

Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Samuel Francisco Vieira da Costa

**Estudo sobre a afetação de produtos num armazém
automático de alta densidade**

Dissertação de Mestrado

Mestrado em Engenharia de Sistemas

Trabalho realizado sob a orientação do

Professor Doutor José António Vasconcelos Oliveira

Professor Doutor Manuel Carlos Barbosa Figueiredo

Dezembro de 2020

DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros desde que respeitadas as regras e boas práticas internacionalmente aceites, no que concerne aos direitos de autor e direitos conexos.

Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença abaixo indicada.

Caso o utilizador necessite de permissão para poder fazer um uso do trabalho em condições não previstas no licenciamento indicado, deverá contactar o autor, através do RepositóriUM da Universidade do Minho.

Licença concedida aos utilizadores deste trabalho



Atribuição-NãoComercial-SemDerivações

CC BY-NC-ND

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

AGRADECIMENTOS

A elaboração deste projeto só foi possível devido ao auxílio e contributo por parte de várias pessoas.

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer ao Professor Doutor José Oliveira e ao Professor Doutor Manuel Figueiredo pelo acompanhamento desde o primeiro momento do projeto, pela inteira disponibilidade e prontidão para me auxiliarem e esclarecerem as dúvidas, quer por garantirem a supervisão do desenvolvimento do trabalho. Agradeço ainda as partilhas de conhecimento e sugestões que enriqueceram a dissertação.

Agradeço, igualmente, ao engenheiro Emanuel pelo fornecimento de informações e dados que foram cruciais para o desenvolvimento da dissertação.

Um especial reconhecimento aos meus amigos e colegas pela motivação, apoio e ideias que sempre me proporcionaram, contribuindo de forma essencial para a concretização da presente etapa.

Por fim, e não menos importante, apresento o meu especial agradecimento ao meu pai e à minha mãe, por tudo quanto me ensinaram e proporcionaram, permitindo chegar ao culminar deste projeto sem que nada me faltasse.

Desta forma, deixo aqui o meu mais sincero agradecimento pelo contributo que cada um teve na realização deste trabalho.

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho académico e confirmo que não recorri à prática de plágio nem a qualquer forma de utilização indevida ou falsificação de informações ou resultados em nenhuma das etapas conducente à sua elaboração.

Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

RESUMO

Com o aparecimento do conceito de Indústria 4.0 a logística apresenta um papel fundamental para que se possa usufruir das vantagens deste novo conceito. Atualmente diversas soluções logísticas em vigor ainda não acompanham o novo paradigma industrial, o que leva à ineficiência na produtividade das empresas. O aumento da complexidade das operações logísticas das empresas, bem como a crescente exigência e particularidade dos consumos feitos por parte dos clientes têm conduzido a uma maior preocupação com a minimização dos custos logísticos e com o aumento da eficiência dos sistemas de armazenamento.

A dissertação retrata o estudo conduzido num armazém automático de alta densidade de uma empresa produtora de para-choques. Os produtos finais são armazenados em linhas gravíticas, as quais apenas apresentam uma única entrada e uma única saída. Através da dissertação objetiva-se fazer um estudo sobre a alocação dos para-choques no armazém, visando encontrar uma solução eficiente e que culmine numa melhoria do desempenho no armazém.

Através da análise da informação sobre o armazém, foi possível observar ineficiências no processo de classificação e com a alocação de produtos. Estes problemas afetam a eficiência do armazém e a produtividade da empresa. Para ultrapassar os problemas encontrados sugeriu-se, em primeiro lugar, a política de armazenamento baseada em classes seguindo a regra de Pareto. Em segundo lugar, analisaram-se configurações com diferentes afetações nas linhas de armazenamento com o intuito de verificar o impacto na operação do armazém.

Conclui-se que para a obtenção do potencial máximo de eficiência do armazém, tendo em conta a dinâmica de armazenamento, tem de se alocar os diferentes tipos de produtos individualmente nas linhas de armazenamento. Pelo facto de o armazém não apresentar as condições necessárias para aplicar a alocação recomendada, sugeriu-se três alternativas: expansão do armazém, introdução de linhas em carrossel ou a diminuição da capacidade de uma parte das linhas.

Palavras-Chave: Armazém automático de alta densidade, Para-choques, Política de armazenamento, Otimização, Indústria 4.0.

ABSTRACT

With the arising of the Industry 4.0 concept, logistics plays a fundamental role to enjoy the advantages of this new concept. Currently, several logistical solutions in force still do not follow the new industrial paradigm, which leads to inefficiency in companies' productivity. The increase in the complexity of companies' logistical operations, as well as the increasing demand and particularity of consumptions made by customers, have led to a greater concern with minimizing logistical costs and with increasing the efficiency of storage systems.

The dissertation portrays the study carried out in a high density's automatic warehouse of a company that produces bumpers. The final products are stored in gravity lines, which only have a single entry and a single exit. Through the dissertation the objective is to make a study on the allocation of bumpers in the warehouse, aiming to find an efficient solution that culminates in an improvement of the performance in the warehouse.

Through the analysis of information about the warehouse, it was possible to observe inefficiencies in the classification process and with the allocation of products. These problems affect the efficiency of the warehouse and the productivity of the company. To overcome the problems encountered, it was suggested, first of all, the class-based storage policy following Pareto's rule. Second, storage configurations with different effects on storage lines were analyzed to verify the impact on warehouse operation.

It is concluded that to obtain the maximum efficiency potential of the warehouse, taking into account the storage dynamics, different types of products must be allocated individually in the storage lines. Because the warehouse does not have the necessary conditions to apply the recommended allocation, three alternatives have been suggested: expansion of the warehouse, introduction of carousel lines, or reduction of the capacity of part of the lines.

Keywords: Automatic high density's warehouse, Bumpers, Storage policy, Optimization, Industry 4.0.

ÍNDICE

Agradecimentos.....	iii
Resumo.....	v
Abstract.....	vi
Lista de Abreviaturas e Siglas	ix
Lista de Figuras.....	x
Lista de Tabelas	xii
1. Introdução.....	1
1.1. Contextualização	1
1.2. Objetivos	2
1.3. Metodologia.....	2
1.4. Estrutura do relatório	3
2. Revisão bibliográfica	4
2.1. Customização em Massa	4
2.2. Indústria 4.0.....	5
2.3. Implicações da indústria 4.0 na gestão da cadeia de abastecimento	7
2.4. Armazém	8
2.4.1. Atividades fundamentais no Armazém.....	9
2.4.2. Unidades de armazenagem	9
2.4.3. Sistemas de armazenagem	9
2.4.4. Tipos de armazém de acordo com o seu inventário	13
2.4.5. Estratégias de movimentação de inventário	14
2.5. Problema de designação de locais de armazenagem.....	14
2.5.1. Política de armazenagem aleatória.....	15
2.5.2. Política de armazenagem fixa.....	16
2.5.3. Política de armazenagem baseada em classes	16
2.6. Avaliação da armazenagem	20
2.7. Modelação matemática.....	20
3. Apresentação do problema	22
3.1. História e caracterização do produto	22

3.2. <i>Layout</i> do armazém.....	23
3.3. Movimentação.....	26
3.4. Armazenamento no <i>Shopstocker</i>	27
3.5. KPIs	30
4. Análise das políticas de armazenamento.....	31
4.1. <i>Datasets</i> disponibilizados pela empresa	31
4.2. Política de armazenamento da empresa.....	33
4.2.1. Tratamento dos dados	33
4.2.2. Análise da política de armazenamento atual.....	46
4.3. Novo método.....	48
4.3.1. Tratamento dos dados	48
4.3.2. Análise da Procura.....	50
4.3.3. Nova política de armazenamento	53
5. Análise da afetação de produtos nas linhas de armazenamento	55
5.1. Modelo matemático.....	55
5.1.1. Parâmetros.....	55
5.1.2. Conjuntos de valores	56
5.1.3. Variáveis de decisão	56
5.1.4. Formulação matemática	57
5.2. Experiências Computacionais.....	59
5.2.1. Configurações do armazém	59
5.2.2 Resultados Computacionais	62
5.3. Considerações sobre a aplicação das soluções analisadas e Propostas de alternativas	69
6. Conclusões e Trabalhos Futuros	72
Bibliografia	75
Apêndice I – Produtos classificados pelo método ABC.....	78

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AS/RS - *Automated Storage and Retrieval System*

CPS - *Cyber-physical systems*

FEFO - *First expired first out*

FIFO - *First in first out*

IoT - *Internet of things*

JDBC - *Java Database Connectivity*

KPI - *Key performance indicators*

LIFO - *Last in first out*

LEFO - *Last expired first out*

MILP - *Mixed integer linear problem*

RFID - *Radio-Frequency IDentification*

SLAP- *Storage location assignment problem*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Sistema de armazenamento do tipo rack convencional (Fonte:Lusoracks).	10
Figura 2 - Sistema de armazenamento do tipo drive-in (Fonte:Lusoracks).....	10
Figura 3 - Sistema de armazenamento do tipo rack cantilever (Fonte:Nortemonta).	11
Figura 4 - Sistema de armazenamento do tipo rack gravitacional (Fonte:Nortemonta).	11
Figura 5 - Sistema de armazenamento em carrossel vertical (Fonte:VRC).	12
Figura 6 - Sistema de armazenamento do tipo autoportante (Fonte:Nortemonta).....	12
Figura 7 - Curva ABC.	17
Figura 8 - Layout do armazenamento horizontal [Adaptado: Chan & Chan (2011)]......	19
Figura 9 - Layout do armazenamento vertical [Adaptado: Chan & Chan (2011)]......	19
Figura 10 - Shopstocker desenvolvido pela empresa Pinto Brasil (Fonte: Pinto Brasil).	22
Figura 11 - Layout do armazém (primeiro piso).	24
Figura 12 - Movimentação do produto no shopstocker (parte 1).....	26
Figura 13 - Movimentação do produto no shopstocker (parte 2).....	26
Figura 14 - Movimentação do produto no shopstocker (parte3).....	27
Figura 15 - Movimentação do produto no shopstocker (parte 4).....	27
Figura 16 - Afetação de produtos high runners.	28
Figura 17 - Afetação de produtos medium runners.	28
Figura 18 - Afetação de produtos low runners.	29
Figura 19 - Logótipo da plataforma KNIME.	32
Figura 20 - Primeiro modelo em Knime (parte 1).....	33
Figura 21 - Configurações do nodo “Double to Int”.....	34
Figura 22 - Configurações do nodo “String to Date&Time”.....	35
Figura 23 - Configurações do nodo “Extract Date&Time Fields”.....	36
Figura 24 - Primeiro modelo em KNIME (parte 2).....	37
Figura 25 - Configurações do nodo “Row Filter”.....	37
Figura 26 - Configurações do nodo “Column Filter”.....	38
Figura 27 - Configurações do primeiro nodo “GroupBy” (parte 1).	39
Figura 28 - Configurações do primeiro do nodo “GroupBy “(parte 2).....	39
Figura 29 - Primeiro modelo em KNIME (parte 3).....	40
Figura 30 - Configurações do segundo nodo “GroupBy”.....	41

Figura 31 - Configurações do nodo “Java Snippet”	42
Figura 32 - Código desenvolvido em Java	43
Figura 33 - Configurações do nodo “Joiner”	44
Figura 34 - Configurações do nodo “Column Rename”	45
Figura 35 - Configurações do nodo “Excel Writer (XLS)”	45
Figura 36 - Segundo modelo em KNIME (parte1).	48
Figura 37 - Segundo modelo em KNIME (parte 2).	49
Figura 38 - Gráfico da Curva ABC (Volume de descarregamentos).	53
Figura 39 - Logótipo da framework NEOS Server (Fonte: NEOS Server)	59
Figura 40 - Análise de Sensibilidade	62
Figura 41 - Resultados das configurações 1, 2, 3, 4, 5 e 6.	63
Figura 42 - Resultados das configurações 2, 7 e 10.	65
Figura 43 - Resultados das configurações 4, 8 e 11.	66
Figura 44 - Resultados das configurações 6, 9 e 12.	67
Figura 45 - Resultados das configurações 5 e 12.	68
Figura 46 - Ilustração de uma linha normal e uma linha com formato carrossel.	70
Figura 47 - Ilustração de linhas de diferentes capacidades.	70
Figura 48 - Script do modelo matemático desenvolvido em linguagem AMPL	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Variáveis do dataset dos descarregamentos.	31
Tabela 2 - Variáveis do dataset dos carregamentos.	32
Tabela 3 - Carregamentos e Descarregamentos da semana 2 (10 a 16 de novembro) de 20 referências aleatoriamente escolhidas.	47
Tabela 4 - Produtos ordenados em relação ao valor mensal de descarregamentos.....	51
Tabela 5 - Produtos ordenados em relação ao valor mensal de descarregamentos (Continuação).....	52
Tabela 6 - Valores das classes A, B e C.....	54
Tabela 7 - Diferentes configurações a ser testadas no modelo matemático.	60
Tabela 8 - Configurações a ser testadas no modelo matemático com diferentes capacidades nas linhas medium runner.	61
Tabela 9 - Resultados das configurações 1, 2, 3, 4, 5 e 6.	64
Tabela 10 - Classificação ABC (especificações de cada produto).....	78

1. INTRODUÇÃO

1.1. Contextualização

A logística desempenha um papel importante na evolução para uma Indústria 4.0. Por isso, essa evolução apenas poderá ser conseguida se os sistemas logísticos tiverem capacidade de disponibilizar, aos sistemas de produção, os materiais necessários no momento exato, com a qualidade ideal e no local devido. As soluções logísticas em vigor nem sempre acompanham o novo paradigma industrial, impulsionando a criação do gargalo nos sistemas de produção e, desta forma, todas as vantagens que se poderiam atingir através do conceito Indústria 4.0 acabam por ficar limitadas.

Uma das maiores dificuldades identificadas na indústria de componentes de automóveis prende-se com logística e armazenamento de peças e componentes, uma vez que se tem observado uma crescente personalização do automóvel por parte dos utilizadores finais. Esta dificuldade é mais acentuada com o componente para-choques.

Para o bom desempenho de uma empresa, é fundamental o correto desempenho dos armazéns nas suas variadas operações logísticas. Os armazéns podem constituir uma parte significativa dos custos logísticos (de Koster et al., 2007). Os custos são empregues normalmente para a preservação e manutenção dos produtos de diferentes fornecedores para, posteriormente, serem entregues aos diversos clientes, consolidando o fluxo de material ao longo da cadeia de abastecimento, e reduzindo o impacto da variabilidade da procura.

A presente dissertação surge no âmbito de um problema identificado numa empresa produtora de para-choques sendo necessário identificar uma solução para o mesmo no presente. Desenvolveu-se um sistema de armazenamento de alta densidade denominado por *Shopstocker*, o qual consiste numa solução logística para receção, segregação e acondicionamento de para-choques. O armazenamento de alta densidade apresenta diversas vantagens, tais como: automatização dos processos, redução da área do armazém, entre outras. No entanto, o sistema apresenta alguns problemas no que diz respeito aos artigos menos solicitados, como é o caso dos produtos customizados. O sistema de armazenamento de alta densidade armazena os produtos em linhas, onde estas apresentam apenas uma entrada e uma saída, implicando a deslocação de artigos para fora da linha quando são solicitados artigos que não se

encontram na saída da linha de armazenamento. Essas deslocações desnecessárias resultam numa perda de eficiência do armazém.

Desta forma, existem vários problemas a ser estudados no sistema logístico, sendo um deles o problema de afetação dos produtos. Após este enquadramento do tema, surge a seguinte pergunta de investigação: a atual política de afetação dos produtos do armazém é adequada ao serviço de abastecimento?

1.2. Objetivos

O principal objetivo da dissertação é aumentar a eficiência do armazém de para-choques, através de melhorias nas políticas de armazenamento, contribuindo-se, assim, para a promoção da competitividade da empresa. Espera-se, no final do projeto, que se consiga provar que política se apresenta mais eficaz e com potencial para otimizar os processos dentro do armazém da empresa.

Mais especificamente, para cumprir o objetivo principal, propõe-se os seguintes objetivos:

- Analisar e caracterizar a gestão de armazenamento da empresa;
- Perceber o comportamento da procura, de forma a estimar os produtos mais solicitados e menos solicitados;
- Definir política adequada para a localização dos diversos tipos de para-choques;
- Definir o *layout* do armazém, com a alocação mais adequada dos produtos nas linhas de armazenamento;
- Testar as diferentes soluções propostas, através da modelação matemática, de forma a melhorar os valores dos KPIs.

1.3. Metodologia

A realização da dissertação propõe uma caracterização rigorosa dos processos e atividades existentes no armazém. Considera-se, por isso, a natureza de investigação como descritiva. Quanto à filosofia de investigação, o projeto enquadra-se no realismo que se insere na epistemologia, dado que os temas em estudo subsistem independentemente da consciência da sua existência. Para além disso, a investigação foca-se na explicação de um fenómeno inserido num contexto. A dissertação segue uma abordagem dedutiva, sendo desenvolvida uma estruturação teórica em que, posteriormente, será testada com dados recolhidos. Para atingir os objetivos desejáveis segue-se uma metodologia investigação-ação, visto que a metodologia se adequa ao problema de investigação que se relaciona com a descrição e

condução de diversas ações durante um período de tempo, seguindo uma espiral ascendente desde o diagnóstico, passando para o planeamento, seguida de uma ação, finalizando com a validação. São recolhidos dados históricos da empresa. Quanto ao horizonte temporal da investigação, este é transversal, uma vez que a procura das componentes em estudo é avaliada dentro de um período definido. Desta forma, o estudo apresenta-se localizado no tempo.

1.4. Estrutura do relatório

A estrutura desta dissertação engloba, no seu total, seis capítulos, cada um abordando diferentes temáticas.

No primeiro capítulo é realizado o enquadramento do tema, objetivos, metodologia aplicada e a estrutura da dissertação.

No segundo capítulo é exposta a revisão bibliográfica abordando o tema da Indústria 4.0 e suas implicações na logística, em particular na gestão do armazenamento. Para além disso, são descritos conceitos inerentes ao armazém e à sua gestão, nomeadamente políticas e modelos de gestão de armazenamento.

No terceiro capítulo descreve-se e caracteriza-se o armazém desenvolvido, o seu funcionamento, as políticas nele em vigor, e ainda os KPIs utilizados para avaliar a performance do armazém.

No quarto capítulo faz-se uma análise do método de classificação da empresa e a abordagem de um novo método. Para isso, são utilizados e previamente transformados os *datasets* de descarregamentos e carregamentos realizados no armazém, facilitando as análises e recomendação de uma nova metodologia de classificação.

No quinto capítulo é desenvolvido o modelo de programação linear inteira mista. O modelo matemático retrata o funcionamento do *picking* no sistema logístico em estudo. São testadas diferentes configurações do armazém tendo por base a nova política abordada no quarto capítulo. São representados e analisados os resultados do modelo desenvolvido. Realiza-se também a recapitulação das melhores soluções para aplicação.

No sexto capítulo expõem-se as conclusões e perspetivas de trabalhos futuros a realizar sobre o trabalho desenvolvido.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A seguinte revisão bibliográfica arranca com uma abordagem holística dos conceitos de customização em massa e Indústria 4.0. Aborda-se também a influência do conceito Indústria 4.0 numa cadeia de abastecimento. Posteriormente, de forma mais aprofundada e relacionada com a problemática em análise, descrevem-se os conceitos sobre o armazém e processos de armazenagem. Por fim, abordam-se os modelos de programação linear inteira mista, sendo um dos conceitos fundamentais para a abordagem do problema.

2.1. Customização em Massa

A customização em massa consiste no desenvolvimento, produção, marketing e distribuição de bens e serviços a um preço acessível, com uma variedade e customização tão elevada que permite que qualquer utilizador encontre o produto ou serviço que procura (Pine, 1993).

As empresas que se especializam com sucesso na customização em massa encontram uma forma integrada para fazer face aos vários desafios que aparecem, tais como o entendimento do que o consumidor procura, a gestão da cadeia de abastecimento, as mudanças nos processos de negócios, entre outros (Hlström & Westbrook, 1999). De acordo com Piller & Tseng (2009), isto leva a uma aquisição de competências num conjunto de três requisitos, os quais guiam um negócio de customização em massa de forma a tornar-se sustentável. Desta forma, as empresas devem olhar para esse conjunto de requisitos que podem suplementar e enriquecer o sistema em questão, sendo eles fábricas, armazéns, entre outros. Assim sendo, os três requisitos são:

- Desenvolvimento do espaço de solução: torna-se importante para uma empresa estudar as necessidades particulares dos seus clientes, contrastando com a ideologia do produtor em massa, no qual as prioridades se concentram nas “tendências centrais” entre as necessidades do cliente, direcionando-as para a produção de uma quantidade limitada de produtos padrão. Para além disso, é objetivo da empresa, que procura fazer a customização em massa, identificar que atributos do produto divergem mais nas escolhas do consumidor. Assim que se definam esses atributos, a organização apresenta a capacidade de designar o que irá ou não irá oferecer, definindo assim o espaço de solução.

- *Design* de um processo robusto: a performance da cadeia de valor é de importância elementar para a empresa. Desta forma, é importante que aumento da variabilidade das necessidades do consumidor não afete a cadeia de abastecimento (Pine, 1993). Esse objetivo é possível através de um *design* robusto da cadeia de valor, ou seja, reutilizar ou combinar os recursos organizacionais da cadeia para atender às diferentes necessidades dos consumidores.
- Escolha de navegação: a empresa deve ser capaz de auxiliar os seus clientes na identificação e possível solução para os seus problemas, minimizando a complexidade relativa à subcarga de opções de escolha. Quando se apresenta um elevado número de opções a um indivíduo, o custo associado à avaliação das opções pode superar a vantagem de ter um número tão elevado de escolhas disponível. Desta forma, oferecer mais opções de produtos pode facilmente levar os clientes a adiar ou suspender as suas decisões de compra e, desta forma, levar a que o cliente considere o fornecedor de difícil entendimento, promovendo o afastamento do mesmo.

Os desafios mencionados exigem que a empresa seja inteligente e eficiente, de forma a aumentar a sua eficácia operacional. Nesse cenário, a sobrevivência da empresa, no novo modelo de negócio, exige uma capacidade de reação eficiente e confiável às possíveis mudanças do produto, com o uso intensivo de automação nos processos, sistemas de computação e *softwares*. Essas são algumas das características relacionadas ao conceito de Indústria 4.0, um conceito que se está a tornar muito popular entre as organizações, especialmente pelas suas implicações para a sustentabilidade de uma organização.

2.2. Indústria 4.0

A Indústria 4.0, também conhecida como "quarta revolução industrial", surgiu em 2011 através de um projeto do governo alemão, que tinha como objetivo a promoção de uma manufatura computadorizada (Govindan et al., 2018). O conceito consiste na integração da eletrónica com as tecnologias de informação com o objetivo de se obter um elevado nível de automatização na produção, promover a adaptação automática da cadeia de abastecimento (Hermann et al., 2016).

Com a automatização da produção, surge o conceito de "fábrica inteligente". Este conceito é a chave para o sucesso das empresas na satisfação dos requisitos particulares dos consumidores (Brettel et al., 2014). Numa "fábrica inteligente", o papel do ser humano é bastante limitado (Tang & Veelenurf, 2019). Assim, no que concerne aos operadores, é expectável a sua redução, devido à crescente

automatização dos processos, assim como o aumento da exigência das suas tarefas e a sua contribuição na tomada de decisão. Para além disso, no que diz respeito às alterações a nível de equipamentos, é expectável uma crescente automatização, com a criação de *robots*, devendo estes trabalhar em conjunto com os restantes colaboradores (Stock & Seliger, 2016).

Por outro lado, o conceito “fábrica inteligente” foca-se na extração e processamento automáticos de dados sobre processos e máquinas de produção (Tang & Veelenturf, 2019). A fusão entre o mundo físico e o virtual é alcançada recorrendo aos sistemas *Cyber-physical systems* (CPS). Os CPS estabelecem integração de processos físicos e de computação que são componentes essenciais das implementações da Indústria 4.0, mencionado anteriormente. A característica importante desses sistemas é responder a qualquer *feedback* gerado, permitindo o controlo instantâneo e a verificação dos feedbacks do processo, afim de gerar resultados esperados (Hermann et al., 2016).

De acordo com Gorecky et al. (2014), a preparação de um ambiente de fabrico inteligente e informatizado garante flexibilidade e alta eficiência de produção, integração de diferentes atividades e comunicação efetiva tanto entre um cliente e um produtor, como entre o produtor e os fornecedores.

Além disso, o conceito de Indústria 4.0 assenta na interligação de informação entre clientes, colaboradores e fornecedores durante todo o ciclo de vida de um produto. Este ciclo de vida compreende o tempo de aquisição da matéria-prima, a fase de desenvolvimento, a fase de produção, a fase de serviço e a fase do fim-de-vida, que compreende as etapas de reutilização, reciclagem e recuperação (Stock & Seliger, 2016). Segundo Schwab (2017), a quarta revolução industrial é bastante diferente das restantes, visto que esta promove a comunicação e conexão entre milhões de dispositivos. Isto só é possível através da tecnologia *internet of things* (IoT). O conceito IoT consiste numa conexão de dispositivos físicos, veículos, edifícios e outros itens, permitindo a esses objetos recolher e trocar dados entre si.

Todos os processos digitais e trocas por plataformas e dispositivos produzem dados, sendo transmitidos por sistemas, sensores e dispositivos móveis. Um grande volume de dados chega de várias fontes a uma velocidade e variedade alarmantes. Para extrair significado dos dados, é necessário um poder de processamento ideal, recursos de análise e ainda capacidade para a gestão de informação (Hazen et al., 2014). Surge assim o conceito *Big Data* que envolve, essencialmente, um conjunto de dados de grande volume que sistemas tradicionais não são capazes de proceder ao processamento desses dados (Provost & Fawcett, 2015).

O grande volume de dados em tempo real, juntamente com as tecnologias emergentes supramencionadas, são os principais fatores de transformação dos processos de fabrico, serviços ao

longo da cadeia de abastecimento, e ainda mudarão a interação do homem com as máquinas (Tang & Veelenturf, 2019).

2.3. Implicações da Indústria 4.0 na gestão da cadeia de abastecimento

A gestão da cadeia de abastecimento propõe uma forma de integrar organizações ao longo de uma cadeia de abastecimento, coordenando o fluxo de artigos, de informação e de ativos financeiros, para que seja possível responder à procura do consumidor final, tendo presente o objetivo de aumentar a competitividade da cadeia de abastecimento como um todo (Stadtler, 2005).

Apesar dos processos logísticos serem responsáveis por levar o produto exato a determinado cliente, numa determinada hora, ainda existem organizações que tendem a desvalorizá-los. Essas empresas consideram-os como um custo a ser gerido, ignorando o facto da logística ser muitas vezes responsável pelo sucesso de uma organização (Tang & Veelenturf, 2019). Por outro lado, de acordo com Muppani (Muppant) & Adil (2008), o aumento da competitividade nas indústrias tem levado as empresas a surtir uma maior preocupação com a gestão eficiente das suas cadeias de abastecimento, já que esta se tem demonstrado fundamental para assegurar vantagens competitivas e melhorar o seu desempenho.

A procura por produtos e serviços customizados continua a aumentar e, por isso, é necessário haver uma adaptação num clima de mudança. Fruto de uma maior complexidade, as práticas comuns de planeamento e controle deixaram de ser eficazes.

Hofmann & Rüsç (2017) mostra um modelo simples da Indústria 4.0, orientado para a logística. O modelo divide-se em duas dimensões:

- Dimensão física da cadeia de abastecimento: consiste em subsistemas de logística autónomos e autocontrolados, como transporte, movimentação de vendas ou processamento de pedidos, interagindo entre si;
- Dimensão digital da cadeia de valor: os dados das máquinas e dos sensores são extraídos das estruturas de toda a cadeia de abastecimento de ponta a ponta. Por meio de uma camada de conectividade, os dados extraídos são fornecidos para qualquer tipo de análise, presumivelmente resultando em possíveis serviços comerciais de valor agregado.

O conceito de Logística 4.0 tem como base o uso dos CPS que monitorizam e controlam os processos físicos da cadeia. Os CPS usam a tecnologia *Radio-Frequency IDentification* (RFID) para identificar, detetar e localizar determinado item e enviar para um computador toda a informação que conseguem

extrair, analisando desta apenas a informação relevante. Os CPS possuem a capacidade de comunicar com outros sistemas ou com seres humanos utilizando a Internet como meio de comunicação. Dessa forma, é possível a partilha de dados em tempo real, permitindo que os processos possam ser coordenados (Hermann et al., 2016).

Com a evolução da gestão da cadeia de abastecimento despoletada pela quarta revolução industrial, Hofmann & Rüsç (2017) referem que é esperada a aquisição de três componentes que acrescentem valor para o cliente:

- valor da disponibilidade: consiste na disponibilização dos produtos ao consumidor através de distribuição autónoma;
- valor da integração digital: o valor é criado através de uma transparência e rastreabilidade permeáveis ao longo da cadeia de abastecimento. Além disso, os sistemas de processamento de pedidos estão interconectados, facilitando a execução de negócios sem interrupções;
- valor do serviço digital: valor criado através da existência de várias opções de serviços baseados em tecnologias de informação que vão além da simples distribuição de produtos ou serviços físicos.

2.4. Armazém

Numa cadeia de abastecimento, o armazém possui um papel fundamental. Desta forma, a gestão adequada dos armazéns tem uma elevada relevância para que uma empresa apresente um bom desempenho (Gu et al., 2010). Com as mudanças do ambiente económico, estas estruturas são essenciais para que se possa obter vantagem competitiva. O armazém atua como um intermediário entre fornecedores que estão a montante da cadeia e os clientes que ficam a jusante (Pang & Chan, 2017). O armazém permite absorver o fluxo de produtos ao longo da cadeia de abastecimento, reduzindo problemas fruto da variabilidade da procura. No entanto, os custos da manutenção deste estabelecimento constituem uma grande parte dos custos logísticos (Gu et al., 2010).

As implicações do paradigma Indústria 4.0 na logística trazem bastantes mudanças para a gestão dos armazéns. Uma integração das diferentes partes da cadeia garante uma total coordenação e alinhamento das mesmas. Portanto, todos os componentes da cadeia devem comunicar e interagir com a disponibilização de dados em tempo real, para que os processos, neste caso, do armazém sejam otimizados (Barreto et al., 2017).

2.4.1. Atividades fundamentais no Armazém

Existem quatro atividades fundamentais num armazém que são: recepção, armazenagem, *picking* e expedição (Berg & Zijm, 1999). A recepção consiste na descarga dos produtos, respetiva verificação da quantidade e qualidade, e por fim a sua preparação para se proceder ao transporte até ao local onde será armazenado, sendo agregado ao produto o rótulo. A armazenagem consiste na alocação dos produtos nos espaços disponíveis para o armazenamento, transporte interno do artigo e a sua arrumação. O *picking* envolve o processo de obtenção da quantidade exata dos produtos para determinada encomenda do cliente. Por fim, o processo de expedição consiste na verificação dos produtos, conceção da documentação e carregamento para distribuição.

2.4.2. Unidades de armazenagem

Atualmente a base que é universalmente reconhecida para suportar as cargas unitárias é a palete. A palete é uma plataforma portátil para montagem dos produtos, tendo como finalidade a criação de uma unidade de carga para manuseamento e armazenagem de mercadorias. A estrutura básica apresenta uma cobertura instalada acima dos seus suportes, cuja altura é reduzida para o mínimo possível. As paletes podem ser manuseadas por porta-paletes manuais ou por empilhadoras. Existem dois tipos de paletes: paletes de entrada dupla e paletes de entrada quadrupla (Drury et al., 2003).

2.4.3. Sistemas de armazenagem

De acordo com Carvalho et al. (2010), existem diversos sistemas armazenagem, entre os quais:

- *Rack* Convencional: armazenagem de produtos em paletes. Geralmente, o sistema apresenta uma grande variedade de referências. O acesso é direto e unitário a todas as referências.



Figura 1 - Sistema de armazenamento do tipo rack convencional (Fonte:Lusoracks).

- Rack Drive-In e Rack Drive-Through: armazenagem de produtos em paletes. As referências têm rotação baixa, e existem em grande quantidade. Normalmente, o sistema admite um número de referências idêntico ao número de corredores de carga que existam. O sistema permite a máxima utilização do espaço disponível tanto na superfície como em altura, pois não existem corredores entre eles;
 - *Drive-In*: apenas existe um corredor de acesso à mercadoria;
 - *Drive-Through*: existem dois acessos à carga, um de cada lado da estante;



Figura 2 - Sistema de armazenamento do tipo drive-in (Fonte:Lusoracks).

- Rack Cantilever: sistema ideal para cargas de grande volume e dimensão, com formas difíceis de armazenar;



Figura 3 - Sistema de armazenamento do tipo rack cantilever (Fonte:Nortemonta).

- Rack Gravitacional: as estantes são constituídas por roletas, com ligeira inclinação, permitindo que as paletes deslizem por ação da gravidade, a uma velocidade controlável, até ao lado oposto.



Figura 4 - Sistema de armazenamento do tipo rack gravitacional (Fonte:Nortemonta).

Existem ainda sistemas de armazenamentos automatizados. Os sistemas de armazenagem automáticos, AS/RS, do termo em inglês, *Automated Storage and Retrieval System*, caracterizam-se por equipamentos computadorizados que depositam e fornecem mercadorias nos armazéns de forma automática reduzindo ao máximo a intervenção humana. Os AS/RS têm vindo a ser cada vez mais utilizados desde a década de 50, apresentando como vantagens a redução dos custos de mão de obra, a redução do espaço físico necessário, maior confiabilidade e taxas de erro bastante reduzidas. Por outro lado, os AS/RS requerem maiores investimentos na sua conceção e em sistemas de controlo, e também apresentam uma menor flexibilidade (Roodbergen & Vis, 2009). Alguns sistemas existentes segundo Carvalho et al. (2010) são:

- Carrosséis verticais e horizontais: sistema composto por várias prateleiras que rodam, no sentido vertical ou horizontal dependendo do tipo, entregando os itens solicitados num ponto de acesso. O sistema armazenagem em carrosséis adequa-se mais a produtos mais pequenos;



Figura 5 - Sistema de armazenagem em carrossel vertical (Fonte:VRC).

- Autoportantes: a sua estrutura de armazenagem (cobertura e revestimento) constitui a estrutura de suporte de um edifício compacto. Possui uma grande capacidade de armazenagem. O sistema utiliza transelevadores para a armazenagem automática das paletes, podendo ocorrer até trinta metros de altura. Estes transelevadores são sistemas automáticos, que funcionam através de um sistema informático e, por isso, não necessita de operadores de armazém, podendo suportar até duas paletes, deslocando-se a uma velocidade de cinco metros por segundo na translação e um metro por segundo na elevação.



Figura 6 - Sistema de armazenagem do tipo autoportante (Fonte:Nortemonta).

- *Pallet Shuttle*: o sistema é semelhante aos sistemas *rack drive-in* e *rack drive-through*, no entanto, o armazenamento feito em profundidade é feito por um carro elétrico. Também existem sistemas de armazenamento com elevadores que levam a mercadoria ao nível necessário, sendo posteriormente armazenado em profundidade.

2.4.4. Tipos de armazém de acordo com o seu inventário

Os itens armazenados podem ter diversas funções e, por isso, de acordo com a função que os produtos desempenham, os armazéns podem ser classificados por diversos tipos. Frazelle (2002) identifica os seguintes armazéns de acordo com o tipo de inventário:

- Armazém de matérias primas e componentes: abrange todos os armazéns que armazenam inventário classificado como matéria prima ou componentes base de processos de montagem;
- Armazém de produtos em processo de fabrico: no processo de fabrico ou processo de montagem por vezes implica armazenar produtos que já foram parcialmente processados, mas ainda não são produtos acabados. Estes armazéns abastecem uma linha de produção em vários locais, dependendo das necessidades dessa linha;
- Armazém de produtos acabados: contém produtos acabados resultantes do processo de fabrico que ainda não foram distribuídos para os clientes. Estes armazéns geralmente localizam-se perto das fábricas e caracterizam-se por receber e despachar grandes lotes de produção.

Frazelle (2002) refere que existem também armazéns caracterizados pela sua função e pela sua localização, sendo eles:

- Centro de distribuição: instalações que recebem produtos acabados dos centros de produção de uma ou várias empresas para serem separados, agrupados e distribuídos aos clientes;
- Pequenos centros de distribuição: instalações que recebem e despacham pequenas encomendas para clientes específicos;
- Armazém local: instalação localizada perto dos clientes, tendo o objetivo de minimizar os tempos e custos de transporte aos clientes e, para além disso, dando uma resposta rápida às necessidades dos clientes. Normalmente o *picking* é feito em produtos individuais e o mesmo artigo pode ser enviado ao clientes dia-a-dia;
- Armazém de valor agregado: instalação que armazena produtos que necessitam de requisitos especiais, tais como embalagens diferentes, ser etiquetados, preços especiais ou encontram-se em processo de retorno;

2.4.5. Estratégias de movimentação de inventário

Com o objetivo de controlar a entrada e saída dos produtos do inventário, surgem as estratégias de movimentação de inventário. A escolha da metodologia mais adequada está relacionada ao tipo de produto a ser controlado ou ao tipo de apuração do valor investido no inventário. As metodologias existentes são:

- FIFO: a sigla provém do termo em inglês *“first-in-first-out”*, o que significa que o primeiro produto de uma certa categoria a chegar será o primeiro produto a sair. Desta forma, no final do período os produtos que constam em inventário são os que foram armazenados mais recentemente (Alamri & Syntetos, 2018);
- LIFO: a sigla vem do termo em inglês *“last-in-first-out”*, o que significa que o produto mais recente de determinada categoria é o primeiro a sair do armazém. No final do período, os produtos em inventário serão produtos mais antigos que ainda não foram recolhidos (Alamri & Syntetos, 2018);
- FEFO: a sigla vem do termo em inglês *“first-expired-first-out”*, o que significa que se enviará produtos apenas dependendo do potencial de validade. Só são enviadas mercadorias quando a data de validade do produto é conhecida, garantindo assim que apenas produtos de alta qualidade cheguem ao cliente e eliminando a perda de produtos durante o transporte (Hertog et al., 2014);
- LEFO: a sigla vem do termo em inglês *“last-expired-first-out”*, o que significa que se enviará produtos com maior potencial de validade. (Leithner & Fikar, 2019).

2.5. Problema de designação de locais de armazenagem

Uma questão frequente na gestão de armazéns é a atribuição de local para armazenamento. De acordo com Berg (1999), o problema de atribuição de local para armazenamento (*Storage Location Assignment Problem - SLAP*) estabelece como e onde estes devem ser colocados dentro do armazém. O SLAP propõe a alocação de produtos no armazém e otimização dos custos de manutenção do material ou otimização na utilização do espaço de armazenamento. O problema de alocação de produtos depende de diversos parâmetros, sendo eles o *design* da área de armazenamento, a disponibilidade de espaço de armazenamento, a capacidade de armazenamento do armazém, as características físicas dos produtos, os horários de chegada e o comportamento da procura. As abordagens principais de otimização consistem na utilização do espaço do armazém e ao tempo de ciclo para as operações de

preparação e separação de pedidos, tendo em conta restrições tais como a capacidade de armazenamento disponível, políticas de despacho e capacidade de recursos para separação de pedidos (Gu et al., 2007). O SLAP é assim um dos problemas mais importantes relacionados com o armazém, podendo aumentar significativamente a eficiência do armazém, reduzir tempos de *picking*, distâncias, custos operacionais, entre outros fatores (de Koster et al., 2007).

O problema de atribuição de locais para armazenamento (SLAP) sob a perspectiva da informação da chegada e saída dos produtos no armazém, pode ser dividido em três vertentes, sendo elas informação do item, informação do produto ou nenhuma informação. A vertente informação do item pressupõe a existência da informação completa do tempo de chegada e saída de cada item e, desta forma, dois itens podem ocupar o mesmo espaço de armazenamento, com tempos diferentes. A vertente informação do produto pressupõe que a informação do produto é conhecida sobre os itens a serem armazenados, como por exemplo, taxa de utilização, peso, tamanho; um item é atribuído a uma classe de produtos tendo por base as suas características. Por fim, a última vertente consiste numa ausência de informação sobre as características dos itens que chegam ao armazém, permitindo apenas aplicações de políticas de armazenamento simples, como é o caso do armazenamento aleatório (Gu et al., 2007).

No processo de alocação existem políticas a cumprir. Estas consistem num conjunto de regras fundamentais para alocar os produtos no sítio correto. As políticas de atribuição de armazenamento têm como objetivo proporcionar meios para uma eficiente atribuição de itens em um armazém. Com a sua contribuição espera-se uma redução do tempo médio de viagem para o armazenamento e a separação de pedidos, distribuição uniforme das atividades dos subsistemas de armazém, redução do congestionamento nos corredores, bem como uma melhor organização das atividades, possibilitando uma elevada capacidade de processamento (Berg & Zijm, 1999; Pang & Chan, 2017).

As políticas de armazenamento vão depender da natureza das características do armazém. Existem três categorias, sendo elas armazenagem aleatória, com localização fixa ou baseada em classes (Chan & Chan, 2011; Hausman, 1976). Uma outra política de armazenagem em vigor é a política de armazenagem baseada na família dos produtos, em que se dispõem os artigos encomendados em conjunto em sítios próximos (de Koster et al., 2007).

2.5.1. Política de armazenagem aleatória

A política de armazenagem aleatória propõe uma alocação dos artigos de maneira aleatória nos espaços disponíveis de armazenagem, tendo esses espaços a mesma probabilidade de serem selecionados.

A política apresenta a vantagem de fazer uma utilização extensa do espaço, devido ao facto dos espaços serem preenchidos à medida que os produtos vão chegando. No entanto, existe a desvantagem de ser necessário uma maior distância de *picking*, uma vez que referências iguais poderão encontrar-se em vários sítios do armazém (de Koster et al., 2007).

2.5.2. Política de armazenagem fixa

A política de localização fixa atribui cada artigo a uma localização própria fixa. A armazenagem com localização fixa permite aos responsáveis de *picking* uma maior familiarização com os espaços dos produtos (de Koster et al., 2007) e consegue, da mesma maneira, alocar os produtos com procura mais elevada perto do local de cargas e descargas (Gu et al., 2007).

A política apresenta desvantagem em relação a uma baixa utilização do espaço, dado que as localizações estão reservadas a determinado produto mesmo quando este não se encontra no armazém (de Koster et al., 2007).

2.5.3. Política de armazenagem baseada em classes

A política baseada em classes aloca os artigos por classes previamente definidas, reservando um espaço dentro da área de armazenagem a cada uma das classes (Berg & Zijm, 1999). Nos espaços destinados a cada classe, os produtos são armazenados de forma aleatória. Esta política permite que os produtos com uma procura mais elevada sejam alocados em zonas mais próximas do cais de carga e descarga, reduzindo o tempo médio de *picking* e, em simultâneo, usufrui-se da flexibilidade e da grande utilização do espaço da política aleatória (Chan & Chan, 2011). Para a implementação da política, é necessário definir a quantidade de classes, atribuir os artigos a cada classe, e ainda atribuir a localização para cada classe.

Regra de Pareto

Uma maneira de definir as classes é recorrer à análise ABC, de acordo com a regra de Pareto (Pang & Chan, 2017). Os produtos são diferenciados pelas suas classes tendo em conta a procura dos artigos. A classe A corresponde aos artigos mais solicitados, representando, habitualmente, 20% dos produtos que correspondem a 80% do total da procura. A classe B representa os artigos com procura intermédia, representando 30% dos artigos que representam 15% da procura total. A classe C

corresponde aos artigos menos solicitados correspondendo aos restantes 50% dos artigos com uma percentagem de procura total de 5%.

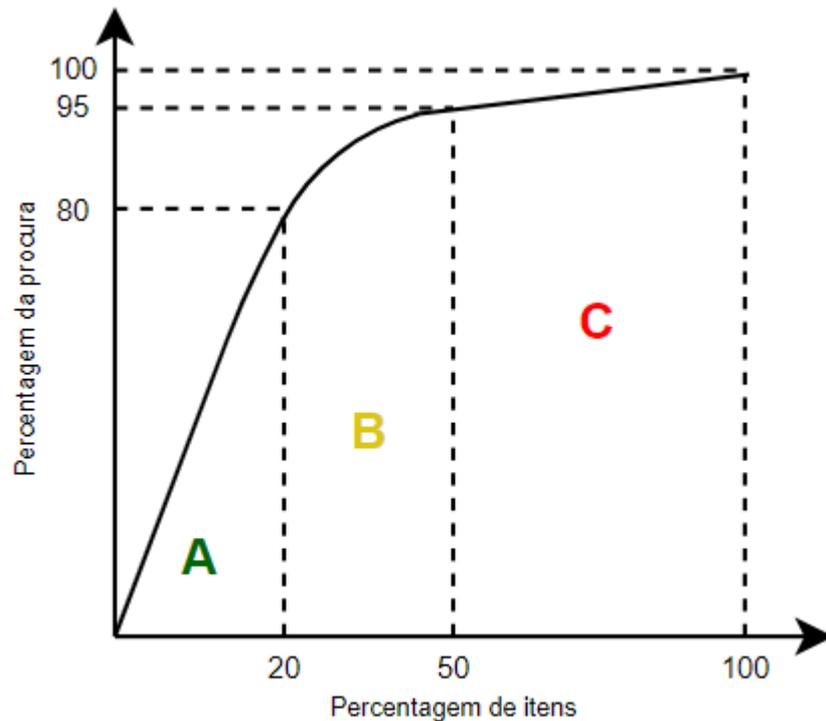


Figura 7 - Curva ABC.

A classificação ABC também permite definir clientes e fornecedores, podendo ser classificados por meio das receitas geradas por eles. Assim, dependendo da classificação do cliente, este pode ser priorizado no tempo de entrega da encomenda e disponibilidade de produtos. O mesmo será possível para fornecedores, em que os mais significativos poderiam ser priorizados em programas de parceria e integração da cadeia de abastecimento.

A aplicação da abordagem ABC trata, de forma simultânea, os problemas de classificação e localização dos produtos no armazém, uma vez que os itens com melhor classificação (classe A) serão armazenados perto do ponto entrada/saída (entrada e saída do armazém) e os piores classificados serão direcionados para locais mais distantes do ponto de entrada/saída.

Independentemente dos critérios tidos em conta, a finalidade do método ABC continua sempre o mesmo, maximizar os recursos e minimizar os custos. Utilizar a análise de Pareto é economizar tempo e ganhar em recursos (Wild, 2002).

Índice cúbico por pedido

Uma outra abordagem é o índice cúbico por pedido. O método é definido como a relação da capacidade média do espaço necessária pelo produto para ser armazenado e o número médio de solicitações. A adoção deste método requer um uso mais intensivo de informação, uma vez que os dados do item e do armazenamento devem ser processados antes para que seja possível classificar o item e atribuí-lo, posteriormente, a uma localização. Atualmente, com a disponibilidade de sistemas que processam grandes quantidades de dados a um baixo custo, o requisito supramencionado apresenta-se pouco significativo, principalmente se as melhorias significativas da eficiência do *picking* resultantes da adoção de políticas avançadas de atribuição de local de armazenamento forem levadas em consideração. No entanto, este método exige uma constante revisão das localizações dos itens, de forma a manter o armazenamento estritamente baseado na proporção do espaço necessário e na frequência de solicitações do artigo, que num ambiente dinâmico está sempre em mudança (Caron et al., 1998).

2.5.3.1. Configurações no armazenamento

Chan & Chan (2011) apresentam duas configurações para armazenamento baseando-se na classificação ABC: armazenamento horizontal e armazenamento vertical.

Armazenamento horizontal baseado na classificação ABC

De acordo com Chan & Chan (2011), o armazenamento horizontal baseado no método ABC é comum ser utilizado em armazéns cujas *racks* apresentam um único nível. Os itens de classe A, que apresentam um movimento mais rápido, são atribuídos a lugares mais perto do local de expedição de forma a reduzir a distância percorrida como se observa na Figura 8.

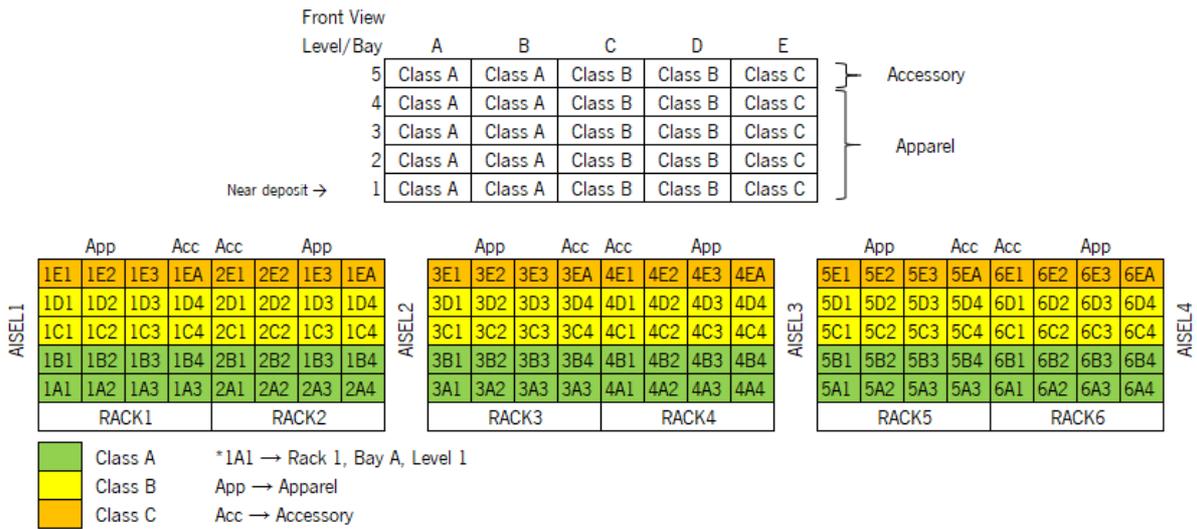


Figura 8 - Layout do armazenamento horizontal [Adaptado: Chan & Chan (2011)].

Armazenamento vertical baseado na classificação ABC

No armazenamento vertical baseado na classificação ABC, a classe A é armazenada nos níveis mais baixos das *racks*. A probabilidade dos responsáveis pelo *picking* escolherem os produtos armazenados num nível mais elevado das *racks* é reduzida. Considera-se este armazenamento mais adequado em armazéns com *racks* multinível (Chan & Chan, 2011). Na Figura 9 apresenta-se ilustrado o armazenamento vertical baseado na regra de Pareto.

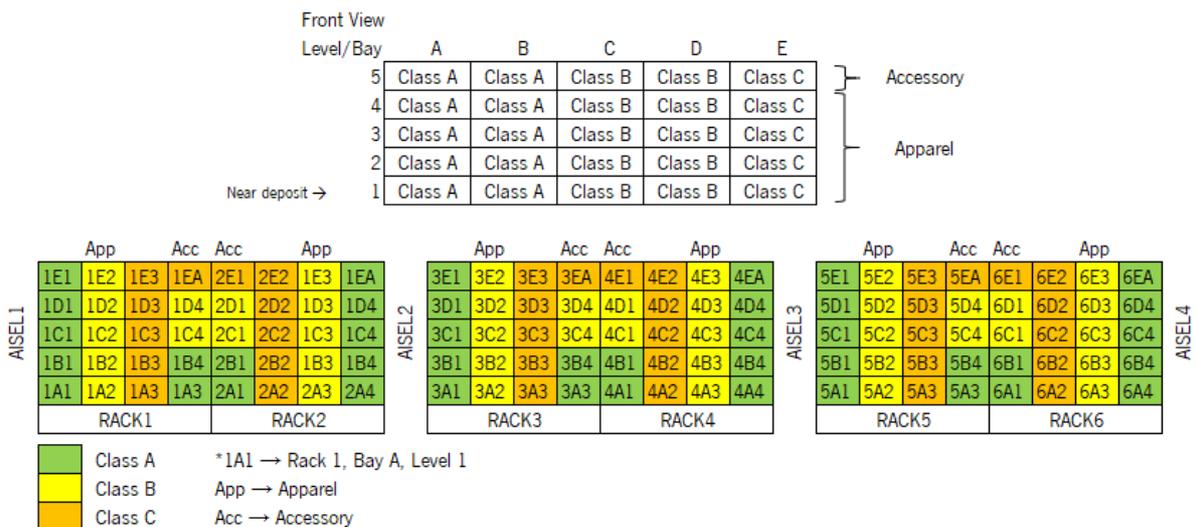


Figura 9 - Layout do armazenamento vertical [Adaptado: Chan & Chan (2011)].

2.6. Avaliação da armazenagem

Existem diversos indicadores para avaliar a performance de um armazém e do layout implementado, podendo variar consoantes os objetivos e competências da empresa. Geralmente os indicadores principais de avaliação são a gestão do espaço e a gestão de tempo (Ackerman & Bodegraven, 2007).

Uma organização ou projeto geralmente apresentam objetivos ou metas a serem cumpridos, objetivos esses representados pelos indicadores de performance (KPI – *key performance indicator*). No caso dos armazéns, os KPIs avaliam os fatores importantes para avaliar as suas principais funções operativas, sendo elas a armazenagem, a distribuição e o serviço ao cliente. Os KPIs abarcam categorias como custos, tempos, eficiência do trabalho dos equipamentos e operadores, qualidade e flexibilidade do sistema, entre outros (Li & Meissner, 2010).

2.7. Modelação matemática

De acordo com Sarker (2008), o *layout* de uma instalação é considerado uma importante questão de planeamento e *design* para várias organizações. A modelação matemática atraiu o interesse de muitos pesquisadores, os quais desenvolveram modelos de problemas relacionados com plantas industriais, estabelecimentos de retalho, armazéns, centros comerciais, entre outros. Cada modelo possui diferenças e semelhanças entre si, mas as peculiaridades de cada problema fornecem a base para as centenas de investigações. Alguns estudos existentes são:

- Manavalan & Jayakrishna (2019), em que determinaram o *layout* ideal de um armazém. O cenário de modelação foi projetado para refletir as práticas de armazenamento, enfatizando tempos de ciclo de separação de pedidos curtos e controlo operacional integrado;
- Georgiadis et al (1999), que apresentaram um modelo matemático para abordar o problema de alocação de equipamentos num determinado espaço bidimensional ou tridimensional. O problema foi formulado como um modelo de programação linear inteira mista (MILP), onde foram levados em consideração equipamentos de vários tamanhos e formas. A função objetivo do modelo consistia na minimização do custo total de transporte, conexão, construção de terrenos e pisos;
- Potts & Whitehead (2001) abordam problemas combinados de planeamento e *layout* de máquinas num sistema de manufatura flexível usando a modelação matemática como abordagem. No modelo contruído para um conjunto conhecido de produtos, o objetivo principal

era maximizar o rendimento e o objetivo secundário era minimizar o movimento do trabalho entre as máquinas.

3. APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA

A empresa Pinto Brasil desenvolveu, para uma empresa produtora de para-choques, um sistema de armazenamento de alta densidade denominado por *Shopstocker*. O conceito de armazenamento de alta densidade baseia-se na ideia de condensar os itens armazenados num espaço reduzido. Ao longo do tempo procuraram encontrar formas de aumentar a densidade de armazenamento para fazer uma utilização mais eficiente do espaço disponível para armazenamento (Foroughi et al., 2020). Os primeiros sistemas a surgir foram os sistemas com *racks* de dupla-profundidade. Nesses sistemas uma determinada paleta é colocada atrás de outra. Posteriormente ao aparecimento dos sistemas de *racks* de dupla profundidade, o nível de profundidade e densidade foi aumentando constantemente, possibilitando que os armazéns acumulassem mais paletes por unidade de área (Gue, 2006). Atualmente existem diversos sistemas de armazenamento em profundidade tais como os sistemas *Pallet Shuttle*, *Rack Drive-In* e *Rack Drive-Through* mencionados na secção 2.4.3.

O *Shopstocker* apresenta-se como uma solução logística que possibilita uma melhor organização com consequente ganho temporal nas atividades de receção, segregação e acondicionamento dos artigos. O sistema permite a colocação, manutenção, preparação e controlo da entrada de artigos de forma automática, de forma correta e eficaz.



Figura 10 - Shopstocker desenvolvido pela empresa Pinto Brasil (Fonte: Pinto Brasil).

3.1. História e caracterização do produto

Os primeiros para-choques foram instalados em 1897 pela fabricante Nesselsdorfer Wagenbarr-Fabriksgesellschaft, exclusivamente com finalidade estética.

Entre as décadas de 1930 e 1960, os fabricantes de automóveis começaram a explorar o potencial estético dos para-choques, optando por enfatizar sua presença e personalizar a sua forma, transformando-os em componentes-chave, trazendo ao veículo uma certa personalidade. Começaram a ser introduzidos para-choques grandes, pesados e lustrosos, revestidos com cromo que se tornaram a característica de identificação das marcas americanas.

Os primeiros para-choques de plástico foram instalados pela General Motors no modelo Pontiac GTO desde 1968. Inicialmente, os para-choques apresentavam cor preta como única cor disponível. Os fabricantes de automóveis tiveram de começar a optar por utilizar novos materiais mais leves, seguros e flexíveis. E assim, o metal cromado desapareceu devido ao seu peso e custos, e o plástico começou a aumentar a sua importância.

Na década de oitenta, passou a ter um *design* generalizado e a sua forma começou a ter em conta as exigências aerodinâmicas. Atualmente, os para-choques diferenciam-se principalmente pela sua cor e forma, deixando de ser um trabalho único de um *designer*, mas sim uma extensão do veículo (Knauf Industries, 2020).

3.2. *Layout* do armazém

O armazém desenvolvido para a empresa produtora de para-choques é um armazém de alta densidade que contém dois pisos. Os dois pisos funcionam de forma idêntica. O sistema apresenta um total de 86 linhas de armazenamento. Na Figura 11 está representado o mapeamento do primeiro piso.

O para-choques é colocado no suporte de armazenamento por um operário na área 63 assinalada na Figura 11. Existem duas áreas disponíveis para inserir os produtos. Os para-choques podem ser inseridos num dos postos, seguindo o caminho que se apresenta destacado a vermelho. No ponto laranja os para-choques colocados em áreas diferentes passam a ser movimentados na mesma linha de transporte. Os para-choques, quando colocados no suporte de armazenamento, apresentam tecnologia RFID, a qual permite uma correta deslocação para as linhas que armazenam para-choques semelhantes ao transportado. No final do trajeto destacado com cor vermelha os produtos são inseridos em linhas de armazenamento. O armazém apresenta diversas linhas de armazenamento que estão destinadas para diferentes modelos de para-choques. As linhas de armazenamento são linhas gravíticas e, por esse motivo, quando os produtos são inseridos na linha de armazenamento deslocam-se o mais próximo da zona de saída por ação da gravidade.

Quando solicitado, o para-choques movimenta-se numa linha de transporte seguindo o trajeto destacado a azul. O para-choques solicitado pode seguir por uma de três saídas, sendo que na saída do meio, denominada como *fast lane*, apenas saem para-choques solicitados com urgência.

No caso de ser solicitado um para-choques que se apresenta numa linha que armazena mais que um tipo de produto, por vezes este não se apresenta na saída da linha, levando à deslocação de um número indeterminado de para-choques para permitir a saída da linha do para-choques desejado. Os para-choques movimentados em consequência dessa solicitação fazem a deslocação destacada a verde. Estes são novamente afetados a uma linha de armazenamento. Dependendo da linha onde o para-choques foi movimentado, a zona de retrocesso, destacada com um ponto verde, pode ser diferente.

Como referido inicialmente, o armazém tem dois pisos. Para fazer ligação ao piso inferior, o único que apresenta as saídas do armazém e a área de colocação dos para-choques no sistema, existem elevadores para estabelecer a ligação dos dois pisos. Observando a Figura 11, no canto superior esquerdo, o retângulo colorido com cor castanha rodeia os elevadores que levam os para-choques do piso superior para o piso de inferior, geralmente, para que o para-choques siga para a linha de transporte que leva o produto à saída do armazém. Já na parte inferior da Figura 11, o retângulo colorido também a castanho contorna os elevadores que farão a ligação dos para-choques provenientes do piso inferior para o piso superior para estes serem armazenados. A restante dinâmica do piso superior é semelhante ao explicado anteriormente.

3.3. Movimentação

O produto é colocado no suporte de armazenamento, sendo que o suporte acondiciona apenas uma unidade do produto. Para o armazenamento dos diferentes para-choques existem quatro diferentes suportes que, dependendo das características do produto, serão adequados aos diversos para-choques existentes no armazém.

No que concerne à forma como se movimentam os suportes, este é feito por dispositivos semelhantes a escovas que estão acopladas nas linhas de transporte. As escovas são movidas a 300 mm/seg. No entanto, a velocidade de deslocação das escovas pode não coincidir com a deslocação dos próprios para-choques, uma vez que as escovas vão “varrer” os suportes.

A Figura 12 representa um esquema do funcionamento do *Shopstocker*. O objeto 1 consiste na escova, e o objeto 2 representa o suporte onde se coloca o para-choques.

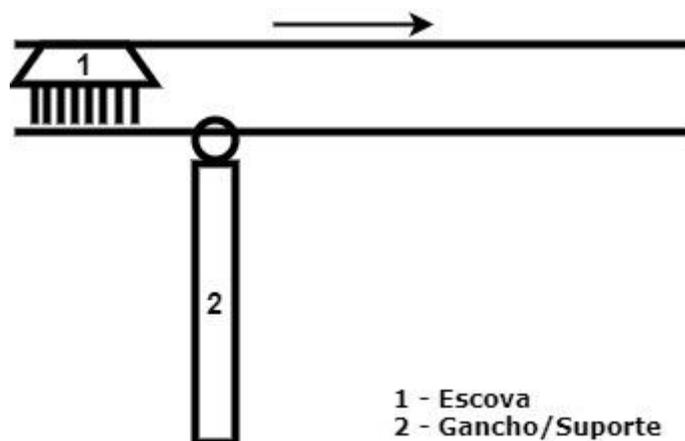


Figura 12 - Movimentação do produto no shopstocker (parte 1).

Como se pode verificar pelos esquemas da Figura 13 e da Figura 14, a escova faz uma “varredura” ao suporte, fazendo com que este se mova.

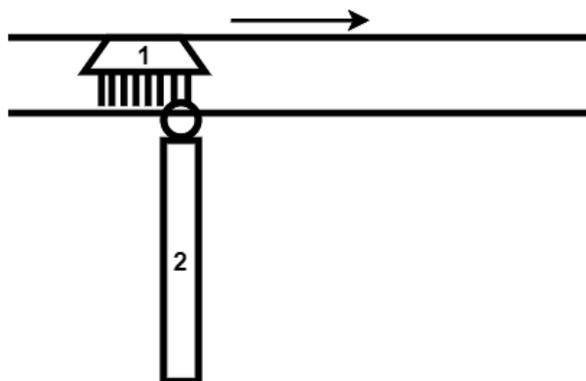


Figura 13 - Movimentação do produto no shopstocker (parte 2).

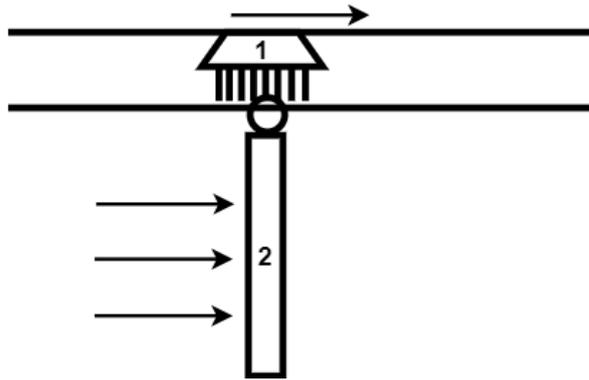


Figura 14 - Movimentação do produto no shopstocker (parte3).

É o movimento das escovas que impulsiona o movimento do suporte. O suporte pode movimentar-se a uma indeterminada distância com a escova, no entanto, este acaba por se libertar da escova a um certo ponto da deslocação exemplificado pelo esquema da Figura 15. Quando libertado, a velocidade a que o suporte se desloca diminui até que chegue a próxima escova. Desta forma, pode-se concluir que o suporte mantém movimento sempre a uma velocidade igual ou inferior à das escovas, sendo que esta velocidade não será constante.

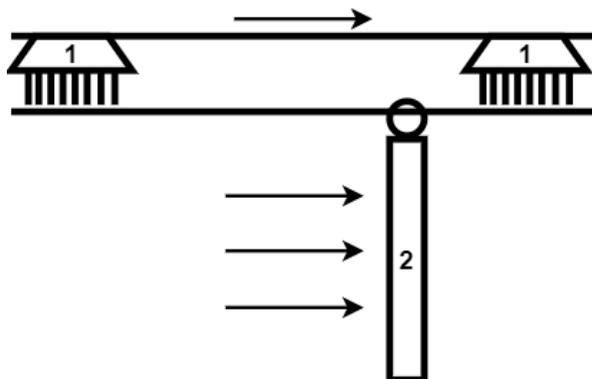


Figura 15 - Movimentação do produto no shopstocker (parte 4).

3.4. Armazenamento no *Shopstocker*

O armazém de alta densidade geralmente apresenta inventário capaz de suportar três dias de descarregamentos. Por isso, caso não haja reposição de stock, o armazém pode operar normalmente cerca de três dias até começar a apresentar ruturas de stock. O armazém funciona de segunda a sexta, laborando oito horas por dia.

No que concerne aos pedidos de clientes, estes são disponibilizados cerca duas horas antes do descarregamento começar. O descarregamento geralmente apresenta uma quantidade de cem produtos. Os para-choques requeridos devem seguir uma determinada ordem previamente estabelecida no pedido do cliente.

No processo de alocação dos produtos é aplicada uma política de armazenamento baseada em classes. Existem três classes de produtos, com as denominações *high runner*, *medium runner* e *low runner*. As classes apresentam características diferentes relativamente à alocação dos artigos nas linhas de armazenamento.

Os produtos classificados como *high runners* têm uma alta rotatividade, ou seja, apresentam uma maior procura. Por apresentar uma maior procura, cada tipo de produto com a classificação *high runner* é armazenado individualmente numa linha de armazenamento. Na Figura 16 apresenta-se o esquema de afetação dos produtos *high runners* nas linhas de armazenamento.

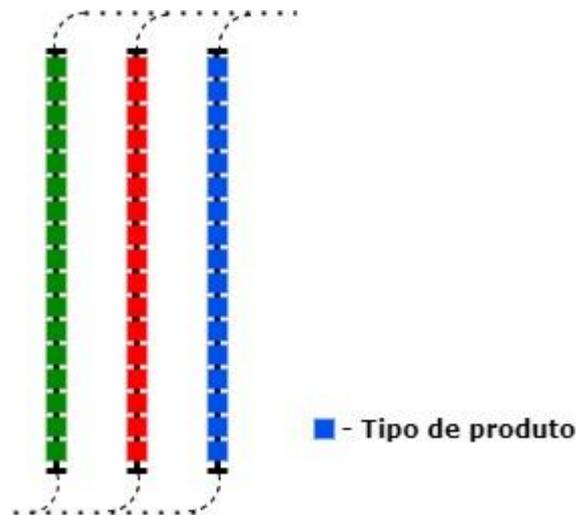


Figura 16 - Afetação de produtos *high runners*.

A classe denominada por *medium runner* é a classe intermédia. As linhas que armazenam *medium runners* podem ter entre três a cinco tipos de para-choques diferentes. Dentro das linhas de armazenamento a disposição dos diferentes produtos é aleatória. Na Figura 17 apresenta-se o esquema de afetação dos produtos *medium runners* nas linhas de armazenamento.

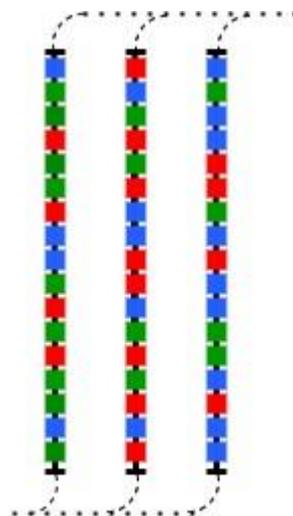


Figura 17 - Afetação de produtos *medium runners*.

Os produtos considerados *low runners* apresentam o nível de procura mais baixo. No que respeita ao armazenamento, estes produtos são intercalados com diversos produtos da mesma classe. Tendo em conta que cada linha tem capacidade para vinte e cinco itens, no máximo as linhas que armazenam produtos da classe *low runner* podem armazenar até vinte e cinco tipos de para-choques diferentes. Na Figura 18 apresenta-se o esquema de afetação dos produtos *low runners* nas linhas de armazenamento.

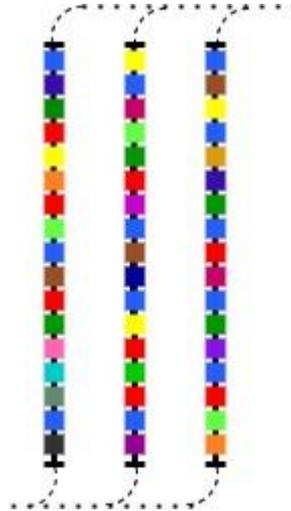


Figura 18 - Afetação de produtos *low runners*.

Cada linha de armazenamento apresenta uma única entrada e uma única saída. A afetação nas linhas onde estão os produtos classificados como *high runners* não gera problemas na performance do armazém porque a linha é exclusiva do produto. Quando é solicitado determinado produto, sai sempre o item mais próximo da saída da linha de armazenamento, pois todas as unidades de produto contêm a mesma referência.

É nas linhas onde são armazenados mais do que um tipo de produto que surgem os problemas do sistema, como é o caso das linhas que armazenam produtos das classes *low runner* e *medium runner*. Nestas linhas são armazenados diversos produtos de diferentes tipos. Quando solicitado um desses para-choques, existe uma grande probabilidade de o produto selecionado não estar no primeiro lugar de saída na linha de armazenamento. Nesse caso, todos os itens que se encontram à frente do artigo pretendido terão de ser removidos da linha de armazenamento para que o produto solicitado possa ser expedido. Este fenómeno apresenta impactos nos KPIs aplicados no armazém.

3.5. KPIs

Os KPIs devem ser capazes de indicar onde estão os principais problemas operacionais, devem monitorizar o desempenho dos processos atuais e direcioná-lo para os objetivos estratégicos da organização. Atualmente a empresa produtora de para-choques utiliza os seguintes indicadores:

- *Takt time*: tempo que o para-choques deve ser descarregado, baseado no tempo de operação do armazém e na procura de mercado. Por exemplo, se o armazém opera nove horas por dia (540 minutos) e a procura de mercado é de 180 unidades por dia, o *takt time* é de três minutos. O *takt time* estabelecido na empresa produtora de para-choques é de oitenta segundos. A deslocação de para-choques para fora da linha culmina num aumento do tempo que o produto solicitado necessita até chegar à zona de saída, podendo impactar com o cumprimento do indicador *takt time*. O aumento do tempo está relacionado com o tempo que cada para-choques necessita para ser extraído da linha de armazenamento. O tempo de extração de cada para-choques é de oito segundos;
- FIFO: A unidade de *stock* mais antiga de um determinado produto deve ser sempre a primeira a ser descarregada do armazém. Caso esse requisito não seja satisfeito passa a existir incumprimento do FIFO. A deslocação de para-choques a mais movimenta diversos produtos que são as unidades mais antigas de um determinado modelo de para-choques. Os produtos ao serem deslocados têm de voltar a ser reconfigurados nas linhas de armazenamento, o que faz com que não possam ser mais selecionados para o descarregamento que se apresenta a ser efetuado naquele momento. Quando solicitado um produto cuja unidade de produto mais antiga não se apresenta disponível, uma outra unidade tem de ser selecionada para fazer face à procura do cliente. A seleção de outra unidade de produto resulta num incumprimento do FIFO e, conseqüentemente, numa degradação da performance do armazém;
- Para-choques movimentados: quantidade de para-choques deslocados para fora da linha de armazenamento em consequência da solicitação de um determinado produto. Quanto maior o número deste indicador maior a degradação no desempenho do armazém.

4. ANÁLISE DAS POLÍTICAS DE ARMAZENAMENTO

No presente capítulo é feita uma análise da política atual aplicada pela empresa de para-choques. Posteriormente, é sugerida uma nova política para colmatar potenciais ineficiências da atual política de armazenamento. Para ambas as fases são necessários dados, fornecidos pela empresa, que necessitam de tratamento prévio para que possam ser analisados posteriormente.

4.1. *Datasets* disponibilizados pela empresa

Para esta etapa do processo, foi necessária a requisição de dados à empresa produtora de para-choques, tendo esta fornecido dois *datasets* relativos aos carregamentos e descarregamentos de para-choques feitos no armazém.

O *dataset* referente aos descarregamentos apresenta 32642 registos e sete variáveis.

Na Tabela 1 estão representadas as variáveis presentes no *dataset* dos descarregamentos e sua respetiva descrição.

Tabela 1 - Variáveis do dataset dos descarregamentos.

Variável	Descrição
Hook	Identificador do tipo de suporte que sustenta o para-choques.
Unload Timestamp	Data e tempo em que o para-choques solicitado chegou ao local de expedição.
Part Number	Identificador único do para-choques.
Output	Local por onde o para-choques saiu.
VIN	Referência do suporte que sustenta o para-choques.
Sequency	Posição na sequência de pedidos.
Reference	Referência do tipo de para-choques.
Empty Hook	Informa se o suporte chegou à saída vazio quando foi solicitado o produto.

O *dataset* referente aos carregamentos apresenta 32759 registos e seis variáveis.

Na Tabela 2 estão representadas as variáveis presentes no *dataset* dos carregamentos e sua respetiva descrição.

Tabela 2 - Variáveis do dataset dos carregamentos.

Variável	Descrição
Hook	Identificador do tipo de suporte que sustenta o para-choques.
Load Timestamp	Data e tempo em que o para-choques foi carregado no armazém.
Part Number	Identificador único do para-choques.
VIN	Referência do suporte que sustenta o para-choques.
Sequency	Posição na sequência de pedidos.
Reference	Referência do tipo de para-choques.
Empty Hook	Informa se o suporte, enviado para determinada linha, chegou à linha vazio..

Após a identificação das variáveis dos *datasets* fornecidos pela empresa, segue-se a fase responsável pelo tratamento dos dados. Para o tratamento dos dados são construídos modelos através da plataforma KNIME. Esta fase é crucial para que seja possível analisar a classificação dos produtos segundo o método da empresa e, posteriormente, sugerir um novo método que se considerar mais adequado.



Figura 19 - Logótipo da plataforma KNIME.

O KNIME é uma plataforma grátis de análise, geração de relatórios e integração de dados que integra vários componentes para *machine learning* e *data mining* por meio do seu conceito de *pipelining* de dados modular. O programa apresenta interface gráfica com o usuário e utiliza JDBC (Java *Database Connectivity*), que é uma API do Java que gere a conexão com uma base de dados, emitindo consultas e comandos e manipulando conjuntos de resultados obtidos da base de dados. A interface gráfica e da utilização do JDBC permite a montagem de nodos combinando diferentes fontes de dados, incluindo pré-processamento (ETL: Extração, Transformação, Carregamento) para modelação, análise e visualização de dados sem ou com programação mínima (KNIME, 2020).

4.2. Política de armazenamento da empresa

. A política da empresa é uma política de armazenamento baseada em classes. O método estabelecido pela empresa consiste numa classificação dos produtos com base nos dados dos carregamentos e descarregamentos dos para-choques. A empresa analisa semanalmente o comportamento dos dados da semana anterior. A análise semanal é feita sobre os carregamentos e descarregamentos discriminados por dias da semana.

Os dados concedidos necessitam de serem transformados para que seja possível fazer uma análise da política atual da empresa. O objetivo da transformação será a criação de um documento com a discriminação por dia dos carregamentos e descarregamentos de cada para-choques.

4.2.1. Tratamento dos dados

Para a transformação dos dados serão utilizados os dois *datasets* disponibilizados. Os *datasets*, sujeitos à transformação dos dados, apresentam semelhanças no seu estado e conteúdo. A transformação dos dados foi idêntica para os dois *datasets*.

Na Figura 20 apresenta-se a primeira parte do modelo para transformação de dados desenvolvido na plataforma KNIME.

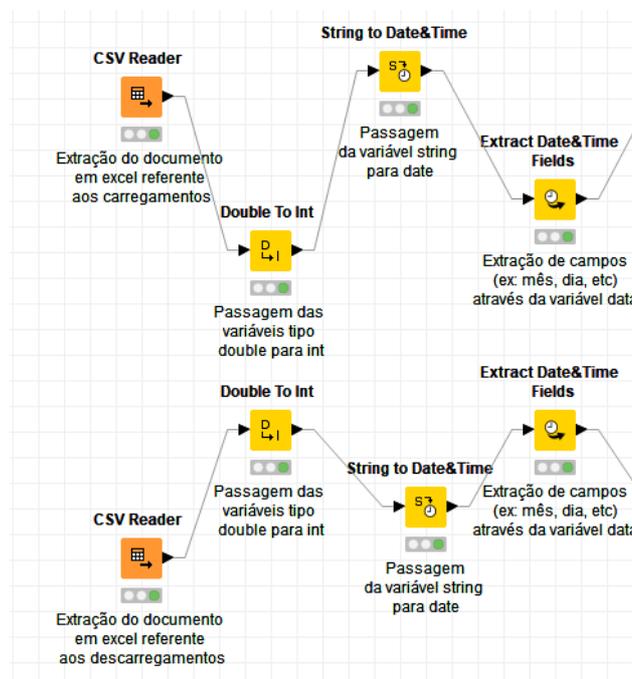


Figura 20 - Primeiro modelo em Knime (parte 1).

O primeiro passo consiste na extração dos *datasets* para a plataforma. Os documentos apresentam-se em formato CSV e, por isso, utilizou-se o nodo “CSV Reader” para fazer a extração dos *datasets*.

Quando extraídos os ficheiros, a plataforma considera o tipo de dados da variável Reference como *double*, ou seja, é considerada como variável numérica que pode conter casas decimais. Sendo os valores neste caso identificadores do tipo de para-choques, procede-se à alteração da variável, utilizando o nodo “Double to Int”, para converter os valores da variável em números inteiros.

A Figura 21 mostra as configurações do nodo “Double to Int”.

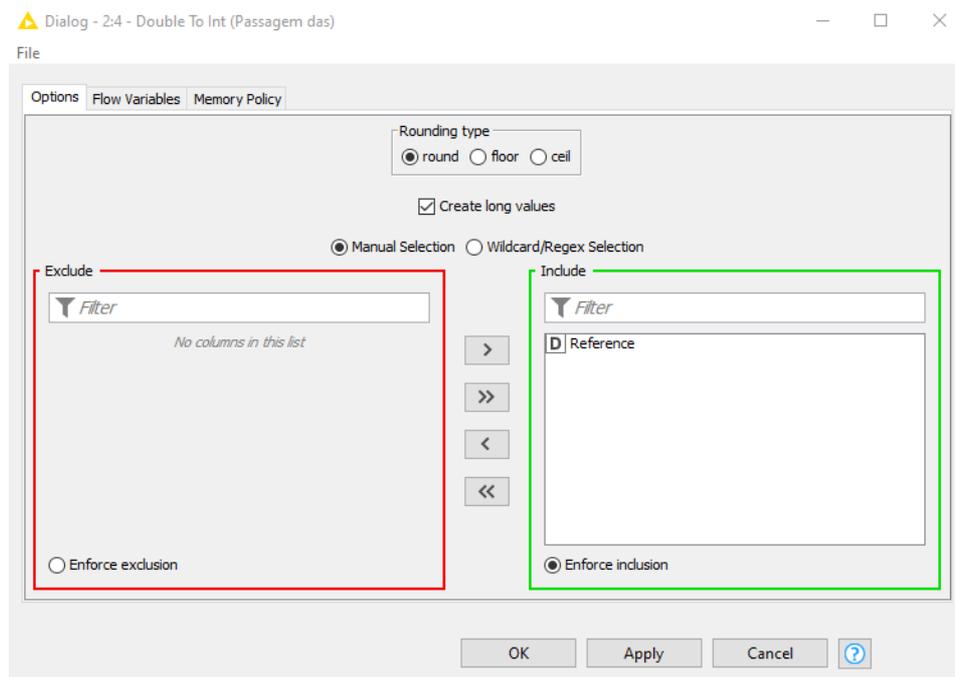


Figura 21 - Configurações do nodo “Double to Int”.

No caso dos dados referente aos descarregamentos, a variável Reference é a única variável identificada do tipo *double*, sendo que o KNIME automaticamente a inclui para a transformação.

Posteriormente, para que possam ser extraídos das variáveis Unload Timestamp (*dataset* descarregamentos) e Load Timestamp (*dataset* carregamentos) os campos considerados relevantes para o modelo, existe a necessidade de converter previamente as duas variáveis, originalmente definidas como *string*; para o tipo *date&time*. Para esse efeito utiliza-se o nodo “String to Date & Time”.

Na Figura 22 estão representadas as configurações do nodo “String to Date & Time”.

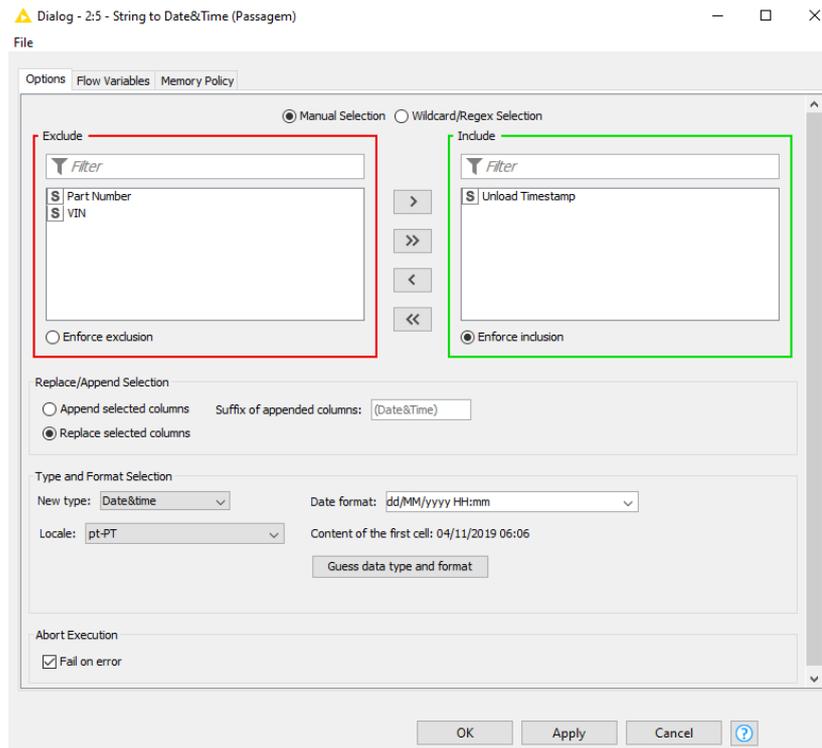


Figura 22 - Configurações do nodo “String to Date&Time”.

Como se pode depreender pela Figura 22, para o *dataset* dos descarregamentos, o nodo “String to Date & Time” identificou no *dataset* dos descarregamentos três variáveis do tipo *string*, as variáveis Part Number, VIN e Unload Timestamp. Da informação obtida, torna-se apenas relevante a transformação das variáveis Unload Time Stamp (para o *dataset* dos descarregamentos) e Load Time Stamp (para o *dataset* dos carregamentos). Posto isto, as variáveis tipo *string* que não interessam transformar para o tipo *date&time* são excluídas da transformação realizada pelo nodo “String to Date & Time”. No separador “Options” foi definido o *time stamp* com o tipo *date&time* e o formato da data foi estabelecido como *yyyy-MM-ddHH:mm*.

O nodo que se aplica de seguida é o nodo “Extract Data File”. O nodo “Extract Data File” é utilizado para extrair das variáveis Unload Timestamp e Load Timestamp campos como mês, dia do mês, semana, entre outros, transformando esses campos em novas variáveis.

A Figura 23 demonstra as configurações do nodo “Extract Data&Time Fields”.

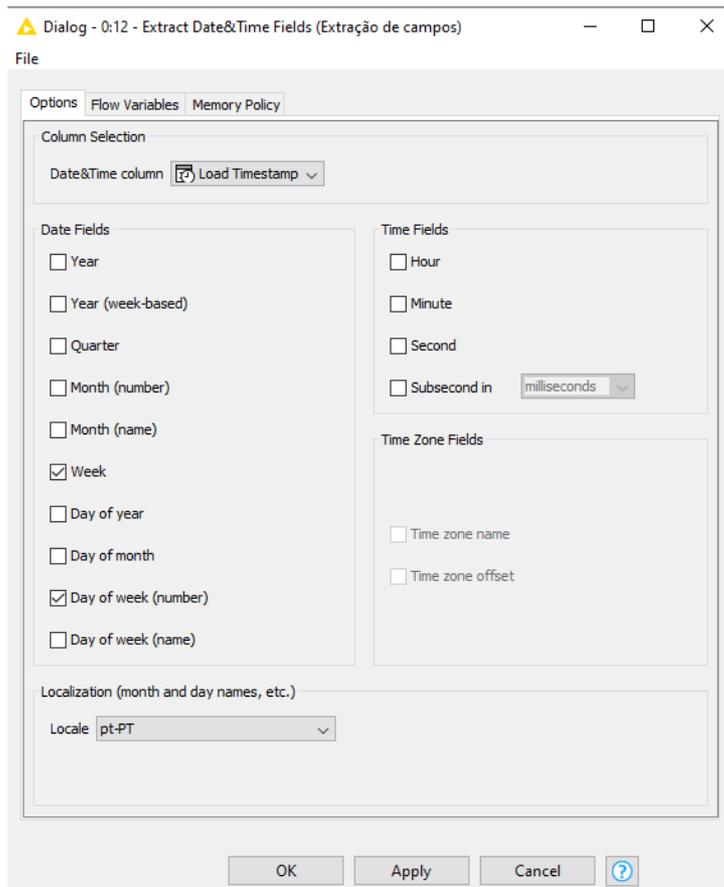


Figura 23 - Configurações do nodo “Extract Date&Time Fields”.

O objetivo principal desta preparação dos dados consiste em discriminar os carregamentos e descarregamentos de cada para-choques por dia. Desta forma, no separador “Options”, seleciona-se os campos número do dia da semana e a semana. A aplicação do nodo “Extract Data&Time Fields”, cria automaticamente duas colunas (variáveis), uma com o dia da semana descarregamento e/ou carregamento, e outra com a semana do mesmo do descarregamento e/ou carregamento. As novas variáveis têm os nomes Week e Day of Week em ambos *datasets*.

A Figura 24 ilustra a segunda parte do modelo em KNIME.

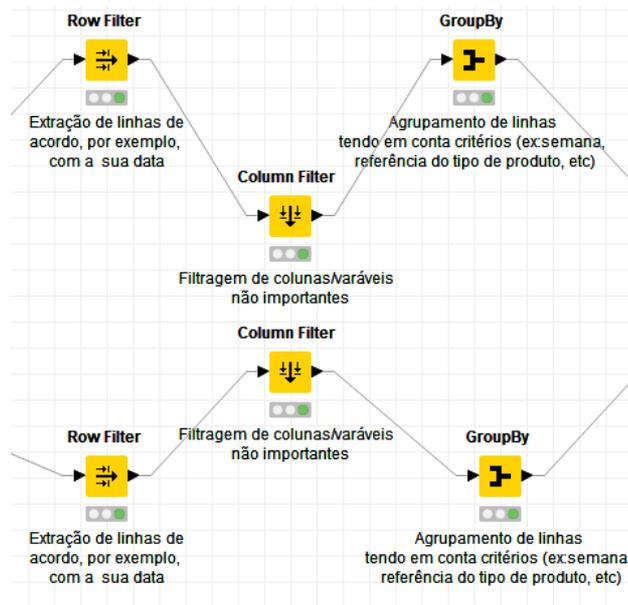


Figura 24 - Primeiro modelo em KNIME (parte 2).

Os nodos presentes na Figura 24 são os nodos “Row Filter”, “Column Filter” e “GroupBy”.

O nodo “Row Filter” tem como propósito filtrar linhas de dados que não tenham utilidade para uma análise.

A Figura 25 representa as configurações presentes no nodo “Row Filter”.

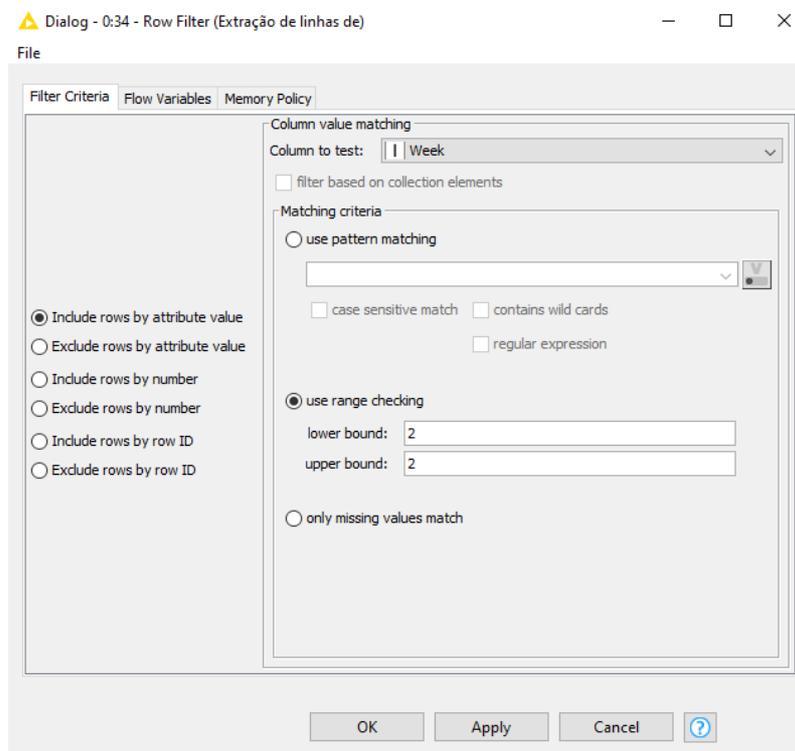


Figura 25 - Configurações do nodo “Row Filter”.

Nas configurações do nodo “Row Filter”, no separador “Filter Criteria”, seleciona-se a variável Week como critério de filtragem. Apenas é feita análise de uma semana. Escolheu-se a semana dois, correspondente ao período compreendido entre 10 de novembro de 2019 e 16 de novembro de 2019 (domingo a sábado). Para o critério de correspondência seleciona-se a opção “use range cheking”. Como apenas se pretender ficar com as linhas da semana dois, tanto o limite inferior como o limite superior terão o valor de dois. Correndo o nodo o “Row Filter”, todas as linhas de dados que não apresentem o número dois na variável Week são filtradas.

Algumas variáveis dos *datasets* não são necessárias para analisar. Consequentemente, existe a necessidade de filtrar as colunas com essas variáveis. Para a filtragem das variáveis considerou-se a utilização do nodo “Column Filter”

Na Figura 26 estão evidenciadas as configurações do nodo “Column Filter”.

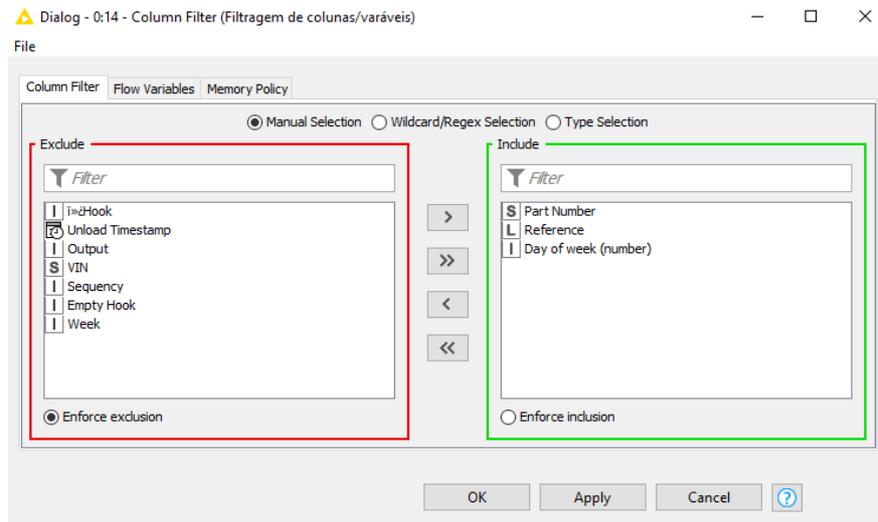


Figura 26 - Configurações do nodo “Column Filter”.

No nodo “Column Filter”, no separador “Column Filter”, por defeito todas as variáveis estão na caixa com a denominação “Include”. Manualmente são transferidas na caixa com a denominação “Exclude” as variáveis a filtrar. Assim, procede-se à filtragem das colunas Unload Timestamp, Hook, Part Number, Output, VIN, Sequency, Empty Hook e Week, visível na Figura 26. Nos dados referentes aos carregamentos filtram-se as colunas Load Timestamp, Hook, Part Number, Empty Hook, Week.

O passo seguinte passa por agrupar linhas de dados de acordo com um ou mais critérios. Para isso, utiliza-se o nodo “GroupBy”. O “GroupBy” agrega linhas de dados, fazendo o seu agrupamento de acordo com determinado critério.

A Figura 27 representa as configurações do nodo “GroupBy”.

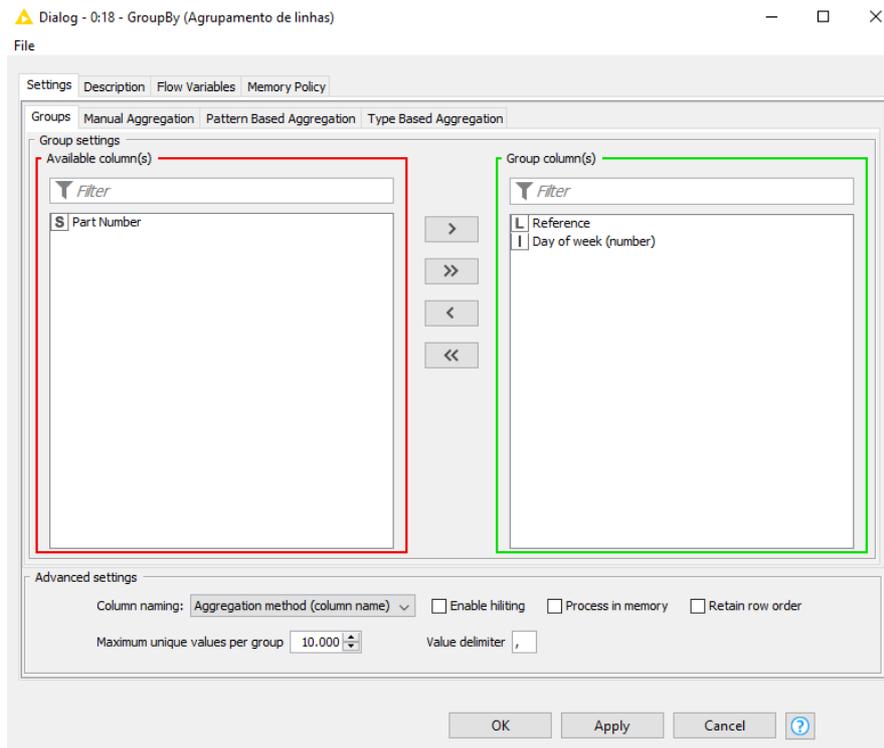


Figura 27 - Configurações do primeiro nodo "GroupBy" (parte 1).

Anteriormente, foi referida a necessidade de discriminar os carregamentos e descarregamentos por dia de um determinado para-choques. Por isso, no separador "Groups" (Settings > Groups) do nodo "GroupBy" são agrupadas as linhas tendo em conta como critérios a referência (variável Reference) e o dia da semana variável (Day of week (Number)).

Ainda no nodo "GroupBy" é necessário fazer outro passo. Para isso, é necessário passar do separador "Groups" para a separador "Manual Aggregation" (Settings > Manual Aggregation),

Na Figura 28 estão representadas as configurações do nodo "GroupBy" no separador "Manual Aggregation".

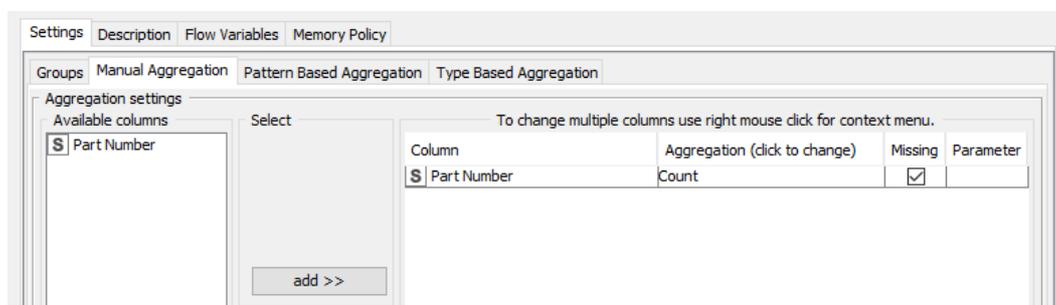


Figura 28 - Configurações do primeiro do nodo "GroupBy" (parte 2).

No separador "Manual Aggregation" é necessário seleccionar uma variável para fazer a contagem de linhas agrupadas com a mesma referência e com o mesmo dia de descarregamento e/ou carregamento. Este passo é importante para que o nodo "GroupBy" se realize com sucesso. Este

processo cria uma coluna com o nome Count (Part Number), em que os valores desta variável são quantidades de cada tipo de para-choques que foram carregados e/ou descarregados num determinado dia.

Por fim, apresenta-se a terceira e última parte do primeiro modelo em KNIME desenvolvido na Figura 29.

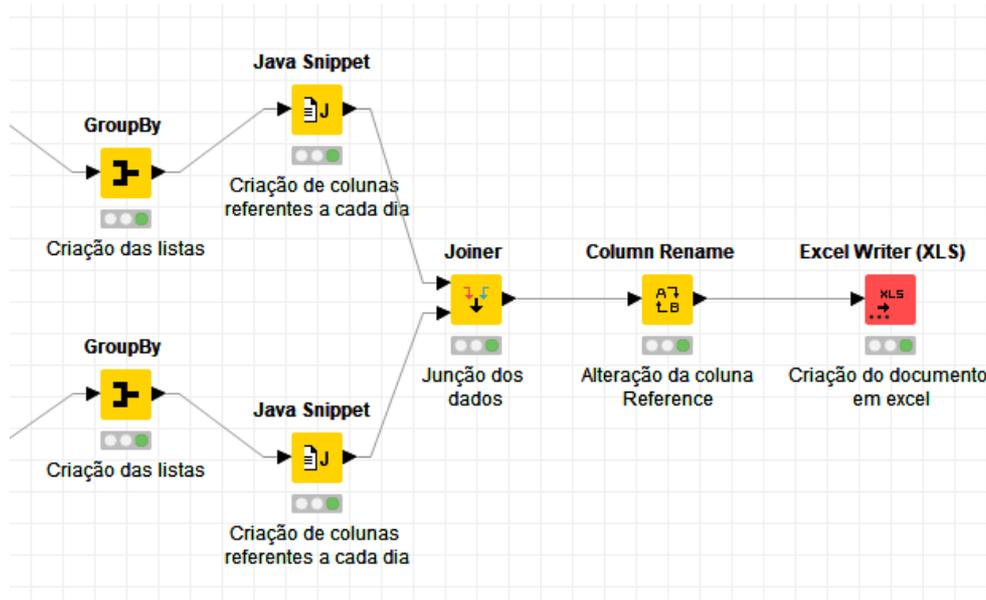


Figura 29 - Primeiro modelo em KNIME (parte 3).

Para além do “GroupBy” utilizado anteriormente, é necessária a implementação de um segundo nodo “GroupBy”. Na última parte do modelo em KNIME são também utilizados os nodos “Java Snippet”, “Column Rename”, “Joiner” e “Excel Writer (XLS)”.

A aplicação do segundo nodo “GroupBy” representa um passo intermédio necessário para o nodo seguinte, o “Java Snippet”. No primeiro nodo “GroupBy” os dados foram agrupados por referência e dia da semana. Estão criadas as primeiras condições para perceber a quantidade de para-choques descarregados (*dataset* descarregamentos) e carregados (*dataset* carregamentos), de uma determinada referência para cada dia da semana. A implementação do segundo nodo “GroupBy” vem criar para cada referência duas listas. Uma lista é referente à quantidade de para-choques descarregados (*dataset* descarregamentos) e carregados (*dataset* carregamentos) e a outra lista é referente aos dias da semana em que os para-choques dessa mesma referência são descarregados e/ou carregados. As listas são estruturas de dados abstratas que contêm um conjunto ordenado de valores, onde o mesmo valor pode ocorrer mais de uma vez.

A Figura 30 ilustra as configurações do segundo nodo “GroupBy” utilizado.

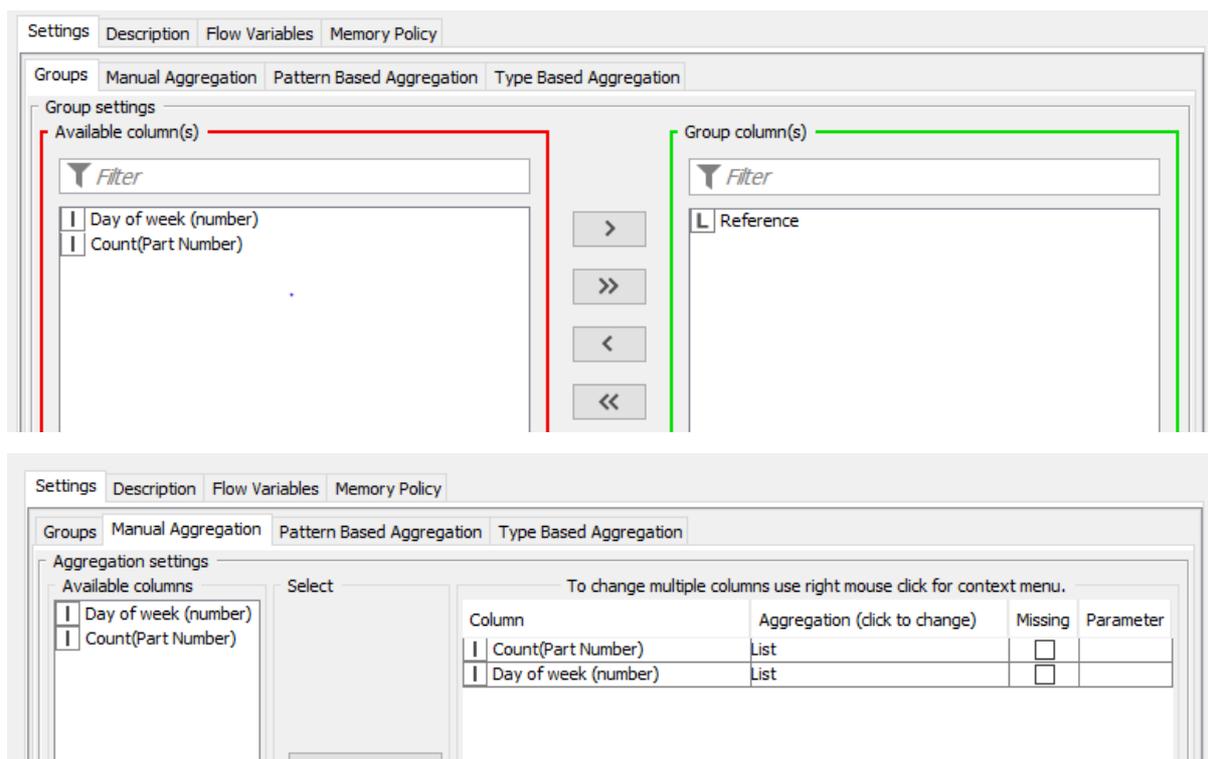


Figura 30 - Configurações do segundo nodo "GroupBy".

No segundo nodo "GroupBy" no separador "Groups", são agrupados os dados de novo pela variável Reference. No separador "Manual Aggregation" criam-se as duas listas utilizando as variáveis Count(Part Number) (número de para-choques descarregados e carregados) e Day of Week (Number) (Dia da semana). Cada posição da lista Count (part number) diz respeito ao dia da semana que está na mesma posição da lista Day of week.

De forma a alcançar a visualização dos carregamentos e descarregamentos por dia, considerou-se necessária a inserção de colunas com os dias da semana. Desta forma, permite uma fácil visualização dos dados, uma vez que para cada referência, existirá uma coluna com cada dia da semana que será preenchida com o número de para-choques descarregados e carregados. Para esse efeito, utilizou-se um nodo "Java Snippet".

Na Figura 31 estão representadas as configurações do nodo "Java Snippet".

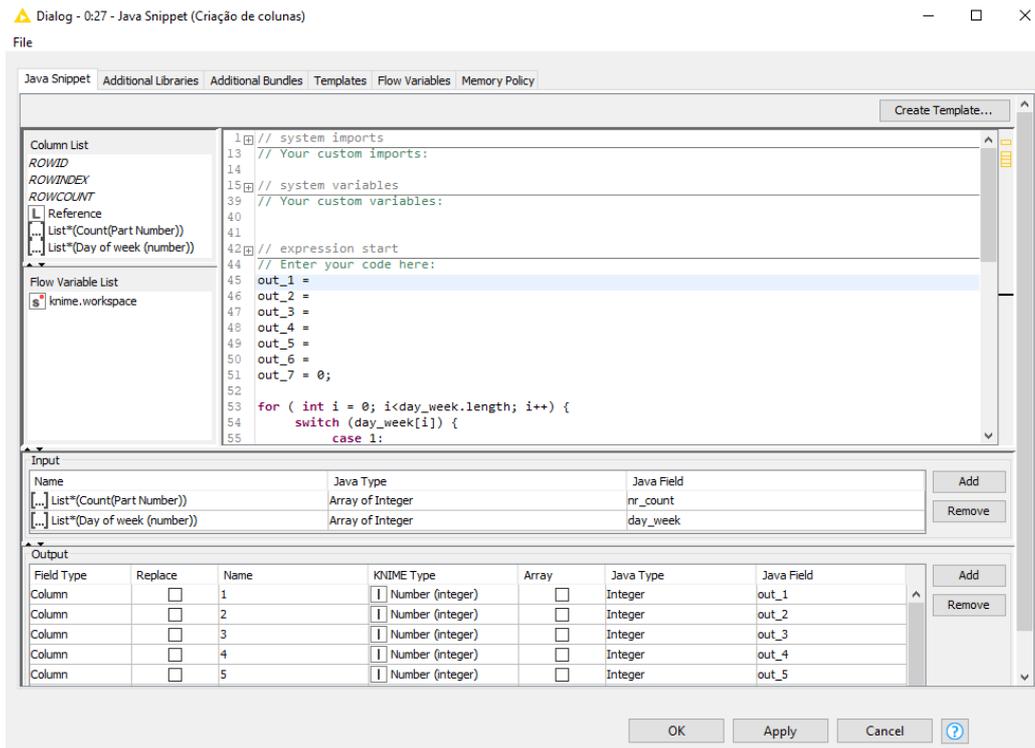


Figura 31 - Configurações do nodo "Java Snippet".

Com a aplicação do segundo nodo "GroupBy" estão criadas para cada para-choques as listas com dias da semana em que um produto foi carregado (*dataset* carregamentos) e/ou descarregado (*dataset* descarregamentos) – List*(Day of Week (Number)) - e com a quantidade desse produto carregada e/ou descarregada – List*(Count(Part Number)). Com a criação das listas estão geradas as condições para criar as colunas para cada dia da semana com a quantidade de descarregamentos e descarregamentos, por para-choques, correspondentes. Para criar as colunas para cada dia da semana com o número de descarregamentos e carregamentos, é necessário desenvolver um código em Java.

No nodo "Java Snippet" numa primeira fase utilizam-se as variáveis List*(Count(Part Number)) e List*(Day of Week(Number)) como *input*. Com as duas listas criam-se dois campos (Java *fields*), sendo eles o nr_count e day_week. Os dois campos criados apresentam o tipo *array of integer*. Em seguida, criaram-se sete variáveis (sete colunas), uma para cada dia da semana (variável respetiva ao dia da semana 1 apresenta a designação "out_1").

O código desenvolvido em Java é apresentado na Figura 32.

```

45 out_1 =
46 out_2 =
47 out_3 =
48 out_4 =
49 out_5 =
50 out_6 =
51 out_7 = 0;
52
53 for ( int i = 0; i<day_week.length; i++) {
54     switch (day_week[i]) {
55         case 1:
56             out_1=nr_count[i];
57             break;
58         case 2:
59             out_2=nr_count[i];
60             break;
61         case 3:
62             out_3=nr_count[i];
63             break;
64         case 4:
65             out_4=nr_count[i];
66             break;
67         case 5:
68             out_5=nr_count[i];
69             break;
70         case 6:
71             out_6=nr_count[i];
72             break;
73         default:
74             out_7=nr_count[i];
75             break;
76     }
77 }

```

Figura 32 - Código desenvolvido em Java.

É importante referir que os *arrays* `nr_count` e `day_week` possuem o mesmo número de posições. O *array* `day_week` possui os dias da semana nos quais existe descarregamentos e/ou carregamentos de um determinado para-choques, e o *array* `nr_count` possui os valores das quantidades registadas nesses dias. Assim, percorrendo cada posição do *array* `day_week`, utiliza-se um *switch case* que permite verificar o dia da semana. Se no *array* `day_week` é verificado a existência do valor 1 (dia 1), a variável `out_1` toma o valor da posição do *array* `nr_count` correspondente à mesma posição do *array* `day_week`. Caso não se verifique a existência do valor 1, atribui-se à variável `out_1` o valor de zero. O processo repete-se até ao dia 7. O dia 7 no *switch case* funciona como *default*. Se não forem verificados os dias restantes no *array* `day_week`, a variável `out_7` toma o valor do *array* `nr_count` que não foi atribuído a mais nenhuma das variáveis anteriores. Com o estabelecimento do nodo “Java Snippet” os *datasets* passam apresentar o formato pretendido. É necessário posteriormente reunir os *datasets* dos descarregamento e carregamentos num só *dataset*. Para reunir os dois *datasets* é necessário aplicar o nodo “Joiner”.

Na Figura 33 apresentam-se as configurações do nodo “Joiner”.

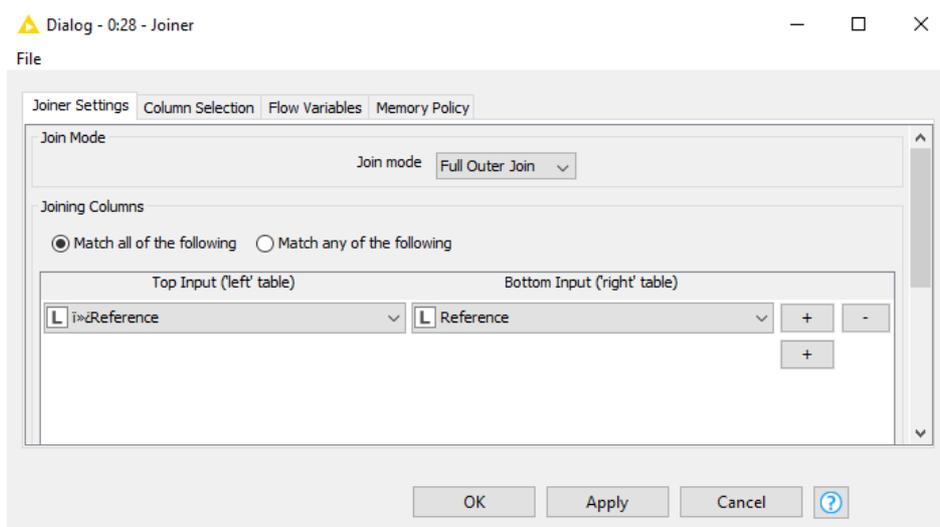


Figura 33 - Configurações do nodo “Joiner”.

Através do nodo “Joiner” é possível juntar os dados dos carregamentos e descarregamentos num só, facilitando a análise dos dois simultaneamente. Para que os carregamentos e descarregamentos do mesmo produto coincidam, utiliza-se a variável Reference. Por defeito, o nodo “Joiner” seleciona a opção “Inner Join” como “Join mode”. Porém, a opção “Inner Join” filtra todas as referências que não se apresentem em simultâneo nos dados de descarregamentos ou carregamentos nessa semana. Para que não aconteça essa filtragem, seleciona-se a opção “Full Outer Join”.

Como nos dados dos carregamentos e descarregamentos a variável Reference apresenta nomes semelhantes, considera-se importante alterar os seus nomes de forma a não gerar dúvidas na análise de dados posterior. Para isso, utiliza-se o nodo “Column Rename” para alterar o nome das variáveis que forem necessárias.

Na Figura 34 estão representadas as configurações do nodo “Column Rename”.

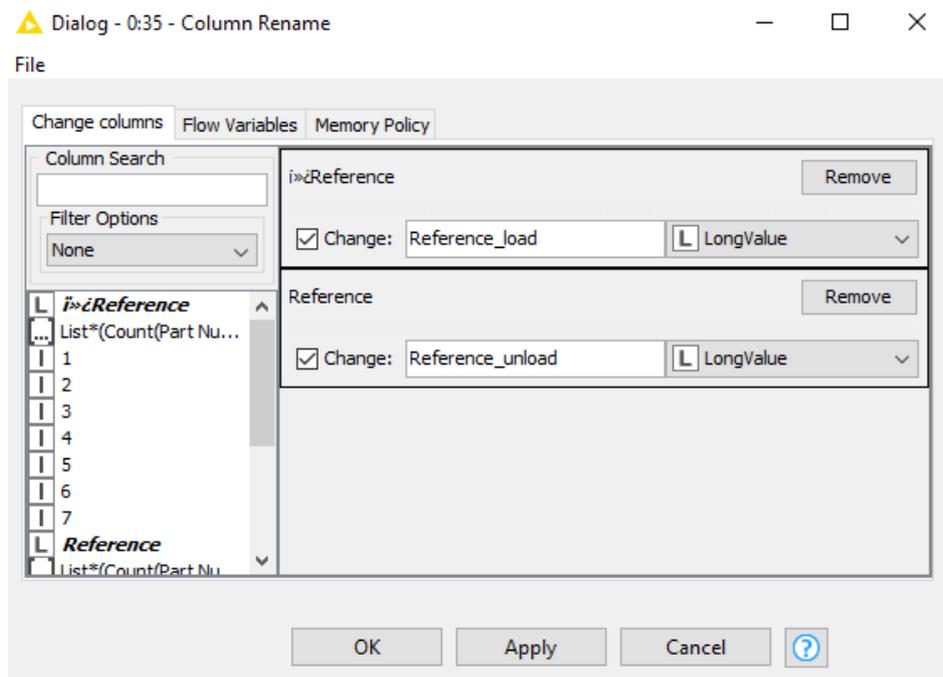


Figura 34 - Configurações do nodo "Column Rename".

Dentro do separador "Change Columns", no lado esquerdo, apresentam-se as variáveis existentes no *dataset* transformado. Selecionam-se as duas variáveis que se pretende mudar de designação, seleciona-se a opção "Change" e reescrevem-se as novas denominações das variáveis com a denominação Reference. As duas variáveis passam a denominar-se de Reference (Load) e Reference (Unload).

Por fim, o último passo consiste na criação de um documento em Excel com os dados transformados. Para esse efeito, utiliza-se o nodo "Excel Writer (XLS)".

Na Figura 35 encontram-se as configurações do nodo "Excel Writer (XLS)".

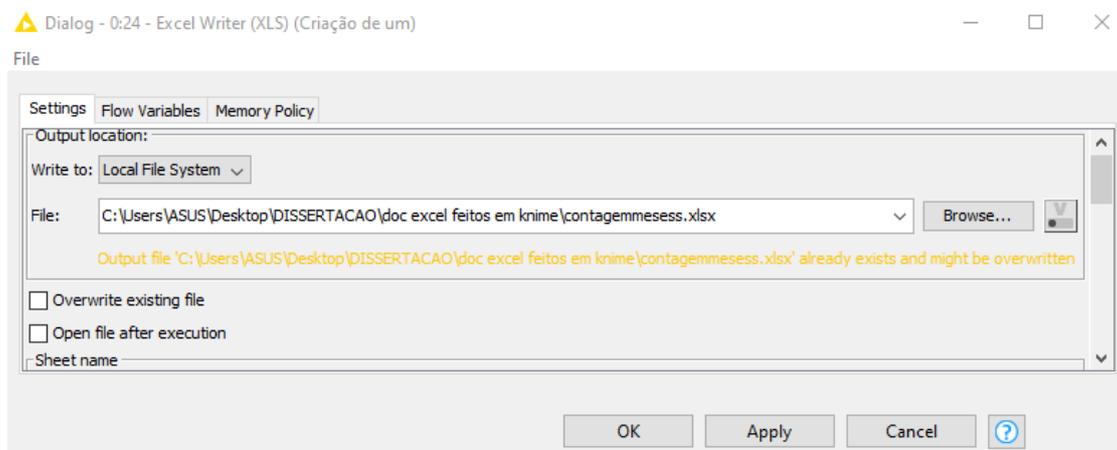


Figura 35 - Configurações do nodo "Excel Writer (XLS)".

No separador “Settings” em “Output location” define-se a localização do ficheiro que será criado. Correndo o nodo “Excel Writer (XLS)” a plataforma cria o ficheiro Excel em formato com o resultado do tratamento de dados.

4.2.2. Análise da política de armazenamento atual

Atualmente é aplicada uma política de armazenamento baseada em classes. A empresa de para-choques aplica uma política de armazenamento que não tem por base metodologias universalmente aplicadas como é o caso da regra de Pareto ou do índice cúbico por pedido. Assim sendo, considerou-se oportuno fazer uma análise da metodologia de classificação atualmente praticada no armazém. Foi possível entender parte das regras que são tomadas em conta para diferenciar os produtos pelas diferentes classes. Para fazer a classificação dos produtos têm-se em conta as seguintes regras:

- Análise é feita sobre os carregamentos e descarregamentos efetuados no armazém;
- Análise da quantidade carregada e descarregada de um produto em cada dia da semana;
- Atualização semanal da classificação;
- Classificar como *low runner* caso dia a dia tenha um valor inferior a 10 de descarga e /ou carga.

Não foram obtidas informações respeitantes à distinção das classes *medium runner* e *high runner*. Consequentemente, a análise tem por base apenas a classificação de produtos como *low runners*.

Na Tabela 3 estão presentes dados dos carregamentos e descarregamentos de 20 para-choques aleatoriamente escolhidos. Os dados representam os carregamentos e descarregamentos relativos à semana escolhida.

Tabela 3 - Carregamentos e Descarregamentos da semana 2 (10 a 16 de novembro) de 20 referências aleatoriamente escolhidas.

Reference_load	1	2	3	4	5	6	7	Reference_unload	1	2	3	4	5	6	7
7184750100203	0	0	0	0	0	5	0	7184750100203	0	1	3	0	0	0	0
7184750100221	0	0	0	0	4	0	0	7184750100221	0	2	0	0	1	0	0
7206340100128	0	18	6	12	8	19	0	7206340100128	0	4	8	12	9	0	0
7206340100182	0	15	12	16	12	2	0	7206340100182	0	22	26	19	10	0	0
7206340100198	0	0	46	6	27	0	0	7206340100198	0	14	5	18	15	0	0
7219000100224	0	0	0	7	3	0	0	7219000100224	0	4	2	3	2	0	0
7219000100226	0	0	0	7	0	0	0	7219000100226	0	2	6	11	4	0	0
7219010100111	0	0	2	6	0	8	0	7219010100111	0	1	1	3	0	0	0
7219010100128	0	11	0	0	19	0	0	7219010100128	0	7	8	7	10	0	0
7219010100142	0	0	0	13	0	0	0	7219010100142	0	0	1	3	3	0	0
7219010100182	0	0	4	5	10	0	0	7219010100182	0	4	5	5	3	0	0
7219010100198	0	11	0	0	0	0	0	7219010100198	0	11	2	6	10	0	0
7219010100199	0	0	11	0	0	0	0	7219010100199	0	2	0	3	4	0	0
7210000100182	0	8	3	44	21	0	0	7210000100182	0	16	13	16	26	0	0
7210000100198	0	25	22	42	42	8	0	7210000100198	0	35	27	48	49	0	0
7210000100199	0	0	32	0	0	0	0	7210000100199	0	10	13	18	18	0	0
7210000100203	0	0	4	0	4	18	0	7210000100203	0	5	9	5	4	0	0
7210000100220	0	2	0	0	0	0	0	7210000100220	0	4	2	2	5	0	0
7210000100222	0	22	0	12	12	2	0	7210000100222	0	14	23	19	15	0	0
7210000100223	0	33	42	26	7	0	0	7210000100223	0	27	22	20	18	0	0

Na tabela é possível observar os carregamentos e descarregamentos de vinte produtos armazenados no armazém. Destacado a verde estão os dias onde houve um número igual ou superior a 10 carregamentos e/ou descarregamentos no armazém.

Quando se observam os valores da tabela, tendo como base os critérios da empresa existem produtos cuja classificação é clara. Muitos artigos não apresentam nenhum dia ou apenas apresentam um dia de carregamentos e/ou descarregamentos com valores superiores ou iguais a dez e, por esse motivo, poderiam ser classificados como *low runners* (referências marcadas a azul). Produtos que poderiam ser excluídos da classe *low runner* (referências marcadas a cor laranja) apresentam em quatro dias da semana carregamentos e/ou descarregamentos com valores superiores ou iguais a dez. As restantes referências que apresentam dois ou três dias de carregamentos e/ou descarregamentos com valores superiores a dez, tendo em conta os critérios de classificação, geram dúvidas na sua classificação. A dúvida prende-se com o número dias que um produto poderá apresentar quantidades descarregadas e/ou carregadas superiores ou iguais a dez para que seja classificado como *low runner*

ou excluído desta mesma classe. Verifica-se, que o método da empresa tem parâmetros que geram dúvida, devido à ambiguidade gerada pelos seus critérios.

4.3. Novo método

O método que pode ser aplicado como proposta de melhoria às ineficiências encontradas anteriormente tem por base a Regra de Pareto. A regra será adaptada ao sistema de armazenamento em estudo, em que o critério que será utilizado será a procura pelos produtos. Serão utilizados os dados dos descarregamentos do armazém que corresponde à procura pelos para-choques.

Antes de ser feita a classificação, considerou-se ser necessária uma breve análise da procura. A análise tem como finalidade averiguar se a procura dos produtos apresenta grandes oscilações durante o tempo. Posto isto, para a análise da procura, serão analisados os descarregamentos por mês de cada para-choques.

4.3.1. Tratamento dos dados

Para transformar o *dataset* de forma a analisar a procura por mês de cada para-choques, é necessária, mais uma vez, a utilização da plataforma KNIME.

Na Figura 36 apresenta-se a primeira parte do segundo modelo desenvolvido.

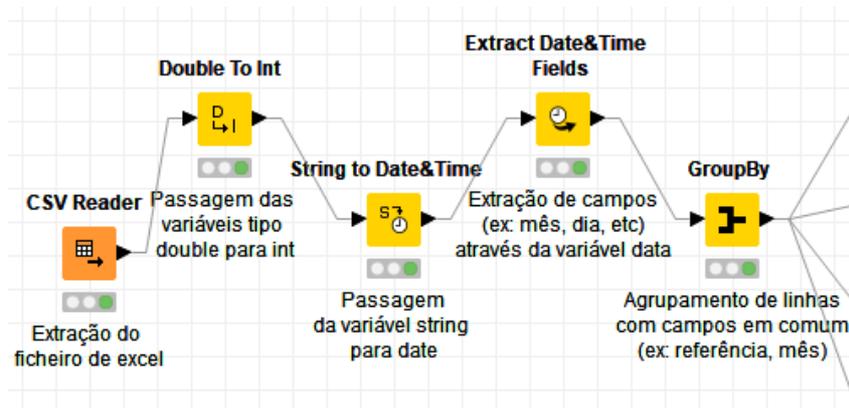


Figura 36 - Segundo modelo em KNIME (parte1).

Os primeiros passos na transformação dos dados são semelhantes aos descritos no subcapítulo 4.2.1., havendo algumas ligeiras diferenças.

Nos nodos “CSV Reader”, “Double to Int” e “String to Date&Time” são executados os mesmos passos explicados anteriormente. Posteriormente, no nodo “Extract Data&Time Fields” apenas se extrai o campo mês. De seguida, agrupa-se os descarregamentos por mês de cada para-choques. No

“GroupBy” utiliza-se a variável Part Number como meio de agregação das linhas, sendo criada uma coluna com o nome Count(Part Number), a qual apresenta como valor todas as descargas efetuadas em determinado mês.

Na Figura 37 está representada a segunda e última parte do segundo modelo desenvolvido na plataforma KNIME.

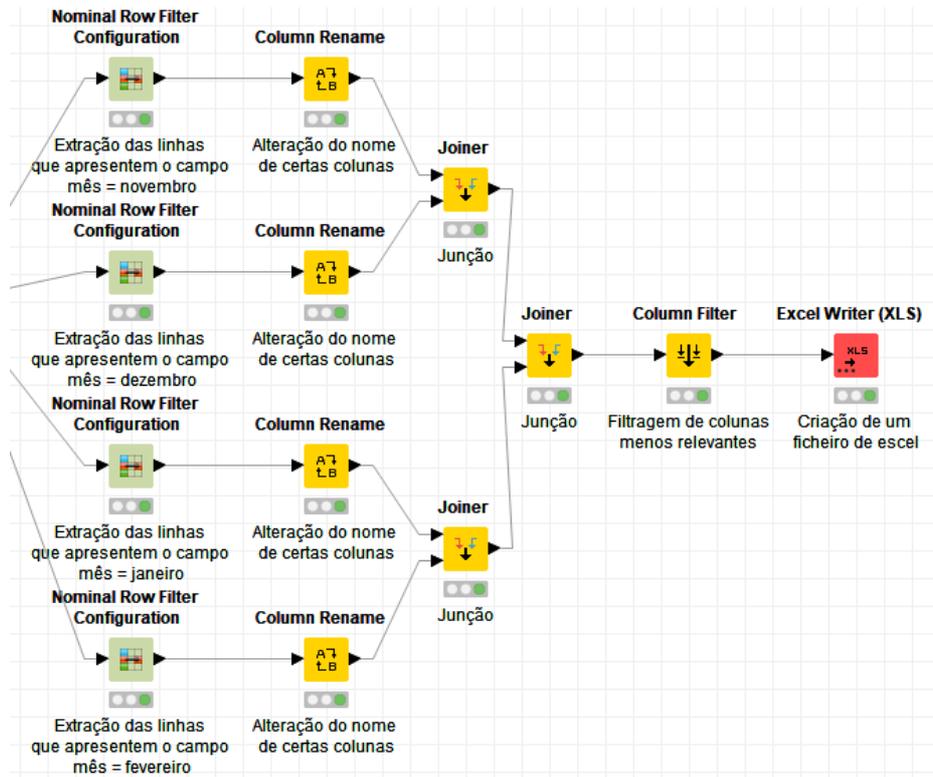


Figura 37 - Segundo modelo em KNIME (parte 2).

No nodo “Nominal Row Filter Configuration” são extraídas as linhas com determinado mês, por isso colocam-se quatro nodos iguais para extrair paralelamente as linhas dos meses diferentes existentes. Posteriormente, o nodo “Column Rename” utiliza-se para alterar o nome da coluna Count (Part Number), variável criada com a aplicação dos nodos “GroupBy”. Como se pretende juntar os dados posteriormente para distinguir que contagens correspondem a cada mês, altera-se o nome “Count (Parte Number)” para o nome do mês a que a contagem de descarregamentos corresponde. De seguida, utiliza-se o nodo Join para fazer a junção de todos os dados. Depois através do “Column Filter” filtram-se todas as colunas/variáveis desnecessárias que são Hook, Part Number, Output, VIN, Sequency e Empty Hook. Por fim, o nodo “Excel Writer (XLS)” utiliza-se para criar um documento em formato XLS.

4.3.2. Análise da Procura

Dado que a empresa de para-choques apresenta atualmente a atualização semanal da classificação dos produtos, considerou-se oportuno verificar a volatilidade na procura dos diferentes produtos armazenados. Nesta secção pretende-se averiguar se, por exemplo, os produtos com uma procura elevada no mês de novembro apresentam uma redução acentuada nos meses seguintes.

Na Tabela 4 e na Tabela 5 estão ordenados os produtos tendo em conta as quantidades mensais de descarregamentos. Os dados representam três meses, os meses novembro de 2019, dezembro de 2019 e janeiro de 2020. Optou-se por excluir os dados do mês de fevereiro, visto que se verificou que os dados apresentavam apenas a uma semana de descarregamentos.

Tabela 4 - Produtos ordenados em relação ao valor mensal de descarregamentos.

Referencia	Novembro	Referencia	Dezembro	Referencia	Janeiro
7210000100111	921	7214030100182	453	7214030100128	1296
7214030100198	891	7214030100198	453	7214030100182	1135
7214030100128	745	7210000100198	368	7210000100198	1013
7214030100182	675	7210000100111	353	7214030100198	902
7210000100198	642	7214030100128	303	7210000100111	712
7206340100182	461	7210000100223	218	7214030100223	521
7210000100223	373	7210000100222	214	7210000100223	456
7210000100222	334	7206340100182	195	7210000100222	412
7206340100198	310	7219000100198	159	7210000100182	367
7219000100198	284	7206340100198	139	7219000100198	309
7210000100224	281	7210000100142	132	7206340100198	292
7210000100142	264	7214030100223	119	7210000100142	256
7214030100223	227	7210000100199	117	7214030100222	247
7236590100198	227	7210000100224	111	7206340100182	238
7214030100222	218	7210000100182	102	7210000100199	238
7214030100111	201	7219010100128	100	7210000100224	238
7210000100182	196	7206340100128	89	7214030100199	214
7219010100128	193	7214030100111	76	7206340100128	205
7219010100198	182	7214030100222	76	7214030100111	192
7206340100128	175	7219010100198	75	7219010100198	184
7206340100222	169	7236590100198	75	7236590100198	168
7236590100207	167	7219000100222	74	7219010100128	154
7219000100182	164	7219000100182	70	7214030100142	114
7236590100251	152	7206340100222	64	7236590100128	106
7210000100199	150	7206340100217	62	7214030100217	91
7219000100222	148	7219000100223	56	7219010100182	83
7206340100217	141	7214030100217	54	7210000100203	82
7236590100128	138	7214030100199	53	7236590100251	81
7214030100217	129	7236590100128	48	7219000100222	77
7219000100223	127	7219000100229	44	7206340100222	75
7219000100224	122	7206340100223	43	7210000100220	74
7206340100142	121	7206340100142	37	7206340100217	73
7214030100199	104	7236590100207	36	7219000100182	73
7206340100223	103	7219010100217	33	7184750100198	71
7214030100142	88	7219000100226	31	7219010100217	69
7214030100226	81	7210000100203	30	13013463	58
7219010100217	79	7219000100224	29	7210000100208	58
7219010100182	78	7210000100220	27	7210000100226	58
7219000100208	74	7219000100208	27	7219000100223	54
7219000100229	68	7206520100128	25	7206340100223	53
7210000100203	57	7210000100208	25	7236590100207	52
7219010100222	55	7214030100226	25	7214030100226	50
7206520100198	54	7219010100182	25	7219000100224	49
7210000100208	53	7236590100251	25	7184750100182	45
7219000100199	52	7214030100142	24	7206520100128	45
7236590100182	52	7206340100199	21	7214030100209	44
7219000100226	51	7206520100198	19	7206520100198	43
7206520100128	50	7219010100199	19	7206340100199	42
7219010100111	50	7214030100209	18	7219000100226	40

Tabela 5 - Produtos ordenados em relação ao valor mensal de descarregamentos (Continuação).

Reference	Novembro	Reference	Dezembro	Reference	Janeiro
7214030100209	48	7219000100142	18	7219010100222	40
7219000100111	45	7219000100199	18	7206340100111	39
7206340100226	43	7214030100203	17	7219010100111	39
7210000100220	42	7210000100226	16	7206340100142	36
13013463	41	7184750100198	16	7219010100199	35
7219010100223	41	7219010100111	15	7219000100199	31
7210000100226	37	7219010100142	14	7219010100223	28
7184750100198	34	7219010100222	14	7184750100223	27
7236590100217	34	7236590100182	14	7206520100182	27
7206340100199	32	7219000100203	13	7184750100111	26
7219000100220	32	7236590100217	13	7219000100208	26
13013327	29	7219000100111	12	7219010100209	25
7219000100142	29	13013457	11	7219000100111	23
7184750100223	28	7206340100111	11	7236590100217	23
7206340100111	28	7219010100223	11	7206340100209	20
7219010100199	28	7184750100182	10	7214030100203	20
13013808	27	7184750100111	9	7219000100229	20
7184750100182	27	7184750100222	8	7219010100142	20
7206520100182	27	7206340100209	8	7236590100182	20
7184750100111	25	7206520100182	8	7236590100209	18
7206340100209	25	7206520100217	7	7236590100199	16
7184750100221	24	7219010100209	7	7219000100142	13
7184750100222	23	13013463	6	13013329	12
7236590100209	23	13013808	6	7184750100222	12
7184750100224	21	7206520100222	6	7206340100203	11
7219000100203	20	7236590100209	6	7206520100217	11
7219010100142	20	7184750100221	5	7206520100222	11
7219010100209	19	7236590100199	5	13013457	10
13013457	17	7206340100203	4	13013808	10
7206340100203	17	7206340100226	4	7206520100199	10
7214030100203	17	7219000100220	4	7206520100209	10
7236590100199	16	7219010100203	4	13014080	10
13013329	14	7219010100226	4	7184750100224	9
7206520100111	12	13013329	3	7206520100111	9
13013451	12	7184750100223	3	7219000100203	9
7206520100217	9	7184750100224	3	7184750100203	8
13012990	8	7206520100111	3	7184750100221	7
7206520100142	8	7206520100223	3	7206520100142	7
7206520100222	8	13013327	2	7184750100142	7
7184750100142	8	7184750100199	2	13013327	6
7184750100203	7	7206520100199	2	7184750100199	6
7219010100226	7	13012990	1	7206520100223	6
7206520100209	6	7184750100203	1	7219000100220	6
7206520100223	6	7206520100142	1	7219010100203	6
7184750100220	6	7206520100203	1	7219010100226	6
7206520100199	5	7206520100209	1	13013451	6
7184750100208	3	7206520100226	1	7184750100208	4
7184750100199	2	13013451	0	7206340100226	3
7206520100203	2	7184750100142	0	7206520100203	3
7206520100226	2	7184750100220	0	7184750100220	3
7219010100203	2	7184750100208	0	13012990	2
7184750100226	2	7184750100226	0	7206520100226	2
13014080	1	13014080	0	7184750100226	0

As referências estão divididas por colorações, e apresentam o total de descarregamentos efetuado por cada mês. Essas colorações têm por base uma análise ABC, feita apenas no mês de novembro. As colorações são mantidas, mesmo que os produtos nos meses seguintes alterem de classe de forma a verificar facilmente mudanças drásticas da procura num contexto geral.

Através da análise dos três meses, depreende-se que existe uma procura consistente pelos para-choques, ainda que algumas flutuações ao longo do período, fruto da imprevisibilidade característica da procura. Os produtos mais procurados no mês de novembro não apresentam quedas acentuadas na sua procura, mantendo-se nas primeiras posições da tabela. Alguns produtos com procura intermédia e procura baixa em novembro apresentam em alguns casos decréscimo na procura e aumento da procura. Considera-se que a evolução da procura nesses produtos ocorre de forma gradual, como é possível verificar em produtos destacados na Tabela 4 e na Tabela 5.

4.3.3. Nova política de armazenamento

A nova política a recomendar será uma política de armazenagem baseada em classes, utilizando a regra de Pareto. A análise ABC abrange dados desde a data de 4 de novembro de 2019 a 31 de janeiro de 2020. Assim sendo, com a classificação seguindo a regra de Pareto chegou-se ao gráfico representado na Figura 38, que consiste no gráfico com a curva ABC, e à Tabela 6, que contém informações gerais de cada classe.

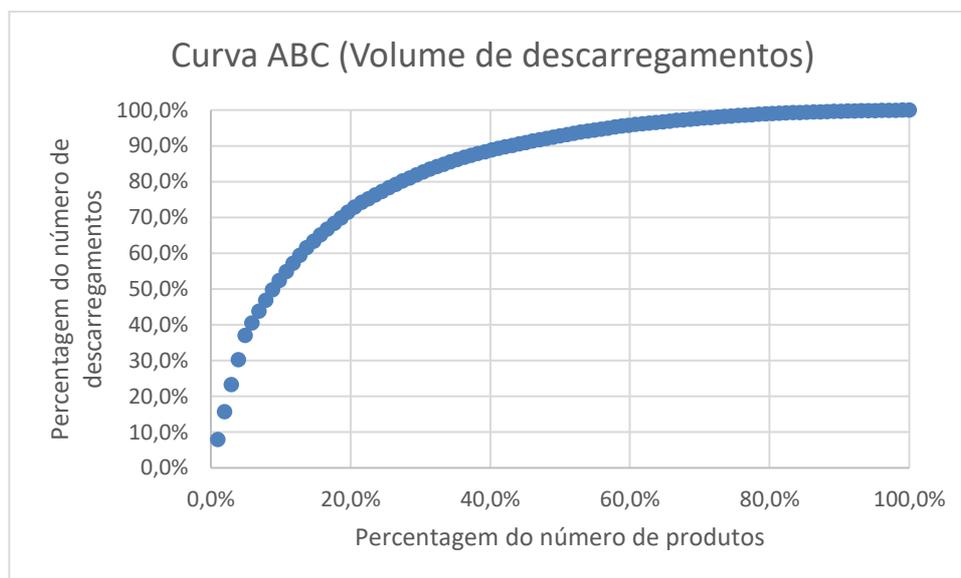


Figura 38 - Gráfico da Curva ABC (Volume de descarregamentos).

Tabela 6 - Valores das classes A, B e C.

Classe	A	B	C
Quantidade de produtos	22	30	50
Percentagem de produtos	21,57%	29,41%	49,02%
Percentagem de descarregamentos	74,22%	18,99%	6,80%

A utilização da regra de Pareto apresenta benefícios comparativamente ao método atualmente aplicado no armazém em estudo. A regra de Pareto é de simples e rápida aplicação, não sendo necessária a análise individual de cada produto. Os produtos são divididos também em três classes, sendo elas caracterizadas por classe A, classe B e classe C.

O método ABC não necessita de ser atualizado semanalmente, podendo utilizar-se uma maior quantidade de dados da procura para efetuar a classificação dos produtos. Para além disso, por mais consistentes que os dados da procura sejam, existem sempre flutuações e imprevisibilidade associada à procura. Assim sendo, uma classificação que utiliza dados de uma semana apresenta uma maior suscetibilidade às flutuações da procura do que uma classificação que usa dados de um maior intervalo temporal.

Todas as questões abordadas nos parágrafos anteriores apresentam impactos na performance do armazém que não são quantificados no presente estudo.

5. ANÁLISE DA AFETAÇÃO DE PRODUTOS NAS LINHAS DE ARMAZENAMENTO

Neste capítulo pretende-se analisar configurações com diferentes afetações de produtos nas linhas de armazenamento. A alocação dos produtos tem como base as características de armazenamento das classes *high runner*, *medium runner* e *low runner*. Através da análise das configurações de armazenamento objetiva-se estudar os impactos na performance do armazém.

5.1. Modelo matemático

Na abordagem ao problema foi implementado um modelo matemático de programação linear inteira mista (MILP). O modelo matemático foi construído para refletir o processo de *picking* no armazém. No modelo utilizaram-se para otimização dois dos KPIs aplicados pela empresa, sendo eles o incumprimento do FIFO e a quantidade para-choques deslocados para além dos produtos solicitados. O KPI referente ao *takt time* não foi incluído no modelo. Através da quantificação de para-choques movimentados a mais é possível contabilizar indiretamente melhorias ou impactos no *takt-time*, dado que cada para-choques possui associado um tempo de extração da linha de armazenamento equivalente a oito segundos.

No modelo são consideradas as 102 referências para o armazenamento. Não são consideradas quebras de *stock*, visto que é garantido *stock* suficiente para fazer face à procura estabelecida nas sequências. Por fim, todas as sequências de procura apresentam 100 produtos a solicitar.

5.1.1. Parâmetros

Os parâmetros do modelo desenvolvido são quinze, sendo eles:

- $N_{parachoq}$ = número de para-choques no armazém;
- N_{lines} = número de linhas existentes no armazém;
- N_{prof} = profundidade de cada linha. Número de para-choques que cada linha poderá suportar;
- N_{seq} = número de para-choques que formam o descarregamento;
- $N_{tipoparach}$ = número de referências presentes no armazém;
- N_{ordem} = número máximo de um produto de uma determinada referência;
- ra_i = referência do para-choques i armazenado;
- $linha_i$ = linha em que o para-choques i está armazenado;

- $prof_i$ = posição do para-choques i na linha de armazenamento;
- ord_arm_i = índice FIFO do para-choques i existente no armazém;
- rs_s = referência do para-choques pretendido na posição s da sequência;
- pos_s = número da posição s da sequência de procura;
- ord_ref_s = índice FIFO do para-choques a ocupar a posição s ;
- α = constante que contém o peso atribuído à função objetivo que pretende minimizar a deslocação de para-choques;
- β = constante que contém o peso atribuído à função objetivo que pretende minimizar o incumprimento do FIFO.

5.1.2. Conjuntos de valores

O modelo apresenta seis conjuntos de valores, sendo eles:

- N = conjunto de para-choques que podem solicitados para a sequência de procura. Este conjunto apresenta o índice i , de tal forma que $i = 1, 2, \dots, N_parachq$;
- S = conjunto de posições da sequência de procura que necessitam de ser ocupadas. Este conjunto apresenta o índice s , de tal forma que $s = 1, 2, \dots, N_seq$;
- L = conjunto de linhas existentes no armazém. Este conjunto apresenta o índice l , de tal forma que $l = 1, 2, \dots, N_lines$;
- P = conjunto de posições que cada linha de armazenamento possui. Este conjunto apresenta o índice p , de tal forma que $p = 1, 2, \dots, N_prof$;
- O = conjunto de valores com a ordem que os produtos da mesma referência devem seguir. Este conjunto apresenta o índice o , de tal forma que $o = 1, 2, \dots, N_ord$;
- R = conjunto de referências existentes no armazém. Este conjunto apresenta o índice r , de tal forma que $r = 1, 2, \dots, N_tipoparach$.

5.1.3. Variáveis de decisão

O modelo apresenta cinco variáveis:

- $x_{is} = \begin{cases} 0 & \text{se o para-choques } i \text{ não for solicitado;} \\ 1 & \text{se o para-choques } i \text{ for selecionado para a posição } s \text{ da sequência;} \end{cases}$

- y_{lp} = variável inteira positiva que regista o índice da posição da sequência s quando o para-choques i é atribuído à posição s da sequência;
- mov_l = variável que regista a maior posição do para-choques da linha l que for movimentado;
- $fifo_s = \begin{cases} 0 & \text{se o para-choques } i \text{ selecionado para sequência não cumpre o FIFO;} \\ 1 & \text{se o para-choques } i \text{ selecionado para sequência cumpre o FIFO;} \end{cases}$
- w_{ro} = variável inteira positiva que regista o índice da ordem FIFO da posição s , quando o para-choques i é atribuído à posição s da sequência.

5.1.4. Formulação matemática

Minimizar:

$$(1) \quad \alpha \times \left(\sum_{l=1}^L mov_l - \sum_{i=1}^N \sum_{s=1}^S x_{is} \right) + \beta \times \left(\sum_{s=1}^S (1 - fifo_s) \right)$$

Sujeito a:

$$(2) \quad \sum_{i=1}^N x_{is} = 1, \quad \forall s \in S$$

$$(3) \quad \sum_{s=1}^S x_{is} \leq 1, \quad \forall i \in N$$

$$(4) \quad ra_i \times x_{is} = rs_s \times x_{is}, \quad \forall i \in N \quad \forall s \in S$$

$$(5) \quad x_{is} = 1 \rightarrow y_{linha_i prof_i} = pos_s, \quad \forall i \in N \quad \forall s \in S$$

$$(6) \quad y_{lp} \leq y_{lp+1}, \quad \forall l \in L \quad \forall p \in P$$

$$(7) \quad x_{is} = 1 \rightarrow m_{linha_i} \geq x_{is} \times prof_i, \quad \forall i \in N \quad \forall s \in S$$

$$(8) \quad fifo_s = 1 \rightarrow ord_{arm_i} \times x_{is} \leq ord_{ref_s} \times x_{is}, \quad \forall i \in N \quad \forall s \in S$$

$$(9) \quad x_{is} = 1 \rightarrow w_{ra_i ord_{arm_i}} = ord_{ref_s}, \quad \forall i \in N \quad \forall s \in S$$

$$(10) \quad w_{ro} \leq w_{ro+1}, \quad \forall r \in R \quad \forall o \in O$$

A expressão (1) representa a função objetivo do modelo. A função objetivo apresenta dois propósitos, sendo atribuído um peso a cada um destes. A expressão multiplicada por α representa a parte da função objetivo que pretende minimizar a deslocação de para-choques quando um determinado para-choques é selecionado para expedição. Para isso, o somatório das maiores posições dos para-choques movimentados de cada linha é subtraído pelo número de para-choques descarregados do armazém, resultando no número de para-choques que foram deslocados a mais. A expressão multiplicada por β

representa a parte da função objetivo que pretende minimizar incumprimento do FIFO. O valor de 1 da expressão é subtraído pela variável $fifo_s$. Como a variável $fifo_s$ toma o valor de 1 quando o FIFO é cumprido, ao subtrair ao valor 1 da expressão resulta num valor de 0, significando que não houve incumprimento do FIFO.

A expressão (2) garante que um para-choques i terá de ser escolhido para ocupar a posição s da sequência.

A expressão (3) garante que posição s da sequência apenas pode ser preenchida uma única vez por um para-choques.

A expressão (4) garante que o para-choques i apenas pode ser alocado, se a sua referência corresponder à referência solicitada na posição s ;

A expressão (5) garante que quando o para-choques i é selecionado para ocupar o lugar s na sequência, sendo que a variável x_{is} toma o valor de 1, a variável y_{ip} com os índices $linha_i$ e $prof_i$ toma o valor da posição s da sequência de procura.

A expressão (6) garante que um para-choques numa posição inferior da linha não pode tomar lugares na sequência superiores aos para-choques com posições superiores da mesma linha. A expressão faz com que quando um determinado para-choques é movimentado, todos os para-choques em posições inferiores da mesma linha não poderão ser selecionados posteriormente, visto que estes foram movimentados para fora da linha de armazenamento e, por esse motivo, precisam de voltar a ser reconfigurados numa linha de armazenamento.

A expressão (8) calcula a quantidade de para-choques deslocados em cada linha do armazém, ao tomar o valor da posição mais elevada do para-choques movimentado em cada linha.

A expressão (8) garante que a regra FIFO é cumprido se o índice FIFO definido no armazenamento do para-choques i selecionado é inferior ao índice FIFO esperado na posição s da sequência. Se a condição for cumprida a variável $fifo_s$ toma o valor de 1.

A expressão (9) garante que quando o para-choques i é selecionado para ocupar o lugar s na sequência, em que a variável x_{is} toma o valor de 1, variável w_{ro} com o os índices ra_i e ord_arm_i toma o valor da ordem tomada na posição s da sequência de procura pelo produto dessa referência.

A expressão (10) garante que um para-choques de índice FIFO superior não seja solicitado antes de um para-choques com índice FIFO inferior.

5.2. Experiências Computacionais

Após a formulação do modelo, este foi implementado na *framework* NEOS Server. Esta foi a plataforma utilizada para realizar as experiências computacionais necessárias para o presente estudo.

O NEOS Server é um serviço gratuito que resolve problemas de otimização numérica. O servidor foi desenvolvido no ano de 1996 pelo Optimization Technology Center of Argonne National Laboratory e pela Northwestern University. A biblioteca de *solvers* do NEOS Server incluem mais de sessenta *solvers* comerciais, gratuitos e de código aberto, que podem ser aplicados a problemas de otimização matemática de mais de doze tipos diferentes, incluindo programação linear, programação inteira mista, entre outros.

O servidor NEOS Server é gerido atualmente pelo Wisconsin Institute for Discovery da Wisconsin-Madison University, onde a maioria dos *solvers* são executados em máquinas de alto desempenho geridas pelo software HTCondor. O resto dos *solvers* são hospedados por organizações parceiras, sendo elas Arizona State University, a Klagenfurt University e ainda a Universidade do Minho (Server, 2020).



Figura 39 - Logótipo da framework NEOS Server (Fonte: NEOS Server)

A linguagem de modelação AMPL foi utilizada para construir o modelo e fazer as experiências computacionais. O script desenvolvido encontra-se no Apêndice II.

5.2.1. Configurações do armazém

Nas configurações de armazenamento os para-choques estão divididos por classes. A divisão dos produtos foi feita seguindo a regra de Pareto abordada na secção 4.3.3. (classe de cada produto especificada no Apêndice I). Em cada configuração a afetação das classes A, B e C baseiam-se nas características de armazenamento das classes *high runners*, *medium runners* ou *low runners*. Com aplicação de diferentes afetações nas classes pretende-se verificar o impacto nos indicadores de performance do sistema de armazenamento.

A Tabela 7 apresenta diferentes configurações a serem testadas no armazém com base na classificação ABC já efetuada.

Tabela 7 - Diferentes configurações a ser testadas no modelo matemático.

Classe/Configuração	Classe A	Classe B	Classe C
Configuração 1	<i>High runner</i>	<i>High runner</i>	<i>High runner</i>
Configuração 2	<i>High runner</i>	<i>High runner</i>	<i>Medium runner</i>
Configuração 3	<i>High runner</i>	<i>High runner</i>	<i>Low runner</i>
Configuração 4	<i>High runner</i>	<i>Medium runner</i>	<i>Medium runner</i>
Configuração 5	<i>High runner</i>	<i>Low runner</i>	<i>Low runner</i>
Configuração 6	<i>High runner</i>	<i>Medium runner</i>	<i>Low runner</i>

Nas seis configurações, presentes na Tabela 7, a classe A é sempre armazenada como os produtos *high runners*. Ou seja, cada produto da classe A tem uma linha de armazenamento individual.

Os produtos da classe B e C podem ser armazenados como *high runners*, tendo uma linha afeta a cada produto. Quando considerados como *medium runners*, os produtos da classe são armazenados numa linha com outros dois produtos da mesma classe, isto é, a linha armazenará três produtos da classe B ou três produtos da classe C. A disposição dos produtos dentro da linha é aleatória. Por fim, quando a classe B ou a classe C são consideradas como *low runners*, o armazenamento dos produtos é completamente aleatório, podendo uma linha armazenar até vinte e cinco produtos diferentes da mesma classe.

Posteriormente, pretende-se analisar todas as configurações com *medium runners*, testando linhas de armazenamento de *medium runners* com diferentes limites. O objetivo da análise é quantificar as diferenças nos KPIs, quando as linhas *medium runners* armazenam três, quatro e cinco tipos de produto diferentes na mesma linha.

A Tabela 8 apresenta todas as configurações que apresentam a classe *medium runner* com diferentes capacidades nas linhas de armazenamento.

Tabela 8 - Configurações a ser testadas no modelo matemático com diferentes capacidades nas linhas *medium runner*.

	Configuração \ Classe	Classe A	Classe B	Classe C
Medium runner (três tipos de produto por linha)	Configuração 2	<i>High runner</i>	<i>High runner</i>	<i>Medium runner</i>
	Configuração 4	<i>High runner</i>	<i>Medium runner</i>	<i>Medium runner</i>
	Configuração 6	<i>High runner</i>	<i>Medium runner</i>	<i>Low runner</i>
Medium runner (quatro tipos de produto por linha)	Configuração 7	<i>High runner</i>	<i>High runner</i>	<i>Medium runner</i>
	Configuração 8	<i>High runner</i>	<i>Medium runner</i>	<i>Medium runner</i>
	Configuração 9	<i>High runner</i>	<i>Medium runner</i>	<i>Low runner</i>
Medium runner (cinco tipos de produto por linha)	Configuração 10	<i>High runner</i>	<i>High runner</i>	<i>Medium runner</i>
	Configuração 11	<i>High runner</i>	<i>Medium runner</i>	<i>Medium runner</i>
	Configuração 12	<i>High runner</i>	<i>Medium runner</i>	<i>Low runner</i>

A Tabela 8 contém as configurações 2, 4 e 6, presentes também na Tabela 7. Estas configurações apresentam linhas de armazenamento de *medium runners* com um limite de três produtos por linha. Pretende-se analisar, com as configurações da Tabela 8, o impacto nos KPIs quando é alterado o limite de produtos nas linhas de armazenamento de *medium runners*. Nas configurações 7, 8 e 9, as linhas de armazenamento de *medium runners* têm um limite de quatro produtos por linha, e nas configurações 10, 11 e 12 as linhas de armazenamento de *medium runners* passam a ter um limite de cinco produtos por linhas.

5.2.2 Resultados Computacionais

A presente etapa consiste em interpretar e inferir conclusões sobre soluções de armazenamento estabelecidas, através da análise do impacto nos KPIs. Foram testadas dez sequências de procura aleatoriamente selecionadas do *dataset* dos descarregamentos. Cada sequência apresenta a solicitação de 100 produtos.

5.2.2.1. Análise de Sensibilidade

Após a conceção de resultados para cada configuração, houve a necessidade de elaborar uma análise de sensibilidade. O papel da análise de sensibilidade passa por averiguar a estabilidade do desempenho das soluções ótimas quando são alterados os pesos nos indicadores em avaliação.

A Figura 40 apresenta-se o gráfico de sensibilidade do valor da função objetivo quando alterados os pesos nos KPIs em estudo.

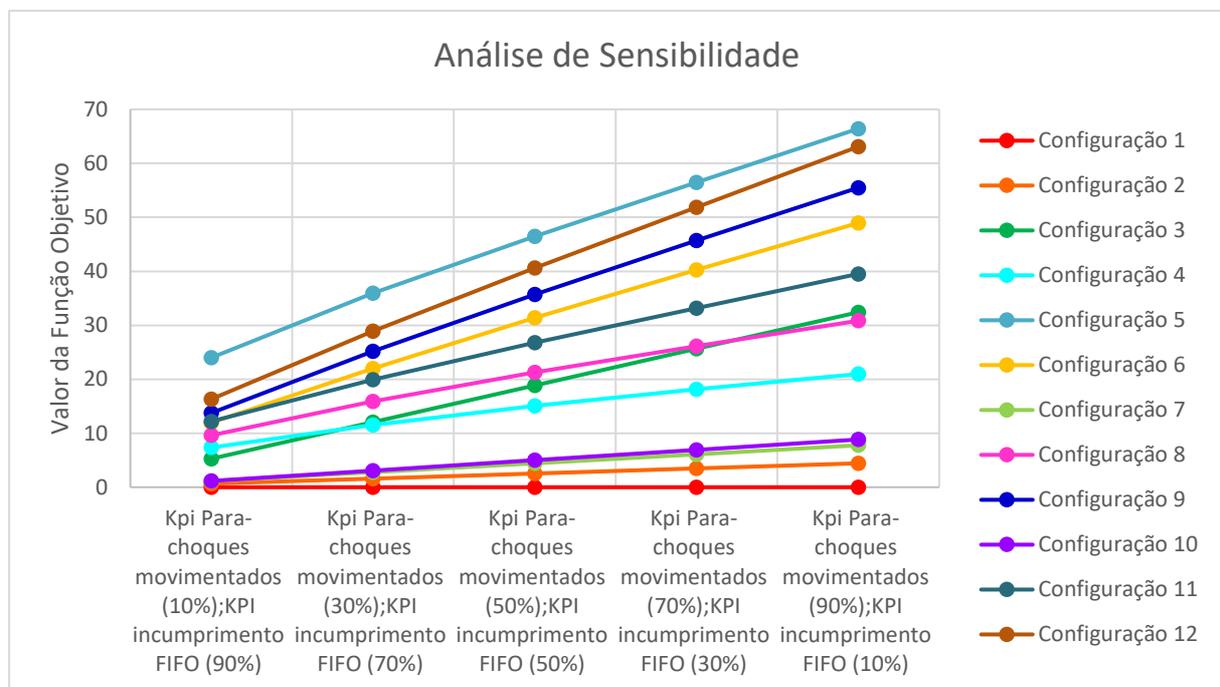


Figura 40 - Análise de Sensibilidade

Analisando o gráfico verifica-se que existe sensibilidade em determinadas configurações, o que significa que, com a alteração do nível de importância dos indicadores, existem soluções que passam a ter desempenhos piores relativamente a outras configurações.

A configuração 3 é a solução que apresenta maior sensibilidade, intersecionando as curvas das configurações 4 e 8. Quando o KPI relativo ao FIFO apresenta um maior peso na função objetivo, a configuração 3 alcança um resultado na função objetivo mais baixo que as configurações 4 e 8, indicando que a configuração 3 consegue alcançar valores de incumprimento do FIFO menores relativamente às

configurações 4 e 8. Quando a prioridade passa para o indicador relativo aos para-choques que se deslocam desnecessariamente, a configuração 3 interjeta as curvas das configurações 4 e 8. Esses resultados revelam que a configuração 3 movimentada desnecessariamente uma quantidade maior de para-choques do que configurações 4 e 8.

Os valores da função objetivo da configuração 6 apresentam também alguma sensibilidade. Quando o peso do indicador para-choques movimentados a mais situa-se nos 10%, a função objetivo da configuração 6 apresenta o valor de 11,96, uma performance ligeiramente melhor relativamente à configuração 11 que obtém 12,2. Com o aumento do peso do indicador para-choques movimentados a mais a curva da configuração 6 interjeta a curva da configuração 11. Assim sendo, constata-se que a configuração 6 consegue alcançar valores de incumprimento do FIFO ligeiramente menores que a configuração 11, mas desloca uma quantidade maior de para-choques.

O desempenho relativo das restantes configurações é consistente, não havendo interseções das curvas

5.2.2.2. Análise dos Indicadores

A Figura 41 e a Tabela 9 retratam, respetivamente, um gráfico de barras e uma tabela com os resultados dos indicadores das configurações 1 à 6.

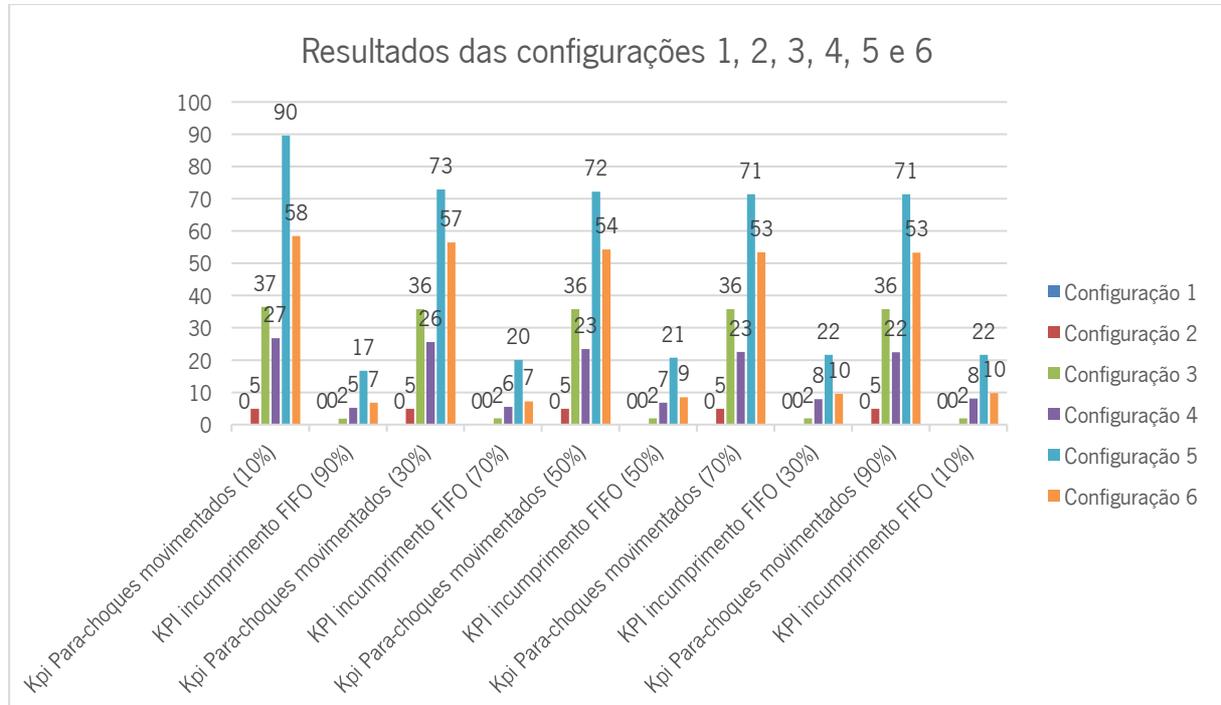


Figura 41 - Resultados das configurações 1, 2, 3, 4, 5 e 6.

Tabela 9 - Resultados das configurações 1, 2, 3, 4, 5 e 6.

	Pesos									
	10%	90%	30%	70%	50%	50%	70%	30%	90%	10%
	PM	FIFO	PM	FIFO	PM	FIFO	PM	FIFO	PM	FIFO
Configuração 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Configuração 2	5	0	5	0	5	0	5	0	5	0
Configuração 3	37	2	36	2	36	2	36	2	36	2
Configuração 4	27	5	26	6	23	7	23	8	22	8
Configuração 5	90	17	73	20	72	21	71	22	71	22
Configuração 6	58	7	57	7	54	9	53	10	53	10

Analisando os valores dos indicadores das configurações 1 a 6, verifica-se que a mudança dos pesos nos indicadores não resulta numa grande mudança de resultados em grande parte das configurações. Pode-se verificar que com a melhoria de um indicador, obtém-se valores menos favoráveis do outro indicador. Por isso, os indicadores são antagônicos, dado que a melhoria de um indicador resulta em piores resultados no outro.

A configuração 5 apresenta os piores resultados em ambos os indicadores. A configuração 5 tem a particularidade de armazenar os produtos das classes B e C como *low runners*. Desta forma, percebe-se que armazenar uma grande quantidade de produtos aleatoriamente nas linhas não traz benefícios neste sistema de armazenamento. A configuração 6 apresenta a penúltima posição nos resultados relativamente às seis configurações em análise. Na configuração 6, os produtos da classe B passam ser tidos em conta como *medium runner*. Comparativamente com a configuração 5, a configuração 6 apresenta melhorias, porém, não o suficiente para fazer face às restantes soluções em estudo.

A configuração 1 é a solução que apresenta os melhores resultados, obtendo uma maior minimização dos dois indicadores. Na configuração 1 todos os produtos são armazenados como *high-runners* o que implica terem pelo menos uma linha de armazenamento para cada produto. Os resultados desta configuração são os mais previsíveis de todas as configurações, uma vez o armazenamento de um único produto numa linha é a forma de armazenamento que minimiza os KPIs em estudo. A configuração 2 apresenta melhores resultados relativamente às configurações 3, 4, 5 e 6, principalmente no indicador que mede o incumprimento do FIFO. Na configuração 2, os produtos da classe B são tidos em conta como *high runners* e os produtos da classe C como *medium runners*. O desempenho da configuração 2 indica que o armazenamento dos produtos da classe C como *medium runner* e os restantes produtos como *high runners* não tem um impacto grande nos resultados dos KPIs em estudo.

Por fim, comparando as configurações 3 e 4, estas destacam-se num dos KPIs em estudo. A configuração 3 consegue valores do incumprimento do FIFO muito próximos do zero, obtendo em média um incumprimento de 2% em cada descarregamento. Já relativamente à quantidade de para-choques que se movimentam a mais, os valores rondam os 37-36 para-choques (296 a 288 segundos necessários para extrair os para-choques movimentados a mais). Já a configuração 4, comparativamente à configuração 3, obtém resultados melhores no KPI dos para-choques movimentados, alcançando valores entre os 27 e 22 para-choques (216 a 176 segundos necessários para extrair os para-choques movimentados a mais). Por outro lado, a configuração 4 apresenta piores resultados no incumprimento do FIFO obtendo valores que rondam entre os 5% e 8% superiores aos 2% alcançados pela configuração 3

Nos gráficos seguintes, pretende-se avaliar o impacto na performance do armazém quando são alterados os limites de produtos por linha nas linhas de armazenamento de *medium runners*,

No gráfico da Figura 42 apresentam-se os resultados das configurações de armazenamento 2, 7 e 10. Nas configurações referidas, os produtos das classes A e B são armazenadas como *high runners* e os produtos da classe C como *medium runners*. As configurações 2, 7 e 10 apresentam nas linhas de armazenamento de *medium runners* o limite, por linha, de três, quatro e cinco tipos de produtos respetivamente.

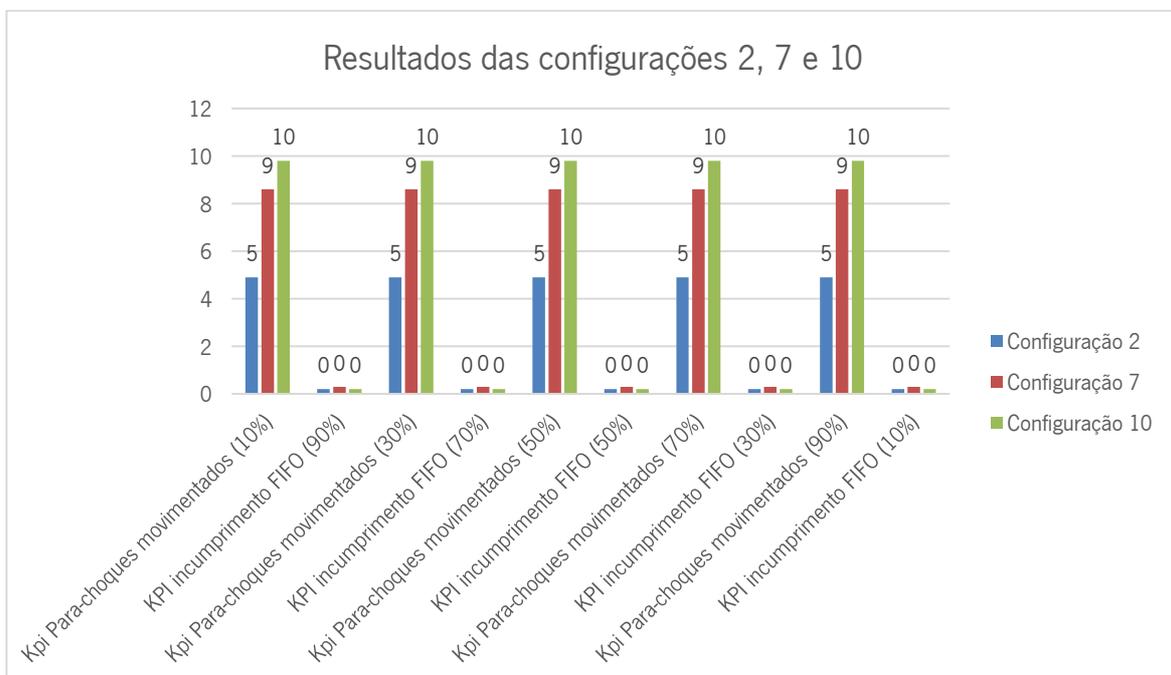


Figura 42 - Resultados das configurações 2, 7 e 10.

Os resultados revelam que a mudança dos pesos na função objetivo não tem impacto nos resultados obtidos. As configurações 2, 7 e 10 apresentam os valores do KPI relativo incumprimento do

FIFO reduzidos a zero. Porém no que toca ao KPI para-choques deslocados existem diferenças. Das três configurações em análise, a configuração 2 é a que apresenta o valor mais reduzido de para-choques movimentados, apresentando o resultado de 5 (40 segundos necessários para extrair os para-choques movimentados a mais). As configurações 7 e 10 apresentam valores muito próximos, contudo a configuração 10, cujo limite das linhas é de cinco produtos, é a que apresenta os piores resultados. Os resultados ilustram um agravamento dos indicadores à medida que se vai aumentando o limite de referências nas linhas de armazenamento de *medium runners*.

No gráfico da Figura 43 estão revelados os resultados dos indicadores das configurações de armazenamento 4, 8 e 11. As configurações mencionadas armazenam como *high runners* os produtos da classe A e como *medium runners* os produtos das classes B e C. As configurações 4, 8 e 11 apresentam nas linhas de armazenamento de *medium runners* o limite de tipos de produtos por linha de três, quatro e cinco, respetivamente.

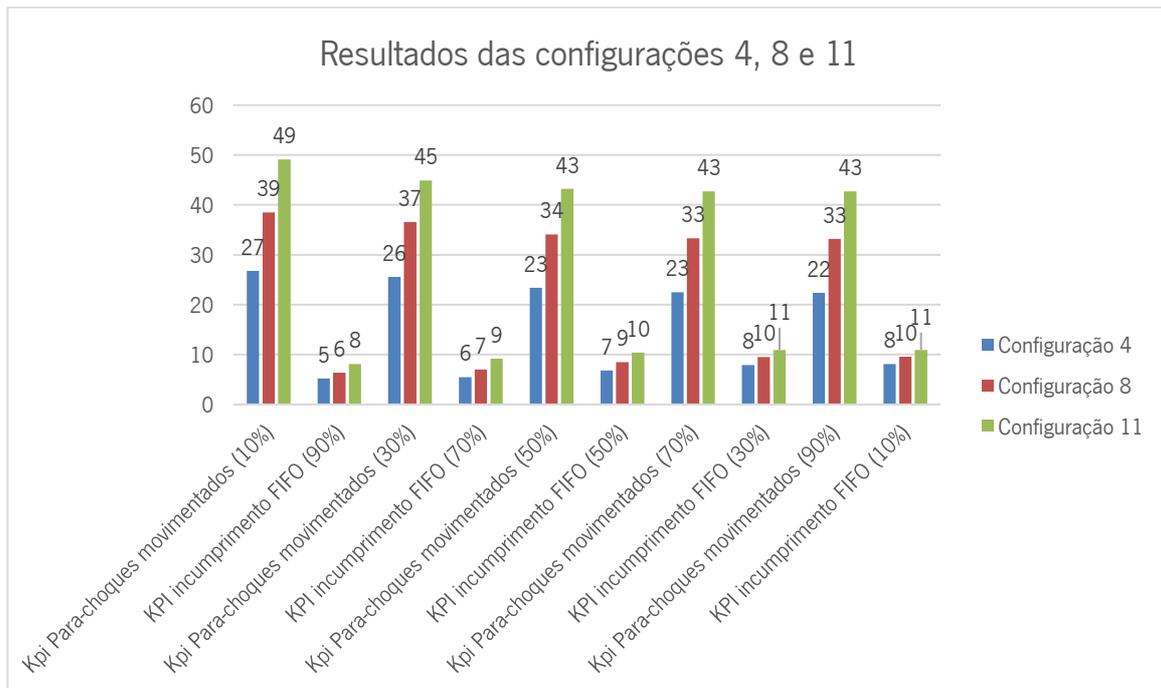


Figura 43 - Resultados das configurações 4, 8 e 11.

Os resultados do gráfico revelam que a alteração dos pesos na função objetivo não gera mudanças drásticas nos indicadores. Para além disso, constata-se que os indicadores são antagónicos, uma vez que a melhoria de um indicador resulta em piores resultados no outro.

Nos resultados destaca-se o número elevado de para-choques movimentados. A configuração 11, que apresenta limite de cinco tipos de produto nas linhas de armazenamento de *medium runners*, apresenta o valor maior de para-choques movimentados rondando entre os 49 e os 43 para-choques (392 a 344 segundos necessários para extrair os para-choques movimentados a mais). Em contrapartida,

a configuração 4, cujo limite nas linhas *medium runners* é de três produtos, apresenta o melhor resultado obtendo valores entre os 22 e 27 para-choques movimentados (176 a 216 segundos necessários para extrair os para-choques movimentados a mais). Relativamente aos valores do incumprimento do FIFO, os resultados evidenciam valores bastante próximos uns dos outros, sendo que, uma vez mais, a configuração 11 obteve os piores resultados e a configuração 4 os melhores resultados. Os resultados ilustram, mais uma vez, um agravamento dos indicadores à medida que se vai aumentando o limite de referências nas linhas de armazenamento de *medium runners*.

No gráfico da Figura 44 estão revelados os resultados dos indicadores das configurações de armazenamento 6, 9 e 12. As configurações armazenam como *high runners* os produtos da classe A, como *medium runners* os produtos das classes B e como *low runners* os produtos da classe C. As configurações 4, 8 e 11 apresentam nas linhas de armazenamento de *medium runners* o limite de tipos de produtos por linha de três, quatro e cinco, respetivamente.

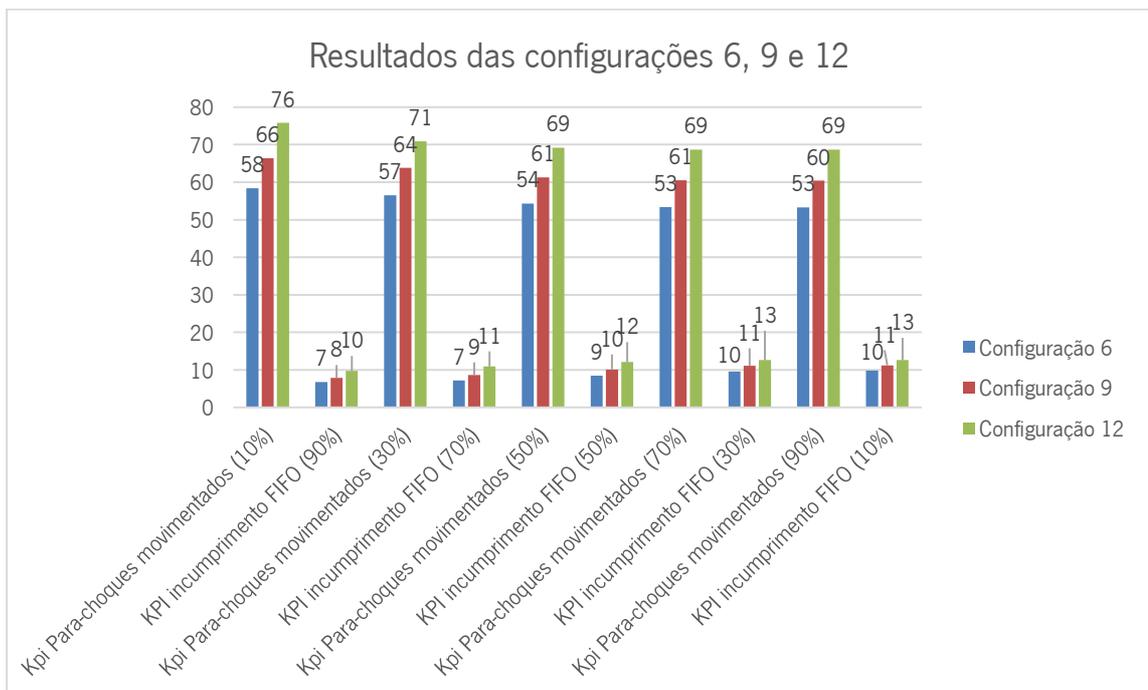


Figura 44 - Resultados das configurações 6, 9 e 12.

Mais uma vez, os resultados do gráfico revelam que a alteração dos pesos na função objetivo não gera mudanças elevadas nos indicadores. Consta-se mais uma vez o antagonismo entre os indicadores testados.

Analisando o gráfico, realça-se o número elevado de para-choques movimentados, obtendo quase o dobro dos valores alcançados no gráfico da Figura 43, em que são analisadas as configurações 4, 8, e 11. A configuração 12, que apresenta limite de cinco tipos de produtos nas linhas de armazenamento de *medium runners*, apresentam o maior número de para-choques movimentados

rondando entre os 76 e os 69 para-choques (608 a 552 segundos necessários para extrair os para-choques movimentados a mais). Em contrapartida, a configuração 6, cujo limite nas linhas *medium runners* é de três tipos de produtos, apresenta o melhor resultado obtendo valores entre os 58 e 53 para-choques movimentados (464 a 424 segundos necessários para extrair os para-choques movimentados a mais). Mais uma vez, no que concerne aos valores do incumprimento do FIFO, ao contrário dos valores do KPI para-choques movimentados, estes apresentam valores bastante próximos uns dos outros, sendo que, de novo, a configuração 12 obteve os piores resultados e a configuração 6 os melhores resultados. Confirma-se de novo um agravamento dos indicadores com o aumento do limite de referências nas linhas de armazenamento de *medium runners*.

De frisar que, excluindo a configuração 5 (configuração com piores resultados), as configurações 6, 9 e 12 são as piores soluções em estudo. Para além disso os números de para-choques movimentados a mais da configuração 12 aproximam-se bastante da configuração 5, possível de constatar no gráfico da Figura 45

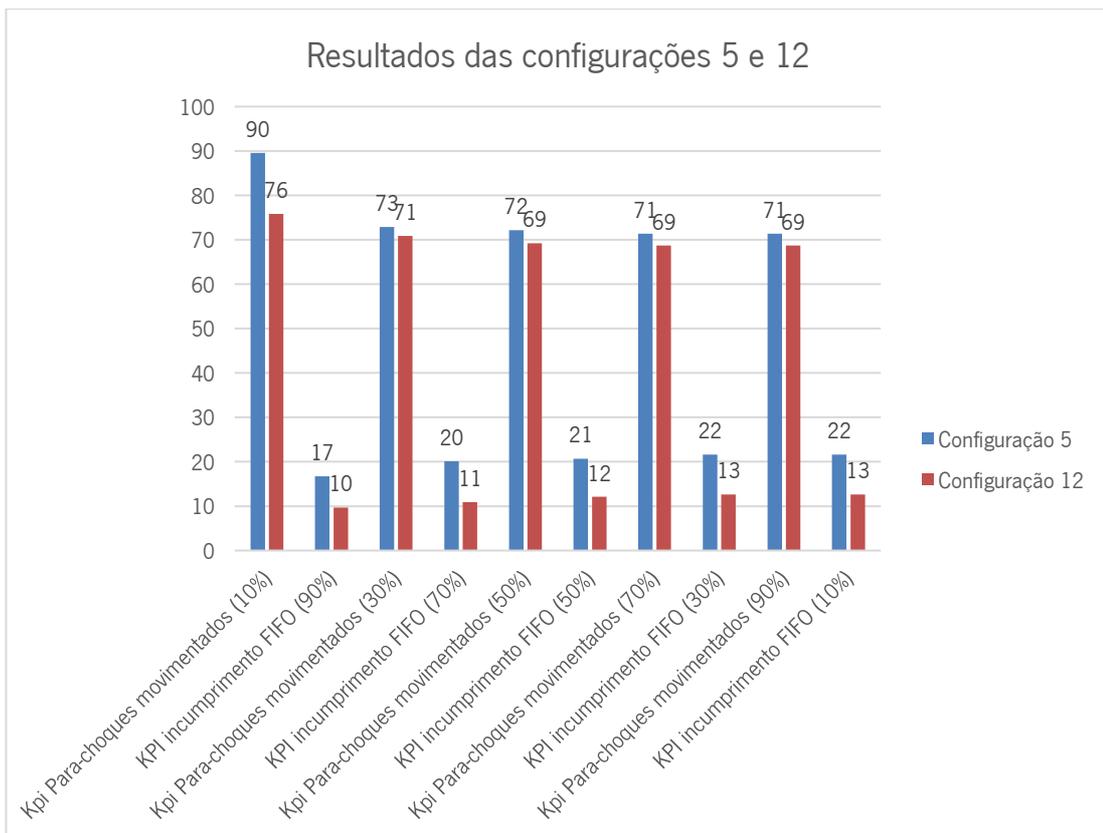


Figura 45 - Resultados das configurações 5 e 12.

Desta forma, a alocação planeada para as soluções 6, 9 e 12 não culmina num bom desempenho na eficiência do sistema de armazenamento.

5.3. Considerações sobre a aplicação das soluções analisadas e Propostas de alternativas

Tendo em conta a análise estabelecida na secção 5.2.2.2., é possível concluir que soluções apresentam maior vantagem para o armazém de alta densidade

A configuração 1, em que são considerados todos os produtos como *high runners*, obteve o melhor resultado possível nos KPIs, obtendo uma maior minimização do incumprimento do FIFO, da movimentação de para-choques a mais e, conseqüentemente os tempos de extração dos produtos movimentados a mais. A alocação dos produtos desta forma permite usufruir na íntegra das vantagens que este sistema de armazenamento tem para oferecer. Para além disso, a configuração 1 deveria ser a única solução a ter em conta, visto que a dinâmica do *Shopstocker* se assemelha bastante aos sistemas de armazenamento *Shuttle*, *Drive-In* e *Drive-Through*. Nos sistemas de armazenamento *Shuttle*, *Drive-In* e *Drive-through* são armazenados artigos do mesmo tipo no mesmo corredor de carga. Por isso, o mais indicado para o *Shopstocker* seria considerar as mesmas condições de armazenamento dos três sistemas de armazenamento mencionados.

Atualmente o sistema de armazenamento da empresa produtora de para-choques não apresenta linhas suficientes para armazenar cada referência individualmente nas linhas de armazenamento, visto que são armazenados 102 produtos e o armazém apresenta apenas 86 linhas de armazenamento. Como alternativa poder-se-iam adotar três hipóteses, das quais duas aplicam-se ao formato da linha para situações relativas a limitação de espaço.

1º Alternativa

A primeira alternativa seria expandir o armazém, com o objetivo de ampliar o número de linhas no sistema. A expansão do armazém requer investimento extra por parte da empresa, sendo necessário um estudo de análise do custo/benefício com a aplicação da alternativa.

2º Alternativa

Para as linhas de armazenamento de *low runners* e *medium runners* poderiam ser adotadas linhas em formato de carrossel. Na Figura 46 apresenta-se a ilustração de uma linha normal e uma linha em formato carrossel.

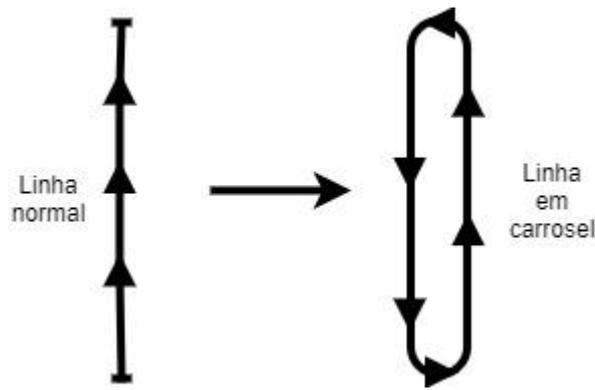


Figura 46 - Ilustração de uma linha normal e uma linha com formato carrossel.

Através de uma linha com formato de carrossel, poder-se-ia armazenar diferentes tipos de para-choques sem comprometer o cumprimento do FIFO e a movimentação de para-choques a mais para além dos solicitados. A introdução das linhas em carrossel necessitaria de investimento, e ainda a adaptação do layout do armazém. Estas questões podem motivar um estudo futuro, bem como uma avaliação do custo/benefício desta mesma aplicação.

3º Alternativa

A terceira alternativa poderia passar pela redução do tamanho das linhas. Na Figura 47 apresenta-se esquematizada a adaptação das linhas em termos de quantidade.

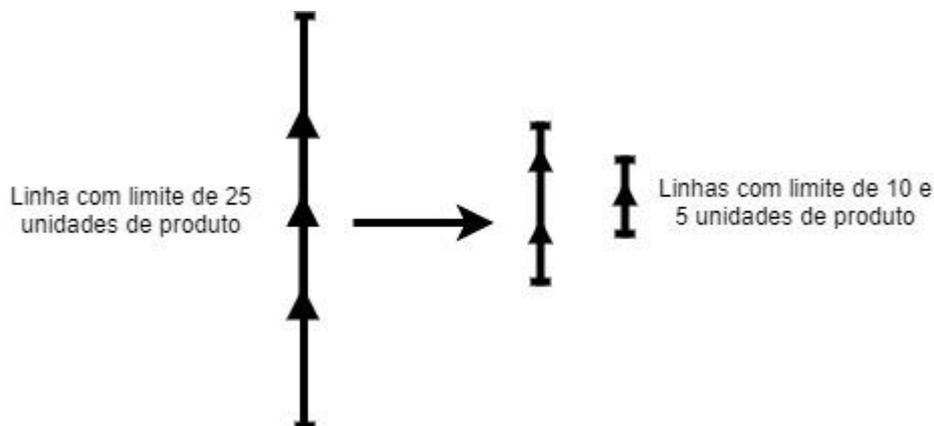


Figura 47 - Ilustração de linhas de diferentes capacidades.

O sistema de armazenamento apresenta todas as linhas com uma capacidade de armazenamento de vinte e cinco para-choques. Seria interessante a introdução de linhas com capacidades de armazenamento de um número inferior, como cinco a dez produtos., por exemplo. Desta forma, poder-se-ia afetar uma linha de armazenamento para um produto com pouca procura, evitando a existência de grandes áreas inutilizadas provenientes de linhas com poucos produtos armazenados.

À semelhança das restantes hipóteses, a aplicação da terceira alternativa requer investimento e uma adaptação do layout atual do sistema de armazenamento. Posteriormente, seria mais uma vez fundamental a elaboração de uma avaliação do custo/benefício com a aplicação da alternativa.

As configurações 2, 7 e 10, a seguir à configuração 1 e às alternativas apresentadas, são as soluções que apresentam melhores desempenhos. O incumprimento do FIFO atinge aproximadamente o valor zero em todas as configurações. Apresentam um número reduzido de para-choques movimentados a mais, variando entre os 5 e os 10 para-choques por descarregamento (40 a 80 segundos necessários para extrair os para-choques movimentados a mais).

As configurações 3 e 4 apresentam os melhores resultados posteriormente à configuração 2, 7 e 10. A configuração 3 apresenta valores de incumprimento do FIFO os 2%. No que toca aos para-choques movimentados desnecessariamente, existe um aumento considerável relativamente às configurações 1, 2, 7 e 10. Se houver uma maior valorização do KPI referente ao FIFO a configuração seria preferível à configuração 4. A configuração 4, por outro lado, tem um melhor desempenho no KPI relativo aos para-choques movimentados relativamente à configuração 3. Desta forma, se houver um maior foco na redução de para-choques movimentados a mais, a configuração 4 superaria os resultados da configuração 3.

Considera-se por fim que a aplicação das configurações 5, 6, 8, 9, 11 e 12, tendo em conta os resultados das configurações destacadas anteriormente, resulta em perdas de performance do sistema de armazenamento. O número de para-choques movimentados apresenta valores elevados relativamente às configurações com melhores desempenho, apresentando entre 43 a 90 para-choques movimentados a mais. Tendo em conta que os valores do KPI referido são relativos a um descarregamento, se a empresa proceder a diversos descarregamentos ao longo do dia, acabam por acontecer centenas deslocações desnecessárias. O número elevado de produtos movimentados a mais culmina em tempos maiores de extração dos produtos solicitados que impacta o KPI *takt time*. Para além disso, o incumprimento do FIFO ronda os 6% chegando até mesmo aos 22%, culminando assim numa degradação da performance do sistema de armazenamento.

6. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

O principal objetivo do estudo desenvolvido consistiu em melhorar a eficiência no armazenamento, através do estudo da afetação dos produtos num armazém automático de alta densidade. Para além disso, analisou-se o método de classificação de produtos utilizado pela empresa.

Para atingir os objetivos realizou-se numa primeira instância uma revisão da literatura acerca dos temas relacionadas à problemática do projeto. Esta etapa do estudo mostrou-se fundamental para analisar o sistema e desenvolver soluções para os problemas identificados, de um modo mais objetivo e sistemático, e apresentando métodos para a resolução dos problemas reconhecidos cientificamente.

Realizou-se um diagnóstico da atual política de armazenamento aplicada no armazém. Tendo por base as problemáticas identificadas, foram desenvolvidas propostas de melhoria de modo a colmatar as ineficiências encontradas.

Dos problemas reconhecidos destaca-se a ambiguidade dos critérios de classificação dos produtos que gera dúvidas na classificação, e a praticabilidade da atual classificação, uma vez que esta deve ser atualizada de semanalmente.

Para ultrapassar as ineficiências encontradas, sugeriu-se aplicação de uma política de armazenamento baseada em classes seguindo a regra de Pareto. A análise ABC apresenta-se sob o critério de quantidade de solicitações efetuadas de cada produto.

Os resultados obtidos com a aplicação da regra de Pareto, foram utilizados na fase seguinte. Esta consistiu no planeamento de diferentes formas de alocar os produtos nas linhas de armazenamento. As alocações tiveram por base as características de armazenamento dos *high runners*, *medium runners* e *low runners*, classes do método de classificação da empresa. Para avaliar as diferentes configurações de armazenamento, elaborou-se um modelo matemático que representasse o processo de *picking* do sistema de armazenamento. No modelo, foram selecionados dois indicadores para otimizar os indicadores relativos incumprimento do FIFO, e à quantidade de para-choques deslocados para além dos para-choques solicitados.

Os resultados das experiências computacionais revelaram que a solução com melhor performance é a configuração 1, em que cada tipo de produto é alocado individualmente nas linhas de armazenamento. Desta forma, consegue-se otimizar os dois indicadores testados. Para além disso, devido às semelhanças com outros sistemas de armazenamentos presentes na revisão bibliográfica como o sistema de armazenamento *Shuttle*, conclui-se que esta seria a única forma correta de alocar os

produtos, visto que no sistema de armazenamento *Shuttle* geralmente se armazena um único tipo de produto no corredor de carga.

Com as condições atuais do armazém não é possível de aplicar a configuração 1, visto que, as referências existentes excedem o número de linhas de armazenamento. Uma forma de contornar a limitação encontrada passa pela expansão do sistema de armazenamento através do aumento do número de linhas de armazenagem. Como alternativas à limitação de espaço disponível para expandir o sistema de armazenamento, surgiram duas hipóteses que consistem em alterar o formato das linhas. A primeira alternativa consiste na aplicação de linhas em carrossel, podendo com esta alternativa misturar produtos com menos procura sem apresentar impactos nos dois indicadores em estudo. A segunda alternativa consiste na redução do limite de vinte e cinco produtos para linhas com limite de dez ou cinco produtos. Desta forma, poderiam aumentar o número de linhas no armazém e, armazenar produtos com menos procura em linhas de menor amplitude. As três hipóteses referidas acarretam um investimento extra no sistema de armazenamento. Assim sendo, seria útil para a empresa fazer um estudo sobre os custos e benefícios com a aplicação das alternativas e, posteriormente, avaliar se o investimento compensa comparativamente às alternativas menos vantajosas.

Considera-se que as configurações 2, 7 e 10, a seguir à configuração 1 e alternativas propostas, são as que obtêm melhores resultados em termos de performance do armazém. As soluções alocam um único tipo de produto a cada linha de armazenamento quando este apresenta a classe A ou B. Os produtos da classe C são alocados em linhas de armazenamento que sustentam três a cinco tipos de produtos diferentes. Os resultados revelam um incumprimento do FIFO de aproximadamente 0% e valores de para-choques movimentados a mais que não ultrapassam os 10 produtos por cada descarregamento de cem para-choques. As restantes soluções apresentam resultados de incumprimento do FIFO que variam desde os 2% até aos 22% e números de para-choques movimentados a mais que variam entre os 22 e 90 produtos por descarregamento.

Durante a realização do estudo num contexto real surgiram, inevitavelmente, dificuldades e limitações, nomeadamente no que diz respeito à extração de informação da empresa de para-choques sobre as políticas de armazenamento. Existem limitações no modelo matemático desenvolvido. O modelo matemático é um modelo estático e, por essa razão, as sequências de procura foram testadas separadamente com as mesmas configurações de armazenamento. Por fim, a última limitação encontrada surge nas experiências computacionais. Apenas foi possível testar dez sequências da procura de produtos, sendo que o ideal seria avaliar um maior número de sequências.

Como trabalho futuro, sugere-se a requisição das restantes informações sobre a política de armazenamento aplicada na empresa para que seja possível fazer uma análise mais completa. Aliado ao trabalho referido anteriormente, sugere-se a implementação de uma política de armazenagem baseada em classes seguindo a regra de Pareto. Seria ainda essencial fazer uma análise para perceber se ocorreram melhorias na eficiência do armazém com a aplicação de uma nova política de armazenamento comparativamente à política de armazenamento atualmente aplicada. Sugere-se a realização de um modelo de simulação, tendo em vista a resolução das limitações que surgem no modelo matemático. Com a aplicação de um modelo de simulação, espera-se perceber o comportamento do sistema de armazenamento num contexto dinâmico. A realização de experiências computacionais com mais sequências de procura seria benéfica para o estudo, tendo como objetivo alcançar uma maior precisão nos resultados. Por fim, como último trabalho futuro, sugere-se a realização de um estudo de custo benefício com a aplicação das soluções e alternativas apresentadas.

BIBLIOGRAFIA

- Alamri, A. A., & Syntetos, A. A. (2018). Beyond LIFO and FIFO: Exploring an Allocation-In-Fraction-Out (AIFO) policy in a two-warehouse inventory model. *International Journal of Production Economics*, 206(March 2017), 33–45. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2018.09.025>
- Barreto, L., Amaral, A., & Pereira, T. (2017). Costing models for capacity optimization in Industry Trade-off between used capacity and operational efficiency. *Procedia Manufacturing*, 13, 1245–1252. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.09.045>
- Berg, J. P. V. Den, & Zijm, W. H. M. (1999). Models for warehouse management: Classification and examples. *International Journal of Production Economics*, 59(1), 519–528. [https://doi.org/10.1016/S0925-5273\(98\)00114-5](https://doi.org/10.1016/S0925-5273(98)00114-5)
- Brettel, M., Friederichsen, N., Keller, M., & Rosenberg, M. (2014). How Virtualization , Decentralization and Network Building Change the Manufacturing Landscape : *International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial and Mechatronics Engineering*, 8(1), 37–44.
- Caron, F., Marchet, G., & Perego, A. (1998). Routing policies and COI-based storage policies in picker-to-part systems. *International Journal of Production Research*, 36(3), 713–732. <https://doi.org/10.1080/002075498193651>
- Carvalho, J. C. de, Guedes, A. P., Arantes, A., Martins, A., Póvoa, A., Luis, C., Dias, E., Dias, J., Menezes, J., Carvalho, J., Ferreira, L., Carvalho, M., Oliveira, R., Azevedo, S., & Ramos, T. (2010). *Logística e Gestão da Cadeia de Abastecimento* (1ª). Edições Silabo.
- Chan, F. T. S., & Chan, H. K. (2011). Improving the productivity of order picking of a manual-pick and multi-level rack distribution warehouse through the implementation of class-based storage. *Expert Systems with Applications*, 38(3), 2686–2700. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2010.08.058>
- de Koster, R., Le-Duc, T., & Roodbergen, K. J. (2007). Design and control of warehouse order picking: A literature review. *European Journal of Operational Research*, 182(2), 481–501. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.07.009>
- Drury, J., Falconer, P., & Heery, G. (2003). *Buildings for Industrial Storage and Distribution* (2nd Editio). Routledge. <https://doi.org/https://doi.org/10.4324/9780080548364>
- Foroughi, A., Boysen, N., Emde, S., & Schneider, M. (2020). High-density storage with mobile racks: Picker routing and product location. *Journal of the Operational Research Society*, 1–19. <https://doi.org/10.1080/01605682.2019.1700180>
- Frazelle, E. (2002). *World-Class Warehousing and Material Handling*. McGraw-Hill.
- Georgiadis, M. C., Schilling, G., Rotstein, G. E., & MacChietto, S. (1999). A general mathematical programming approach for process plant layout. *Computers and Chemical Engineering*, 23(7), 823–840. [https://doi.org/10.1016/S0098-1354\(99\)00005-8](https://doi.org/10.1016/S0098-1354(99)00005-8)
- Gorecky, D., Schmitt, M., Loskyll, M., & Zühlke, D. (2014). Human-Machine-Interaction in the Industry 4 . 0 Era. *12th IEEE International Conference on Industrial Informatics*, 289–294. <https://doi.org/10.1109/INDIN.2014.6945523>
- Govindan, K., Cheng, T. C. E., Mishra, N., & Shukla, N. (2018). Big data analytics and application for logistics and supply chain management. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 114(March), 343–349. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2018.03.011>
- Gu, J., Goetschalckx, M., & McGinnis, L. F. (2007). Research on warehouse operation: A comprehensive review. *European Journal of Operational Research*, 177(1), 1–21. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.02.025>
- Gu, J., Goetschalckx, M., & McGinnis, L. F. (2010). Research on warehouse design and performance evaluation: A comprehensive review. *European Journal of Operational Research*, 203(3), 539–549. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2009.07.031>

- Gue, K. R. (2006). Very high density storage systems. *IIE Transactions (Institute of Industrial Engineers)*, 38(1), 79–90. <https://doi.org/10.1080/07408170500247352>
- Hausman, W. (1976). Optimal Storage Assignment in Automatic Warehousing Systems. *Management Science*, 22(6), 629–638.
- Hazen, B. T., Boone, C. A., Ezell, J. D., & Jones-Farmer, L. A. (2014). Data quality for data science, predictive analytics, and big data in supply chain management: An introduction to the problem and suggestions for research and applications. *International Journal of Production Economics*, 154, 72–80. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2014.04.018>
- Hermann, M., Pentek, T., & Otto, B. (2016). Design principles for industrie 4.0 scenarios. *Proceedings of the Annual Hawaii International Conference on System Sciences, 2016-March*, 3928–3937. <https://doi.org/10.1109/HICSS.2016.488>
- Hertog, M. L. A. T. M., Uysal, I., McCarthy, U., Verlinden, B. M., & Nicolai, B. M. (2014). Shelf life modelling for first-expired-first-out warehouse management. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 372(2017). <https://doi.org/10.1098/rsta.2013.0306>
- Hlström, P., & Westbrook, R. (1999). Implications of mass customization for operations management: An exploratory survey. *International Journal of Operations and Production Management*, 19(3), 262–275. <https://doi.org/10.1108/01443579910249705>
- Hofmann, E., & Rüsçh, M. (2017). Industry 4.0 and the current status as well as future prospects on logistics. *Computers in Industry*, 89, 23–34. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2017.04.002>
- Knauf Industries, A. (2020). *De para-choques de metal a plástico: em busca do equilíbrio entre estética e segurança*. <https://knaufautomotive.com/pt-br/de-para-choques-de-metal-a-plastico-em-busca-do-equilibrio-entre-estetica-e-seguranca/>
- KNIME. (2020). *KNIME Software*. <https://www.knime.com/software-overview>
- Leithner, M., & Fikar, C. (2019). A simulation model to investigate impacts of facilitating quality data within organic fresh food supply chains. *Annals of Operations Research*. <https://doi.org/10.1007/s10479-019-03455-0>
- Li, H., & Meissner, J. (2010). Distribution and Warehousing in Supply Chains. In *The Handbook of Technology Management: Supply Chain Management, Marketing and Advertising, and Global Management* (Volume II, p. 931). John Wiley & Sons.
- Manavalan, E., & Jayakrishna, K. (2019). A review of Internet of Things (IoT) embedded sustainable supply chain for industry 4.0 requirements. *Computers and Industrial Engineering*, 127, 925–953. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.11.030>
- Muppani (Muppant), V. R., & Adil, G. K. (2008). A branch and bound algorithm for class based storage location assignment. *European Journal of Operational Research*, 189(2), 492–507. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2007.05.050>
- Pang, K. W., & Chan, H. L. (2017). Data mining-based algorithm for storage location assignment in a randomised warehouse. *International Journal of Production Research*, 55(14), 4035–4052. <https://doi.org/10.1080/00207543.2016.1244615>
- Piller, F. T., & Tseng, M. M. (2009). *HANDBOOK OF RESEARCH IN MASS CUSTOMIZATION AND PERSONALIZATION* (2nd ed.). World Scientific Publishing Company.
- Pine, J. (1993). *Mass Customization: The New Frontier in Business Competition*. Harvard Business School Press.
- Potts, C. N., & Whitehead, J. D. (2001). Workload balancing and loop layout in the design of a flexible manufacturing system. *European Journal of Operational Research*, 129(2), 326–336. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(00\)00230-7](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(00)00230-7)
- Provost, F., & Fawcett, T. (2015). *Data Science for Business*. O'Reilly Media.
- Roodbergen, K. J., & Vis, I. F. A. (2009). A survey of literature on automated storage and retrieval systems.

- European Journal of Operational Research*, 194(2), 343–362.
<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2008.01.038>
- Sarker, R. A. & N. C. S. (2008). *A Practical Approach for Optimization Modelling*. CRC Press.
- Schwab, K. (2017). *The Fourth Industrial Revolution*. Currency.
- Server, N. (2020). *NEOS Server*. <https://neos-server.org/neos/>
- Stadtler, H. (2005). Supply chain management and advanced planning - Basics, overview and challenges. *European Journal of Operational Research*, 163(3), 575–588.
<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2004.03.001>
- Stock, T., & Seliger, G. (2016). Opportunities of Sustainable Manufacturing in Industry 4.0. *Procedia CIRP*, 40(1cc), 536–541. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.01.129>
- Tang, C. S., & Veelenturf, L. P. (2019). The strategic role of logistics in the industry 4.0 era. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 129(June), 1–11.
<https://doi.org/10.1016/j.tre.2019.06.004>
- Wild, T. (2002). *Best Practice in Inventory Management* (2nd ed.). Butterworth-Heinemann.

APÊNDICE I – PRODUTOS CLASSIFICADOS PELO MÉTODO ABC

Tabela 10 - Classificação ABC (especificações de cada produto)

Número	Percentagem acumulada de produtos	Reference	Procura	Valores acumulados da procura	Percentagem acumulada da procura	Classe
1	1,0%	7214030100128	2344	2344	8,0%	A
2	2,0%	7214030100182	2263	4607	15,7%	A
3	2,9%	7214030100198	2246	6853	23,3%	A
4	3,9%	7210000100198	2023	8876	30,2%	A
5	4,9%	7210000100111	1986	10862	37,0%	A
6	5,9%	7210000100223	1047	11909	40,6%	A
7	6,9%	7210000100222	960	12869	43,8%	A
8	7,8%	7206340100182	894	13763	46,9%	A
9	8,8%	7214030100223	867	14630	49,8%	A
10	9,8%	7219000100198	752	15382	52,4%	A
11	10,8%	7206340100198	741	16123	54,9%	A
12	11,8%	7210000100182	665	16788	57,2%	A
13	12,7%	7210000100142	652	17440	59,4%	A
14	13,7%	7210000100224	630	18070	61,6%	A
15	14,7%	7214030100222	541	18611	63,4%	A
16	15,7%	7210000100199	505	19116	65,1%	A
17	16,7%	7236590100198	470	19586	66,7%	A
18	17,6%	7206340100128	469	20055	68,3%	A
19	18,6%	7214030100111	469	20524	69,9%	A
20	19,6%	7219010100128	447	20971	71,4%	A
21	20,6%	7219010100198	441	21412	73,0%	A
22	21,6%	7214030100199	371	21783	74,2%	A
23	22,5%	7206340100222	308	22091	75,3%	B
24	23,5%	7219000100182	307	22398	76,3%	B
25	24,5%	7219000100222	299	22697	77,3%	B
26	25,5%	7236590100128	292	22989	78,3%	B
27	26,5%	7206340100217	276	23265	79,3%	B
28	27,5%	7214030100217	274	23539	80,2%	B
29	28,4%	7236590100251	258	23797	81,1%	B
30	29,4%	7236590100207	255	24052	81,9%	B
31	30,4%	7219000100223	237	24289	82,8%	B
32	31,4%	7214030100142	226	24515	83,5%	B
33	32,4%	7219000100224	200	24715	84,2%	B
34	33,3%	7206340100223	199	24914	84,9%	B
35	34,3%	7206340100142	194	25108	85,5%	B
36	35,3%	7219010100182	186	25294	86,2%	B
37	36,3%	7219010100217	181	25475	86,8%	B

38	37,3%	7210000100203	169	25644	87,4%	B
39	38,2%	7214030100226	156	25800	87,9%	B
40	39,2%	7210000100220	143	25943	88,4%	B
41	40,2%	7210000100208	136	26079	88,9%	B
42	41,2%	7219000100229	132	26211	89,3%	B
43	42,2%	7219000100208	127	26338	89,7%	B
44	43,1%	7219000100226	122	26460	90,2%	B
45	44,1%	7184750100198	121	26581	90,6%	B
46	45,1%	7206520100128	120	26701	91,0%	B
47	46,1%	7206520100198	116	26817	91,4%	B
48	47,1%	7210000100226	111	26928	91,7%	B
49	48,0%	7214030100209	110	27038	92,1%	B
50	49,0%	7219010100222	109	27147	92,5%	B
51	50,0%	13013463	105	27252	92,8%	B
52	51,0%	7219010100111	104	27356	93,2%	B
53	52,0%	7219000100199	101	27457	93,5%	C
54	52,9%	7206340100199	95	27552	93,9%	C
55	53,9%	7236590100182	86	27638	94,2%	C
56	54,9%	7184750100182	82	27720	94,4%	C
57	55,9%	7219010100199	82	27802	94,7%	C
58	56,9%	7219000100111	80	27882	95,0%	C
59	57,8%	7219010100223	80	27962	95,3%	C
60	58,8%	7206340100111	78	28040	95,5%	C
61	59,8%	7236590100217	70	28110	95,8%	C
62	60,8%	7206520100182	62	28172	96,0%	C
63	61,8%	7184750100111	60	28232	96,2%	C
64	62,7%	7219000100142	60	28292	96,4%	C
65	63,7%	7184750100223	58	28350	96,6%	C
66	64,7%	7214030100203	54	28404	96,8%	C
67	65,7%	7219010100142	54	28458	97,0%	C
68	66,7%	7206340100209	53	28511	97,1%	C
69	67,6%	7219010100209	51	28562	97,3%	C
70	68,6%	7206340100226	50	28612	97,5%	C
71	69,6%	7236590100209	47	28659	97,6%	C
72	70,6%	13013808	43	28702	97,8%	C
73	71,6%	7184750100222	43	28745	97,9%	C
74	72,5%	7219000100203	42	28787	98,1%	C
75	73,5%	7219000100220	42	28829	98,2%	C
76	74,5%	13013457	38	28867	98,4%	C
77	75,5%	13013327	37	28904	98,5%	C
78	76,5%	7236590100199	37	28941	98,6%	C
79	77,5%	7184750100221	36	28977	98,7%	C
80	78,4%	7184750100224	33	29010	98,8%	C
81	79,4%	7206340100203	32	29042	98,9%	C
82	80,4%	13013329	29	29071	99,0%	C
83	81,4%	7206520100217	27	29098	99,1%	C

84	82,4%	7206520100222	25	29123	99,2% C
85	83,3%	7206520100111	24	29147	99,3% C
86	84,3%	13013451	18	29165	99,4% C
87	85,3%	7206520100199	17	29182	99,4% C
88	86,3%	7206520100209	17	29199	99,5% C
89	87,3%	7219010100226	17	29216	99,5% C
90	88,2%	7184750100203	16	29232	99,6% C
91	89,2%	7206520100142	16	29248	99,6% C
92	90,2%	7206520100223	15	29263	99,7% C
93	91,2%	7184750100142	15	29278	99,8% C
94	92,2%	7219010100203	12	29290	99,8% C
95	93,1%	13012990	11	29301	99,8% C
96	94,1%	13014080	11	29312	99,9% C
97	95,1%	7184750100199	10	29322	99,9% C
98	96,1%	7184750100220	9	29331	99,9% C
99	97,1%	7184750100208	7	29338	100,0% C
100	98,0%	7206520100203	6	29344	100,0% C
101	99,0%	7206520100226	5	29349	100,0% C
102	100,0%	7184750100226	2	29351	100,0% C

APÊNDICE II – SCRIPT DO MODELO DESENVOLVIDO EM LINGUAGEM AMPL

```
#MODELO EM LINGUAGEM AMPL

param N_ordem;
param N_tipoparach;
param N_parachos;
param N_lines;
param N_prof;
param N_seq;

set O:={1..N_ordem};
set R:={1..N_tipoparach};
set N:={1..N_parachos};
set L:={1..N_lines};
set P:={1..N_prof};
set S:={1..N_seq};

param arm{i in N, j in 1..4};
param seq{s in N, k in 1..3};

var x{i in N, s in S},binary;
var y{l in L, p in P},>=0;
var mov{l in L},>=0;
var FIFO{j in S},binary;
var w{r in R, o in O},>=0;

minimize parachos_mov: 0.5*(sum{l in L}mov[l]-sum{i in N, s in S}x[i,s]) + 0.5*(sum{j in S}(1-FIFO[j]));

s.t. Afet_Pal{i in N}:sum{s in S}x[i,s]<=1;
s.t. Afet_Seq{s in S}:sum{i in N}x[i,s]=1;
s.t. Ref_{i in N, s in S}: arm[i,1]*x[i,s]=seq[s,1]*x[i,s];
s.t. Seq_Prof_0{i in N, s in S}:x[i,s]=1==>y[arm[i,2],arm[i,3]]=seq[s,2];
s.t. Seq_Prof_1{l in L, p in 1..N_prof-1}:y[l,p]<=y[l,p+1];
s.t. act_Y_movx{i in N, s in S}: mov[arm[i,2]]>= arm[i,3]*x[i,s];
s.t. cumprimento_fifo{i in N, s in S}: FIFO[s]=1==> x[i,s]*arm[i,4]<= x[i,s]*seq[s,3];
s.t. Ordem_ref{i in N, s in S}:x[i,s]=1==>w[arm[i,1],arm[i,4]]=seq[s,3];
s.t. Ordem_refl{r in R, o in 1..N_ordem-1}: w[r,o]<=w[r,o+1];
```

Figura 48 - Script do modelo matemático desenvolvido em linguagem AMPL