código 4.4: Função Remove\_LU

```
if (PosDDepth==1) {
StorageUnit=Aisle1_1stDepth.get(0, PosDX, PosDY); }
else if (PosDDepth==2) {
StorageUnit=Aisle1_2ndDepth.get(0, PosDX, PosDY); }
return StorageUnit;
```

A objecto *Retrieval\_1stDepth* 4.10 retira a entidade a desarmazenar da célula do objecto *Aisle1\_1stDepth* 4.13.

#### 4.5.2 Modelo de simulação de ala de dupla profundidade

O modelo de simulação de ala de dupla profundidade tem o mesmo principio de funcionamento do modelo para simples profundidade. Por haver mais uma profundidade de armazenamento, o modelo de dupla profundidade é uma extensão do modelo de simples



profundidade. Nos próximos parágrafos serão explicadas as diferenças para o modelo de dupla profundidade.

#### 4.5.2.1 Módulo de operação de armazenamento dupla profundidade

A figura 4.14 apresenta o módulo de operação de armazenamento dupla profundidade. Comparativamente ao módulo para o caso de simples profundidade, este módulo possui uma extensão para o armazenamento na segunda profundidade, representada pelo ramo que contém o objecto *Store\_2ndDepth*.

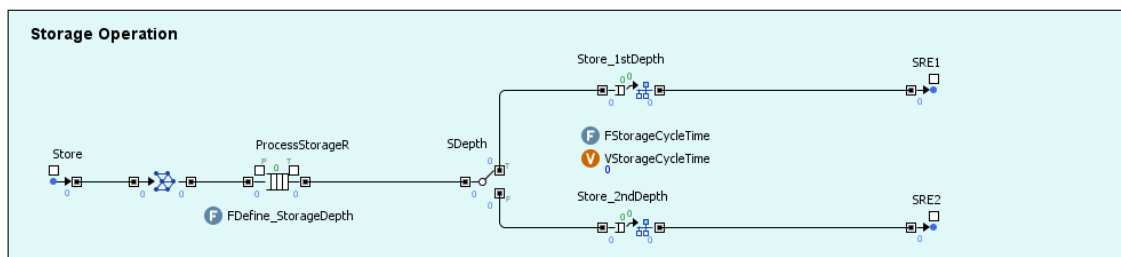


Figura 4.14: Módulo Operação de Armazenamento dupla profundidade

O objecto *ProcessStorageR* define a profundidade de armazenamento 4.5 e a posição de armazenamento 4.6. A atribuição de profundidade, só por si, define uma estratégia de armazenamento. O critério subjacente à atribuição de uma profundidade é a de haver ou não posição livre na segunda profundidade. Se houver posição livre na segunda profundidade, então a posição de armazenamento é na segunda profundidade. Este critério elimina a possibilidade de ter a primeira profundidade ocupada e a segunda desocupada.

Código 4.5: Função *FDefine\_StorageDepth*

```

if (Aisle1_2ndDepth.size() < Nr_Positions) {
PosADepth=2;}
else if (Aisle1_2ndDepth.size() == Nr_Positions && Aisle1_1stDepth.size() <
Nr_Positions) {
PosADepth=1;}

```

À imagem do modelo de primeira profundidade, o objecto *ProcessStorageR* após a atribuição de profundidade, chama a função *Posição\_Armazenamento\_X\_Y\_1ªProfundidade* ou *Posição\_Armazenamento\_X\_Y\_2ªProfundidade* 4.6 para atribuição aleatória de uma posição de armazenamento.

Código 4.6: Função *Posição\_Armazenamento\_X\_Y\_2ªProfundidade*

```

do {
VPosição_Armazenamento_X_Y_2ªProfundidade=uniform_discr(1,Nr_Positions);}

```

```

while (!Aisle1_2ndDepth.isFree(0, (int)Posição_PosiçãoX(
    VPosição_Armazenamento_X_Y_2ªProfundidade)-1, (int)Posição_PosiçãoY(
    VPosição_Armazenamento_X_Y_2ªProfundidade)-1));
PosAX=(int)Posição_PosiçãoX.get(VPosição_Armazenamento_X_Y_2ªProfundidade)
-1;
PosAY=(int)Posição_PosiçãoY.get(VPosição_Armazenamento_X_Y_2ªProfundidade)
-1;
PosA=VPosição_Armazenamento_X_Y_2ªProfundidade;
PosAXt.setText("Storage Position x:"+format(PosAX+1));
PosAYt.setText("Storage Position y:"+format(PosAY+1));
PosADeptht.setText("Reallocation Depth:"+format(PosADepth));
return VPosição_Armazenamento_X_Y_2ªProfundidade;

```

#### 4.5.2.2 Módulo de operação de desarmazenagem dupla profundidade

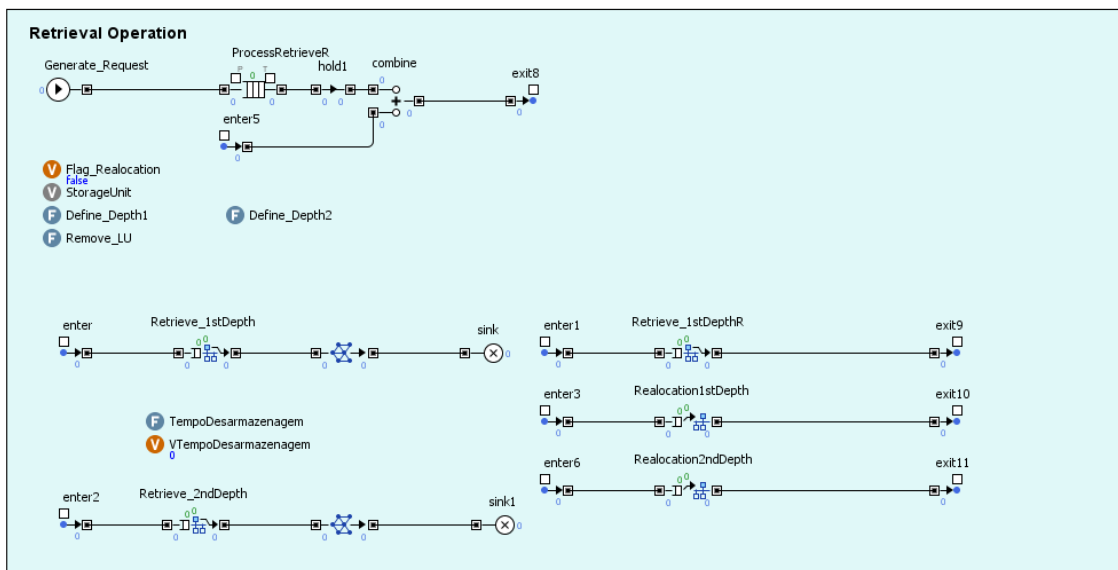


Figura 4.15: Módulo Operação de Desarmazenagem dupla profundidade

A figura 4.15 ilustra o módulo de desarmazenagem dupla profundidade. A desarmazenagem em dupla profundidade apresenta uma lógica de funcionamento mais complexa que a desarmazenagem de simples profundidade. A operação de desarmazenagem de uma unidade de carga na primeira profundidade é idêntica ao modelo de simples profundidade, já para a dupla profundidade é necessário distinguir as seguintes situações.

- unidade de carga é solicitada da segunda profundidade e a respectiva posição na estante da primeira profundidade está livre;

- unidade de carga é solicitada da segunda profundidade e a respectiva posição na estante da primeira profundidade está ocupada.

Para a primeira situação aplica-se a mesma lógica de desarmazenagem em simples profundidade. Quantitativamente o tempo de ciclo do sistema de extracção de carga é maior do que para a situação de simples profundidade, por ter um curso maior para chegar à segunda profundidade. A segunda situação requer o reposicionamento da unidade de carga que está a bloquear o acesso à segunda profundidade.

Código 4.7: objecto ProcessRetrieveR

```

Define_Depth1();
if(PosDDepth==1){
    Flag_Reallocation=true;
    Posição_Desarmazenamento_X_Y_1ªProfundidade();
    enter5.take(Remove_LU());}
else if(PosDDepth==2){
    Posição_Desarmazenamento_X_Y_2ªProfundidade();
    Flag_Reallocation=Aisle1_1stDepth.isFree(0, PosDX, PosDY);
    if(Flag_Reallocation){
        enter5.take(Remove_LU());}
    else if(!Flag_Reallocation){
        hold1.setBlocked(true);
        enter5.take(Remove_LU());
        Define_Depth2();
        if(PosRDepth==1){
            RPosição_Armazenamento_X_Y_1ªProfundidade();}
        else if(PosRDepth==2){
            RPosição_Armazenamento_X_Y_2ªProfundidade();}
        enter1.take(Aisle1_1stDepth.get(0, PosDX, PosDY));}
}

```

O código 4.7 descreve a sequência de instruções executadas no objecto *ProcessRetrieveR*. A primeira instrução a ser executada é a chamada da função *Define\_Depth1*. A função *Define\_Depth1* define aleatoriamente a profundidade de desarmazenagem. Conforme definido anteriormente, o tipo de armazenamento é uniformemente distribuído, o que implica que a probabilidade de aceder a qualquer posição da estante é a mesma. Se a profundidade de desarmazenagem for a primeira só é necessário remover a respectiva entidade da posição definida. Caso seja atribuída a segunda profundidade para a desarmazenagem é necessário avaliar se a primeira profundidade tem uma unidade de carga a bloquear. Se a primeira profundidade estiver livre, a entidade na segunda profundidade é removida. Se a primeira profundidade estiver ocupada é necessário realocar a entidade da primeira profundidade numa outra posição definida aleatoriamente.

### 4.5.3 Modelo de Simulação de simples/dupla profundidade distribuição baseado em zonas

Uma zona em um armazém corresponde a uma quantidade de posições de armazenamento, cujas às unidades de armazenamento estão associadas um conjunto de atributos. Um armazém com uma única zona é mesmo que dizer que não existe diferenciação de atributos nas unidades de armazenamento. A estratégia de armazenamento onde a atribuição de uma posição é uniformemente distribuída, isto é, a probabilidade de escolher qualquer posição é a mesma, cai neste tipo de categoria de uma só zona. Desta forma, a estratégia de armazenamento uniformemente distribuída, só por si não é uma estratégia que permita uma diminuição do tempo de ciclo. Contudo serve de base para a comparação com estratégias de armazenamento que diminuem o tempo de ciclo. O modelo desenvolvido de distribuição baseada em zonas contempla duas zonas. O principio de funcionamento do modelo de simulação segue a mesma lógica dos modelos para simples profundidade e dupla profundidade, isto é, existe um módulo onde é definida a operação a realizar, um módulo onde é executado uma operação de desarmazenagem e um modulo para a operação de desarmazenagem. A diferença reside na escolha de mais uma opção que distingue se uma entidade deverá ser alocada a uma zona especifica. Para ter o caso mais completo os próximos parágrafos serão dedicados a descrição do modelo de simulação de dupla profundidade baseado em zonas.

#### 4.5.3.1 Módulo de gestão de pedidos de operação por zona

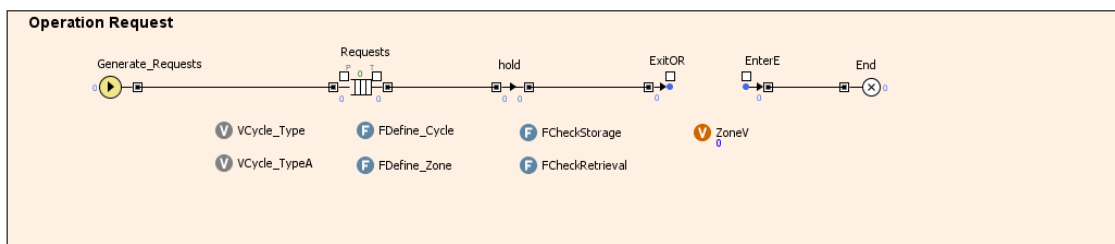


Figura 4.16: Processamento de Pedido de Operação por Zona

A figura 4.17 ilustra o módulo de gestão de pedidos de operação por zona. Conforme indicado este módulo inclui uma extensão para a gestão de zonas. A função *FDefine\_Zone* 4.8 executada no objecto *Requests*, verifica as opções seleccionadas no menu *Operations*. As funções *FCheckStorage* e *FCheckRetrieval*, verificam respectivamente se há posições de armazenagem ou desarmazenagem.

Código 4.8: Função *FDefine\_Zone*

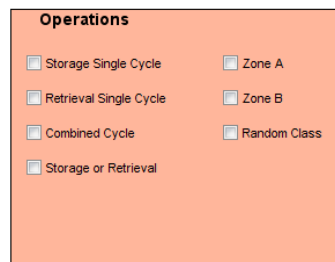


Figura 4.17: Selecção de Operação baseado em Zonas

```

if(ClasseA.isSelected() && !ClasseB.isSelected()){
Class=Classes.get(0);}
else if(!ClasseA.isSelected() && ClasseB.isSelected()){
Class=Classes.get(1);}

```

#### 4.5.3.2 Módulo de operação de armazenamento dupla profundidade gestão de pedidos de operação por zona

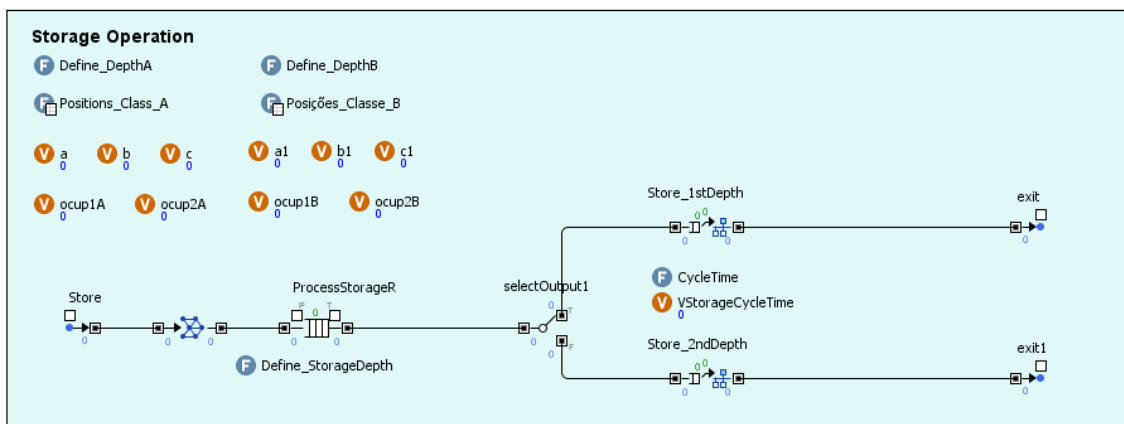


Figura 4.18: Módulo Operação de armazenagem dupla profundidade baseado em zonas

Tal como no módulo de simples profundidade e o módulo de dupla profundidade, o módulo para a operação de armazenagem por zona 4.18 tem o mesmo princípio de funcionamento. Com a entrada de uma entidade no objecto *ProcessStorageR*, o código executado determina qual a profundidade a ser utilizada e a posição de armazenagem de acordo com a zona definida. O princípio de aleatoriedade mantém-se tanto para a atribuição de profundidade como para atribuição de uma posição. Dependendo da profundidade atribuída a entidade segue para o objecto *Store\_1stDepth* ou *Store\_2ndDepth* que realiza a operação de armazenagem respectivamente na primeira ou segunda profundidade.

### 4.5.3.3 Módulo de operação de desarmazenagem dupla profundidade por zona

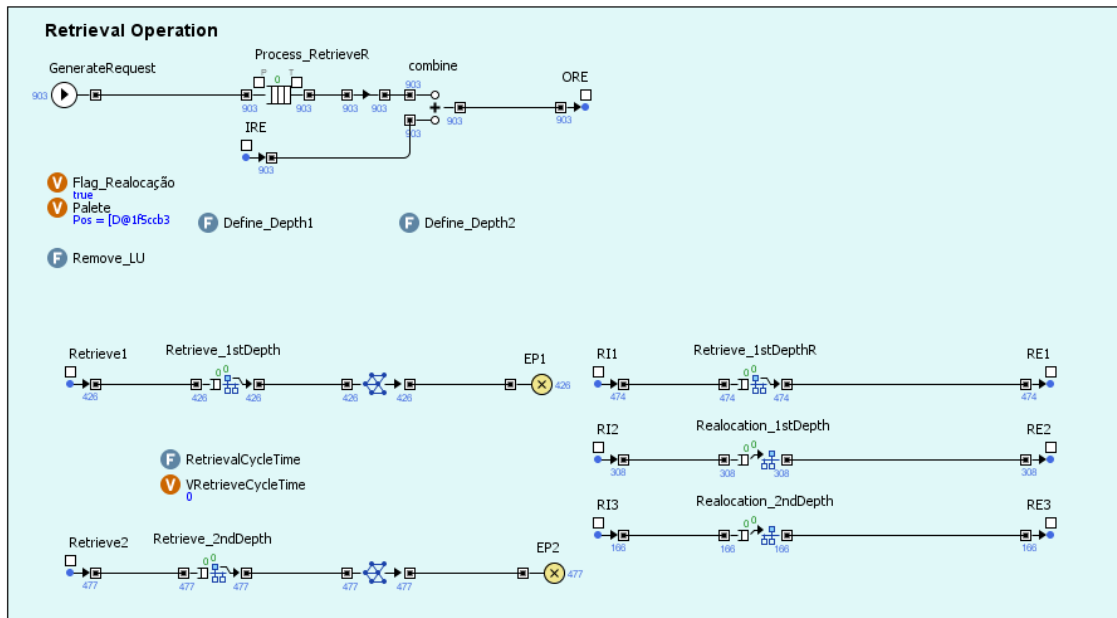


Figura 4.19: Módulo operação de desarmazenagem dupla profundidade baseado em zonas

O módulo de desarmazenagem para dupla profundidade baseado em zonas processa-se da mesma forma que o módulo para dupla profundidade. Uma vez definido o tipo de operação no módulo de gestão de pedidos uma entidade é injectada no objecto *GenerateRequest*. O objecto *Process\_RetrieveR* define a profundidade de desarmazenagem e a posição de desarmazenagem. A atribuição de uma posição de desarmazenagem é realizada com a chamada da função *Posição\_Desarmazenamento\_X\_Y\_1ªProfundidadeABC*, caso seja a primeira profundidade. Conforme o caso o mesmo se aplica para a desarmazenagem na 2ª profundidade, realocação primeira profundidade e realocação segunda profundidade.

### 4.5.4 Dados de Entrada, Animação, Dados de Saída

Na execução de uma simulação é possível visualizar um conjunto de informação. Nos parágrafos seguintes são apresentados os elementos que permitem visualizar a informação mais relevante para o estudo de simulação.

#### 4.5.4.1 Dados de Entrada

Os parâmetros de entrada dinâmicos para o modelo de simulação estão ilustrados na figura 4.20. No quadro apresentado para os parâmetros dinâmicos é possível definir:

- velocidade de translação  $v_x$  ;
- velocidade de elevação  $v_y$ ;
- aceleração de translação  $a_x$ ;
- aceleração de elevação  $a_y$ ;
- tempo de ciclo de sistema de extracção  $t_z$ .

**Dynamic Parameters**

vx 2	ax 0.5	vx	<input type="text" value="2"/>	vy	<input type="text" value="0.5"/>
vy 0.5	ay 0.5	ax	<input type="text" value="0.5"/>	ay	<input type="text" value="0.5"/>
tz 10		vz	<input type="text" value="10"/>		

Figura 4.20: Parâmetros dinâmicos

Os parâmetros de entrada estáticos estão ilustrados na figura 4.21. Os parâmetros estáticos definem:

- nr. de Posições em uma ala;
- nr. de Posições em x;
- nr. de Posições em y;
- nr. de Posições para a zona A;
- nr. de Posições para a zona B.

**Static Parameters**

Cycle_Types {4}	Classes {2}
nr_Positions 500	nr_PositionsA 200
nr_PositionsX 50	nr_PositonsB 300
nr_PositionsY 10	
Rack_Double_Deep Rack	
A	

Figura 4.21: Parâmetros Estáticos

Cada posição em uma ala é identificada por um número. O modelo de simulação assume uma distribuição uniforme para atribuição de posição. Uma vez determinada a posição de armazenagem ou desarmazenagem, a posição é mapeada nas posições em x e y bem como nas coordenadas em x e y 4.22. No modelo de simulação recorreu-se à função tabela para o mapeamento destes parâmetros.

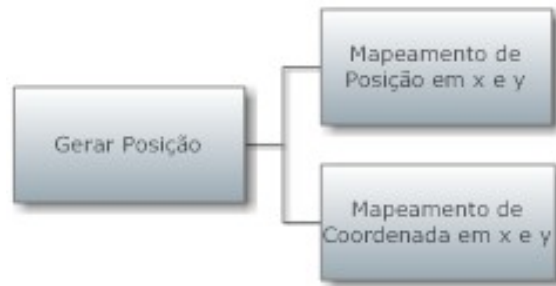


Figura 4.22: Mapeamento de Posições e Coordenadas

A figura 4.23 ilustra um extracto de uma tabela para o mapeamento de uma posição em coordenada x.

**Posição\_CoordenadaX - Table Function**

**General**

Name: Posição\_CoordenadaX  Show name  Ignore  Public  Show at runtime

Access: public  Static

Interpolation: Linear Out of Range: Error Value: 0.0

Table Data:

Argument	Value
1	0.00
2	1.10
3	2.38
4	3.48
5	4.76
6	5.86
7	7.14

Remove  
Paste from clipboard

Figura 4.23: Mapeamento de Posições e Coordenadas



### 4.5.4.2 Animação

Para visualizar a sequência de operações de armazenamento/desarmazenamento foi adicionado ao modelo de simulação uma representação da estante onde pode ser visualizada as posições ocupadas e desocupadas na ala. Na figura 4.24 está representado um momento da simulação onde pode ser vista uma zona de maior rotatividade e a zona de baixa rotatividade. A representação de alveolo de segunda profundidade ocupado corresponde a um quadrado azul com o numero 2, um alveolo de primeira profundidade ocupado está representado com um quadrado vermelho e numero 1 e para alveolo livre está representado quadrado branco e numero 0.

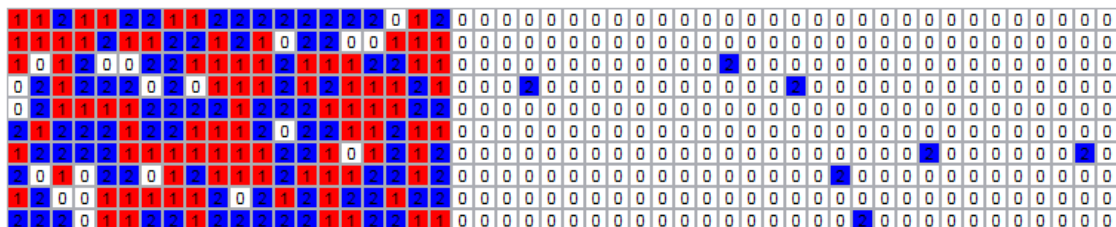


Figura 4.24: Animação de Estante - Dupla Profundidade armazenamento por zona

A figura 4.25 ilustra a informação que é disponibilizada referente à última posição onde ocorre uma operação de armazenamento, desarmazenamento ou realocação.



Figura 4.25: Últimas posições acedidas

Os objectos em ambiente *Anylogic* também fornecem informação durante a simulação. Os objectos *Aisle1\_1stDepth* e *Aisle1\_2ndDepth* que estão ilustrados na figura 4.26, para além de serem responsáveis pelo armazenamento de entidades, é possível verificar os estados de ocupação

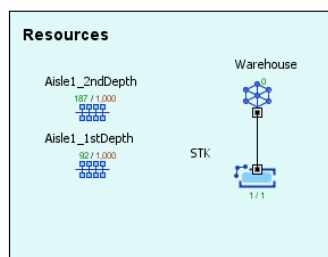


Figura 4.26: Estado de Ala

#### 4.5.4.3 Dados de Saída

A finalidade do estudo de simulação é poder obter valores para avaliar os resultados da plataforma de cálculo. Os dados disponibilizados pelo estudo de simulação estão ilustrados na figura 4.27. De acordo com os modelos analíticos estudados o ciclo de trabalho de um armazém automático é definido por três tipos de ciclos. Para cada operação de armazenagem, desarmazenagem e a combinação dos dois tipos de operação, é calculado o tempo que é necessário para a operação em função das posições geradas.

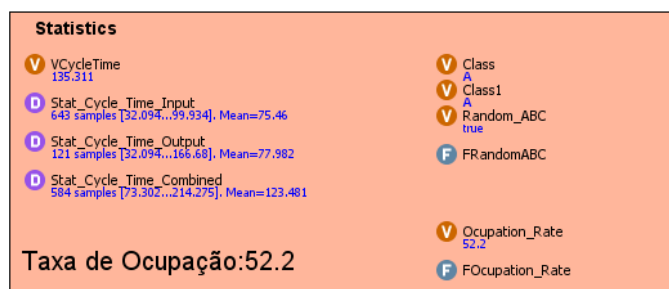


Figura 4.27: Estatísticas

## 4.6 Verificação e Validação de Modelo

Antes de se poder confiar nos resultados do modelo de simulação, é necessário uma verificação e validação do modelo. Para a verificação é revista a funcionalidade interna do modelo e são levantados os erros lógicos e sintáticos bem como erros construtivos. A validação serve a correspondência do modelo de simulação com a realidade no contexto de conformidade com o comportamento, estrutura e aplicação empírica.

A verificação do modelo é realizada por um lado com a verificação passo a passo dos eventos na simulação, com a repetição de varias sessões de simulação, por outro lado com a comparação de resultados de simulação com os resultados de modelos analíticos. Uma das metodologias utilizadas para a verificação do modelo de simulação, foi a utilização

das animações disponibilizadas, que permitem visualizar a sequência de eventos a ser executados, e desta forma comprovar que o modelo executa as operações pretendidas.



## Capítulo 5

# Plataforma de Cálculo de ciclos de trabalho de armazéns automáticos

Um dos objectivos deste trabalho era criar uma plataforma de cálculo de ciclos de trabalho de armazéns automáticos, mais concretamente, o subsistema armazém automático, ao qual está associado um transelevador e uma estante. A plataforma de cálculo é constituída por um conjunto de ferramentas que permite avaliar tempos de ciclo de um transelevador em uma ala, mediante um conjunto de configurações e estratégias de armazenagem. Neste capítulo será apresentada a plataforma de cálculo desenvolvida e a validação de resultados com o modelo de simulação.

### 5.1 Composição da plataforma de cálculo

A plataforma de cálculo foi desenvolvida em ambiente EXCEL+VBA e é composta por 4 folhas de cálculo.

- Rack Definition - Configuração física de estante
- RackCoord - Aplicação em VBA para cálculo de ciclos de trabalho
- CT-Tools - Avaliação de tempos de ciclo com diferentes modelos analíticos
- FEM 9.851 - Aplicação da norma FEM 9.851

#### 5.1.1 Rack Definition - Determinação de Espaço para armazém

A figura [A.1](#) ilustra a primeira folha de cálculo desenvolvida. O objectivo da folha de cálculo *Rack Definition* é permitir avaliar quantitativamente o espaço utilizado por determinada configuração de estante. Uma vez definidos os dados de entrada como por

exemplo as dimensões da unidade de carga, número de alvéolos na horizontal, número de alvéolos na vertical, número de alas, etc, é possível obter o espaço requerido para o sistema de armazenamento.

### 5.1.2 RackCoord - Determinação de tempos de ciclo utilizando VBA

A figura [A.2](#) ilustra a folha de cálculo *RackCoord*.

A folha de cálculo *RackCoord* permite obter uma quantidade de informação útil para o cálculo de tempos de ciclo. Como dados de entrada é necessário definir:

- Nr of positions H: número de posições na horizontal;
- Nr of positions V: número de posições na vertical ;
- Coordenada de ponto de entrada e saída em x e y;
- Pitch x: Passo da estante em x;
- Pitch y: Passo da estante em y;
- PitchUC : Passo entre unidades de carga;
- $v_x$  - velocidade de translação;  $v_y$  - velocidade de elevação;  $a_x$  - aceleração de translação;  $a_y$  - aceleração de elevação: Parametros dinâmicos de transelevador;
- Zone A - lower lim; Upper lim: Definição de zona de alta rotação. A zona de baixa rotação é complementar à zona de alta rotação;
- % A Zone: Percentagem de posições para zona de alta rotação;
- Class A Rotation: percentagem de rotação para a zona de alta rotação;

Tendo como suporte aplicações escritas em VBA, a folha de cálculo apresenta diferentes resultados para auxiliar o cálculo de tempos de ciclo. A título de exemplo a figura [A.2](#) ilustra um exemplo dos resultados apresentados pela folha de cálculo *RackCoord*. No exemplo ilustrado é possível visualizar o mapeamento de 25 posições de uma estante, a distância para cada uma dessas posições e o tempo de viagem para cada uma dessas posições desde um ponto de origem. O mesmo é determinado para a zona de alta rotação e a zona de baixa rotação. Com o mapeamento de todas as posições da estante e os respectivos tempos de viagem, é calculado o tempo de viagem médio entre a origem e uma posição na estante, bem como o tempo médio entre duas posições na estante [A.3](#).

A figura [A.3](#) ilustra os resultados para um plano de estante de 5/5. O tempo médio entre ponto de origem e uma posição aleatória na estante é aproximadamente 7,76 segundos, enquanto o tempo médio entre duas posições na estante é de 7,18 segundos. O tempo de ciclo simples é calculado de acordo com a formula [5.1](#)

$$E(t_{ciclosimples}) = 2 \cdot t_g + 2 \cdot t_{op} = 2 \cdot 10 + 2 \cdot 7,76 = 35,52 \quad (5.1)$$

enquanto o tempo de ciclo combinado é calculado de acordo com a formula 5.2

$$E(t_{\text{ciclocombinado}}) = 4 \cdot t_g + 2 \cdot t_{op} + t_{pp} = 2 \cdot 10 + 2 \cdot 7,76 + 7,18 = 62.70 \quad (5.2)$$

A figura A.4 ilustra os resultados para a divisão do plano da estante em duas zonas. A zona A para o armazenamento de produtos de elevada rotação e uma zona para o armazenamento de produtos de baixa rotação, designada por zona B.

### 5.1.3 CT-Tools

A figura A.5 ilustra a folha de cálculo *CT-Tools*. A folha de cálculo *CT-Tools* apresenta os resultados para o tempo de ciclo de diferentes cenários. Uma vez definidos os dados de entrada que definem a distância a percorrer na horizontal, vertical e os parâmetros dinâmicos do transelevador, são apresentados os resultados para os seguintes cenários.

- Tempos de ciclo para ala de simples profundidade com os seguintes métodos de cálculo:
  - Norma FEM 9.851;
  - GUDEHUS - método de cálculo baseado no estudo de Gudehus onde é considerada a relação  $w$ ;
  - VBA - Baseado no tempo médio do mapeamento realizado na folha de cálculo *RackCoord*.
- Tempos de ciclo para ala de dupla profundidade com os seguintes métodos de cálculo:
  - Norma FEM 9.851 - Caso especial;
  - VBA+Lippolt - método de cálculo baseado na folha de cálculo *RackCoord* e o estudo realizado por Lippolt para o armazenamento de dupla profundidade;
  - VBA+Lerher- - método de cálculo baseado na folha de cálculo *RackCoord* e o estudo realizado por Lerher para o armazenamento de dupla profundidade;
- Tempos de ciclo para ala de simples profundidade baseado em distribuição por zonas;
- Tempos de ciclo para ala de dupla profundidade baseado em distribuição por zonas.

### 5.1.4 FEM 9.851

A figura A.6 ilustra a folha de cálculo segundo a norma FEM 9.851. Uma vez que a norma FEM 9.851 é o padrão mais utilizado para o cálculo de ciclos de trabalho de

armazéns automático a plataforma de cálculo apresenta uma folha de cálculo dedicada aos diferentes casos apresentados na norma FEM 9.851.

## 5.2 Avaliação de Resultados

### 5.2.1 Configuração de ala simples profundidade

A figura A.7 e tabela A.1 apresentam a comparação de resultados dos diferentes métodos de cálculo para a configuração de ala de simples profundidade.

A primeira observação que se pode retirar dos resultados apresentados é a variação introduzida pelo método de cálculo segundo a norma FEM 9.851 em função do comprimento de ala sem variar os parâmetros dinâmicos do transelevador. De acordo com o apresentado na tabela A.1 o parâmetro  $w$  varia entre [0,48;2,52]. Segundo a norma FEM 9.851 este parâmetro deve variar entre [0,5;2] para que o método de cálculo apresente resultados válidos. Há um factor que contribui para o desvio no tempo de ciclo entre os diferentes métodos de cálculo. Para a norma FEM 9.851 a relação  $w = \frac{H}{L} \cdot \frac{v_x}{v_y}$  está fora dos limites definidos, o que significa que os pontos representativos P1 e P2 não representam a distância média a percorrer. Para o método de cálculo segundo Gudehus, o parâmetro  $w$  é considerado e de acordo com os resultados apresentados, o método de cálculo apresenta resultados com menor variação apesar de  $w$  estar fora do intervalo definido pela norma FEM 9.851. Entre o método de cálculo VBA e a simulação o erro varia entre 0.2% e 0.4% representando um erro insignificante. O método de cálculo segundo a norma FEM 9.851, Gudehus apresentam o maior erro comparando como o método de cálculo VBA.

A mesma conclusão pode ser retirada na análise tempo de ciclo em função da velocidade de translação A.2, A.9, A.10.

### 5.2.2 Configuração de ala dupla profundidade

As figuras A.11, A.12, A.13 e tabela A.3 apresentam a comparação de resultados dos diferentes métodos de cálculo para a configuração de ala de dupla profundidade.

Para a configuração de dupla profundidade o ciclo simples de entrada e o ciclo simples de saída têm de ser diferenciados devido à possibilidade de realocação no caso de uma ordem de saída. Para o caso de um ciclo simples de entrada os resultados obtidos são semelhantes ao caso de simples profundidade, isto é, apesar do tempo de ciclo ser superior devido ao armazenamento em dupla profundidade, as variações são semelhantes. O cálculo segundo a norma FEM 9.851 apresenta um erro máximo relativo de 7.8% A.11, A.12.

O ciclo simples de saída apresenta um diferença significativa entre os métodos analíticos e os resultados de simulação. Para além do ponto anteriormente referido para o método de cálculo segundo a FEM9.851, referente ao parâmetro  $w$  existe um factor que



não é contabilizado no modelo de simulação. O tempo de realocação segundo o método de cálculo de Lippolt, Lerher e a FEM 9.851 contempla duas faces de uma ala, enquanto o modelo de simulação só contempla uma face. O facto de em um sistema de armazenamento existirem normalmente duas faces, ao tempo de realocação está associado a probabilidade de haver uma posição livre nas duas faces de uma ala.

Para o ciclo combinado com dupla profundidade os resultados analíticos e de simulação não apresentam diferenças significativas.

### 5.2.3 Configuração por Zonas A e B

As figuras [A.14](#), [A.15](#), [A.16](#) e tabela [A.4](#) apresentam a comparação de resultados dos diferentes métodos de cálculo para a configuração por Zonas A e B.

Para a configuração por Zonas A e B foi testado um cenário de de duas zonas (A e B), onde a zona A está situada junto aos pontos de E/S e representa 25% das posições disponíveis num plano da estante, enquanto os restantes 75% representam a zona B. A zona A corresponde está reservada para produtos de elevada rotação enquanto a zona B para produtos de baixa rotação. Os índices de rotação atribuídos foram 75/25. Os resultados obtidos demonstram claramente uma diminuição do tempo de ciclo global, o que significa uma melhoria na taxa de manipulação de unidades de carga. A comparação entre os métodos analíticos e a simulação, demonstram que não existem variações significativas entre métodos.



## Capítulo 6

# Conclusões e Desenvolvimentos Futuros

### 6.1 Conclusões

O presente trabalho teve como objectivo o enfoque na problemática de cálculo de ciclos de trabalho em sistemas automáticos de armazenamento, mais concretamente operados por transelevadores mediante determinadas estratégias de armazenamento. Os resultados obtidos devem permitir que na fase de estudo de configuração de um armazém, seja possível obter medidas de performance em função de parâmetros técnicos e de operação.

Uma vez que na fase de planeamento são decididos grande parte dos custos de investimento, existe a necessidade de avaliar informação precisa sobre a configuração a adoptar. É extremamente útil obter informação relativamente a uma determinada configuração e principalmente quais são os resultados que se obtêm variando certos parâmetros.

Um ponto de especial interesse é influência de configurações de dupla profundidade e divisão em zonas ABC, onde o estudo quantitativo é normalmente menosprezado. A plataforma desenvolvida permite avaliar quantitativamente estas configurações de forma rápida e com resultados fiáveis.

Este trabalho teve como base o estudo de modelos analíticos apresentados em directivas e estudos realizados sobre esta temática. Como ferramenta de validação dos modelos analíticos estudados, foi utilizado o programa de simulação *Anylogic*. Os modelos de simulação desenvolvidos permitem simular inúmeras configurações e obter resultados quantitativos de ciclos de trabalho.

Os modelos analíticos de dupla profundidade, baseados nos estudos [14], [15] e [9], foram confrontados com os resultados obtidos via simulação, e demonstrou-se que para um determinado tipo de operação estes modelos analíticos são viáveis.

Referente à temática de divisão de uma ala em zonas, abordada nos estudos [16] e [17], é possível verificar com o modelo de simulação, a influência que uma divisão em zonas tem no ciclo de trabalho. A plataforma de cálculo desenvolvida permite avaliar quantitativamente esta estratégia de armazenagem.

A plataforma de cálculo desenvolvida apresenta várias funcionalidades que podem ser utilizadas durante o processo de planeamento de um armazém automático. O módulo de cálculo desenvolvido em VBA é bastante útil na determinação de especificações operacionais eficazes e o número de transelevadores que vão ao encontro dos requisitos do sistema de armazenamento. O módulo de VBA, entre os modelos analíticos, é o modelo que mais se aproxima dos valores de simulação, muito pelo facto de o modelo calcular sobre o posicionamento exacto das unidades de carga versus um modelo analítico que partiu de uma transformação de um modelo analítico discreto para um modelo analítico contínuo.

## 6.2 Desenvolvimentos futuros

O trabalho desenvolvido abordou uma parte do cálculo de ciclos de sistemas de armazéns automáticos. Conforme foi apresentado no capítulo 2, existem inúmeras possibilidades de configuração de um armazém automático. Configurações de múltipla profundidade ou sistemas com transelevadores que possuem a capacidade de mudar de ala, exigem outra abordagem no cálculo de ciclos de trabalho. Onde normalmente o armazenamento aleatório é prática comum para sistemas de armazenamento com um transelevador por ala e de simples/dupla profundidade, em sistemas de múltipla profundidade e/ou com mudança de ala de transelevador, o cálculo de ciclos de trabalho está fortemente dependente da estrutura de pedidos de entrada e saída a realizar. Este tipo de sistemas requer um estudo bastante aprofundado, quase caso a caso, e cuja alternativa para obter resultados fiáveis numa fase de planeamento é inevitavelmente a simulação.

A análise de ciclos de trabalho centrado no transelevador está relacionado com o conceito de *bottleneck* de um sistema. Normalmente o planeamento de um sistema de armazenamento começa com o dimensionamento do armazém, e só depois deriva para o sistema de transporte acoplado a este armazém. Contudo a análise de ciclos de trabalho deve ser alargada a um sistema baseado em vários sub-sistemas que permita obter medidas de performance globais. Embora um transelevadores seja o "gargalo" mais caro do sistema, todos os sistemas de transporte a montante e a jusante de um armazém, devem estar devidamente dimensionados para garantir os requisitos do sistema.

# Referências

- [1] Donald Bowersox, David Closs, e M. Bixby Cooper. *Supply Chain Logistics Management*. McGraw-Hill/Irwin, 2002.
- [2] Günther Schuh. *Produktionsplanung und -steuerung: Grundlagen, Gestaltung und Konzepte (VDI-Buch) (German Edition)*. Springer, 2006.
- [3] Marco Perona e Giovanni Miragliotta. Complexity management and supply chain performance assessment. a field study and a conceptual framework. *International Journal of Production Economics*, 90(1):103–115, July 2004.
- [4] Michael Hompel e Thorsten Schmidt. *Warehouse Management: Organisation und Steuerung von Lager- und Kommissioniersystemen (VDI-Buch) (German Edition)*. Springer, 2007.
- [5] Gavriel Salvendy. *Handbook of Industrial Engineering: Technology and Operations Management*. Wiley-Interscience, 2001.
- [6] VDI-Handbuch Materialfluss und Fördertechnik Band 7: Materialfluss I (Gestaltung). *Concepts and explanations in the conveying system*. VDI-Gesellschaft Fördertechnik Materialfluss Logistik, 1970-06.
- [7] J. Christian Femerling. *Logistik*. Gabler, Betriebswirt.-VLG, 2007.
- [8] Kenneth B. Ackerman. *Practical Handbook of Warehousing - Fourth Edition*. Springer, 1997.
- [9] FEM. *FEM 9.851 Performance Data of S/R Machines*. Federation europeenne de la manutention, 1970-06.
- [10] Michael Hompel e Volker Heidenblut. *Taschenlexikon Logistik: Abkürzungen, Definitionen und Erläuterungen der wichtigsten Begriffe aus Materialfluss und Logistik (VDI-Buch) (German Edition)*. Springer, 2005.
- [11] Lippolt. *Beiträge zu einer Theorie der Logistik (German Edition)*. Springer, 2008.
- [12] VDI-Handbuch Materialfluss und Fördertechnik Band 7: Materialfluss I (Gestaltung). *VDI 3561 Testspiele zum Leistungsvergleich und zur Abnahme von Regalförderzeugen*. 1973.
- [13] Timm Gudehus. *Logistik: Grundlagen - Strategien - Anwendungen (German Edition)*. Springer, 2010.
- [14] T. Lerher. Travel time models for double-deep automated storage and retrieval systems. *International Journal of Production Research*, 48(0020-7543):3151 – 3172, 2010. Proceedings of the 21st International Conference on Computers and Industrial Engineering.

- [15] Christian R. Lippolt. *Spielzeiten in Hochregallagern mit doppeltiefer Lagerung*. Dissertation, Universität Karlsruhe, 2003.
- [16] Ashayeri J. A geometrical approach to computing expected cycle times for zonebased storage layouts in as/rs. *International Journal of Production Research*, 40:4467–4483(17), 20 November 2002.
- [17] Byung Chun Park, Robert D. Foley, e Edward H. Frazelle. Performance of mini-load systems with two-class storage. *European Journal of Operational Research*, 170(1):144 – 155, 2006.
- [18] António E.S. Carvalho Brito e J. Manuel Feliz Teixeira. *Simulação por Computador*. Publindústria, 2001.
- [19] FEM. *FEM9.001 Terminology Dictionary-storage and retrieval machines*. Federation europeenne de la manutention, 1970-06.
- [20] Henry C. Tuckwell. *Elementary Applications of Probability Theory, Second Edition (Chapman & Hall Statistics Textbook)*. Chapman & Hall/CRC, 1995.
- [21] Sergey Suslov. Different simulation methods. [http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Different\\_simulation\\_methods.JPG](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Different_simulation_methods.JPG), Junho 2009.
- [22] Maher Lahmar. *Facility Logistics: Approaches and Solutions to Next Generation Challenges (Resource Management)*. Auerbach Publications, 2007.
- [23] Markus Rabe, Sven Spieckermann, e Sigrid Wenzel. *Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik: Vorgehensmodelle und Techniken (VDI-Buch) (German Edition)*. Springer, 2008.
- [24] Masud Mansuri. Cycle-time computation, and dedicatated storage assignment, for as/r systems. *Computers and Industrial Engineering*, 33(1-2):307 – 310, 1997. Proceedings of the 21st International Conference on Computers and Industrial Engineering.
- [25] Christopher A. Chung. *Simulation Modeling Handbook: A Practical Approach (INDUSTRIAL AND MANUFACTURING ENGINEERING SERIES)*. CRC Press, 2003.
- [26] Bhaba R. Sarker e P. Sobhan Babu. Travel time models in automated storage/retrieval systems: A critical review. *International Journal of Production Economics*, 40(2-3):173 – 184, 1995.

# Anexo A

## Figuras

Value	Unit	Parameter	Description
<b>Grid Dimensions</b>			
2050	mm	GH	Bay height GH=Pallet height + XX mm horizontal beam height + XX mm safety clearance
1700	mm	Lp	pallet height (Pallet+Load)
100	mm	Lb	beam height
100	mm	Lpb	Safety clearance
150	mm	Lpo	Offset between depth
2380	mm	GL	Bay length GL= XX x Pallet length + XX mm vertical beam + XX mm safety clearance
1000	mm	Wp	Pallet Length/width
100	mm	Wu	Upright
2		n	Nr of pallets per bay
90		Wup	Safety clearance
100		Wpp	Safety clearance
6750	mm	GD	<b>Aisle With GD</b>
150	mm	Dpw	Distance between pallet and wall
1200	mm	Dp	Pallet Depth
75	mm	Dpp	Distance between pallets
150		Dpf	Distance pallet - pallet aisle
2		npd	Nr of pallets in depth
2		ns	Nr of sides
<b>Rack dimension</b>			
59600	mm	Lrack	total Rack length Lrack=GL x nL
21510	mm	Hrack	total Rack height Hrack= GH x nH
1000	mm	Lfl	First Level
2060	mm	Lfl	Last Level
<b>Warehouse</b>			
59600	mm	LL	total length LL=Lrack+side length
			side length
21510	mm	LH	total height LH=Hrack + upper length
			upper length
33750	mm	LB	total with LB=nbaysi x GD + naisle x aisle width + side width
<b>Capacity</b>			
2000		npallets	Nr of Pallets npallets=nPS x nbaysi
5		naisle	Nr of aisles
2		nbaysi	Nr of bays in depth
10		nH	Nr of positions vertically
25		nL	Nr of bays in length
1		nD	Nr of positions in depth
250		nbays	Nr of bays nbays=nH x nL
1000		nPS	Nr of Pallets per aisle nPS=nr of positions per bay x nbays x nr of positions in depth x 2
2			nr of positions per bay
5000	C		Total Nr of positions

Figura A.1: Rack Definition - Determinação de Espaço para armazém

Rack Coordinates		Reference Point		Zone Parameters		Zone A		Zone B	
Nr of positions H	Nr of positions V	x	y	Average Cycle T SC	% B Zone	nr. Of A Positions	% A Zone	nr. Of A Positions	% B Zone
SC	DC	4.76	8.20	20%	47.09	5.0	20%	47.09	20.0
35.53	62.70	Pitch x	Pitch y	Average Cycle T CS	nr. Of A Positions Y	1.0	nr. Of A Positions X	nr. Of A Positions	Average Cycle T CS
		2.380	2.050	5.0	5.0	1.0	5.0	5.0	5.0
				Mean Time Between Distances A	Mean Travel Time A	85%	Mean Time Between Distances B	Mean Travel Time B	Mean Time Between Distances B
				7.18	5.35	15%	6.41	6.32	6.41
				Mean Travel Time	7.76		Cycle Time Single Cycle Class A and B	44.92	Cycle Time Combined Cycle Class A and B
				7.76			70.43		70.43

ID	Positions			Coordinates			Travel Time			Zone Coordinates											
	x	y	z	x [m]	y [m]	z [s]	tx [s]	ty [s]	tz [s]	ID_A	x	y	z	ID_B	x	y	z	max[s]	max[s]		
1	1	1	1	4.760	8.200	5.22	13.54	13.54	13.54	1	1	1	1	1	1	1	1	1	4.760	6.150	10.39
2	2	1	1	3.660	8.200	4.57	13.54	13.54	13.54	2	2	1	2	2	2	2	2	2	3.660	6.150	10.39
3	3	1	1	2.380	8.200	3.69	13.54	13.54	13.54	3	3	1	3	3	3	3	3	3	2.380	6.150	10.39
4	4	1	1	1.280	8.200	2.70	13.54	13.54	13.54	4	4	1	4	4	4	4	4	4	1.280	6.150	10.39
5	5	1	1	0.000	8.200	0.00	13.54	13.54	13.54	5	5	1	5	5	5	5	5	5	0.000	6.150	10.39
6	1	2	2	4.760	6.150	5.22	10.39	10.39	10.39	6	1	2	6	1	3	11	4	7.600	4.100	7.24	
7	2	2	2	3.660	6.150	4.57	10.39	10.39	10.39	7	2	2	7	2	3	12	3	3.660	4.100	7.24	
8	3	2	2	2.380	6.150	3.69	10.39	10.39	10.39	8	3	2	8	3	3	13	3	2.380	4.100	7.24	
9	4	2	2	1.280	6.150	2.70	10.39	10.39	10.39	9	4	2	9	4	3	14	4	1.280	4.100	7.24	
10	5	2	2	0.000	6.150	0.00	10.39	10.39	10.39	10	5	2	10	5	3	15	5	0.000	4.100	7.24	
11	1	3	3	4.760	4.100	5.22	7.24	7.24	7.24	11	1	3	11	1	4	16	4	4.760	2.050	5.22	
12	2	3	3	3.660	4.100	4.57	7.24	7.24	7.24	12	2	3	12	2	4	17	3	3.660	2.050	5.22	
13	3	3	3	2.380	4.100	3.69	7.24	7.24	7.24	13	3	3	13	3	4	18	3	2.380	2.050	5.22	
14	4	3	3	1.280	4.100	2.70	7.24	7.24	7.24	14	4	3	14	4	4	19	4	1.280	2.050	5.22	
15	5	3	3	0.000	4.100	0.00	7.24	7.24	7.24	15	5	3	15	5	4	20	5	0.000	2.050	5.22	
16	1	4	4	4.760	2.050	5.22	4.08	4.08	4.08	16	1	4	16	1	5	21	4	4.760	0.000	5.22	
17	2	4	4	3.660	2.050	4.57	4.08	4.08	4.08	17	2	4	17	2	5	22	4	3.660	0.000	5.22	
18	3	4	4	2.380	2.050	3.69	4.08	4.08	4.08	18	3	4	18	3	5	23	3	2.380	0.000	5.22	
19	4	4	4	1.280	2.050	2.70	4.08	4.08	4.08	19	4	4	19	4	5	24	4	1.280	0.000	5.22	
20	5	4	4	0.000	2.050	0.00	4.08	4.08	4.08	20	5	4	20	5	5	25	5	0.000	0.000	5.22	
21	1	5	5	4.760	0.000	5.22	0.00	0.00	0.00	21	1	5	21	1	5	25	1	4.760	0.000	5.22	
22	2	5	5	3.660	0.000	4.57	0.00	0.00	0.00	22	2	5	22	2	5	25	2	3.660	0.000	5.22	
23	3	5	5	2.380	0.000	3.69	0.00	0.00	0.00	23	3	5	23	3	5	25	3	2.380	0.000	5.22	
24	4	5	5	1.280	0.000	2.70	0.00	0.00	0.00	24	4	5	24	4	5	25	4	1.280	0.000	5.22	
25	5	5	5	0.000	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00	25	5	5	25	5	5	25	5	0.000	0.000	5.22	

Figura A.2: RackCoord - Determinação de tempos de ciclo utilizando VBA



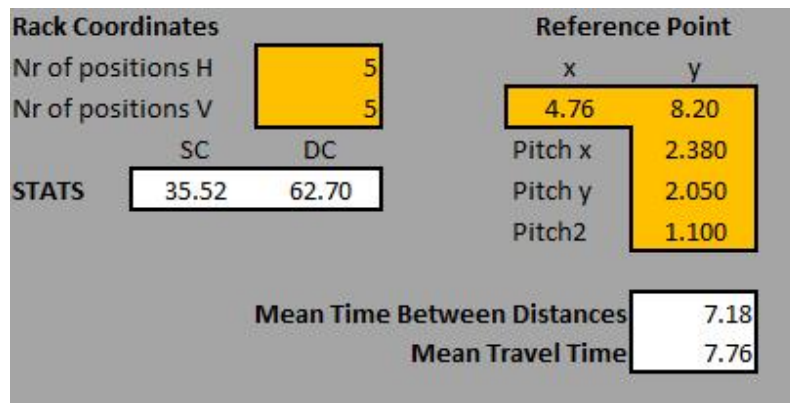


Figura A.3: RackCoord - Tempo de viagem médio entre origem e posição aleatória na estante/ tempo de viagem médio entre duas posições na estante

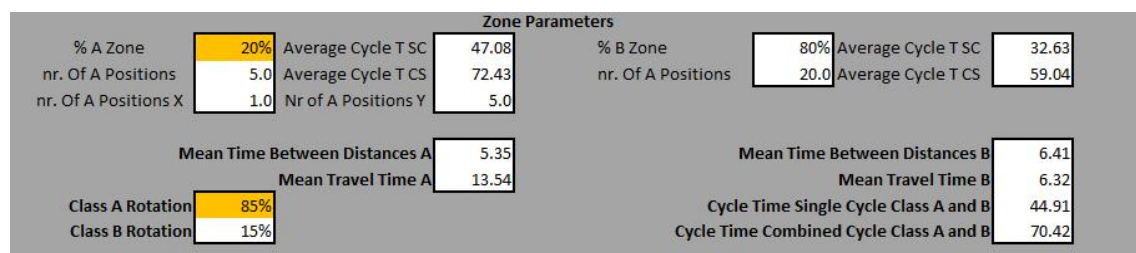


Figura A.4: RackCoord - Tempo de ciclo para armazém dividido em zonas

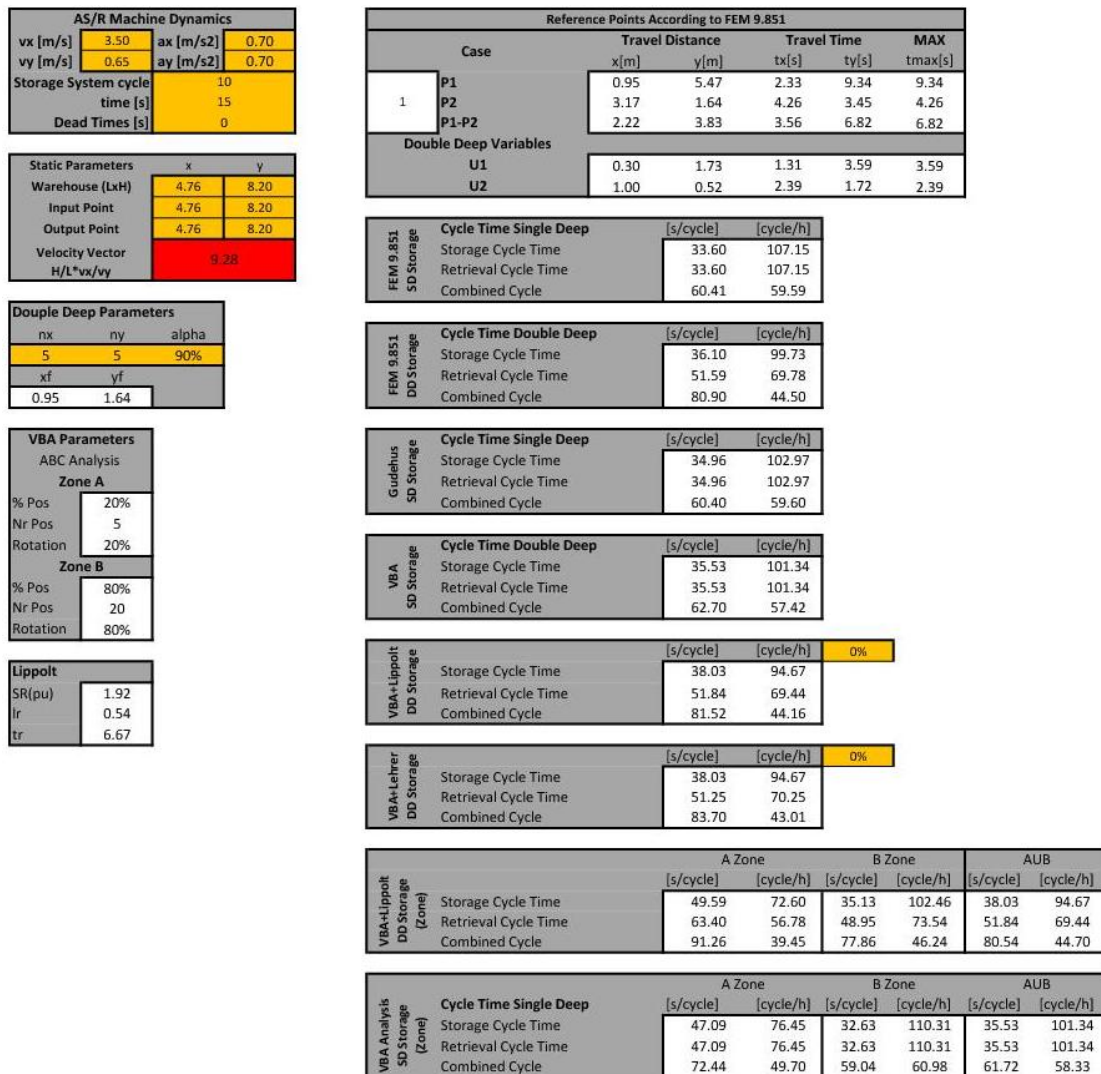


Figura A.5: CT-Tools - Comparação entre Métodos de cálculo de tempos de ciclo

Reference Points According to FEM 9.851			
Case	Coordinates		
	x	y	z
1	P1	9.26	5.47
	P2	30.88	1.64
2	P1 Input	9.26	5.47
	P2 Input	30.88	1.64
3	P1	9.26	5.47
	P2	30.88	1.64
4	P1	9.26	5.47
	P2	30.88	1.64
5	P1 Output	9.26	5.47
	P2 Output	30.88	1.64
6	P1	9.26	5.47
	P2	30.88	1.64
	P1 Output	9.26	5.47
	P2 Output	30.88	1.64
0	E-A	0	0

Case	E-P1-S-P1*			E-P2-S-P2*			P1-P2/P1-P2*			NA			NA		
	x	y	z	x	y	z	x	y	z	x	y	z	x	y	z
1	9.26	5.47	30.88	1.64	21.62	3.83	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Distance	4.30	1.30	7.86	1.30	6.58	1.30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
$t_p$	0.00	7.11	0.00	1.22	0.00	4.59	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
$t_{p1}$	4.30	1.30	7.86	1.30	6.58	1.30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Utotal	8.61	9.71	15.72	-3.82	13.15	-7.19	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Check	-8.96	-5.47	-28.59	-1.64	15.75	-3.83	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Max	9.71			-15.72			73.115			0.00			0.00		

AS/R Machine Dynamics			
$v_x$ [m/s]	$v_y$ [m/s]	$v_z$ [m/s]	ax [m/s <sup>2</sup> ]
5	0.65	0.5	0.5
Storage System cycle	10	15	0
Dead Times [s]	0		

Static Parameters			
Warehouse (LxH)	x	y	z
Input Point	46.32	8.20	0.00
Output Point	0.00	0.00	0.00
Velocity Vector	1.36		
H/L <sup>2</sup> v <sub>w</sub> /v <sub>y</sub>	1.36		

Double Deep Parameters			
mx	my	degree of filling	MF
40	10	98%	1.16
$t$	0.82	0.82	0.82
$t_{max}$	2.56	1.93	4.27
delta x1	2.73	4.67	4.67
delta x2	0.58	2.15	4.67
delta y2	0.58	2.15	4.67

Single Deep			
Case	1	cycle	cycles/h
Single Cycle Input	45.43	79.25	75.11
Single Cycle Output	47.43	75.90	55.47
Combined Cycle	78.58	45.81	100.55

Double Deep			
Case	1	cycle	cycles/h
Single Cycle Input	47.93	75.11	35.80
Single Cycle Output	64.90	55.47	35.80
Combined Cycle	100.55	35.80	35.80

Figura A.6: FEM 9.851 - Folha de cálculo segundo norma FEM 9.851

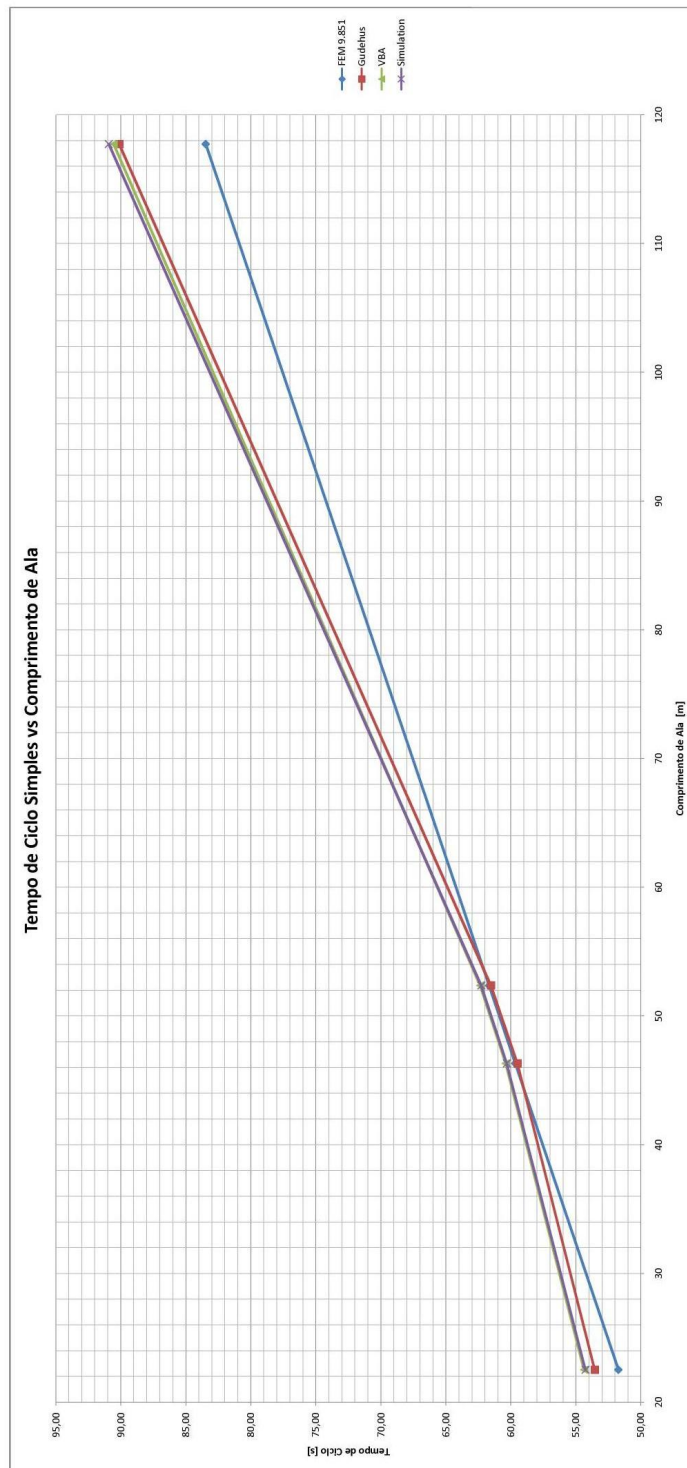


Figura A.7: Gráfico:Tempo de ciclo simples vs Comprimento de Ala

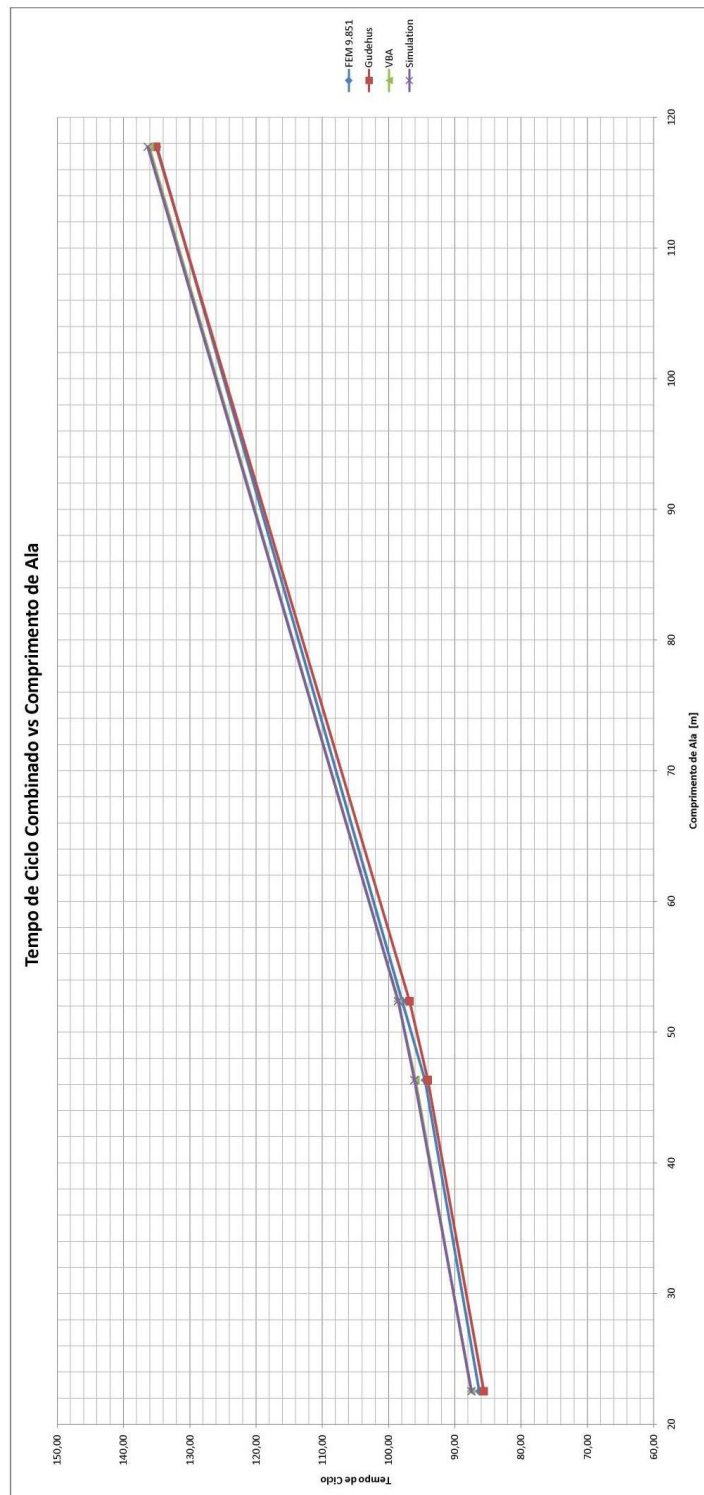


Figura A.8: Gráfico:Tempo de ciclo combinado vs comprimento de ala

Case	Single Deep Storage							w
	L [m]	H [m]	vx [m/s]	ax [m/s <sup>2</sup> ]	vy [m/s]	ay [m/s <sup>2</sup> ]		
FEM 9.851	22.52	18.45	2	0.5	0.65	0.5	2.52	
FEM 9.851	46.32	18.45	2	0.5	0.65	0.5	1.23	
FEM 9.851	52.36	18.45	2	0.5	0.65	0.5	1.08	
FEM 9.851	117.72	18.45	2	0.5	0.65	0.5	0.48	
Gudehus	22.52	18.45	2	0.5	0.65	0.5	2.52	
Gudehus	46.32	18.45	2	0.5	0.65	0.5	1.23	
Gudehus	52.36	18.45	2	0.5	0.65	0.5	1.08	
Gudehus	117.72	18.45	2	0.5	0.65	0.5	0.48	
VBA	22.52	18.45	2	0.5	0.65	0.5	2.52	
VBA	46.32	18.45	2	0.5	0.65	0.5	1.23	
VBA	52.36	18.45	2	0.5	0.65	0.5	1.08	
VBA	117.72	18.45	2	0.5	0.65	0.5	0.48	
Simulation	22.52	18.45	2	0.5	0.65	0.5	2.52	
Simulation	46.32	18.45	2	0.5	0.65	0.5	1.23	
Simulation	52.36	18.45	2	0.5	0.65	0.5	1.08	
Simulation	117.72	18.45	2	0.5	0.65	0.5	0.48	

	Input Single Cycle		Output Single Cycle		Combined Cycle		error1	error2
	Cycle Time [s]	Throughput [cycles/h]	Cycle Time [s]	Throughput [cycles/h]	Cycle Time [s]	Throughput [cycles/h]		
FEM 9.851	51.73	69.59	51.73	69.59	86.28	41.73	4.8%	1.4%
FEM 9.851	59.66	60.34	59.66	60.34	94.47	38.11	1.2%	1.5%
FEM 9.851	61.68	58.37	61.68	58.37	97.89	36.77	1.1%	0.7%
FEM 9.851	83.46	43.13	83.46	43.13	134.93	26.68	7.8%	0.8%
Gudehus	53.54	67.23	53.54	67.23	85.63	42.04	1.5%	2.2%
Gudehus	59.49	60.52	59.49	60.52	94.05	38.28	1.5%	1.9%
Gudehus	61.52	58.51	61.52	58.51	96.84	37.17	1.3%	1.8%
Gudehus	90.12	39.95	90.12	39.95	135.04	26.66	0.5%	0.8%
VBA	54.36	66.23	54.36	66.23	87.54	41.12	0.0%	0.0%
VBA	60.38	59.62	60.38	59.62	95.92	37.53	0.0%	0.0%
VBA	62.35	57.74	62.35	57.74	98.59	36.52	0.0%	0.0%
VBA	90.56	39.75	90.56	39.75	136.09	26.45	0.0%	0.0%
Simulation	54.26	66.35	54.26	66.35	87.49	41.15	0.2%	0.1%
Simulation	60.31	59.70	60.31	59.70	96.11	37.46	0.1%	0.2%
Simulation	62.27	57.81	62.27	57.81	98.56	36.53	0.1%	0.0%
Simulation	90.92	39.60	90.92	39.60	136.34	26.40	0.4%	0.2%

Tabela A.1: Tempo de ciclo Simples Profundidade vs comprimento de ala

Case	Single Deep Storage		vx [m/s]	ax [m/s <sup>2</sup> ]	vy [m/s]	ay [m/s <sup>2</sup> ]	w
	L [m]	H [m]					
FEM 9.851	58.22	18.45	1	0.5	0.65	0.5	0.49
FEM 9.851	58.22	18.45	1.5	0.5	0.65	0.5	0.73
FEM 9.851	58.22	18.45	2	0.5	0.65	0.5	0.98
FEM 9.851	58.22	18.45	2.5	0.5	0.65	0.5	1.22
FEM 9.851	58.22	18.45	3	0.5	0.65	0.5	1.46
FEM 9.851	58.22	18.45	3.5	0.5	0.65	0.5	1.71
Gudehus	58.22	18.45	1	0.5	0.65	0.5	0.49
Gudehus	58.22	18.45	1.5	0.5	0.65	0.5	0.73
Gudehus	58.22	18.45	2	0.5	0.65	0.5	0.98
Gudehus	58.22	18.45	2.5	0.5	0.65	0.5	1.22
Gudehus	58.22	18.45	3	0.5	0.65	0.5	1.46
Gudehus	58.22	18.45	3.5	0.5	0.65	0.5	1.71
VBA	58.22	18.45	1	0.5	0.65	0.5	0.49
VBA	58.22	18.45	1.5	0.5	0.65	0.5	0.73
VBA	58.22	18.45	2	0.5	0.65	0.5	0.98
VBA	58.22	18.45	2.5	0.5	0.65	0.5	1.22
VBA	58.22	18.45	3	0.5	0.65	0.5	1.46
VBA	58.22	18.45	3.5	0.5	0.65	0.5	1.71
Simulation	58.22	18.45	1	0.5	0.65	0.5	0.49
Simulation	58.22	18.45	1.5	0.5	0.65	0.5	0.73
Simulation	58.22	18.45	2	0.5	0.65	0.5	0.98
Simulation	58.22	18.45	2.5	0.5	0.65	0.5	1.22
Simulation	58.22	18.45	3	0.5	0.65	0.5	1.46
Simulation	58.22	18.45	3.5	0.5	0.65	0.5	1.71

	Input Single Cycle		Output Single Cycle		Combined Cycle		error1	error2
	Cycle Time [s]	Throughput [cycles/h]	Cycle Time [s]	Throughput [cycles/h]	Cycle Time [s]	Throughput [cycles/h]		
FEM 9.851	81.04	44.42	81.04	44.42	130.21	27.65	-6.7%	-0.6%
FEM 9.851	69.10	52.10	69.10	52.10	110.21	32.66	-2.7%	0.1%
FEM 9.851	63.70	56.51	63.63	56.58	101.21	35.57	-1.3%	-0.3%
FEM 9.851	60.75	59.26	60.75	59.26	96.52	37.30	-1.3%	-1.2%
FEM 9.851	59.16	60.85	59.16	60.85	94.22	38.21	-1.7%	-1.7%
FEM 9.851	58.31	61.74	58.31	61.74	93.08	38.68	-2.0%	-2.2%
Gudehus	86.49	41.62	86.49	41.62	129.78	27.74	-0.4%	-0.9%
Gudehus	70.07	51.38	70.07	51.38	108.70	33.12	-1.3%	-1.2%
Gudehus	63.70	56.51	63.70	56.51	99.79	36.08	-1.3%	-1.7%
Gudehus	60.39	59.61	60.39	59.61	95.42	37.73	-1.9%	-2.3%
Gudehus	58.62	61.41	58.62	61.41	93.07	38.68	-2.6%	-2.9%
Gudehus	57.57	62.53	57.57	62.53	91.67	39.27	-3.3%	-3.7%
VBA	86.94	41.41	86.94	41.41	130.95	27.49	0.1%	0.0%
VBA	71.07	50.65	71.07	50.65	110.05	32.71	0.1%	0.0%
VBA	64.51	55.81	64.51	55.81	101.48	35.47	0.0%	0.0%
VBA	61.48	58.56	61.48	58.56	97.57	36.90	-0.1%	-0.1%
VBA	60.01	59.99	60.01	59.99	95.75	37.60	-0.2%	-0.2%
VBA	59.31	60.70	59.39	60.62	95.16	37.83	-0.3%	0.0%
Simulation	86.83	41.46	86.83	41.46	130.99	27.48	0.0%	0.0%
Simulation	71.02	50.69	71.02	50.69	110.06	32.71	0.0%	0.0%
Simulation	64.51	55.81	64.51	55.81	101.49	35.47	0.0%	0.0%
Simulation	61.56	58.48	61.56	58.48	97.65	36.87	0.0%	0.0%
Simulation	60.16	59.84	60.05	59.95	95.90	37.54	0.0%	0.0%
Simulation	59.51	60.49	59.40	60.61	95.16	37.83	0.0%	0.0%

Tabela A.2: Tempo de ciclo Simples Profundidade vs velocidade

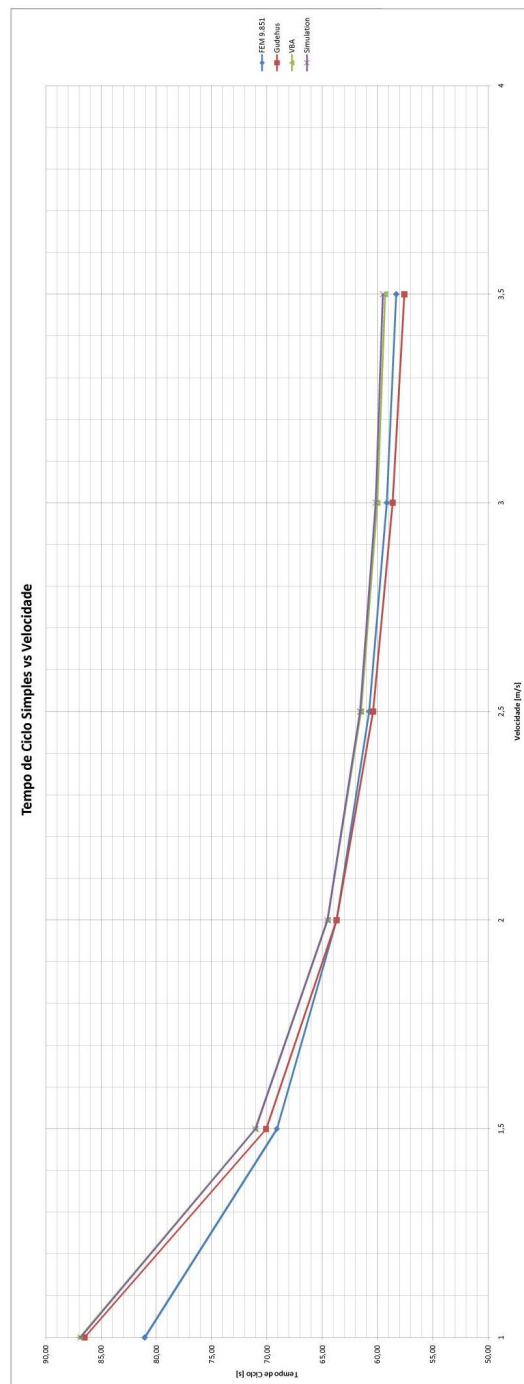


Figura A.9: Gráfico:Tempo de ciclo simples Simples Profundidade vs velocidade



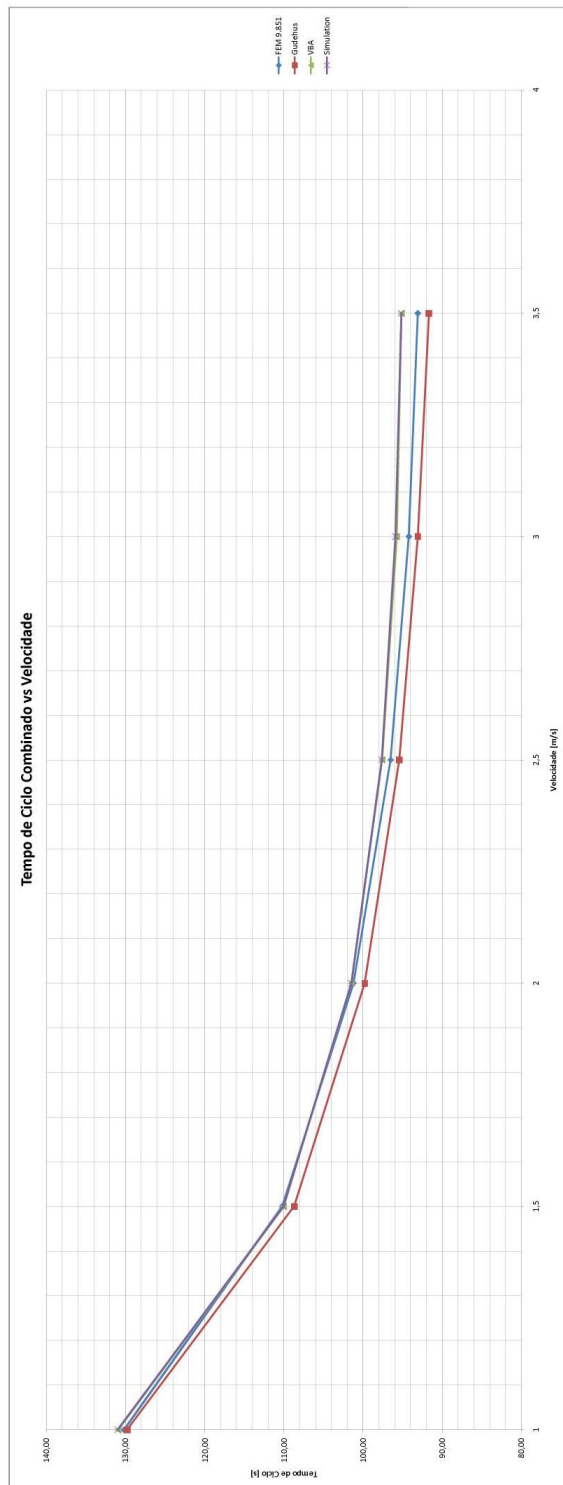


Figura A.10: Gráfico:Tempo de ciclo combinado Simple Profundidade vs velocidade

Case	Double Deep Storage		vx [m/s]	ax [m/s <sup>2</sup> ]	vy [m/s]	ay [m/s <sup>2</sup> ]	w
	L [m]	H [m]					
FEM 9.851	58.22	18.45	1.0	0.5	0.65	0.5	0.49
FEM 9.851	58.22	18.45	1.5	0.5	0.65	0.5	0.73
FEM 9.851	58.22	18.45	2.0	0.5	0.65	0.5	0.98
FEM 9.851	58.22	18.45	2.5	0.5	0.65	0.5	1.22
FEM 9.851	58.22	18.45	3.0	0.5	0.65	0.5	1.46
FEM 9.851	58.22	18.45	3.5	0.5	0.65	0.5	1.71
Simulation	58.22	18.45	1.0	0.5	0.65	0.5	0.49
Simulation	58.22	18.45	1.5	0.5	0.65	0.5	0.73
Simulation	58.22	18.45	2.0	0.5	0.65	0.5	0.98
Simulation	58.22	18.45	2.5	0.5	0.65	0.5	1.22
Simulation	58.22	18.45	3.0	0.5	0.65	0.5	1.46
Simulation	58.22	18.45	3.5	0.5	0.65	0.5	1.71
Lippolt	58.22	18.45	1.0	0.5	0.65	0.5	0.49
Lippolt	58.22	18.45	1.5	0.5	0.65	0.5	0.73
Lippolt	58.22	18.45	2.0	0.5	0.65	0.5	0.98
Lippolt	58.22	18.45	2.5	0.5	0.65	0.5	1.22
Lippolt	58.22	18.45	3.0	0.5	0.65	0.5	1.46
Lippolt	58.22	18.45	3.5	0.5	0.65	0.5	1.71
Lerher	58.22	18.45	1.0	0.5	0.65	0.5	0.49
Lerher	58.22	18.45	1.5	0.5	0.65	0.5	0.73
Lerher	58.22	18.45	2.0	0.5	0.65	0.5	0.98
Lerher	58.22	18.45	2.5	0.5	0.65	0.5	1.22
Lerher	58.22	18.45	3.0	0.5	0.65	0.5	1.46
Lerher	58.22	18.45	3.5	0.5	0.65	0.5	1.71

	Input Single Cycle		Output Single Cycle		Combined Cycle		error1	error2	error3	error1	error2	error3
	Cycle Time [s]	Throughput [cycles/h]	Cycle Time [s]	Throughput [cycles/h]	Cycle Time [s]	Throughput [cycles/h]						
FEM 9.851	83.54	43.09	99.75	36.09	151.42	23.77	-6.0%	-8.9%	1.5%	-6.4%	-9.8%	1.5%
FEM 9.851	71.07	50.65	87.81	41.00	131.42	27.39	-2.4%	-4.3%	2.2%	-2.5%	-4.5%	2.1%
FEM 9.851	66.13	54.44	82.34	43.72	122.43	29.40	-0.3%	-3.5%	2.0%	-0.3%	-3.6%	1.9%
FEM 9.851	63.25	56.92	79.46	45.31	117.14	30.73	-0.2%	-2.4%	0.9%	-0.2%	-2.4%	0.9%
FEM 9.851	61.66	58.38	77.87	46.23	115.43	31.19	-0.3%	-2.1%	1.2%	-0.3%	-2.2%	1.2%
FEM 9.851	60.81	59.20	77.03	46.74	114.29	31.50	-0.7%	-2.2%	1.3%	-0.7%	-2.3%	1.3%
Simulation	88.91	40.49	109.48	32.88	149.20	24.13						
Simulation	72.83	49.43	91.80	39.22	128.60	27.99						
Simulation	66.31	54.29	85.33	42.19	120.08	29.98						
Simulation	63.36	56.82	81.40	44.23	116.08	31.01						
Simulation	61.87	58.19	79.57	45.24	114.01	31.58						
Simulation	61.22	58.80	78.78	45.70	112.83	31.91						
Lippolt	89.44	40.25	105.02	34.28	151.53	23.76	0.6%	-4.1%	1.6%	0.6%	-4.2%	1.5%
Lippolt	73.57	48.93	88.50	40.68	129.98	27.70	1.0%	-3.6%	1.1%	1.0%	-3.7%	1.1%
Lippolt	67.00	53.73	81.85	43.98	121.33	29.67	1.0%	-4.1%	1.0%	1.0%	-4.2%	1.0%
Lippolt	64.00	56.25	78.96	45.59	117.56	30.62	1.0%	-3.0%	1.3%	1.0%	-3.1%	1.3%
Lippolt	62.49	57.61	77.74	46.31	115.98	31.04	1.0%	-2.3%	1.7%	1.0%	-2.3%	1.7%
Lippolt	61.77	58.28	77.96	46.53	115.52	31.16	0.9%	-1.8%	2.4%	0.9%	-1.8%	2.3%
Lerher	89.44	40.25	103.31	34.85	150.22	23.96	0.6%	-5.6%	0.7%	0.6%	-6.0%	0.7%
Lerher	73.57	48.93	87.44	41.17	129.28	27.85	1.0%	-4.8%	0.5%	1.0%	-5.0%	0.5%
Lerher	67.01	53.72	80.87	44.51	120.68	29.83	1.0%	-5.2%	0.5%	1.0%	-5.5%	0.5%
Lerher	63.99	56.26	77.84	46.25	116.71	30.85	1.0%	-4.4%	0.5%	1.0%	-4.6%	0.5%
Lerher	62.52	57.58	76.38	47.13	114.78	31.36	1.1%	-4.0%	0.7%	1.1%	-4.2%	0.7%
Lerher	61.84	58.22	75.64	47.59	113.86	31.62	1.0%	-4.0%	0.9%	1.0%	-4.1%	0.9%

Tabela A.3: Tempo de ciclo de Dupla Profundidade vs velocidade

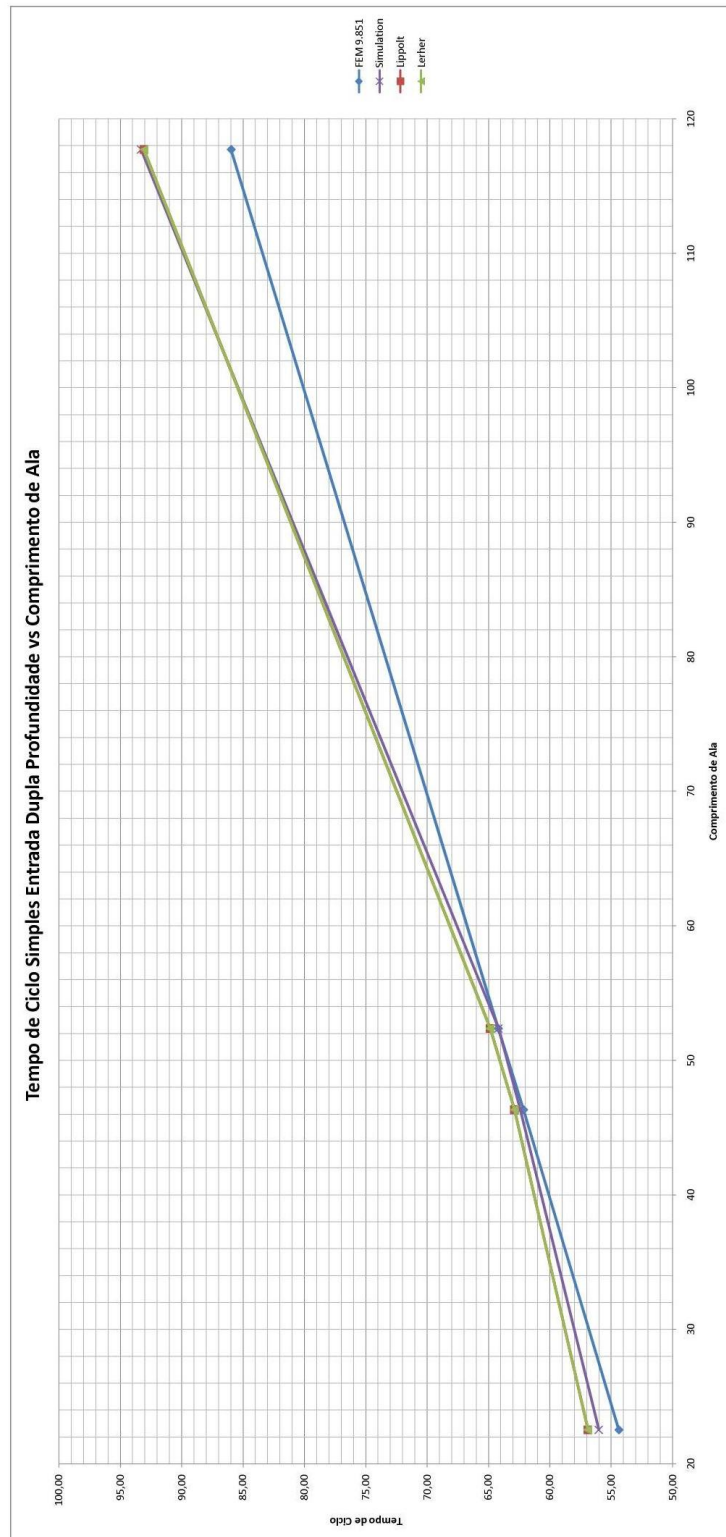


Figura A.11: Gráfico: Tempo de ciclo simples Dupla Profundidade vs Comprimento

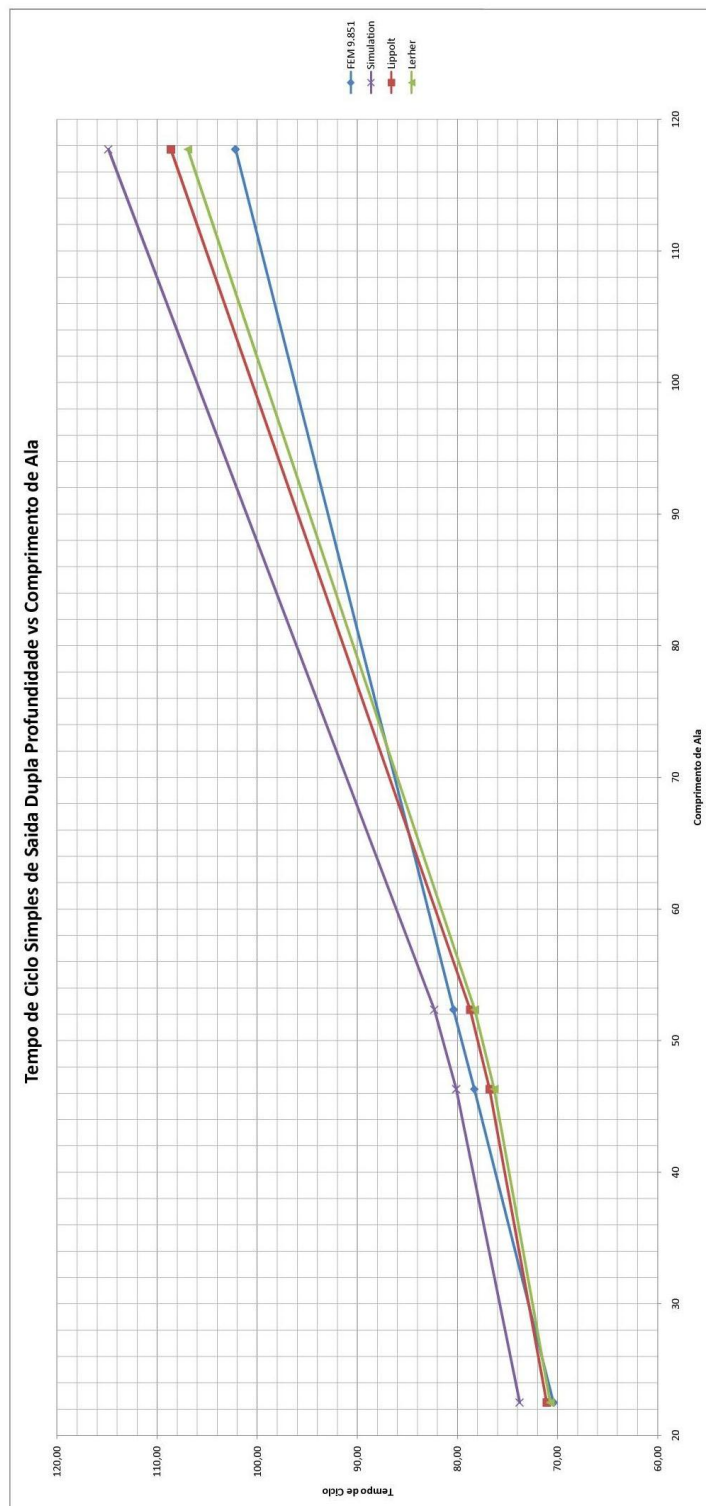


Figura A.12: Gráfico:Tempo de CS de saída de Dupla Profundidade vs comprimento de ala

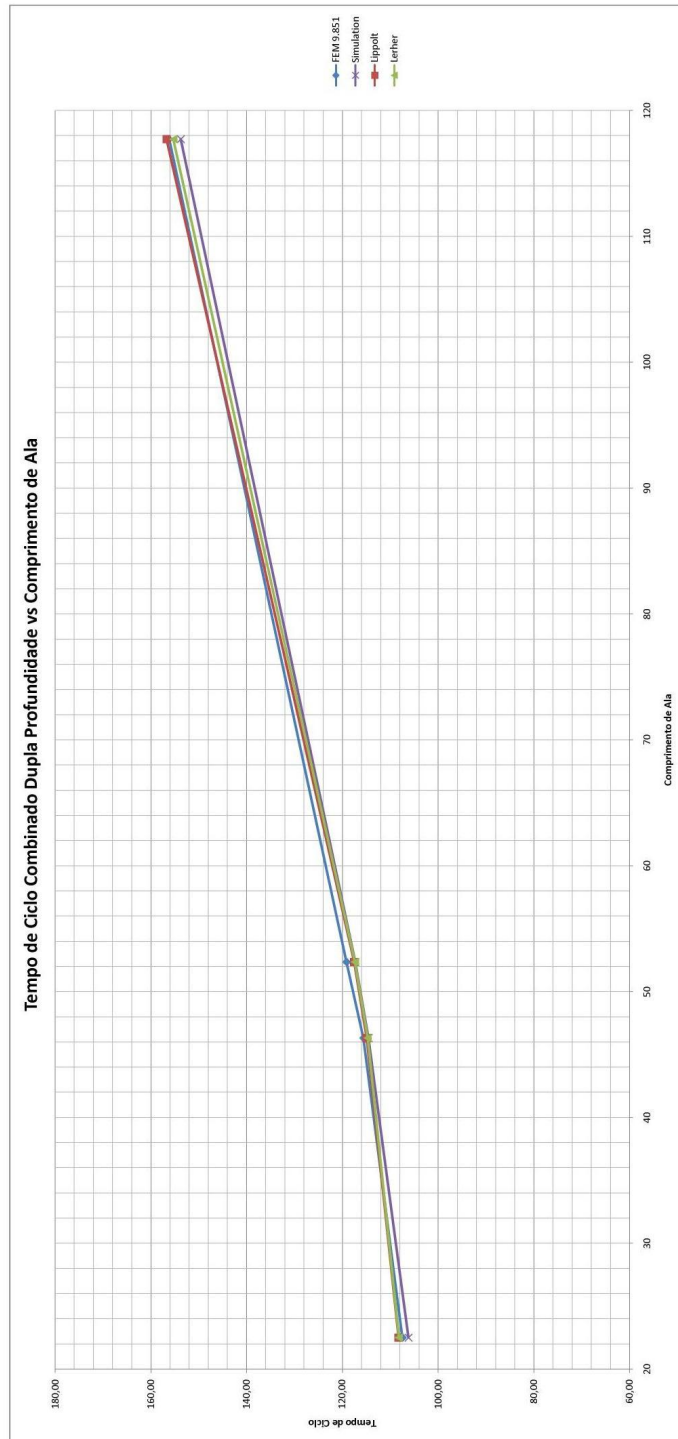


Figura A.13: Gráfico:Tempo de CC de Dupla Profundidade vs comprimento de ala

ABC Zone 25%/75%  
ABC Rotation 75%/25%

Case Double Deep Storage

Case	L [m]	H [m]	vx [m/s]		ax [m/s <sup>2</sup> ]		vy [m/s]		ay [m/s <sup>2</sup> ]		w
			1	2	1	2	1	2	1	2	
VBA	58.22	18.45	1	0.7	0.65	0.7	0.49				
			1.5	0.7	0.65	0.7	0.73				
			2	0.7	0.65	0.7	0.98				
			2.5	0.7	0.65	0.7	1.22				
			3	0.7	0.65	0.7	1.46				
Simulation	58.22	18.45	1	0.7	0.65	0.7	0.49				
			1.5	0.7	0.65	0.7	0.73				
			2	0.7	0.65	0.7	0.98				
			2.5	0.7	0.65	0.7	1.22				
			3	0.7	0.65	0.7	1.46				

Case	Input Single Cycle					
	CT A [s]	error1	TH A [cycles/h]	CT B [s]	error2	TH B [cycles/h]
VBA	55.85	1.4%	64.46	99.24	1.1%	36.28
	48.26	1.5%	74.60	80.16	1.1%	44.91
	45.17	1.5%	79.70	72.12	1.2%	49.92
	43.78	1.4%	82.23	68.29	1.1%	52.72
	43.19	1.3%	83.35	66.27	1.1%	54.32
Simulation	42.99	1.0%	83.74	65.12	1.1%	55.28
	55.06		65.38	98.17		36.67
	47.52		75.75	79.33		45.38
	44.48		80.93	71.30		50.49
	43.15		83.41	67.53		53.31

Case	Output Single Cycle					
	CT A [s]	error3	TH A [cycles/h]	CT B [s]	error4	TH B [cycles/h]
VBA	70.98	1.8%	50.72	114.37	-3.0%	31.48
	62.61	2.0%	57.50	94.51	-3.3%	38.09
	59.30	2.2%	60.71	86.24	-3.4%	41.74
	57.91	2.4%	62.17	82.42	-3.3%	43.68
	57.44	2.8%	62.67	80.52	-3.5%	44.71
Simulation	57.42	3.2%	62.70	79.55	-3.6%	45.25
	72.29		49.80	117.86		30.54
	63.86		56.38	97.70		35.85
	60.66		59.35	89.27		40.33
	59.33		60.67	85.25		42.23

Case	Combined Cycle														
	CT A [s]	error5	TH A [cycles/h]	CT B [s]	error6	TH B [cycles/h]	CT I [s]	error7	TH I [cycles/h]	CT O [s]	error8	TH O [cycles/h]	CT CC [s]	error9	TH CC [cycles/h]
VBA	105.72	2.2%	34.05	159.12	0.7%	22.62	62.36	-3.0%	57.73	77.49	-0.1%	46.46	113.79	1.4%	31.65
	94.99	1.9%	37.90	134.37	1.8%	26.79	53.05	0.7%	67.87	67.40	-2.5%	53.42	100.90	1.5%	35.68
	90.81	1.5%	39.64	124.10	1.3%	29.01	49.21	-3.1%	73.15	63.34	-3.3%	56.84	95.80	1.3%	37.58
	89.11	1.9%	40.40	119.34	1.4%	30.17	47.46	-0.9%	75.86	61.59	-3.1%	58.45	93.64	2.2%	38.44
	88.61	2.0%	40.63	116.99	2.0%	30.77	46.65	-1.2%	77.17	60.90	-2.8%	59.11	92.87	2.3%	38.77
Simulation	88.71	1.4%	40.58	115.83	1.9%	31.08	46.31	-1.4%	77.74	60.74	-3.5%	59.27	92.78	1.0%	38.80
	103.48		34.79	157.96		22.79	64.28		56.00	77.54		46.43	112.19		32.09
	93.21		38.62	132.05		27.26	52.68		68.34	69.13		52.08	99.41		36.21
	89.51		40.22	122.48		29.39	50.81		70.86	65.49		54.97	94.54		38.08
	87.45		41.16	117.68		30.59	47.88		75.19	63.58		56.62	91.64		39.29

Tabela A.4: Tempo de ciclo ABC de Dupla Profundidade vs velocidade

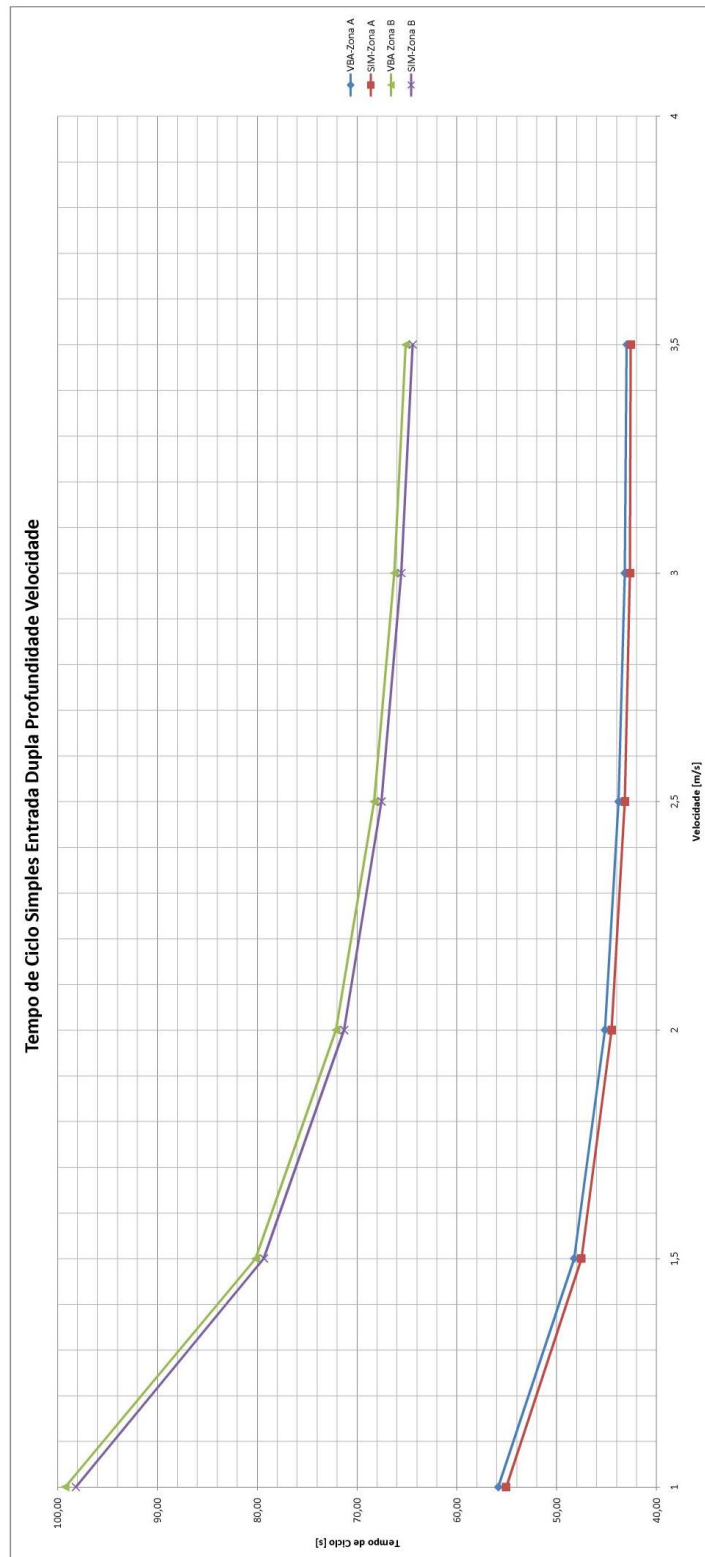


Figura A.14: Gráfico:Tempo de CS de Dupla Profundidade vs velocidade

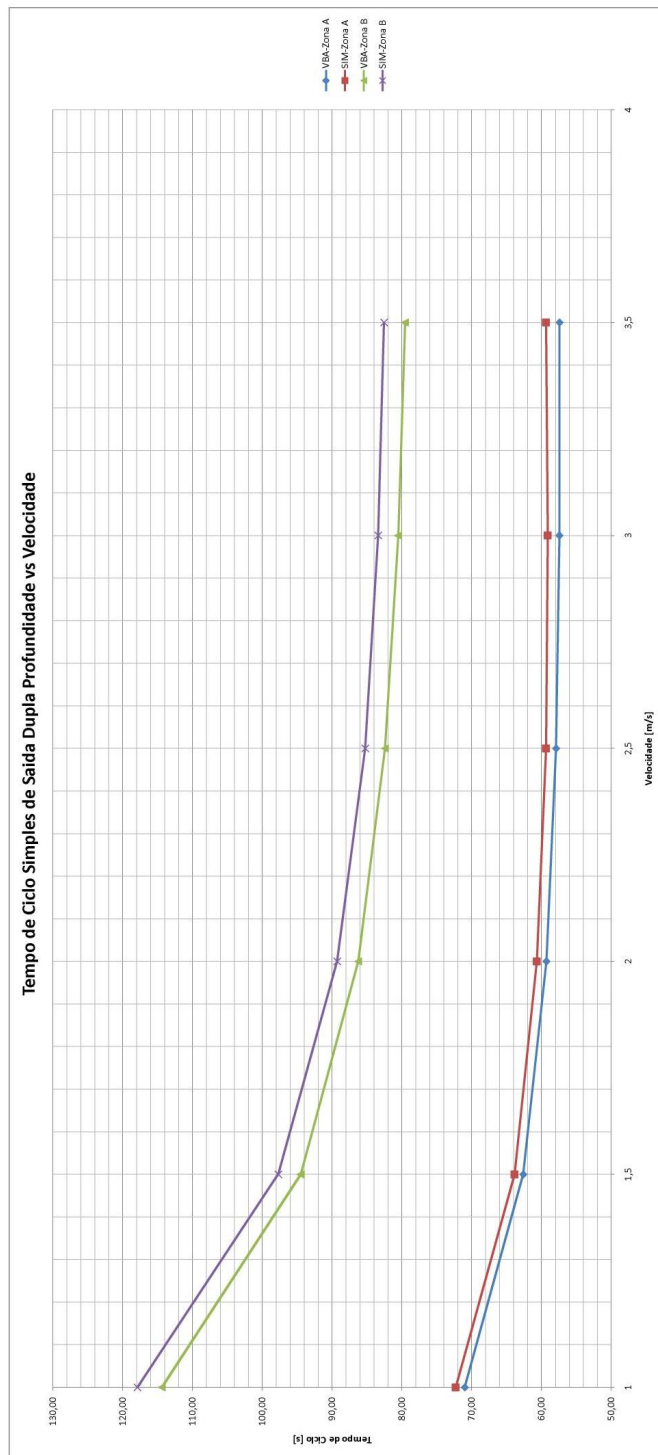


Figura A.15: Gráfico:Tempo de CS de Dupla Profundidade vs velocidade



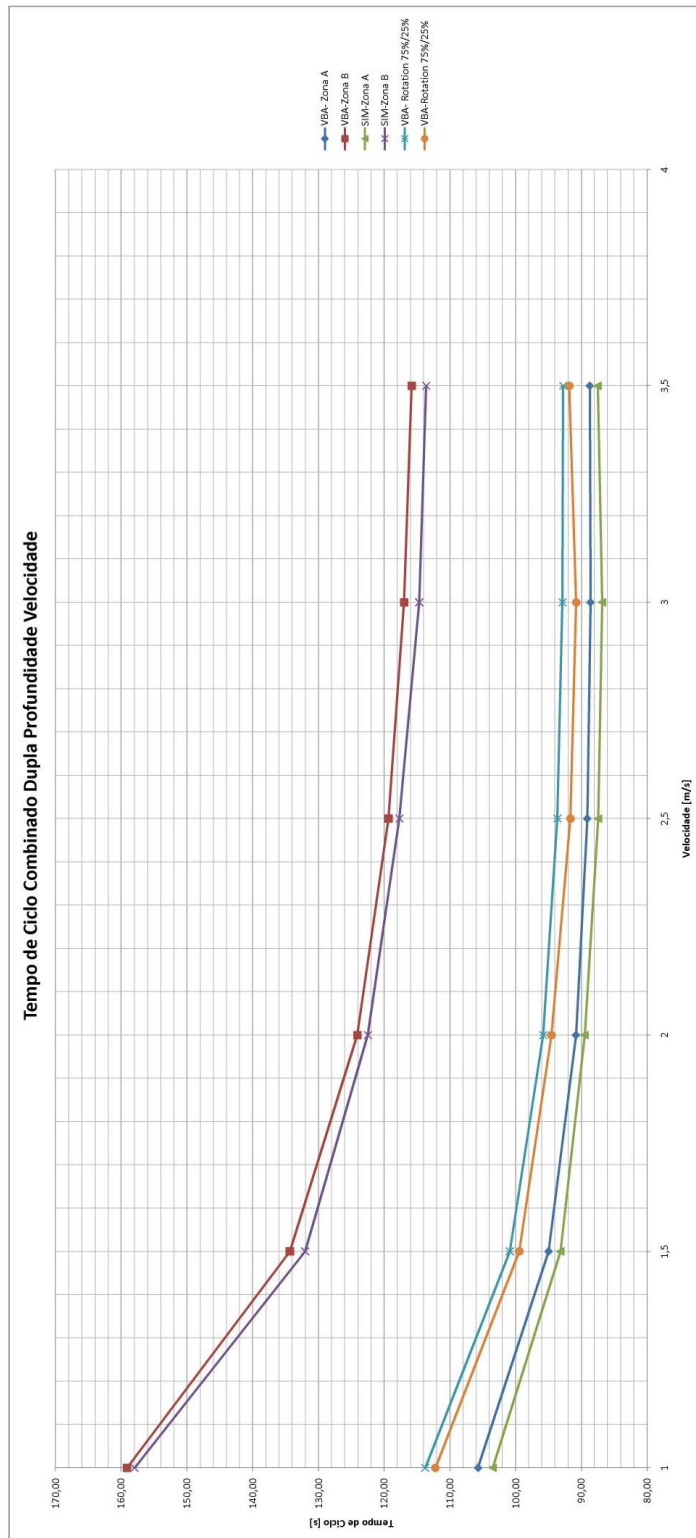


Figura A.16: Gráfico:Tempo de CC de Dupla Profundidade vs velocidade