

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

CAMPUS SOROCABA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO DE SOROCABA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO DE  
SOROCABA

LUCAS ERIC DA SILVA

**AVALIAÇÃO E SELEÇÃO SIMULTÂNEA DO *LAYOUT* E POLÍTICAS DE  
CONTROLE OPERACIONAIS EM ARMAZÉNS POR MEIO DE MCDA E SED**

Sorocaba

2019

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

CAMPUS SOROCABA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO DE SOROCABA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO DE  
SOROCABA

LUCAS ERIC DA SILVA

**AVALIAÇÃO E SELEÇÃO SIMULTÂNEA DO *LAYOUT* E POLÍTICAS DE  
CONTROLE OPERACIONAIS EM ARMAZÉNS POR MEIO DE MCDA E SED**

Texto apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção de Sorocaba, para realização do Exame de Defesa, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

Orientação: Prof. Dr. José Geraldo Vidal Vieira

Coorientador: Prof. Dr. João Eduardo Azevedo  
Ramos da Silva

Sorocaba

2019

da Silva, Lucas Eric

AValiação e Seleção Simultânea do Layout e Políticas  
de Controle Operacionais em Armazéns por Meio de  
MCDA e SED / Lucas Eric da Silva. -- 2019.  
181 f. : 30 cm.

Dissertação (mestrado)-Universidade Federal de São Carlos, campus  
Sorocaba, Sorocaba  
Orientador: José Geraldo Vidal Vieira  
Banca examinadora: Gilberto Montibeller Neto, Renato da Silva Lima  
Bibliografia

1. Projeto do armazém. 2. MCDA. 3. Simulação de eventos discretos. I.  
Orientador. II. Universidade Federal de São Carlos. III. Título.

Ficha catalográfica elaborada pelo Programa de Geração Automática da Secretaria Geral de Informática (SIn).

DADOS FORNECIDOS PELO(A) AUTOR(A)

Bibliotecário(a) Responsável: Maria Aparecida de Lourdes Mariano – CRB/8 6979



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**

Centro de Ciências em Gestão e Tecnologia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção

---

**Folha de Aprovação**

---

Assinaturas dos membros da comissão examinadora que avaliou e aprovou a Defesa de Dissertação de Mestrado do candidato Lucas Eric da Silva, realizada em 03/09/2019:

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. José Geraldo Vidal Vieira  
UFSCar

\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Gilberto Montibeller Neto  
LBORO

\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Renato da Silva Lima  
UNIFEI

Certifico que a defesa realizou-se com a participação à distância do(s) membro(s) Gilberto Montibeller Neto, Renato da Silva Lima e, depois das arguições e deliberações realizadas, o(s) participante(s) à distância está(ao) de acordo com o conteúdo do parecer da banca examinadora redigido neste relatório de defesa.

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. José Geraldo Vidal Vieira

*“Ninguém pode voltar atrás e fazer um novo começo.  
Mas qualquer um pode recomeçar e fazer um novo fim.”*  
*(Chico Xavier)*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela oportunidade de fazer a pós-graduação na Ufscar e concluir assim mais uma etapa da minha passagem por este plano.

À minha família: Dito, Maria, Tati, Fabio, Rebeca e Gabriel pelo amor, pelo pilar de sustentação, pelas orações e pelas palavras de carinho e motivação sempre que precisei.

À Stefani pelo amor, apoio, compreensão, parceria e carinho.

A todos meus amigos e colegas de mestrado. Em especial ao amigo Luís Felipe pelo companheirismo, paciência, críticas construtivas, explicações a respeito de simulação e parceria na vida acadêmica. Em especial ao amigo Claudio pelos anos de amizade, apoio e tempo dedicado.

Ao meu orientador, Professor José Geraldo Vidal Vieira pela dedicação em me conduzir em todo este processo, estando aberto às ideias e oferecendo críticas construtivas a todo momento. Pelas oportunidades oferecidas, conselhos e paciência.

Ao meu coorientador, Professor João Eduardo Azevedo Ramos da Silva, pela dedicação e paciência em me ensinar SED e participar ativamente da construção da minha dissertação. Pelos conselhos, paciência e abertura.

À banca examinadora, Professor Gilberto Montibeller e Professor Renato Silva, pelas contribuições e críticas construtivas.

À Ufscar e seus funcionários. Em especial à Érica e o Felipe pela atenção e dedicação de sempre.

À CAPES pela bolsa acadêmica de estudos.

## RESUMO

DA SILVA, Lucas Eric. Avaliação e seleção simultânea do *layout* e políticas de controle operacionais em armazéns por meio de MCDA e SED. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção – Universidade Federal de São Carlos, *campus* Sorocaba, Sorocaba, 2019).

Decisões a respeito do *layout*, que têm cunho estratégico, e políticas de controle operacionais, de cunho tático a operacional, afetam os critérios de desempenho do armazém (custos, taxa de movimentação, capacidade de armazenagem e tempo de resposta). Tais decisões quando tomadas não permitem uma fácil alteração, devido a transtornos que possam trazer à operação e ao cliente final, ou por limitações físicas. Logo, devem ser pensadas já na fase de projeto e de maneira simultânea, pois a combinação entre suas possíveis alternativas leva a diferentes resultados. Por outro lado, estas decisões possuem um caráter multicritério envolvendo *trade-offs* que os gestores devem analisar em função dos objetivos da empresa. Ainda, questões como o comportamento estocástico do perfil da demanda, o congestionamento da atividade de separação e as incertezas dos cenários que a operação pode enfrentar, também devem ser consideradas na fase de projeto. Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo propor uma metodologia de avaliação e seleção da combinação robusta entre alternativas de arranjo de *layout* e políticas de controle operacionais (estocagem, separação e roteirização). O modelo é composto por: (1) um modelo de simulação de eventos discretos (SED) para capturar o caráter estocástico dos parâmetros da operação (tempo entre chegada dos pedidos, variação do tempo entre chegada dos pedidos e tamanho da lista de pedidos), congestionamento e fazer a análise quantitativa das diferentes combinações; (2) um modelo de análise de decisão multicritério (ou Multicriteria Decision Analysis - MCDA) de modo contemplar os *trade-offs* entre os diferentes critérios e os objetivos/preferências dos tomadores de decisão, incorporando planejamento de cenários. Os resultados parecem ser úteis para operações de pequeno porte e podem contribuir para o desenvolvimento de novos projetos considerando incertezas e a preferência dos decisores. Para a academia, os resultados trazem a proposição de uma metodologia que analisa, conjuntamente, decisões em diferentes níveis por meio da combinação de métodos, até então não utilizados para operações em centros de distribuição, e que pode ainda servir para fomentar pesquisas sob a ótica de logística de distribuição.

Palavras-chave: Projeto do armazém. *Layout*. Políticas de controle operacionais. MCDA. Simulação de eventos discretos.

## ABSTRACT

Strategic decisions such as layout and tactical and operational decisions such as control policies affect warehouse performance criteria (costs, throughput, storage capacity and response time). Once taken, these decisions do not allow an easy alteration due to inconvenience to the operation and the end customer, or physical limitations. Therefore, they should be considered at the design phase and simultaneously, since the combination of their possible alternatives leads to different results. On the other hand, these decisions have a multicriteria aspect involving trade-offs that managers must analyze according to the market in which the company is inserted. Yet, the stochastic behavior of the demand profile, the picking activity congestion and the uncertainties of the scenarios that the operation may face should also be considered in the design phase. Thus, the present work aims to propose a methodology for evaluation and selection of the robust combination between aisle layout and operational control policies (storage, picking and routing) alternatives. The model consists of: (1) a discrete event simulation (SED) model to capture the stochastic character of the operation parameters (order arrival time, order arrival time variation, and order list size), congestion and make a quantitative analysis of the different combinations; (2) a multicriteria decision analysis (or MCDA) model in order to contemplate trade-offs between different criteria and objectives / preferences of decision makers, incorporating scenario planning. The results appear to be useful for small operations and may contribute to the development of new projects considering uncertainties and decision makers' preference. For the academy, the results bring the proposition of a methodology that jointly analyzes decisions at different levels through the combination of methods, previously unused for operations in distribution centers, and which can also serve to foster research from the perspective of distribution logistics.

Keywords: Warehouse design. Layout. Operational control policies. MCDA. Discret event simulation (DES).

## LISTA DE FIGURAS

|   |     |
|---|-----|
| FIGURA 1 – Delimitação do escopo da pesquisa .....                                  | 24  |
| FIGURA 2 – <i>Layout</i> tradicional (a,b) e não tradicional (c).....               | 31  |
| FIGURA 3 – Política de estocagem por classes ABC .....                              | 36  |
| FIGURA 4 – Políticas de roteirização .....  | 42  |
| FIGURA 5 – Passos para estruturar modelos MCDA .....                                | 60  |
| FIGURA 6 – Exemplo de função de valor .....   | 63  |
| FIGURA 7 – Estrutura geral da pesquisa .....  | 77  |
| FIGURA 8 – Metodologia combinada .....  | 83  |
| FIGURA 9 – Estrutura hierárquica de decisão .....                                   | 87  |
| FIGURA 10 – Exemplo do tamanho da lista de um pedido .....                          | 92  |
| FIGURA 11 – Dados de entrada layout vertical.....                                   | 93  |
| FIGURA 12 – Modelo conceitual do problema .....                                     | 95  |
| FIGURA 13 – Lógica de geração dos pedidos .....                                     | 98  |
| FIGURA 14 – Exemplo da lógica de separação do pedido .....                          | 98  |
| FIGURA 15 – Lógica do congestionamento .....  | 99  |
| FIGURA 16 – Robustez entre cenários .....   | 105 |
| FIGURA 17 – Distribuição de peças envolvendo um concessionário.....                 | 108 |
| FIGURA 18 – Alternativas de layout do caso ilustrativo.....                         | 110 |
| FIGURA 19 – Layout vertical com blocos.....   | 111 |
| FIGURA 20 – Histórico de pedidos separados em 200 dias de separação.....            | 113 |
| FIGURA 21 – Quantidade de linhas separadas em 200 dias de operação.....             | 114 |
| FIGURA 22 – Identificação do período transiente.....                                | 119 |
| FIGURA 23 – Correlação entre os sucessivos registros da variável TTS.....           | 120 |
| FIGURA 24 – Quantidade de lotes formados em 30 dias de simulação .....              | 122 |
| FIGURA 25 – Intervalo de confiança de 95% no entorno da média.....                  | 122 |
| FIGURA 26 – Função de valor " <i>tempo total médio de separação por dia</i> " ..... | 125 |
| FIGURA 27 – Função de valor " <i>tempo médio de separação de um pedido</i> " .....  | 125 |

|   |     |
|---|-----|
| FIGURA 28 – Função de valor " <i>% média de utilização dos separadores</i> " .....    | 126 |
| FIGURA 29 – Função de valor " <i>% de utilização do espaço</i> " .....                | 128 |
| FIGURA 30 – Função de valor " <i>Custo operacional</i> " .....                        | 129 |
| FIGURA 31 – Função de valor " <i>Custo equipamento de armazenagem</i> " .....         | 130 |
| FIGURA 32 – Estrutura hierarquica de decisão e pesos pelo método <i>swing weights</i> | 132 |
| FIGURA 33 – Estrutura hierarquica de decisão e pesos pelo método ROC .....            | 134 |
| FIGURA 34 – Resumo da robustez entre cenários das alternativas .....                  | 137 |
| FIGURA 35 – Robustez de cada cenário para as sete alternativas.....                   | 138 |
| FIGURA 36 – Teste para avaliar a independência dos critérios .....                    | 165 |
| FIGURA 37 – Funções de valores para o exemplo <i>swing weights</i> .....              | 179 |
| FIGURA 38 – Exemplo do uso de <i>swing weights</i> .....                              | 180 |
| FIGURA 39 – Construção de uma função de valor.....                                    | 181 |

## LISTA DE TABELAS

|   |     |
|---|-----|
| TABELA 1 – Políticas de controle abordada por grupo de artigos analisados .....                             | 46  |
| TABELA 2 – Critérios/objetivos por grupo de artigos analisado .....   | 47  |
| TABELA 3 – Fatores considerados pelos grupos de artigos analisados .....                                    | 49  |
| TABELA 4 – Comportamento estocástico por grupo de artigo analisado .....                                    | 49  |
| TABELA 5 – Métodos MCDA.....  | 66  |
| TABELA 6 – Relação de artigos que abordam SED e MCDA.....   | 67  |
| TABELA 7 – Relação de artigos que abordam MCDA e SP .....   | 70  |
| TABELA 8 – Relação de artigos que abordam SED e SP .....  | 74  |
| TABELA 9 – Etapas do método SMARTS/SMARTER e SED.....   | 84  |
| TABELA 10 – Critérios e subcritérios do problema de decisão .....   | 85  |
| TABELA 11 – Possíveis alternativas de avaliação pelo modelo .....   | 88  |
| TABELA 12 – Perfil do entrevistado .....  | 107 |
| TABELA 13 – Níveis das incertezas.....  | 113 |
| TABELA 14 – Distribuição empírica do TLS.....   | 115 |
| TABELA 15 – Distribuição de probabilidade TEC A e B .....   | 116 |
| TABELA 16 – Distribuição de probabilidade TEC C e D .....   | 116 |
| TABELA 17 – Distribuição empírica do TEC sem intervalos .....   | 117 |
| TABELA 18 – Verificação do modelo computacional .....   | 117 |
| TABELA 19 – Correlação da variável tempo total de separação.....  | 120 |
| TABELA 20 – Experimentos e cenários .....   | 123 |
| TABELA 21 – Detalhamento dos cenários .....   | 123 |
| TABELA 22 – Pontuação do critério “tempo total médio de separação por dia” ....                             | 125 |
| TABELA 23 – Pontuação do critério “tempo médio de separação de um pedido” ...                               | 126 |
| TABELA 24 – Pontuação do critério “% média de utilização dos separadores” .....                             | 127 |
| TABELA 25 – % de utilização do espaço .....   | 127 |
| TABELA 26 – Pontuação do critério “Custo operacional” para os cenários “MMM”,<br>“PMM”, “MPM” e “PPM” ..... | 129 |

|   |     |
|---|-----|
| TABELA 27 – Pontuação do critério " <i>Custo operacional</i> " para os cenários "MMP", "PPP", "MPP" e "PMP" ..... | 130 |
| TABELA 28 – Pesos atribuídos aos critérios – <i>swing weights</i> .....   | 131 |
| TABELA 29 – Pesos atribuídos aos subcritérios custos – <i>swing weights</i> .....                                 | 131 |
| TABELA 30 – Pesos atribuídos aos subcritérios recursos – <i>swing weights</i> .....                               | 131 |
| TABELA 31 – Pesos atribuídos aos subcritérios nível de serviço – <i>swing weights</i> ...                         | 132 |
| TABELA 32 – Pesos acumulados dos subcritérios – <i>swing weights</i> .....  | 132 |
| TABELA 33 – Pesos atribuídos aos critérios – ROC.....   | 133 |
| TABELA 34 – Pesos atribuídos aos subcritérios – ROC .....   | 133 |
| TABELA 35 – Pesos acumulados dos subcritérios – ROC .....   | 134 |
| TABELA 36 – Índice das alternativas .....   | 135 |
| TABELA 37 – Avaliação geral das alternativas em cada cenário.....   | 135 |
| TABELA 38 – Resumo da robustez entre cenários das alternativas .....  | 136 |
| TABELA 39 – Comparação entre o método proposto e critérios isolados .....   | 139 |
| TABELA 40 – Descrição das melhores alternativas do caso analisado .....   | 141 |
| TABELA 41 – Pesos Roc para o número de critérios indicados.....   | 167 |
| TABELA 42 – Quantidade de pedidos por período de 20 minutos.....  | 167 |
| TABELA 43 – TEC dos pedidos em minutos .....  | 168 |
| TABELA 44 – Tempo total de separação de todos os pedidos (dias).....  | 170 |
| TABELA 45 – Tempo total médio de separação dos pedidos por dia (horas) .....                                      | 171 |
| TABELA 46 – Tempo médio de separação de um pedido (minutos) .....   | 172 |
| TABELA 47 – Porcentagem de utilização média dos separadores .....   | 172 |
| TABELA 48 – Distância total percorrida (x 1.000 metros) .....   | 173 |
| TABELA 49 – Tempo médio de congestionamento por pedido (segundos).....  | 174 |
| TABELA 50 – Custo operacional (R\$) .....   | 175 |
| TABELA 51 – Linhas separadas por hora-homem .....   | 176 |
| TABELA 52 – Robustez entre cenários .....   | 177 |

## SUMÁRIO

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1. INTRODUÇÃO .....</b>   | <b>16</b> |
| 1.1. Contextualização .....  | 16        |
| 1.2. Problema e justificativa do trabalho .....                                  | 17        |
| 1.3. Enunciação dos objetivos .....  | 23        |
| 1.4. Escopo e delimitação da dissertação .....                                   | 23        |
| 1.5. Organização e estrutura da dissertação.....                                 | 25        |
| <b>2. REVISÃO DA LITERATURA .....</b>  | <b>27</b> |
| 2.1. Decisões em projetos de Armazéns .....                                      | 27        |
| 2.1.1. Estrutura geral .....   | 28        |
| 2.1.2. Capacidade e dimensionamento .....  | 29        |
| 2.1.3. Seleção de equipamentos .....   | 30        |
| 2.1.4. <i>Layout</i> .....   | 30        |
| 2.1.5. Seleção das políticas operacionais .....                                  | 33        |
| 2.1.6. Políticas de Estocagem.....   | 34        |
| 2.1.7. Políticas de Separação .....  | 37        |
| 2.1.8. Política de roteirização e sequenciamento .....                           | 39        |
| 2.2. Revisão da literatura a respeito de políticas de operações .....            | 43        |
| 2.2.1. Organização dos resultados da revisão sistemática.....                    | 45        |
| 2.2.2. Grupo um – Abordagem de uma política operacional .....                    | 50        |
| 2.2.3. Grupo dois – Abordagem de duas políticas operacionais conjuntamente.....  | 51        |
| 2.2.4. Grupo três – Abordagem de três políticas operacionais conjuntamente ..... | 56        |
| 2.2.5. Conclusões da revisão sistemática .....                                   | 57        |
| 2.3. Análise de decisão multicritério .....                                      | 59        |
| 2.3.1. Modelo e elementos .....  | 59        |
| 2.3.2. Métodos MCDA .....  | 65        |
| 2.4. Combinações de métodos .....  | 66        |

|  |            |
|--|------------|
| 2.4.1. Métodos MCDA e SED.....   | 67         |
| 2.4.2. Métodos MCDA e SP.....  | 69         |
| 2.4.3. Métodos SED e SP.....   | 73         |
| <b>3. METODOLOGIA.....</b>   | <b>77</b>  |
| 3.1. Procedimentos de pesquisa.....  | 77         |
| 3.2. Proposição de metodologia combinada entre MCDA, SP.....   | 83         |
| 3.2.1. Entendimento do problema e identificação dos critérios e alternativas de escolha (Etapa 1 e 2)..... | 85         |
| 3.2.2. Identificação das principais incertezas (Etapa 3).....  | 89         |
| 3.2.3. Desenvolvimento dos cenários (Etapa 4).....   | 89         |
| 3.2.4. Desenvolvimento do modelo de simulação (Etapa 5).....   | 91         |
| 3.2.5. Aplicação do MCDA (etapa 6).....  | 101        |
| 3.2.6. Identificação da alternativa mais robusta (etapa 7).....  | 104        |
| <b>4. APLICAÇÃO DE CASO.....</b>   | <b>106</b> |
| 4.1. Entendimento do problema e perfil do tomador de decisão.....  | 106        |
| 4.1.1. Entendimento do exemplo ilustrativo.....  | 108        |
| 4.2. Validação dos critérios e das alternativas de escolha.....  | 110        |
| 4.3. Identificação das principais incertezas.....  | 111        |
| 4.4. Desenvolvimento dos cenários.....   | 112        |
| 4.5. Modelo de simulação de eventos discretos.....   | 113        |
| 4.5.1. Coleta de dados.....  | 113        |
| 4.5.2. Verificação do modelo computacional.....  | 117        |
| 4.5.3. Projeto dos experimentos.....   | 118        |
| 4.6. Aplicação do método MCDA.....   | 124        |
| 4.6.1. Avaliação de cada alternativa para cada critério.....   | 124        |
| 4.6.1. Determinação dos pesos dos critérios – <i>swing weights</i> .....                                   | 131        |
| 4.6.1. Determinação dos pesos dos critérios – ROC.....   | 133        |

|  |            |
|--|------------|
| 4.6.2. Avaliação geral de cada alternativa.....            | 135        |
| 4.7. Identificação da alternativa mais robusta .....       | 136        |
| 4.8. Discussão dos resultados do exemplo ilustrativo ..... | 138        |
| <b>5. CONCLUSÕES.....</b>                                  | <b>144</b> |
| <b>6. BIBLIOGRAFIA .....</b>                               | <b>147</b> |
| <b>APÊNDICES .....</b>                                     | <b>164</b> |

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. Contextualização

Independentemente da posição de uma empresa na cadeia de suprimento (CS), seja esta um fornecedor de matéria prima, uma indústria, um distribuidor ou um varejista, há armazenagem de produtos (SHQAIR; ALTARAZI; AL-SHIHABI, 2014), o que implica que os armazéns são necessários e desempenham um papel crítico no sucesso logístico das empresas (KOSTER; LE-DUC; ROODBERGEN, 2007). Consequentemente, os armazéns são importantes para o fornecimento de alto nível de serviço aos clientes (BAKER; CANESSA, 2009), o que leva empresas focarem na eficiência operacional (GUO; YU; DE KOSTER, 2016).

Por outro lado, armazéns representam altos custos logísticos (BAKER; CANESSA, 2009). Depois de transporte, armazenagem é um dos maiores impulsionadores de custos nas CSs (DUKIC; OLUIC, 2007). Os custos logísticos no Brasil correspondem a 12,3% do PIB brasileiro, sendo que estes custos representam 7,6% da receita das empresas, onde 23,6% refere-se a custos com armazenagem (ILOS, 2017). Frequentemente os armazéns envolvem altos investimentos e custos operacionais, como, por exemplo: custos da área, equipamentos, mão de obra, etc. (KOSTER; LE-DUC; ROODBERGEN, 2007).

Orientado pela constante demanda dos clientes por serviços mais rápidos, melhores e mais baratos, a eficiência das operações do armazém se tornam cruciais para a competitividade das empresas (CHEN et al., 2010). Para se alcançar as expectativas dos clientes ao mais baixo custo possível, o projeto do armazém deve ser planejado cuidadosamente. Isto porque os custos logísticos dentro do armazém, em grande parte, são gerados já na fase de projeto (ROUWENHORST et al., 2000) e o tempo de resposta de um pedido é diretamente relacionado à eficiência da configuração do *layout* e controle da operação interna do armazém, que por sua vez determinam o fluxo de movimentação interna e que também são determinados já na fase de projeto (GU; GOETSCHALCKX; MCGINNIS, 2010).

Importantes elementos do projeto do armazém incluem: a escolha do tipo de sistema de armazenagem, o *layout* e as políticas que controlam todos os processos operacionais (ROODBERGEN; VIS; TAYLOR, 2015). Estas escolhas estão fortemente inter-relacionadas (GU; GOETSCHALCKX; MCGINNIS, 2010) e são feitas nos níveis estratégico, tático e operacional (CORMIER; GUNN, 1992; ROUWENHORST et al., 2000) em relação a processos, recursos e organização (controle) de modo a contemplar critérios de desempenho

particulares, como, por exemplo: custos, taxa de movimentação, capacidade de armazenagem, tempo de resposta, entre outros (ROUWENHORST et al., 2000).

Analisar os *trade-offs* dos critérios de desempenho é uma tarefa importante para alinhar as medidas de eficiência do armazém com os requisitos do cliente, uma vez que iniciativas para melhorar um dos critérios anteriormente citados podem impactar negativamente outros critérios (CHACKELSON et al., 2013). Assim como outros problemas da CSs (seleção de fornecedores, localização de centros de distribuição, terceirização logística, etc.), o projeto do armazém pode ser caracterizado como um problema multicritério com objetivos conflitantes (nível de serviço x custo, por exemplo) e muitas alternativas para análise e seleção (VIEIRA et al., 2017).

Neste contexto, estudos de modelos que auxiliem os projetistas e tomadores de decisão no processo de avaliação e seleção da melhor alternativa quanto ao projeto do armazém (*layout* e políticas de controle de operação) são bem-vindos, de acordo com as preferências e objetivos da empresa, levando-se em conta as condições de operação.

## **1.2. Problema e justificativa do trabalho**

O projeto do armazém envolve decisões estratégicas relacionadas à estratégia de distribuição com foco na demanda ou no suprimento (VIEIRA et al., 2017), o projeto do fluxo dos processos internos, a determinação do tipo de sistema de armazenagem e da unidade de armazenagem (ROUWENHORST et al., 2000), bem como o *layout* (GILS et al., 2017). Já no nível tático, as decisões estão relacionadas ao dimensionamento dos recursos (sistema de armazenagem e pessoas), seleção dos equipamentos, escolha das políticas de controle de estocagem e separação, enquanto que no nível operacional as decisões estão relacionadas à política de roteirização e à distribuição da força de trabalho (ROUWENHORST et al., 2000).

Dentre as decisões elencadas, quatro se destacam no projeto do armazém: configuração do *layout*, política de estocagem, política de separação e política de roteirização. Isto, por que, um determinado *layout* ou política de controle de estocagem pode ter um bom desempenho com determinadas estratégias de roteirização, mas ruim com outras (KOSTER; LE-DUC; ROODBERGEN, 2007).

A configuração de um *layout* não é algo trivial. Um planejamento ineficiente do *layout* pode levar a problemas no uso de espaço, equipamentos e pessoas (TOMPKINS; SIMITH, 1998) afetando medidas de desempenho como os custos (de construção, manutenção e movimentação), a capacidade de estocagem, a utilização de espaço e equipamentos (GU;

GOETSCHALCKX; MCGINNIS, 2010), bem como o tempo de resposta ou a distância percorrida para a separação de pedidos (POHL; MELLER; GUE, 2011a).

O projeto do *layout* diz respeito ao *layout* completo do armazém (incluindo a área de separação) e o *layout* interno da área de separação (CHAN; CHAN, 2011). As decisões a respeito do *layout* interno da área de separação contemplam a quantidade e a localização das docas, a orientação, o comprimento, a largura e a quantidade dos corredores de separação e cruzamento (GU; GOETSCHALCKX; MCGINNIS, 2010). O *layout* da área de separação pode ter um arranjo tradicional ou não tradicional entre os corredores de separação e de cruzamento, a depender do ângulo formado entre eles, podendo gerar alternativas como: o vertical, o horizontal (ALTARAZI; AMMOURI, 2018), o *flying V* e o *fishbone* (POHL; MELLER; GUE, 2011a).

A política de estocagem determina onde os itens devem ser estocados, podendo ter como alternativa as políticas aleatória, por classes e a *full turnover* (GUO; YU; DE KOSTER, 2016), enquanto que a política de separação determina como os pedidos devem ser agrupados para o processo de separação e a destinação destes a um ou mais separadores (PETERSEN, 2000), onde as possíveis alternativas são: discreta, zona sequencial, zona por lote e por onda (PETERSEN, 2000).

Por fim, a política de roteirização determina a rota que o separador deve seguir durante o processo de separação, especificamente a sequência de itens a serem coletados na rota e as possíveis alternativas para esta política são: transversal, retorno, ponto médio, maior distância, composta e ótima (PETERSEN, 1997).

Estas políticas devem ser consideradas na fase de projeto, pois são decisões que afetam as operações que possuem efeitos globais em outras decisões, como, por exemplo, o *layout*, e uma vez tomadas não são passíveis de se mudar frequentemente (GU; GOETSCHALCKX; MCGINNIS, 2010), o que sugere que estas decisões também possam ser consideradas como estratégicas.

As decisões sobre *layout* e as políticas de controle operacional influenciam todas as operações de movimentação interna do armazém, porém estudos anteriores (em sua maioria) avaliam suas influências somente na operação de separação pedidos. Esta atividade foi reconhecida como a atividade mais trabalhosa e dispendiosa em operações de armazéns manuais, podendo chegar a até 55% do total dos custos operacionais do armazém (BERG; ZIJM, 1999; KHANZODE; SHAH, 2017) e determina o nível de serviço experimentado pelos

clientes a jusante da CSs (BARTHOLDI; HACKMAN, 2014). Sua produtividade depende fortemente do sistema de armazenagem, do *layout* e das políticas de controle (PETERSEN, 1999; ROODBERGEN; KOSTER, 2001), considerados importantes componentes do projeto do armazém (ROODBERGEN; VIS; TAYLOR, 2015). Portanto, o projeto do armazém pode ter um enfoque especial no projeto da área de separação de pedidos, considerando o *layout* e as políticas de controle, já que uma melhoria na atividade da separação dos pedidos pode reduzir os custos operacionais totais, bem como aumentar o nível de serviço prestado aos clientes.

Todavia, cinco pontos devem ser considerados a respeito do projeto de armazéns e ou o projeto da área de separação de pedidos. O primeiro ponto diz respeito à abordagem sequencial das decisões em projeto de armazéns. O segundo, a respeito do comportamento estocástico das operações dos armazéns. O terceiro, a respeito da abordagem do problema do congestionamento na separação de pedidos. O quarto ponto é baseado em quais critérios as decisões são tomadas. Por fim, o quinto ponto é entender como estes critérios podem ser avaliados.

Tradicionalmente, o projeto do armazém é implementado de maneira sequencial (ALTARAZI; AMMOURI, 2018) onde, por exemplo, as questões a respeito de *layout* são decididas antes das políticas de controle operacional. Contudo, decisões sequenciais não necessariamente fornecem a mesma qualidade de resultado que um procedimento que toma decisões simultâneas sobre o *layout* e as políticas de controle operacional, como mostrado por Roodbergen e Vis (2006). No procedimento sequencial, tomando-se a decisão a respeito de um componente do projeto do armazém, a decisão a respeito do componente seguinte fica limitada a um pequeno conjunto de alternativas deste componente, ocorrendo uma limitação das alternativas de projeto que podem ser investigadas e reduzindo-se a chance de melhorar o desempenho do armazém (ALTARAZI; AMMOURI, 2018). Isto indica que deve haver uma iteratividade entre os componentes do projeto (BAKER; CANESSA, 2009).

Embora, em geral, estudos anteriores tenham focado em um dos quatros problemas de decisão citados para melhorar o desempenho do processo de separação de pedidos em armazéns (PETERSEN; AASE, 2017), faz-se necessário uma abordagem simultânea de avaliação e seleção conjunta do *layout* e das políticas de controle operacionais envolvendo alternativas de mais de um dos problemas de decisão (ALTARAZI; AMMOURI, 2018; DEKKER et al., 2004; GILS et al., 2017; PETERSEN; AASE, 2017), para determinar a melhor combinação entre estas alternativas, uma vez que as decisões sobre o projeto do armazém estão inter-relacionadas e uma decisão afeta a outra.

As políticas de controle operacionais devem ser cuidadosamente projetadas, todavia os fatores externos são os que normalmente determinam quando uma política específica é apropriada (CHACKELSON et al., 2013). Estes fatores podem ser o perfil dos pedidos (quantidade de linhas por pedido e a quantidade de itens a serem coletados por linha de pedido), o padrão da demanda dos pedidos (o tempo entre chegada dos pedidos e variação deste tempo ao longo da operação) e o tempo para a execução das atividades, principalmente em armazéns manuais. Estes fatores possuem comportamento estocástico por natureza. Para representar este ambiente estocástico se faz necessário a utilização de simulação para capturar a aleatoriedade intrínseca das operações do armazém (SHQAIR; ALTARAZI; AL-SHIHABI, 2014), bem como considerar as possibilidades de combinações das alternativas dos problemas de decisão do projeto (ALTARAZI; AMMOURI, 2018), auxiliando na avaliação do desempenho do armazém por meio também da combinação de diferentes fatores (CHAN; CHAN, 2011; KHANZODE; SHAH, 2017).

A literatura revela a aplicação com sucesso da simulação para estudar o desempenho do armazém sob diferentes condições de projeto, abordando diferentes combinações das alternativas de dois ou mais problemas do projeto em questão simultaneamente, como, por exemplo: política de estocagem e *layout* (PETERSEN, 2002; PETERSEN; AASE, 2017); política de roteirização e *layout* (PETERSEN, 1997); políticas de estocagem e separação (PETERSEN, 2000); políticas de estocagem e roteirização (CHAN; CHAN, 2011; DEKKER et al., 2004; FRANZKE et al., 2017; PETERSEN, 1999; PETERSEN; SCHMENNER, 1999), políticas de separação e roteirização (PETERSEN; AASE, 2004); políticas de estocagem, separação e roteirização (CHACKELSON et al., 2013; CHEN et al., 2010); políticas de estocagem e roteirização e *layout* (ALTARAZI; AMMOURI, 2018; ROODBERGEN; VIS; TAYLOR, 2015; SHQAIR; ALTARAZI; AL-SHIHABI, 2014); e políticas de estocagem, separação, roteirização e *layout* (GILS et al., 2018).

Todavia, estes trabalhos não levam em conta o caráter estocástico do tempo entre chegada dos pedidos (com exceção de Altarazi e Ammouri (2017)), e tão pouco a variação deste tempo ao longo da operação. Além disto, somente Van gils et al. (2018) faz uma análise dos quatro problemas e suas alternativas simultaneamente. Ainda, somente Altarazi e Ammouri (2017) analisam alternativas de arranjo de *layout*. Por fim, somente Altarazi e Ammouri (2017), Franzke et al. (2017) e Shqair, Altarazi e Al-shihabi (2014) consideram múltiplos separadores na separação de pedidos; e destes, somente Franzke et al. (2017) consideram o tema do congestionamento no desempenho do armazém.

A adoção de corredores de separação mais estreitos de modo a privilegiar a maior capacidade de estocagem é algo comum onde o custo da área é elevado ou não há a possibilidade física da expansão da área de armazenagem. Corredores estreitos têm como desvantagem o congestionamento de separadores, já que são tão pequenos que não permitem que um separador passe pelo outro se necessário (FRANZKE et al., 2017) e conseqüentemente os separadores de pedidos podem bloquear um ao outro (DAVARZANI; NORRMAN, 2015). Isto pode resultar em longos tempos de viagem de separação de pedidos, devido ao tempo ocioso ou tempos de espera, e conseqüentemente reduzir o desempenho e a eficiência da separação de pedidos (ELBERT et al., 2017; FRANZKE et al., 2017). Ademais, fora a ligação entre congestionamento e desempenho da separação de pedidos com o *layout* (CHEN et al., 2013), há também a relação com as políticas de roteirização e estocagem, bem como com o tamanho da lista de pedido e a quantidade de separadores (FRANZKE et al., 2017). Logo, a análise deste fator no projeto do armazém se faz importante para uma representação mais fiel das operações do armazém.

Os trabalhos de simulação elencados, com exceção de Chen et al. (2010) e Roodbergen, Vis e Taylor (2015), utilizam análises estatísticas (de variância, por exemplo) para identificar quais problemas de decisão e fatores (tamanho da lista de separação e ou a quantidade de separadores) ou combinações entre estes problemas e fatores significativamente afetam o desempenho da operação de separação de pedidos. Esta análise majoritariamente é feita sob um critério de desempenho.

Observa-se a utilização de critérios ligados ao tempo de separação de pedidos (CHACKELSON et al., 2013; FRANZKE et al., 2017; PETERSEN, 1999, 2000; PETERSEN; AASE, 2004), à distância percorrida na separação de pedidos (CHAN; CHAN, 2011; GILS et al., 2018; PETERSEN, 2002; PETERSEN; AASE, 2017; PETERSEN; SCHMENNER, 1999; ROODBERGEN; VIS; TAYLOR, 2015; SHQAIR; ALTARAZI; AL-SHIHABI, 2014), ao tempo médio de permanência do item no armazém (ALTARAZI; AMMOURI, 2018), a quantidade de bloqueios (FRANZKE et al., 2017), à % de pedidos atrasados (PETERSEN, 2000), ao tempo de trabalho do colaborador (PETERSEN, 2000) e nível de serviço e custos (CHEN et al., 2010).

Embora os estudos, na sua maior parte, foquem exclusivamente em um único critério e objetivo com relação à operação de separação de pedidos, existem outros objetivos (taxa de utilização do espaço e do separador, tempo de ciclo do pedido, custos e nível de serviço) que também são importantes e deveriam ser submetidos no processo de decisão dos problemas do

projeto do armazém (BAKER; CANESSA, 2009; GU; GOETSCHALCKX; MCGINNIS, 2007, 2010; ROUWENHORST et al., 2000) considerando os *trade-offs* entre os mesmos (CHACKELSON et al., 2013; CHEN et al., 2010). Isto porque, os gerentes dos armazéns têm que olhar além de um único critério de desempenho e considerar *trade-offs* entre os diferentes critérios (CHEN et al., 2010). Neste sentido, uma abordagem por análise de decisão multicritério (MCDA) pode ser útil.

As análises estatísticas dos trabalhos anteriores indicam qual combinação de *layout* e políticas de controle operacional a utilizar frente a fatores determinísticos (médias) do tamanho da lista de separação, tempo entre chegada dos pedidos, etc. Todavia, como identificar qual a combinação é a mais indicada onde há uma flutuação considerável do tamanho da lista de separação ou do tempo entre chegada dos pedidos? Em outras palavras, como identificar uma combinação entre alternativas de arranjo de *layout* e alternativas de políticas de controle operacionais que seja mais robusta às variações (incertezas) dos possíveis fatores da operação? Entende-se por uma alternativa mais robusta aquela que possui um desempenho razoável para uma variedade de cenários (RAM; MONTIBELLER, 2013).

Logo, a construção de cenários por meio de simulação, considerando uma série de situações diferentes nas quais a flexibilidade do projeto pode ser testada (BAKER; CANESSA, 2009) é uma alternativa frente ao exposto. Porém para definição dos cenários, seria interessante utilizar a abordagem de análise morfológica aplicada por Ram e Montibeller (2013), onde as incertezas dos fatores são consideradas em suas melhores (piores) situações, analisando-se uma troca de cada incerteza para sua pior (melhor) situação, cenário a cenário. Isto permitiria verificar o comportamento de uma alternativa (combinação de um *layout L*, política de estocagem *E*, política de separação *S* e política de roteirização *R*) frente a condições favoráveis e não favoráveis dos fatores do projeto.

Neste contexto, o presente trabalho propõe um modelo de avaliação e seleção da combinação mais robusta entre alternativas de arranjo de *layout* e políticas de controle operacionais. O modelo será construído em duas etapas a saber: (1) um modelo de simulação de eventos discretos (SED) para capturar o caráter estocástico dos parâmetros da operação (tempo entre chegada dos pedidos, variação do tempo entre chegada dos pedidos e tamanho da lista de pedidos), congestionamento e fazer a análise quantitativa das diferentes combinações; (2) Um modelo de análise de decisão multicritério (MCDA) de modo contemplar os *trade-offs* entre os diferentes critérios a serem utilizados e os objetivos/preferências dos tomadores de decisão. Ao modelo MCDA é incorporado o planejamento de cenários (SP) por meio de análise

morfológica, de modo a capturar o comportamento destas alternativas frente às incertezas dos parâmetros.

### **1.3. Enunciação dos objetivos**

O objetivo principal desse estudo é propor uma metodologia para avaliação e seleção simultânea do *layout* e políticas de controle operacionais em armazéns, de modo a fornecer uma alternativa robusta frente às incertezas dos fatores que compõe a operação de armazéns. A metodologia é composta pela combinação dos métodos: simulação de eventos discretos e análise de decisão multicritério com avaliação de cenários.

Os objetivos secundários são:

1. Desenvolver um modelo de decisão multicritério com planejamento de cenários para selecionar a alternativa mais robusta quanto ao *layout* e políticas de controle operacionais;
2. Desenvolver um modelo de simulação discreta para avaliar o desempenho destas alternativas, considerando o comportamento estocástico dos fatores da operação e o congestionamento.

### **1.4. Escopo e delimitação da dissertação**

Esta dissertação tem como escopo o projeto e operações em centros de distribuições da cadeia automobilística, com foco nos armazéns atacadistas/varejistas devido ao grande volume e frequência de transações envolvendo peças de reposição, e que demandam alto nível de serviço e baixo custo de operação. Outro motivo está relacionado às incertezas enfrentadas por este elo quanto as suas condições de mercado e operação (tempo entre chegada dos pedidos, variação do tempo entre chegada dos pedidos e tamanho das listas de pedidos). Trabalhos recentes estudaram o elo atacadista/varejista da CS com foco na configuração das operações do armazém provando sua importância, como, por exemplo: Vidal Vieira et al. (2017), Altarazi e Ammouri (2018), Chackelson et al. (2013), Chan e Chan (2011) e Petersen e Aase (2004).

No entanto, este trabalho se delimita a armazéns onde o processo de separação de pedidos é manual, com baixa tecnologia, mas dotado de ERP/WMS para seu gerenciamento. Muitas empresas ainda estão trabalhando com armazéns manuais, pois existe variabilidade no formato e tamanho dos seus produtos, variabilidade na demanda, sazonalidade de produtos, ou porque há um alto investimento requerido para sistemas de armazéns automatizados e não é

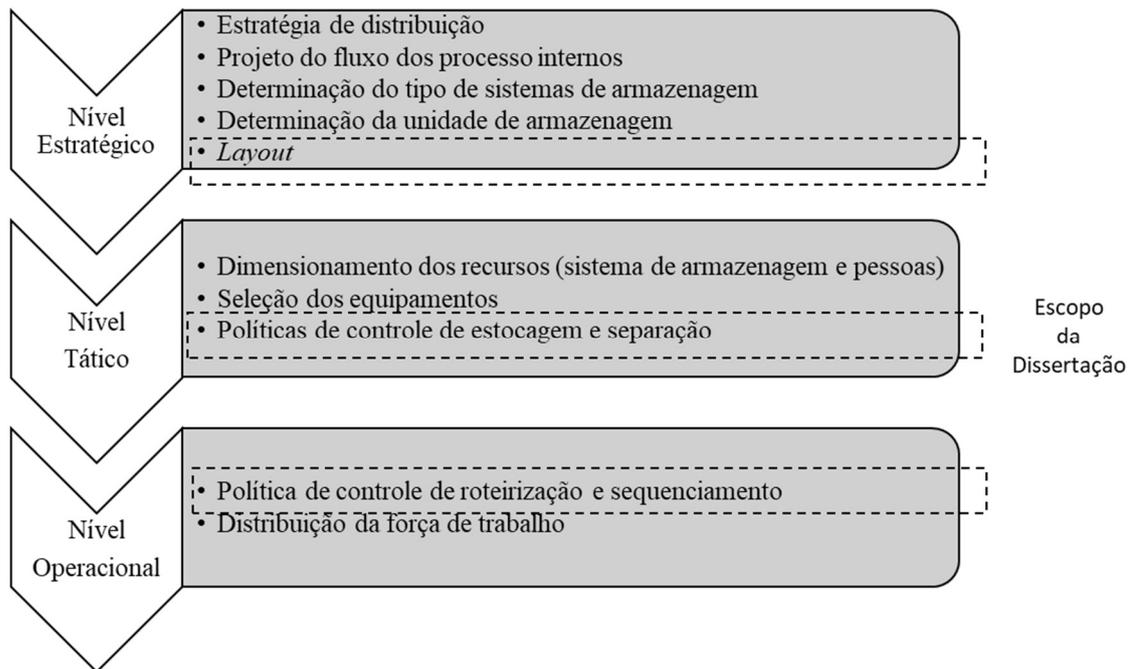
possível mudar ou aperfeiçoar o sistema periodicamente para pequenas e médias empresas (KHANZODE; SHAH, 2017). Logo armazéns manuais é uma classe de armazéns muito comum (ALTARAZI; AMMOURI, 2018). De acordo com De Koster, Le-Duc e Roodbergen (2007) 80% dos armazéns da Europa ocidental ainda são manuais.

Este trabalho também se delimita a analisar a problemática levantada considerando somente a operação de separação de pedidos, embora outras operações ocorram dentro de um armazém, tais como: recebimento, estocagem, reabastecimento, *cross docking*, consolidação de pedidos faturados e expedição por exemplo. Entende-se que estas operações também são importantes e estão inter-relacionadas com a operação de separação de pedidos, porém como já explicitado, a operação de separação de pedidos geralmente é a mais custosa.

Também, esta dissertação não busca avaliar e comparar diferentes: áreas de armazenagem, dimensões de corredores (largura e comprimento), quantidade de operadores, sistemas de armazenagem e equipamentos de movimentação. Por outro lado, este trabalho avalia e compara diferentes alternativas de arranjo de *layout* e políticas de controle operacionais, considerando um sistema de armazenagem do tipo estante metálica em uma área fixa e *inputs* do usuário tais como: dimensões dos corredores e entre corredores, quantidade de operadores e disponibilidade dos operadores. As comparações são feitas por meio de indicadores de produtividade, custo, utilização dos recursos e nível de serviço que são *outputs* da modelagem proposta.

Ainda com relação ao nível das decisões, o escopo da dissertação pode ser entendido como na FIGURA 1. Logo, quanto a projeto de armazéns, delimita-se a decisões de nível estratégico (de longo prazo, até 5 anos), de nível tático (de médio prazo, até 2 anos) e operacional (de curto prazo, até um ano) (ROUWENHORST et al., 2000).

FIGURA 1 – Delimitação do escopo da pesquisa



Fonte: Próprio autor.

No entanto, para esta dissertação, considera-se que as decisões estratégicas quanto ao fluxo dos processos internos (neste caso somente o processo de separação de pedidos), o sistema de armazenagem (manual) e a unidade de armazenagem (caixas) já foram tomadas. Assim como, no nível tático o dimensionamento dos recursos já foi feito e no nível operacional a distribuição já foi considerada.

No entanto, vale-se ressaltar que há uma divergência entre autores se o nível de decisão do *layout* é estratégico (GILS et al., 2017) ou tático (ROUWENHORST et al., 2000) em relação ao projeto do armazém. Todavia, sua mudança não é feita frequentemente mediante vários *trade-offs*, o que pode sugerir uma decisão estratégica sob o ponto de vista da modelagem MCDA e assim adotada nesta dissertação.

### 1.5. Organização e estrutura da dissertação

O restante deste trabalho está organizado conforme abaixo:

- O Capítulo 2 apresenta uma revisão da literatura envolvendo estudos de simulação relacionados ao problema da tomada de decisão entre dois ou mais componentes de decisão elencados anteriormente;
- O Capítulo 3 descreve a metodologia aplicada para abordar a problemática em questão: o modelo de simulação, os fatores abordados, bem como suas

limitações; a justificativa do modelo de decisão multicritério e planejamento de cenários, sua aplicação, seus critérios, pesos, limitações e premissas;

- O Capítulo 4 apresenta a aplicação da metodologia proposta em um caso, porém com dados reais, e discussão dos resultados;
- O Capítulo 5 apresenta as considerações finais a respeito da dissertação;

## 2. REVISÃO DA LITERATURA

Realizar uma revisão da literatura é uma parte importante de qualquer projeto de pesquisa, onde o pesquisador mapeia e avalia o território intelectual relevante a respeito da temática de estudo (TRANFIELD; DENYER; SMART, 2003). Logo, o presente capítulo tem como objetivo apresentar uma revisão da literatura a respeito da temática “*layout* e políticas de controle operacionais em projetos de armazéns”, de modo a provocar a familiarização com os constructos e variáveis pertinentes ao tema, e assim auxiliar na construção da teoria e pensamento para o propósito desta dissertação. Também, permitirá ao leitor a se familiarizar com o tema e assim acompanhar a linha de pensamento do autor.

Inicialmente, serão apresentadas as principais decisões a serem tomadas no projeto do armazém, as principais alternativas e os fatores a serem considerados, bem como a relação entre eles. Posteriormente será apresentada uma revisão sistemática da literatura a respeito do problema de projetos de armazéns com enfoque em políticas de controle operacional e como estas políticas estão sendo relacionadas ao *layout*, por meio do emprego de simulação como metodologia para a solução dos problemas desta temática.

Na sequência será apresentada uma breve revisão da literatura a respeito de análise de decisão multicritério, seus elementos, etapas da construção de um modelo de decisão e métodos de decisão. Por fim, serão apresentados a integração dos métodos de análise de decisão multicritério e planejamento de cenários, métodos de análise de decisão multicritério e simulação de eventos discretos, e planejamento de cenários e simulação de eventos discretos. Esta última etapa da revisão da literatura busca dar embasamento teórico suficiente ao leitor para a compreensão da metodologia proposta nesta dissertação, bem como situá-lo com relação dos métodos compostos.

### 2.1. Decisões em projetos de Armazéns

O projeto do armazém é um processo complexo que envolve decisões estruturais e operacionais que afetam o desempenho geral do armazém (THOMAS; MELLER, 2014). As variáveis de decisão no projeto do armazém estão inter-relacionadas, tornando o projeto complexo (THOMAS; MELLER, 2015), onde a eficiência operacional é altamente afetada pelas decisões estruturais (GU; GOETSCHALCKX; MCGINNIS, 2010). Em uma abordagem de decisão sequencial, Rouwenhorst et al. (2000) divide estas decisões nos níveis estratégico, tático e operacional com relação a processos, recursos e controle.

Tradicionalmente, o projeto do armazém é implementado de uma maneira sequencial (ALTARAZI; AMMOURI, 2018), todavia estas decisões tendem a ser um processo iterativo (BAKER; CANESSA, 2009) com múltiplas visitas a cada estágio (GOETSCHALCKX; MCGINNIS; SHARP, 2008) em que critérios de desempenho (como, custos, taxa de movimentação, capacidade de armazenagem e tempo de resposta), com objetivos conflitantes, devem ser considerados levando-se em conta *trade-offs* (ROUWENHORST et al., 2000).

De maneira geral, o projeto do armazém consiste em três decisões inter-relacionadas: o tipo de sistema de armazenagem utilizado, o *layout* e as políticas que controlam os processos operacionais (ROODBERGEN; VIS; TAYLOR, 2015). Todavia, Gu, Goetschalckx e McGinnis (2010) classificam estas decisões em cinco categorias principais: estrutura geral do armazém, capacidade e dimensionamento, *layout*, seleção de equipamentos e seleção das políticas operacionais. Esta classificação será adotada para melhor apresentar as decisões que devem ser levadas em conta no projeto de um armazém, porém com maiores detalhes a respeito do *layout* e políticas de controle operacionais, pois são decisões importantes no desempenho do armazém (ROODBERGEN; KOSTER, 2001).

### **2.1.1. Estrutura geral**

A estrutura geral (ou design conceitual) determina o fluxo dos materiais dentro do armazém, quais e quantas áreas funcionais e a alocação relativa entre elas (GU; GOETSCHALCKX; MCGINNIS, 2007), bem como a unidade de estocagem e os sistemas de armazenagem (ROUWENHORST et al., 2000). Estas decisões são consideradas estratégicas e de longo prazo (CORMIER; GUNN, 1992; ROUWENHORST et al., 2000).

As áreas funcionais são: de recebimento; de armazenamento de reserva e separação de paletes; de separação de caixas; de separação de unidades; de acumulação, classificação e embalagem de pedidos; e de expedição (KOSTER; LE-DUC; ROODBERGEN, 2007). O fluxo dos produtos pode ocorrer entre todas estas áreas por intermédio das atividades de recebimento, estocagem, reabastecimento, separação e despacho ou somente entre duas áreas, como, por exemplo, entre a área de recebimento e expedição por meio da atividade de *cross-docking* (TOMPKINS et al., 2010) a depender do padrão dos pedidos (ROUWENHORST et al., 2000).

A decisão a respeito do fluxo dos produtos e a seleção do sistema de armazenagem e equipamentos devem ser adequados para as características dos produtos, ao padrão dos pedidos e não ser conflitantes entre eles (ROUWENHORST et al., 2000). Ainda, devem considerar os requisitos de armazenagem e da taxa de movimentação objetivando minimizar os custos de

investimento e de operação (GU; GOETSCHALCKX; MCGINNIS, 2010; ROUWENHORST et al., 2000).

### **2.1.2. Capacidade e dimensionamento**

A determinação de capacidade e dimensionamento envolve decisões consideradas de nível tático por alguns autores (GILS et al., 2018; KOSTER; LE-DUC; ROODBERGEN, 2007; ROUWENHORST et al., 2000) e de nível estratégico por outros (CORMIER; GUNN, 1992). Levando-se em conta o nível tático, estas decisões têm menor impacto que as decisões estratégicas, todavia não devem ser reconsideradas com frequência pois requerem algum tipo de investimento (ROUWENHORST et al., 2000).

A decisão a respeito da capacidade está relacionada às necessidades de armazenagem (GU; GOETSCHALCKX; MCGINNIS, 2010) que, por sua vez, está relacionada às vendas em potencial e com a quantidade de armazéns da empresa (ALTARAZI; AMMOURI, 2018). A importância desta decisão está na sua inversa relação entre os custos de construção e de inventário (CORMIER; GUNN, 1996) e sua correlação com o nível de serviço alvo da empresa (ALTARAZI; AMMOURI, 2018). Gu, Goetschalckx e McGinnis (2010) salientam que a empresa pode ou não ter controle sobre sua política de inventário e isto deve ser levado em conta na decisão a respeito da capacidade de armazenagem.

O problema do dimensionamento do armazém é traduzir a capacidade em área, a fim de estimar os custos de construção e operação (GU; GOETSCHALCKX; MCGINNIS, 2010), uma vez que a área necessária para o armazenamento é importante não somente para o gerenciamento como para o projeto do armazém (GUO; YU; DE KOSTER, 2016).

De acordo com Venkitasubramony e Adil (2017), a interação complexa entre os fatores como custos da área alugada, o custo operacional, a altura dos equipamentos de armazenagem, bem como a política de estocagem, devem ser levados em conta na estimativa da área necessária do armazém. Cardona et al. (2015) relatam que dois ótimos armazéns, com a mesma capacidade e utilizando o mesmo equipamento de armazenagem, podem ter diferentes *layouts* em função dos custos envolvidos em sua particular operação. Isto porque nas regiões onde o custo do terreno é baixo, o leiaute ótimo pode ser longo, largo e horizontalizado. Contudo, para regiões onde o custo do terreno é alto, o leiaute ótimo pode ser verticalizado e cobrir uma pequena área.

### **2.1.3. Seleção de equipamentos**

As decisões a respeito da seleção de equipamentos determinam os processos e sistemas para movimentar e armazenar produtos dentro do armazém (ALTARAZI; AMMOURI, 2018). Mais especificamente, estas decisões determinam o nível de automação apropriado para o armazém e identificam os tipos de equipamento para armazenagem, movimentação, separação dos pedidos e classificação (GU; GOETSCHALCKX; MCGINNIS, 2010).

Estas decisões têm natureza estratégica e afetam quase todas as outras decisões assim como o investimento e desempenho geral do armazém (GU; GOETSCHALCKX; MCGINNIS, 2010). Rouwenhorst et al. (2000) denominam os equipamentos de recursos e subdivide em sistemas de armazenagem (desde simples prateleiras até sistemas altamente automatizados), equipamentos de separação (empilhadeira), equipamentos auxiliares de separação (scanners de código de barra), sistema computacional, equipamentos de manuseio de material (paletizadores, sistemas de classificação) e finalmente pessoal.

Ressalta-se que a seleção dos equipamentos de um armazém é altamente correlacionada com as características dos produtos. Entende-se por características dos produtos o seu mix, ciclo de vida, demanda, embalagem, fragilidade e peso (DA CUNHA REIS et al., 2017).

### **2.1.4. Layout**

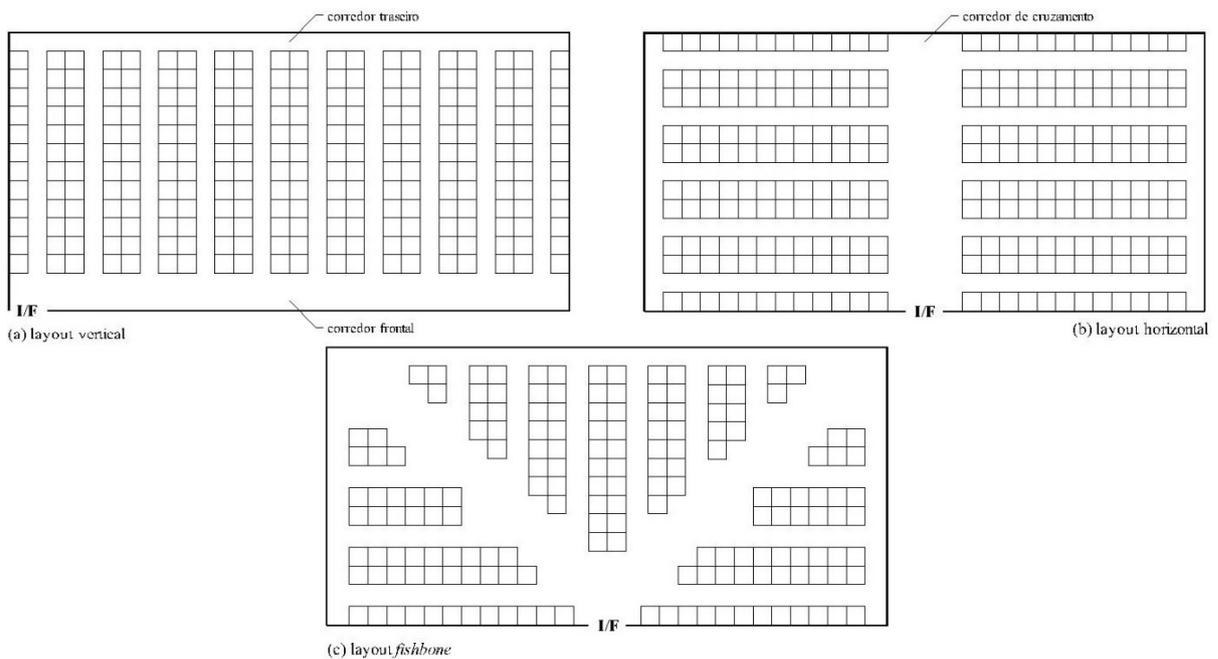
O *layout* tem papel importante na eficiência do armazém (PETERSEN; AASE, 2017) sendo considerado uma decisão de nível tático por alguns autores (ROUWENHORST et al., 2000) ou estratégico por outros (GILS et al., 2017). A tomada de decisão a respeito do *layout* é uma das mais importantes do projeto do armazém e para muitas empresas a sua mudança depois de instalado se torna onerosa ou praticamente impossível. O projeto do *layout* se divide em dois subproblemas: o *layout* geral do armazém e o *layout* interno da área de armazenagem/separação (CHAN; CHAN, 2011; GU; GOETSCHALCKX; MCGINNIS, 2010).

O *layout* geral do armazém aborda a decisão da alocação das várias áreas do armazém (recebimento, armazenamento, expedição, etc.) e frequentemente é realizada levando-se em conta o relacionamento das atividades entre estas áreas (KOSTER; LE-DUC; ROODBERGEN, 2007). Já o projeto do *layout* interno da área de armazenagem/separação abordam as decisões a respeito da quantidade e localização das docas (ou ponto I/F – início e fim de rota de separação), quantidade e dimensões (comprimento e largura) dos corredores de separação, arranjo físico entre os corredores de separação e os equipamentos de armazenagem (GU;

GOETSCHALCKX; MCGINNIS, 2010), bem como a utilização de corredores de cruzamento (VAUGHAN; PETERSEN, 1999), o formato em relação a largura/comprimento do armazém e a utilização de uma área de separação e reserva (THOMAS; MELLER, 2014, 2015). Corredores de cruzamento são aqueles utilizados para a transição entre um corredor de separação e outro, e dependendo da sua quantidade podem dividir o layout em blocos (ROODBERGEN; KOSTER, 2001).

Uma decisão importante a respeito do *layout* é seu arranjo físico (disposição dos corredores dentro do sistema de armazenagem) que pode ser classificado como tradicional ou não tradicional a depender do ângulo formado entre os corredores de separação e de cruzamento (frontal e traseiro) (POHL; MELLER; GUE, 2011b). Exemplos de arranjos (FIGURA 2) tradicionais são os *layouts* vertical e horizontal, já *layout fishbone* é um exemplo do não tradicional. (ALTARAZI; AMMOURI, 2018).

FIGURA 2 – *Layout* tradicional (a,b) e não tradicional (c)



Fonte: Próprio autor.

Considerando a política de estocagem aleatória e listas de separação com até dois itens, o arranjo *fishbone* possui desempenho superior aos tradicionais em termos de distância percorrida (POHL; MELLER; GUE, 2009). Todavia, para políticas de estocagem por classes onde a curva da demanda é muito inclinada, o *layout fishbone* se desempenha tão bem quanto os tradicionais independentemente do tamanho da lista de separação (ÇELK; SÜRAL, 2014).

Uma desvantagem do arranjo *fishbone* sobre o tradicional é que para uma mesma área de armazenagem, este *layout* possui menor capacidade (POHL; MELLER; GUE, 2011b).

A combinação de diferentes arranjos físicos de *layout* em conjunto com diferentes políticas de controle operacionais e outros fatores como o tamanho da lista de separação, a adoção de corredores de cruzamento, o tamanho (ou capacidade) do armazém, o volume de pedidos, entre outros, resultarão em diferentes desempenhos nas atividades do armazém, como mostrado pelos autores Altarazi e Ammouri (2018).

A localização do ponto de início e fim da rota de separação (I/F ou uma doca, por exemplo) no meio ou no canto do *layout* não oferece grande diferença na distância percorrida no processo de separação de pedidos, não sendo superior a 1% (PETERSEN, 1997). Já de acordo com Petersen e Schmenner (1999), reduções da ordem de 4% podem ser alcançadas com a localização do ponto I/F ao meio, dependendo da política de roteirização e estocagem empregada. Estas observações estão de acordo com o trabalho de Petersen e Aase (2004).

O formato do armazém é um fator que influencia a eficiência da separação dos pedidos (PETERSEN, 1997), assim como a capacidade (ou tamanho) do armazém e o tamanho da lista de separação (PETERSEN, 2002). Petersen (2002) relata que para grandes áreas de armazenagem e pequenas listas de separação, um *layout* com corredores mais curtos e em maior quantidade (formato mais achatado) reduz a distância percorrida na atividade de separação. Já para pequenas áreas e grandes listas de separação, o autor indica a utilização de poucos e longos corredores (formato mais alongado) a depender de um corredor de cruzamento traseiro.

Por outro lado, o aumento de corredores de cruzamento pode ou não diminuir o tempo de separação de pedidos a depender da política de roteirização em uso e de outros fatores, pois a quantidade ótima de corredores de cruzamento depende do tamanho da lista de separação, do comprimento e quantidade dos corredores de separação (ROODBERGEN; KOSTER, 2001). Para as políticas de roteirização maior distância e transversal e de estocagem aleatória e por classes, Shqair; Altarazi; Al-shihabi (2014) afirmam que é melhor adicionar somente um corredor de cruzamento além do corredor frontal e traseiro, pois mais corredores de cruzamento aumentariam a distância percorrida na atividade de separação independente dos fatores supracitados. Entretanto, considerando a política de estocagem aleatória ou por classes e roteirização transversal, a distribuição (posição) dos corredores de cruzamento não apresenta diferença no desempenho do armazém durante a atividade de separação de pedidos (PETERSEN; AASE, 2017).

Petersen e Aase (2017) relatam que o uso de corredores de cruzamento pode aumentar a possibilidade de acidentes com os separadores, se estes não forem cuidadosos na intersecção entre os corredores de cruzamento e separação. Por sua vez, os autores Roodbergen e De koster (2001) lembram que o uso de corredores de cruzamento implicam em maior necessidade de espaço, e que um *trade-off* da redução de custos experimentado na atividade de separação com a sua adição deve ser feito com os custos adicionais na construção do armazém.

Logo, estas decisões a respeito do *layout* afetam o desempenho do armazém com relação aos custos de construção e manutenção, custos de manuseio de produtos, capacidade de armazenagem, utilização do espaço e utilização do equipamento (GU; GOETSCHALCKX; MCGINNIS, 2010) bem como seu desempenho.

### **2.1.5. Seleção das políticas operacionais**

Políticas de controle operacional comandam as operações diárias do armazém (ROODBERGEN; VIS; TAYLOR, 2015). Entre outras, destacam-se a política de estocagem, a política de separação e a política de roteirização e sequenciamento (KOSTER; LE-DUC; ROODBERGEN, 2007; PETERSEN; AASE, 2017). A política de estocagem e de separação são consideradas um problema tático, em contrapartida a de roteirização é considerada um problema operacional (ROUWENHORST et al., 2000).

Produtos recebidos necessitam ser designados à uma locação dentro do armazém e separadores necessitam receber instruções da sequência de locações a visitar para completar um pedido de determinado cliente (ALTARAZI; AMMOURI, 2018; ROODBERGEN; VIS; TAYLOR, 2015). Logo estas políticas afetam, por exemplo, as distâncias percorridas na atividade de separação de pedidos (GILS et al., 2018) ou ainda impactam a capacidade de armazenagem (GU; GOETSCHALCKX; MCGINNIS, 2007). ROUWENHORST et al. (2000) relata que as políticas de estocagem se relacionam com as outras e influenciam a taxa de movimentação máxima do armazém. Assim, existem muitas combinações para estas políticas e devido a sua natureza heurística (em sua maior parte) e a imprevisibilidade da interface com outras políticas, não se pode dizer com antecedência qual a melhor combinação entre elas (KOSTER; LE-DUC; ROODBERGEN, 2007), embora os trabalhos de Chen et al. (2010) e Roodbergen, Vis e Taylor (2015) sugiram métodos para tal.

### 2.1.6. Políticas de Estocagem

As Políticas de estocagem determinam qual produto deve ser estocado em qual locação dentro do armazém (PETERSEN, 1999; PETERSEN; AASE, 2004). É o fator mais importante no desempenho da atividade de separação (CHAN; CHAN, 2011) e a melhor estratégia de estocagem depende da política de roteirização (ou sequenciamento) e do tamanho do armazém, bem como do tamanho da lista de separação (KOSTER; LE-DUC; ROODBERGEN, 2007; PETERSEN; SCHMENNER, 1999).

Geralmente classificam-se em: locação disponível mais próxima (CHACKELSON et al., 2013), dedicada, aleatória, *full turnover* e baseada em classes (GU; GOETSCHALCKX; MCGINNIS, 2007). Na política da locação disponível mais próxima o trabalhador escolhe a primeira locação disponível para armazenar os produtos, o que permite uma alta taxa de utilização das locações mais próximas dos ponto de início e fim de rota (CHACKELSON et al., 2013). Na política de estocagem dedicada cada produto é estocado em uma locação fixa dentro do armazém (KOSTER; LE-DUC; ROODBERGEN, 2007). Esta política necessita de maior espaço para armazenagem, pois uma quantidade suficiente de locações deve ser reservada para o máximo inventário de cada produto (GU; GOETSCHALCKX; MCGINNIS, 2007), porém os separadores de pedidos se tornam mais familiarizados com as locações dos produtos (KOSTER; LE-DUC; ROODBERGEN, 2007).

Na política de estocagem aleatória cada produto é designado a uma locação vazia aleatoriamente, considerando que todas as locações tem a mesma probabilidade de ser utilizada (KOSTER; LE-DUC; ROODBERGEN, 2007). Esta política é amplamente utilizada em muitos armazéns devido a sua simplicidade de utilização, frequentemente requerer menor espaço que as outras políticas e resultar na melhor utilização dos corredores de separação (PETERSEN; AASE, 2004), embora resulte em maior distância percorrida pelo separador na atividade de separação (FRAZELLE, 2001; PETERSEN, 1999).

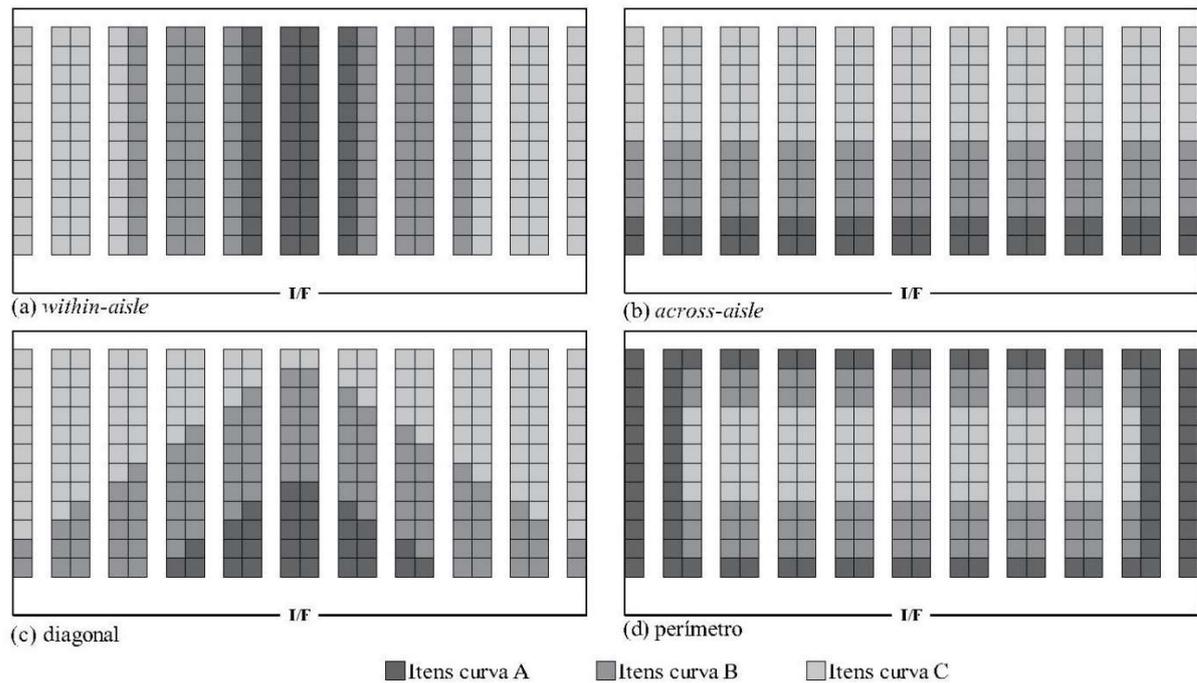
Na política *full turnover*, os itens são estocados em ordem decrescente de seu índice COI (*Cube per Order*) (RAO; ADIL, 2017) em relação ao ponto de início e fim de rota de separação. O COI de um item é razão entre o espaço requerido por este item e a frequência de pedido (CARON; MARCHET; PEREGO, 1998). A política *full turnover* resulta em menores distâncias percorridas na separação dos pedidos, mas geralmente sua implementação é difícil, devido as frequentes mudanças de demandas bem como dos itens (RAO; ADIL, 2017). Os

últimos autores salientam que a política de estocagem baseada em classes oferece bons resultados a um menor esforço.

A política de estocagem baseada em classes compreende-se entre a dedicada e a aleatória (GU; GOETSCHALCKX; MCGINNIS, 2007). Há uma divisão dos produtos em classes de acordo com as suas demandas de separação e estes produtos são estocados aleatoriamente em suas respectivas classes dentro do armazém (CHEN et al., 2010; PETERSEN; AASE, 2017). Uma maneira clássica de se dividir os produtos baseados em sua popularidade, é utilizar o método de Pareto (KOSTER; LE-DUC; ROODBERGEN, 2007). A ideia básica é alocar os produtos mais frequentemente requisitados nas locações com melhor acesso dentro armazém (ROODBERGEN; VIS; TAYLOR, 2015).

No *layout*, as classes podem ser distribuídas conforme os padrões: diagonal, perímetro, *across-aisle* e *within-aisle* (PETERSEN; SCHMENNER, 1999), *nearest sub-aisle* e *nearest location* (ROODBERGEN; VIS; TAYLOR, 2015) em relação ao ponto de início e fim da rota de separação. Geralmente as duas últimas são aplicadas para *layout* com mais de um bloco, ou seja, para *layouts* com corredores de cruzamento no meio e possuem formato próximo da diagonal. A FIGURA 3 apresenta as políticas *within-aisle*, *across-aisle*, diagonal e perímetro considerando três classes de distribuição A/B/C, onde os itens de classe A são os de maior demanda de separação e estão localizados próximos do ponto I/F, e os itens de classe C os de menor demanda de separação e estão mais afastados do ponto I/F. Já os itens de classe B, considerados de demanda média, estão localizados entre os itens de classe A e C.

FIGURA 3 – Política de estocagem por classes ABC



Fonte: Próprio autor.

A política *within-aisle* proporciona uma menor distância percorrida na atividade de separação em relação as demais políticas, independentemente do tamanho da lista de separação ou do uso de corredores de cruzamento para *layout* verticais (PETERSEN; AASE, 2017) ou da inclinação da curva de demanda (PETERSEN; SCHMENNER, 1999). De acordo com Petersen e Schmenner (1999), a política *within-aisle* pode proporcionar uma redução de 10 a 20% na distância percorrida independentemente da política de roteirização e localização do ponto de início e fim de rota.

Embora as políticas por classe possam reduzir os tempos de viagem e as distâncias percorridas, podem também incorrer em congestionamento nos corredores e a uma utilização desequilibrada do armazém (CHEN et al., 2010; PETERSEN, 1999), e isto pode aumentar dependendo da combinação com a política de roteirização, o tamanho da lista de separação, a inclinação da curva de demanda (PETERSEN; SCHMENNER, 1999) e a quantidade de separadores (HEATH; CIARALLO; HILL, 2013).

Heath, Ciarallo e Hill (2013) mostraram quantitativamente que a utilização da política de estocagem *within-aisle* ou *across-aisle* geram maiores tempos de congestionamento que a política de estocagem aleatória, ao se aumentar a quantidade de separadores no armazém. Corroborando, os autores Franzke et al. (2017) relatam que as menores médias de

congestionamento ocorrem em combinações entre as políticas de roteirização com a política de estocagem aleatória, que utiliza todas as áreas do armazém com a mesma intensidade. Todavia, os autores complementam que a combinação com a menor quantidade de congestionamento não necessariamente leva ao menor tempo de separação de pedidos.

### **2.1.7. Políticas de Separação**

A atividade de separação é a mais importante na maioria dos armazéns e consiste no processo de obter a exata quantidade dos produtos solicitados no pedido do cliente (HALL, 1993; PETERSEN, 1999). Esta atividade constitui uma porção dominante dos custos operacionais de um armazém (PETERSEN, 1999) podendo chegar a 55% do custo total (BERG; ZIJM, 1999; KHANZODE; SHAH, 2017), sendo que o deslocamento do separador até a locação e seu retorno compõe a maior parte deste custo (HACKMAN et al., 2001). Logo, a melhoria da eficiência desta atividade desempenha um importante papel na redução dos custos do armazém bem como da CSs (PETERSEN, 2002).

A política de separação está relacionada ao agrupamento ou não dos pedidos dos clientes em uma lista de separação (ALTARAZI; AMMOURI, 2018) e a destinação destes a um ou mais separadores (ROUWENHORST et al., 2000). Diferentes métodos podem ser empregados, como por exemplo: separação por zona, por onda, por lote (KHANZODE; SHAH, 2017) ou a mais comum, a separação discreta (PETERSEN; AASE, 2017). A escolha do método mais efetivo deve levar em conta as estratégias de negócio, as capacidades, as tecnologias e a necessidade de espaço da empresa, de modo a trazer benefícios tanto a empresa como aos seus clientes (PETERSEN, 2000).

A separação discreta consiste na separação de um pedido único por um único separador (PETERSEN; AASE, 2004). É frequentemente preferida, pois é fácil de se implantar e a integridade do pedido é sempre mantida (PETERSEN; AASE, 2017), além de prover um serviço rápido quando os clientes estão esperando por seus pedidos (CHACKELSON et al., 2013; PETERSEN, 2000). Porém, Petersen (2000) relata que seu tempo de viagem na atividade de separação é considerável, conferindo a esta política um baixo desempenho em relação as outras.

Já a separação por zona consiste na divisão do espaço de armazenagem em zonas de separação e à cada zona é designado um ou mais separadores que separam os pedidos somente em suas respectivas zonas (KHANZODE; SHAH, 2017). Ainda, a separação por zona pode ser dividida em zona paralela ou sequencial (GU; GOETSCHALCKX; MCGINNIS, 2010).

Embora um desbalanceamento da carga de trabalho entre as zonas possa ser prejudicial à operação, a separação por zona geralmente traz reduções nos tempos de separação dos pedidos, maior familiaridade dos separadores com a localização dos itens estocados em suas zonas e redução do congestionamento (PETERSEN, 2000).

A separação por lote atribui um grupo de pedidos que deve ser separado simultaneamente em uma única viagem a um separador (HWANG; KIM, 2005; KHANZODE; SHAH, 2017). A separação por lote é mais indicada quando se objetiva reduzir o tempo total de separação de todos os pedidos (CHACKELSON et al., 2013; PETERSEN; AASE, 2004), porém, tem como desvantagens a necessidade de uma área maior para a classificação dos pedidos (caso esta não seja feito no carrinho de separação) e a integridade do pedido é perdida, aumentando-se a probabilidade de erros (PETERSEN, 2000).

A separação por onda, onde os separadores separam grandes lotes de pedidos não se baseando na quantidade de itens ou pedidos, mas em um período de tempo pré-determinado (PETERSEN, 2002). Os pedidos devem possuir características semelhantes e demandar o mesmo horário de despacho, para que esta política possa ser utilizada (KHANZODE; SHAH, 2017). Esta política é muito eficiente nas principais atividades da separação (coleta, viagem e descarregamento), todavia demanda maior coordenação e planejamento do que as outras políticas além de maior espaço para o processo de consolidação do pedido (PETERSEN, 2000). O último autor afirma que a separação por onda e por lote são superiores as demais e seus desempenhos não são afetados adversamente pela variação no padrão da inclinação da curva de demanda ou volume de pedidos diário.

Existem dois tipos principais de heurísticas de formação de lotes que tentam minimizar o esforço total na operação de separação: algoritmos sementes e heurística *savings* (GU; GOETSCHALCKX; MCGINNIS, 2007). No algoritmo baseado em semente, a geração dos lotes começa ao se escolher o pedido semente (por exemplo, o menor pedido) e depois é determinado qual pedido (ainda não atribuído a um lote) deve-se adicionar ao pedido semente de acordo com alguma correlação (por exemplo, adicionar um pedido de tal forma que a quantidade de posições a se visitar seja mínima) e respeitando-se a restrição de capacidade (SCHOLZ; WÄSCHER, 2017).

Na heurística *savings*, as listas de separação são compostas com base nas economias de distância que podem ser obtidas pela combinação de dois ou mais pedidos dos clientes em uma única rota de separação, levando-se em conta a restrição de capacidade (GILS et al., 2018).

Uma alternativa simples ao uso das duas anteriores é agrupar os pedidos conforme o FCFS (*first-come-first-served*) respeitando-se a restrição de capacidade (CHEN et al., 2010), porém o desempenho é inferior em relação as primeiras. Todavia, Van gils et al. (2018) relatam que o uso de algoritmos complexos para resolver os problemas de planejamento de lotes e roteirização não tem sido amplamente utilizado na prática devido aos longos tempos computacionais para o cálculo de lotes e rotas ideais para cada roteirização de coleta. Logo, a utilização de FCFS pode ser útil.

Geralmente, a separação discreta é utilizada quando os pedidos são grandes e a separação por lote quando os pedidos são pequenos (CHAN; CHAN, 2011). Algumas empresas tem combinado a separação por zona e por lote dentro da separação por onda (PETERSEN; AASE, 2017). Todavia, o emprego destas políticas requer custos adicionais na operação que devem ser considerados (KHANZODE; SHAH, 2017), uma vez que etapas de classificação e consolidação dos pedidos são necessárias ao fim da etapa de separação (KOSTER; LE-DUC; ROODBERGEN, 2007). Neste caso o *trade-off* é o tempo adicional para classificar e consolidar o item separado para seu devido cliente (CHEN et al., 2010).

A eficiência do processo de separação está intimamente ligada às políticas de separação, roteirização e estocagem (HWANG; KIM, 2005), uma vez que o emprego das políticas de separação podem melhorar o tempo, a utilização dos recursos e as distâncias percorridas na atividade de separação nas mais diversas combinações com as política de estocagem e roteirização, configuração dos corredores, tamanhos de pedidos, entre outros fatores (GU; GOETSCHALCKX; MCGINNIS, 2007; KHANZODE; SHAH, 2017; KOSTER; LE-DUC; ROODBERGEN, 2007).

### **2.1.8. Política de roteirização e sequenciamento**

Embora alterar uma política de estocagem ou de separação proporcione maiores reduções no tempo de separação, a troca de políticas de roteirização também pode oferecer tais reduções (PETERSEN; AASE, 2004). A decisão da roteirização e sequenciamento nas operações de movimentação de um armazém determinam a melhor rota e a sequência de locações para a separação e ou estocagem de um dado conjunto de produtos, geralmente com o objetivo de minimização dos custos de manuseio (GU; GOETSCHALCKX; MCGINNIS, 2007) ou minimizar as distâncias percorridas pelos separadores (PETERSEN; AASE, 2017). Este problema é uma variante do problema do caixeiro viajante especificamente para armazéns (ALTARAZI; AMMOURI, 2018; HALL, 1993; ROODBERGEN; VIS; TAYLOR, 2015),

onde a localização da separação/estocagem de um item é conhecida (GU; GOETSCHALCKX; MCGINNIS, 2007).

A rota entre as posições de visitação de uma lista de separação pode representar a maior parcela de tempo da atividade de separação, portanto uma redução na distância percorrida por esta rota pode reduzir o tempo total da operação, considerando a velocidade do separador constante (CARON; MARCHET; PEREGO, 2000). Para eficientemente guiar os separadores de pedidos, várias alternativas de políticas de roteirização estão disponíveis tanto na prática quanto na literatura (ROODBERGEN; VIS; TAYLOR, 2015). Estas alternativas podem variar de simples heurísticas à algoritmos ótimos (PETERSEN, 1999) e podem ser classificados em: transversal, retorno, ponto médio, maior distância, composta, ótima (PETERSEN; SCHMENNER, 1999), combinada (FRANZKE et al., 2017) e corredor por corredor (GILS et al., 2018).

Na roteirização transversal, o separador entra no corredor que contém pelo menos um produto da lista de separação por um extremo do corredor e sai pelo o outro extremo com o produto coletado e assim se destina ao outro corredor (KOSTER; LE-DUC; ROODBERGEN, 2007). É amplamente utilizado nos armazéns devido a sua simplicidade e por promover bons resultados quando a densidade de separação por corredor é alta (PETERSEN; AASE, 2004). Semelhante a política transversal e para *layout* com corredores de cruzamento ao meio (ou seja, com dois ou mais blocos), na política corredor por corredor o separador atravessa completamente cada sub corredor que contém pelo menos um item a ser coletado, deixando a programação dinâmica decidir qual corredor de cruzamento utilizar para mover-se ao próximo corredor (ROODBERGEN; VIS; TAYLOR, 2015).

A roteirização por retorno permite que separador entre e saia pelo mesmo extremo do corredor independente da distância entre a entrada do corredor e os pontos de coleta dos produtos (PETERSEN; AASE, 2017). Já a roteirização por ponto médio permite ao separador entrar por um extremo do corredor, fazer a coleta de produtos até no máximo a metade deste corredor e sair pelo mesmo extremo de entrada (KOSTER; LE-DUC; ROODBERGEN, 2007). Esta roteirização supera o desempenho da roteirização transversal quando a quantidade de separações por corredor é pequena (HALL, 1993).

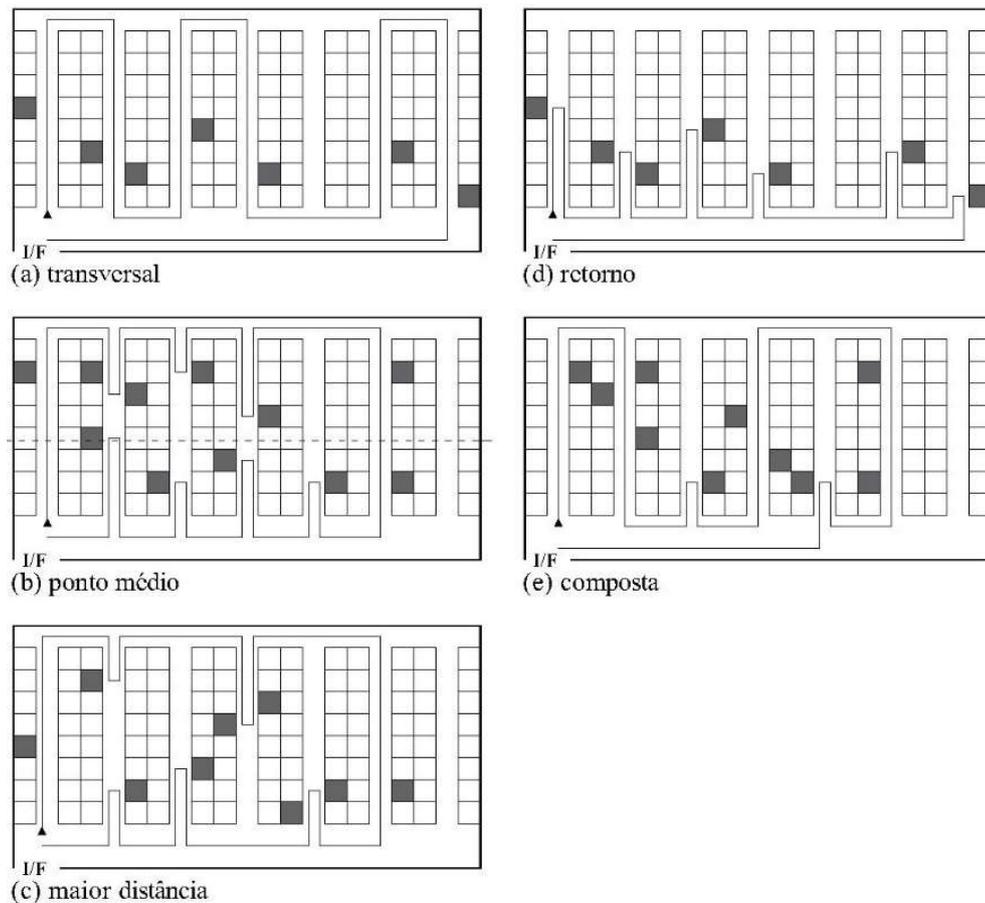
A política da maior distância oferece uma melhora sobre a política de ponto médio (HALL, 1993). Esta política vira o separador de pedidos em cada corredor quando a maior distância é encontrada, com os demais itens da lista de separação sendo coletados a partir do

corredor de cruzamento oposto (ROODBERGEN; VIS; TAYLOR, 2015). Dentro do corredor, a maior distância entre duas coletas seguidas deve ser evitada pelo separador (PETERSEN, 1999). Embora esta política supere o desempenho da política de ponto médio (HALL, 1993), a implementação da última é mais fácil (KOSTER; LE-DUC; ROODBERGEN, 2007).

A combinação das melhores características das roteirizações de retorno e transversal formam a política composta que busca minimizar a distância entre coletas distantes entre dois corredores adjacentes (PETERSEN, 1999). Esta política não atravessa todo o corredor se a política de retorno é preferível para as coletas daquele corredor (PETERSEN; SCHMENNER, 1999). Em contraste à política composta que foca somente em dois corredores adjacentes, a política combinada considera o bloco de armazenagem inteiro ao determinar a rota de separação (ELBERT et al., 2017).

Por fim, a política ótima de Ratliff e Rosenthal (1983) é basicamente a roteirização transversal enriquecida com aspectos da heurística da roteirização da maior distância (ROODBERGEN; VIS; TAYLOR, 2015) onde os corredores são completamente atravessados ou acessados e deixados pelo mesmo extremo (KOSTER; LE-DUC; ROODBERGEN, 2007). De todas as políticas, a ótima é a que oferece a menor distância percorrida, mas sua aplicação nem sempre é viável em função das complicadas rotas criadas e do tempo computacional envolvido no seu cálculo (ROODBERGEN; KOSTER, 2001). A FIGURA 4 mostra as roteirizações transversal, retorno, ponto médio, maior distância e composta.

FIGURA 4 – Políticas de roteirização



Fonte: Próprio autor.

Ressalta-se que as políticas de roteirização transversal e composta são as mais apropriadas para grandes listas de separação, enquanto que as políticas de roteirização maior distância e ponto médio se adequam melhor a pequenas listas de separação (PETERSEN, 1997). O desempenho das políticas de roteirização é altamente dependente da política de estocagem (GILS et al., 2018; PETERSEN, 1997), do tamanho da lista de separação (PETERSEN; SCHMENNER, 1999) e da quantidade de corredores de cruzamento (SHQAIR; ALTARAZI; AL-SHIHABI, 2014) e em menor grau de dependência da inclinação da curva de demanda dos itens (PETERSEN; SCHMENNER, 1999). Desta forma, a diferença entre o algoritmo ótimo e as políticas heurísticas pode variar amplamente a depender dos fatores já citados, assim como da velocidade do separador e do tempo de coleta (PETERSEN, 1999).

Todavia, a escolha pelas políticas básicas pode resultar em soluções próximas da roteirização ótima (HALL, 1993) e desta maneira evitar rotas complexas que podem causar confusão e consequentemente pode aumentar o tempo e erros na atividade de separação (PETERSEN; AASE, 2004). Porém, os autores Elbert et al. (2017) relatam que política ótima

se mostra mais robusta contra os desvios de rotas (esquecer um item ou pular um corredor ou ambos no processo de separação), indicando que esta política pode superar as demais heurísticas de roteirização mesmo sendo mais passível de desvios de rotas do que as heurísticas de roteirização. Além disto, Franzke et al. (2017) relatam a superioridade da política ótima ao se abordar o tema do congestionamento. Contudo, os gestores devem analisar os *trade-offs* entre a eficiência desta roteirização híbrida e a facilidade de implementação e uso das heurísticas puras de roteirização (PETERSEN, 1999; ROODBERGEN; KOSTER, 2001).

Por meio da revisão da literatura, pode-se concluir que a combinação do tipo de *layout*, a política de estocagem, a política de separação e a política de roteirização é de grande importância para a atividade de separação de pedidos e conseqüentemente para o desempenho geral do armazém. Ainda, pode-se inferir que a melhor combinação dependerá das reais condições de operação (fatores) e objetivos da empresa. Assim, técnicas de simulação podem auxiliar na tomada de decisão de qual combinação de *layout* e políticas utilizar frente os fatores de projeto (condições de operação).

## **2.2. Revisão da literatura a respeito de políticas de operações**

Uma revisão da literatura foi realizada para levantar o estado da arte das pesquisas envolvendo os quatro problemas de decisão (*layout* e políticas de controle de estocagem, separação e roteirização) no projeto de armazéns, analisados por meio de simulação. Para tal, utilizou-se de uma breve revisão sistemática. Uma revisão torna-se sistemática quando é baseada em uma pergunta claramente formulada, identifica estudos relevantes, avalia sua qualidade e resume suas evidências, utilizando uma metodologia explícita (KHAN et al., 2003).

Esta revisão é limitada por pesquisas que utilizam simulação como método, pois somente a simulação pode lidar com o comportamento estocástico das atividades de um armazém (BANKS et al., 2010), como, por exemplo, a aleatoriedade da chegada dos pedidos e sua variação ao longo da operação, a variabilidade da quantidade linhas por pedido, a variabilidade no tempo de coleta de um item, a aleatoriedade do tema congestionamento, etc. Além disso, permite analisar simultaneamente uma grande quantidade de combinações das alternativas dos quatro problemas de decisão elencados no projeto do armazém (AMMOURI; ALTARAZI; ALZUBI, 2012).

A pergunta geral a ser respondida pela revisão sistemática é: Considerando o emprego de simulação como metodologia, como as políticas de controle operacional estão sendo relacionadas ao *layout* de forma melhorar o desempenho do armazém? Ainda, esta pergunta

busca elucidar: quais são os principais critérios/objetivos de desempenho utilizados pelos artigos/pesquisas; quais são os principais fatores utilizados; quais são os tipos de simulação empregado (discreto, baseado em agentes, etc); e quais são os principais resultados, limitações e oportunidade de pesquisas futuras.

Para as etapas de planejamento, condução, síntese e compilação de dados e relatório da presente revisão sistemática, foram seguidos os passos propostos pelos autores Saunders, Lewis e Thornhill (2008), Tranfield, Denyer e Smart (2003) e Khan et al. (2003). Os parâmetros de busca adotados para a revisão sistemática foram:

- I. Publicações do tipo artigo e no formato eletrônico;
- II. Publicações entre 1997 e 2018;
- III. Publicações em língua inglesa;
- IV. Utilização da principal coleção da base dados da *Web of Science* (WoS);
- V. Área temática das publicações livre.

As palavras chaves foram definidas e refinadas conforme leitura de artigos de revisão da literatura recentes e relacionados a projeto de armazéns, uma vez que discutem o estado atual da arte referente ao tema estudado e apresentam trabalhos de relevância da área (SAUNDERS; LEWIS; THORNHILL, 2008). Como exemplo, podem-se citar as revisões de: De koster; Leduc e Roodbergen, (2007), Rouwenhorst et al. (2000), Baker e Canessa (2009), Davarzani e Norman (2015), Gu, Goetschalckx e McGinnis (2007, 2010), Khanzode e Shah (2017) e Van Gils et al. (2017). Logo as palavras chaves utilizadas foram: “*simulation*”, “*warehouse*”, “*layout*”, “*order picking*”, “*control policy*”, “*storage policy*”, “*picking policy*” e “*routing policy*”, agrupadas com operadores booleanos do tipo “OR” e “AND” e aplicadas em busca avançada na principal base de dados da WoS (*Web of Science*).

Com estas especificações encontrou-se um grupo de 50 artigos. Por meio da leitura do título e do resumo, este grupo de artigos foi avaliado por sua relevância e aderência à questão e objetivo desta revisão sistemática, utilizando os critérios claramente definidos (SAUNDERS; LEWIS; THORNHILL, 2008):

- I. Artigos que abordem operações manuais em armazéns;
- II. Artigos que avaliem alternativas de uma política de controle operacional no desempenho do armazém;

- III. Artigos que avaliem a interação conjunta de alternativas de duas ou mais políticas de controle operacional no desempenho do armazém, ou seja, artigos que avaliem a interação de múltiplas alternativas de cada política no desempenho do armazém;
- IV. Artigos que proponham uma metodologia (ou procedimento) de avaliação, classificação e seleção da melhor combinação entre políticas de controle operacional.

A adoção dos critérios supracitados resultou em um refinamento para nove artigos que após leitura completa proporcionou a inclusão de mais 10 artigos citados em suas referências, que possuíam adesão aos parâmetros e critérios anteriormente elencados, totalizando 19 artigos. Estes foram analisados e sintetizados de maneira mais profunda, quantitativamente e qualitativamente. Esta síntese consistiu na tabulação das características dos estudos (fatores e métodos), seus objetivos e relato descritivo de seus principais resultados (KHAN et al., 2003) com apontamento da lacuna encontrada para esta pesquisa (TRANFIELD; DENYER; SMART, 2003). No próximo tópico, serão expostas as análises e reporte da revisão sistemática.

### **2.2.1. Organização dos resultados da revisão sistemática**

Os artigos foram classificados conforme a abordagem das políticas de controle operacional (estocagem, separação e roteirização) e suas alternativas. Ou seja, artigos que abordam alternativas de uma política operacional (grupo um), artigos que abordam conjuntamente alternativas de duas políticas operacionais (grupo dois) e artigos que abordam alternativas das três políticas operacionais conjuntamente (grupo três). Os 19 trabalhos divididos em seus respectivos grupos encontram-se na TABELA 1.

TABELA 1 – Políticas de controle abordada por grupo de artigos analisados

| Artigos         |                                     | Políticas de controle operacional |         |             |                 |          |           |                       |       |                 |                  |           |                         |            |                  |                   |                              |                              |                                 |                                  |          |      |      |      |
|-----------------|-------------------------------------|-----------------------------------|---------|-------------|-----------------|----------|-----------|-----------------------|-------|-----------------|------------------|-----------|-------------------------|------------|------------------|-------------------|------------------------------|------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|----------|------|------|------|
|                 |                                     | Roteirização                      |         |             |                 |          |           | Estocagem             |       |                 |                  |           | Separação               |            |                  |                   |                              |                              |                                 |                                  |          |      |      |      |
|                 |                                     | Transversal                       | Retorno | Ponto Médio | Maior distância | Composta | Combinada | Corredor por corredor | Ótima | Nova heurística | Sem roteirização | Aleatória | Disponível mais próxima | Por Classe | Classe -Diagonal | Classe -Perímetro | Classe - <i>Across-aisle</i> | Classe - <i>Within-aisle</i> | Classe- <i>nearest location</i> | classe- <i>nearest sub-aisle</i> | Discreto | Lote | Onda | Zona |
| Grupo 1         | Elbert et al. (2017)                | X                                 | X       | X           | X               | X        | X         | X                     | X     | X               | X                |           |                         |            |                  |                   |                              |                              |                                 | X                                |          |      |      |      |
|                 | Petersen e Aase (2017)              | X                                 |         |             |                 |          |           |                       |       |                 | X                |           |                         |            |                  | X                 | X                            |                              |                                 | X                                |          |      |      |      |
|                 | Dekker et al. (2004)                | X                                 |         | X           | X               |          | X         | X                     | X     |                 |                  |           | X                       |            |                  |                   |                              |                              |                                 | X                                |          |      |      |      |
|                 | Petersen (2002)                     |                                   |         |             |                 |          |           |                       | X     |                 | X                |           |                         |            |                  | X                 | X                            |                              |                                 | X                                |          |      |      |      |
|                 | Roodbergen e De koster (2001)       | X                                 |         |             | X               |          | X         | X                     | X     | X               | X                |           |                         |            |                  |                   |                              |                              |                                 | X                                |          |      |      |      |
|                 | Petersen (2000)                     |                                   |         |             |                 |          | X         |                       |       |                 |                  |           |                         |            |                  | X                 |                              |                              |                                 | X                                | X        | X    | X    |      |
|                 | Petersen (1997)                     | X                                 | X       | X           | X               | X        |           | X                     |       |                 | X                |           |                         |            |                  |                   |                              |                              |                                 | X                                |          |      |      |      |
| Grupo 2         | Franzke et al. (2017)               | X                                 | X       | X           | X               | X        | X         | X                     |       | X               |                  | X         | X                       | X          | X                | X                 |                              |                              | X                               |                                  |          |      |      |      |
|                 | Altarazi e Ammouri (2018)           | X                                 |         |             |                 |          |           |                       |       | X               | X                | X         |                         |            |                  |                   |                              |                              | X                               |                                  |          |      |      |      |
|                 | Roodbergen, Vis e Taylor (2015)     | X                                 | X       |             | X               |          | X         | X                     |       |                 | X                |           | X                       |            | X                | X                 | X                            | X                            | X                               | X                                |          |      |      |      |
|                 | Shqair, Altarazi, Al-shihabi (2014) | X                                 |         |             | X               |          |           |                       |       |                 | X                |           | X                       |            |                  |                   |                              |                              |                                 | X                                |          |      |      |      |
|                 | Heath, Ciarallo e Hill (2013)       | X                                 |         |             |                 |          |           |                       |       | X               | X                |           |                         |            | X                | X                 |                              |                              |                                 | X                                |          |      |      |      |
|                 | Chan e Chan (2011)                  | X                                 | X       |             |                 | X        |           |                       |       |                 | X                |           |                         |            | X                | X                 |                              |                              |                                 | X                                |          |      |      |      |
|                 | Chen et al. (2010)                  | X                                 | X       |             | X               |          | X         |                       |       |                 | X                |           |                         |            | X                | X                 |                              |                              |                                 | X                                |          | X    |      |      |
|                 | Petersen e Schmenner (1999)         | X                                 | X       | X           | X               | X        |           | X                     |       |                 |                  |           | X                       | X          | X                | X                 |                              |                              |                                 | X                                |          |      |      |      |
| Petersen (1999) | X                                   |                                   |         | X           | X               |          | X         |                       |       | X               |                  |           |                         | X          |                  |                   |                              |                              | X                               |                                  |          |      |      |      |
| Grupo 3         | Van Gils et al. (2018)              | X                                 | X       |             | X               |          | X         | X                     |       | X               |                  | X         | X                       | X          | X                | X                 |                              |                              | X                               | X                                |          |      | X    |      |
|                 | Chackelson et al. (2013)            | X                                 | X       |             |                 |          |           |                       |       |                 | X                |           |                         |            | X                |                   |                              |                              | X                               | X                                |          |      |      |      |
|                 | Petersen e Aase (2004)              | X                                 |         |             |                 |          | X         | X                     |       | X               |                  |           |                         |            |                  | X                 |                              |                              | X                               | X                                |          |      |      |      |

Fonte: Próprio autor.

Em cada grupo, os artigos foram analisados quanto a:

- Tipo de estudo feito: *análise da interação* entre os problemas de planejamento (políticas de controle operacional, *layout* e fatores) ou *metodologia (ou procedimento) de avaliação, classificação e seleção* a respeito da melhor combinação de alternativas (entre políticas de controle e *layout*);
- Tipo de arranjo físico do *layout* (horizontal, vertical ou *fishbone*);
- Fatores empregados;
- Simulação empregada: SED (simulação de eventos discretos) ou SBA (simulação baseada em agentes);
- Fatores empregados com comportamento estocástico;
- Utilização de múltiplos separadores e análise do congestionamento;
- Critérios/objetivos adotados na avaliação do desempenho e análise de *trade-offs*;

Os estudos de *interação* são definidos como aqueles que analisam o efeito conjunto que dois ou mais problemas de decisão (neste caso: a política de estocagem, separação e roteirização) têm em um objetivo de desempenho (critério), e que podem ser investigados considerando várias políticas para cada problema de decisão (alternativas), analisando-se o efeito dessas políticas no desempenho do armazém. Os resultados destes estudos podem ser usados pelos gerentes de armazéns como uma orientação de como configurar/projetar seu sistema de separação de pedidos, levando-se em conta as interações entre os problemas de decisão. Salienta-se que os principais resultados dos trabalhos de análise de interação estão sintetizados no texto dos tópicos 2.1.6 a 2.1.8.

Para mostrar e analisar as interações entre as políticas de controle, *layout* e fatores, a maioria destes estudos utilizaram gráficos (ELBERT et al., 2017; HEATH; CIARALLO; HILL, 2013; PETERSEN, 1999; PETERSEN; AASE, 2004), análise de variância (ANOVA) (CHACKELSON et al., 2013; GILS et al., 2018; PETERSEN, 2002) ou ambos (ALTARAZI; AMMOURI, 2018; CHAN; CHAN, 2011; PETERSEN, 1997, 2002; PETERSEN; AASE, 2017; PETERSEN; SCHMENNER, 1999; SHQAIR; ALTARAZI; AL-SHIHABI, 2014), adotando um ou mais critérios/objetivos de desempenho do armazém (TABELA 2). ANOVA é a técnica estatística mais utilizada pelos estudos para determinar, por exemplo, as políticas de controle que têm o efeito mais significativo no desempenho do armazém e também confirmar se as interações entre as políticas de controle são estatisticamente significantes.

TABELA 2 – Critérios/objetivos por grupo de artigos analisado

|         | Artigos                             | Critérios/objetivos             |                                  |                                       |                      |               |                           |                                      |  |                     |                  |                   |            |  |   |   |   |  |  |   |
|---------|-------------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|---------------------------------------|----------------------|---------------|---------------------------|--------------------------------------|--|---------------------|------------------|-------------------|------------|--|---|---|---|--|--|---|
|         |                                     | Tempo                           |                                  |                                       |                      |               | Distância                 |                                      |  | Outros              |                  |                   |            |  |   |   |   |  |  |   |
|         |                                     | Total de separação de uma lista | Viagem na separação de uma lista | Total de separação de todas as listas | Trabalho/trabalhador | Ciclo do item | Total de congestionamento | Percorrida na separação de uma lista | Percorrida na separação de todas as listas | % pedidos atrasados | Nível de Serviço | Custo operacional | Trade-offs |  |   |   |   |  |  |   |
| Grupo 1 | Elbert et al. (2017)                | X                               |                                  |                                       |                      |               |                           |                                      |  |                     |                  |                   |            |  |   |   |   |  |  |   |
|         | Petersen e Aase (2017)              |                                 |                                  |                                       |                      |               |                           |                                      |  |                     | X                |                   |            |  |   |   |   |  |  |   |
|         | Dekker et al. (2004)                |                                 |                                  |                                       |                      |               |                           |                                      |  |                     | X                |                   |            |  |   |   |   |  |  |   |
|         | Petersen (2002)                     |                                 |                                  |                                       |                      |               |                           |                                      |  |                     | X                |                   |            |  |   |   |   |  |  |   |
|         | Roodbergen e De koster (2001)       |                                 | X                                |                                       |                      |               |                           |                                      |  |                     |                  |                   |            |  |   |   |   |  |  |   |
|         | Petersen (2000)                     |                                 |                                  | X                                     | X                    |               |                           |                                      |  |                     |                  |                   |            |  | X |   |   |  |  |   |
|         | Petersen (1997)                     |                                 |                                  |                                       |                      |               |                           |                                      |  |                     | X                |                   |            |  |   |   |   |  |  |   |
| Grupo 2 | Franzke et al. (2017)               | X                               |                                  |                                       |                      |               |                           |                                      |  |                     |                  |                   |            |  |   |   |   |  |  |   |
|         | Altarazi e Ammouri (2018)           |                                 |                                  |                                       |                      |               | X                         |                                      |  |                     |                  |                   |            |  |   |   |   |  |  |   |
|         | Roodbergen, Vis e Taylor (2015)     |                                 |                                  |                                       |                      |               |                           |                                      |  |                     | X                |                   |            |  |   |   |   |  |  |   |
|         | Shqair, Altarazi, Al-shihabi (2014) |                                 |                                  |                                       |                      |               |                           |                                      |  |                     | X                |                   |            |  |   |   |   |  |  |   |
|         | Heath, Ciarallo e Hill (2013)       |                                 |                                  | X                                     |                      |               |                           |                                      | X  |                     |                  |                   |            |  |   |   |   |  |  |   |
|         | Chan e Chan (2011)                  |                                 |                                  | X                                     |                      |               |                           |                                      |  |                     |                  | X                 |            |  |   |   |   |  |  |   |
|         | Chen et al. (2010)                  |                                 |                                  |                                       |                      |               |                           |                                      |  |                     |                  |                   |            |  | X | X | X |  |  |   |
|         | Petersen e Schmenner (1999)         |                                 |                                  |                                       |                      |               |                           |                                      |  |                     |                  | X                 |            |  |   |   |   |  |  |   |
|         | Petersen (1999)                     | X                               |                                  |                                       |                      |               |                           |                                      |  |                     |                  |                   |            |  |   |   |   |  |  |   |
| Grupo 3 | Van Gils et al. (2018)              |                                 |                                  |                                       |                      |               |                           |                                      |  |                     | X                |                   |            |  |   |   |   |  |  |   |
|         | Chackelson et al. (2013)            | X                               |                                  | X                                     |                      |               |                           |                                      |  |                     |                  |                   |            |  |   |   |   |  |  | X |
|         | Petersen e Aase (2004)              |                                 |                                  | X                                     |                      |               |                           |                                      |  |                     |                  |                   |            |  |   |   |   |  |  |   |

Fonte: Próprio autor.

Metodologia ou procedimentos de avaliação, classificação e seleção são empregados por alguns estudos para avaliar e selecionar a melhor combinação de alternativas das políticas operacionais frente ao *layout* e a outros fatores (CHEN et al., 2010; ROODBERGEN; VIS; TAYLOR, 2015).

Apesar de nesta dissertação o arranjo físico do *layout* ser considerado como uma decisão a ser tomada, para efeito de classificação será considerado como um fator de variação do *layout*. Outros fatores a respeito da variação do *layout* são: o formato, a quantidade e comprimento dos corredores de separação e a quantidade dos corredores de cruzamento.

Em conjunto com as políticas de controle operacional, muitos fatores (TABELA 3) afetam o desempenho geral do armazém e por isto foram empregados nas análises, de modo a verificar o comportamento das políticas de controle frente às condições de operação reais de um armazém. A depender do artigo, alguns destes fatores podem ter comportamento estocástico (TABELA 4). Todavia, os demais fatores são tratados de maneira determinística.

TABELA 3 – Fatores considerados pelos grupos de artigos analisados

| Artigos         | Fatores                             |                   |                    |                   |                     |                               |                              |   |                       |   |                |                    |                           |                 |                     |                |
|-----------------|-------------------------------------|-------------------|--------------------|-------------------|---------------------|-------------------------------|------------------------------|---|-----------------------|---|----------------|--------------------|---------------------------|-----------------|---------------------|----------------|
|                 | TLS                                 | Formato do layout | Localização do I/F | Volume de pedidos | Inclinação da curva | Qtde corredores de cruzamento | Qtde corredores de separação | Comprimento dos corredores de separação | Capacidade do armazém | Distribuição dos corredores de cruzamento | Devios da rota | Capacidade do lote | Regra de formação do lote | TEC dos pedidos | Qtde de separadores | Arranjo físico |
| Grupo 1         | Elbert et al.(2017)                 | X                 |                    |                   |                     |                               |                              |   |                       |   | X              |                    |                           |                 |                     |                |
|                 | Petersen eAase (2017)               | X                 |                    |                   |                     | X                             |                              |   |                       | X   |                |                    |                           |                 |                     |                |
|                 | Dekker et al.(2004)                 | X                 |                    |                   |                     |                               |                              |   |                       |   |                |                    |                           |                 |                     |                |
|                 | Petersen(2002)                      | X                 |                    |                   |                     |                               | X                            | X                                       | X                     |   |                |                    |                           |                 |                     |                |
|                 | Roodbergen eDe koster (2001)        | X                 |                    |                   |                     | X                             | X                            | X                                       |                       |   |                |                    |                           |                 |                     |                |
|                 | Petersen(2000)                      | X                 |                    | X                 | X                   |                               |                              |   |                       |   |                |                    |                           |                 |                     |                |
|                 | Petersen(1997)                      | X                 | X                  | X                 |                     |                               |                              |   |                       |   |                |                    |                           |                 |                     |                |
| Grupo 2         | Franzke et al. (2017)               | X                 |                    |                   |                     |                               |                              |   |                       |   |                |                    |                           |                 |                     | X              |
|                 | Altarazi e Ammouri (2018)           | X                 |                    | X                 |                     |                               |                              |   | X                     |   |                |                    |                           | X               | X                   | X              |
|                 | Roodbergen, Vis e Taylor (2015)     | X                 |                    |                   |                     | X                             | X                            | X                                       |                       |   |                |                    |                           |                 |                     |                |
|                 | Shqair, Altarazi, Al-shihabi (2014) | X                 |                    |                   |                     | X                             | X                            | X                                       |                       |   |                |                    |                           |                 |                     |                |
|                 | Heath, Ciarallo e Hill (2013)       |                   |                    |                   |                     |                               |                              |   |                       |   |                |                    |                           |                 |                     | X              |
|                 | Chan e Chan (2011)                  | X                 |                    |                   |                     |                               |                              |   |                       |   |                |                    |                           |                 |                     |                |
|                 | Chen et al. (2010)                  | X                 |                    |                   |                     |                               |                              |   |                       |   |                | X                  | X                         | X               |                     |                |
|                 | Petersen e Schmenner (1999)         | X                 | X                  | X                 | X                   |                               |                              |   |                       |   |                |                    |                           |                 |                     |                |
| Petersen (1999) | X                                   |                   |                    |                   |                     |                               |                              |   |                       |   |                |                    |                           |                 |                     |                |
| Grupo 3         | Van Gils et al. (2018)              | X                 |                    |                   |                     |                               | X                            |   |                       |   |                | X                  | X                         |                 |                     |                |
|                 | Chackelson et al. (2013)            | X                 |                    |                   |                     |                               |                              |   |                       |   |                |                    |                           |                 |                     |                |
|                 | Petersen e Aase (2004)              | X                 | X                  | X                 | X                   |                               |                              |   |                       |   |                |                    |                           |                 |                     |                |
| Ocorrências     | 18                                  | 2                 | 3                  | 3                 | 3                   | 4                             | 5                            | 4                                       | 2                     | 1   | 1              | 2                  | 2                         | 2               | 3                   | 1              |

Fonte: Próprio autor.

TABELA 4 – Comportamento estocástico por grupo de artigo analisado

| Artigos         | Tipo de Simulação                   | Fatores                 |     |                 |                 |                 |                 |  |
|-----------------|-------------------------------------|-------------------------|-----|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|--|
|                 |                                     | Atribuição das locações | TLS | Unidades de SKU | Desvios de rota | TEC dos pedidos | Tempo de coleta |  |
| Grupo 1         | Elbert et al. (2017)                | SBA                     | X   |                 |                 | X               |                 |  |
|                 | Petersen e Aase (2017)              | SED                     | X   |                 |                 |                 |                 |  |
|                 | Dekker et al. (2004)                | SED                     | X   | X               |                 |                 |                 |  |
|                 | Petersen (2002)                     | SED                     | X   |                 |                 |                 |                 |  |
|                 | Roodbergen e De koster (2001)       | SED                     | X   |                 |                 |                 |                 |  |
|                 | Petersen (2000)                     | SED                     | X   | X               | X               |                 |                 |  |
|                 | Petersen (1997)                     | SED                     | X   |                 |                 |                 |                 |  |
| Grupo 2         | Franzke et al. (2017)               | SBA                     | X   |                 |                 |                 |                 |  |
|                 | Altarazi e Ammouri (2018)           | SED                     | X   | X               |                 | X               |                 |  |
|                 | Roodbergen, Vis e Taylor (2015)     | SED                     | X   | X               |                 |                 |                 |  |
|                 | Shqair, Altarazi, Al-shihabi (2014) | SBA                     | X   |                 |                 |                 |                 |  |
|                 | Heath, Ciarallo e Hill (2013)       | SBA                     | X   |                 |                 |                 |                 |  |
|                 | Chan e Chan (2011)                  | SED                     | X   |                 |                 |                 |                 |  |
|                 | Chen et al. (2010)                  | SED                     | X   | X               |                 | X               |                 |  |
|                 | Petersen e Schmenner (1999)         | SED                     | X   |                 |                 |                 |                 |  |
| Petersen (1999) | SED                                 | X                       |     |                 |                 |                 |                 |  |
| Grupo 3         | Van Gils et al. (2018)              | SED                     | X   | X               |                 |                 |                 |  |
|                 | Chackelson et al. (2013)            | SED                     |     |                 |                 |                 | X               |  |
|                 | Petersen e Aase (2004)              | SED                     | X   | X               |                 |                 |                 |  |

Fonte: Próprio autor.

Assim, nos próximos tópicos, segue análise dos trabalhos por grupo conforme classificação descrita.

### **2.2.2. Grupo um – Abordagem de uma política operacional**

Dos 19 trabalhos analisados, sete artigos enquadram-se nesta classificação. Estes trabalhos analisaram a interação entre duas ou mais alternativas de uma política de controle operacional e dois ou mais níveis de outros fatores, com foco no desempenho do armazém por meio de um ou mais critérios. Nesta abordagem, as outras duas políticas de controle operacional são consideradas constantes e isto pode ser observado na TABELA 1 para este grupo de 7 trabalhos.

Assim, quatro trabalhos analisaram a interação entre as alternativas de políticas de roteirização (DEKKER et al., 2004; ELBERT et al., 2017; PETERSEN, 1997; ROODBERGEN; KOSTER, 2001) e os fatores tamanho da lista de separação (TLS), formato do *layout*, localização do ponto de início e fim (I/F) da rota de separação, quantidade de corredores de cruzamento, quantidade e comprimento dos corredores de separação e desvios de rota (que compreendem o esquecimento de um item da lista de separação, pular um corredor de separação ou ambos).

Petersen (2002) e Petersen e Aase (2017) analisaram a interação entre as alternativas de políticas de estocagem e os fatores tamanho da lista de separação (TLS), capacidade (tamanho) do armazém, quantidade e comprimento dos corredores de separação, quantidade de corredores de cruzamento e a sua posição no *layout*. Ainda, apenas Petersen (2000) analisou as interações entre as alternativas de políticas de separação e os parâmetros tamanho da lista de separação, o volume de pedidos e a inclinação da curva de demanda.

Os fatores utilizados por cada artigo podem ser vistos na TABELA 3. Estes fatores são inseridos nas interações, obedecendo uma variação determinística (escalonada, por exemplo) ou um comportamento estocástico. O fator mais utilizado é o tamanho da lista de separação (TLS) sendo utilizado por todos os trabalhos deste grupo. Em seguida aparecem os fatores quantidade de corredores de cruzamento, quantidade e comprimento dos corredores de separação, que foram utilizados por pelo menos dois trabalhos cada fator.

O comportamento estocástico (TABELA 4) dos estudos é representado pela atribuição das locações nas listas de separação, pelo tamanho da lista de separação (TLS) ou quantidade

de linhas por pedido, a quantidade de unidades de SKU por linha a ser separada e os desvios de rota. Estes comportamentos foram, majoritariamente, abordados por meio da utilização de SED (Simulação por eventos discretos) e somente Elbert et al. (2017) utilizaram SBA (Simulação baseado em agentes), pois estudam o comportamento de agentes (separadores de pedidos) em armazéns com relação aos desvios de roteirização versus as políticas de roteirização.

Para a avaliação do desempenho das interações entre as políticas de operação e os fatores foram utilizados um ou mais critérios/objetivos conjuntamente. Os critérios/objetivos por artigo analisado pode ser observado na TABELA 2. Dos sete artigos analisados, três utilizaram critérios/objetivos relacionados ao tempo e quatro utilizaram critérios/objetivos relacionado a distância percorrida. Foram aplicados sozinhos os critérios/objetivos tempo total de separação de uma lista, tempo de viagem na separação de uma lista e distância percorrida na separação de uma lista, sendo este o mais empregado. Já Petersen (2002) aplicou conjuntamente os critérios tempo de trabalho por trabalhador em um dia, tempo de separação de todas as listas e % de pedidos atrasados. Todavia, mesmo considerando a aplicação de três critérios conjuntamente, o autor não considerou *trade-offs* entre eles.

Com exceção de Dekker et al. (2004) que analisaram um *layout* horizontal dividido em blocos e em mezanino, os demais artigos deste grupo analisaram somente o *layout* tradicional do tipo vertical, mesmo que o estudo da interação de outros arranjos seja importante (ALTARAZI; AMMOURI, 2018). Ainda, embora Petersen (2000) tenha utilizado múltiplos separadores simultaneamente em seu estudo, nenhum dos trabalhos deste grupo aborda a questão do congestionamento.

### **2.2.3. Grupo dois – Abordagem de duas políticas operacionais conjuntamente**

Dos 19 artigos analisados, nove trabalhos enquadram-se nesta classificação. Para este grupo de trabalhos, as alternativas das políticas de roteirização, estocagem e separação que foram abordadas encontram-se listadas na TABELA 1. Neste grupo, todos os trabalhos utilizaram a política de separação discreta, com exceção dos autores Chen et al. (2010) que trabalharam com a política de separação por lote.

Dentre os nove, sete artigos analisaram a interação ente as alternativas das políticas de estocagem e de roteirização e dois ou mais níveis de outros fatores, com foco no desempenho do armazém por meio de um ou mais critérios (ALTARAZI; AMMOURI, 2018; CHAN; CHAN, 2011; FRANZKE et al., 2017; HEATH; CIARALLO; HILL, 2013; PETERSEN; SCHMENNER, 1999; SHQAIR; ALTARAZI; AL-SHIHABI, 2014).

Estes artigos empregaram diferentes níveis dos fatores: tamanho da lista de separação (TLS), localização do ponto de início e fim (I/F) da rota de separação, volume de pedidos, inclinação da curva de demanda, quantidade de corredores de cruzamento, quantidade e comprimento dos corredores de separação, capacidade do armazém, tempo entre chegada (TEC) dos pedidos e quantidade de separadores.

Os demais artigos propuseram uma metodologia de avaliação, seleção e classificação da melhor combinação de alternativas das políticas de controle operacional e (ou frente a) outros fatores (CHEN et al., 2010; ROODBERGEN; VIS; TAYLOR, 2015). Nestes, foram utilizados os fatores: tamanho da lista de separação (TLS), quantidade dos corredores de cruzamento, quantidade e comprimento dos corredores de separação, capacidade do lote de separação e regra de formação do lote.

Na TABELA 3, os fatores utilizados podem ser observados por artigo. Estes fatores foram inseridos obedecendo uma variação determinística (escalonada, por exemplo) ou um comportamento estocástico. Novamente o fator tamanho da lista de separação (TLS) foi o mais utilizado. Com ocorrência em pelo menos dois artigos, estão os fatores volume de pedidos, quantidade de corredores de cruzamento, quantidade e comprimento dos corredores de separação e quantidade de separadores.

O comportamento estocástico (TABELA 4) dos estudos foram representados pela atribuição das locações nas listas de separação, pelo tamanho da lista de separação (TLS) e o tempo entre chegada (TEC) dos pedidos. Embora a abordagem estocástica destes dois últimos parâmetros sejam importantes para o estudo do ambiente de armazenagem, somente os trabalhos de Altarazi e Ammouri (2018) e Chen et al. (2010) empregaram conjuntamente ambos. Todavia, nenhum dos artigos analisados consideraram diferentes frequências de chegadas de pedidos ao longo da operação.

Estes comportamentos foram, novamente em sua maioria, abordados por meio da utilização de SED (Simulação por eventos discretos) e somente os trabalhos de Franzke et al. (2017), Shqair; Altarazi e Al-shihabi (2014) e Heath, Ciarallo e Hill (2013) utilizaram SBA (Simulação baseado em agentes). Os autores Franzke et al. (2017) e Heath, Ciarallo e Hill (2013) utilizaram SBA para estudar o comportamento dos separadores de pedidos (agentes) e suas interações com o ambiente (área de separação de pedidos). Este comportamento foi pré definido e os autores buscam avaliar o tema de bloqueio/congestionamento entre os separadores de pedidos.

Por sua vez, os autores Shqair; Altarazi e Al-shihabi, (2014) relatam que somente o uso de SBA poderia incorporar em um único modelo todos os elementos de interação de seu estudo (alternativas de políticas de estocagem e roteirização, os níveis dos fatores quantidade e comprimento de corredores de separação, quantidade de corredores de cruzamento e tamanho da lista de separação) de modo a facilitar a mudança destes elementos para a análise das interações, evitando-se assim a grande quantidade de modelos de simulação que deveriam ser codificados, verificados e validados se outro método fosse utilizado.

Novamente foram utilizados um ou mais critérios/objetivos conjuntamente para avaliação do desempenho do armazém (TABELA 2) tanto para aos estudos de interação quanto para os estudos que propuseram uma metodologia de avaliação, classificação e seleção das políticas. Foram aplicados sozinhos os critérios/objetivos: tempo total de separação de uma lista, distância percorrida na separação de uma lista, tempo de viagem na separação de uma lista e tempo de ciclo de um item. Foram abordados, conjuntamente, o tempo total de separação de todas as listas e o tempo total de congestionamento (HEATH; CIARALLO; HILL, 2013), o tempo total de separação de todas as listas e a distância percorrida na separação de todas as listas (CHAN; CHAN, 2011) e nível de serviço e custo operacional (CHEN et al., 2010). Neste grupo, os critérios/objetivos relacionados ao tempo aparecem em seis dos nove trabalhos e os relacionados à distância aparecem em quatro dos nove trabalhos.

Heath, Ciaralloe Hill (2013) levantaram duas curvas em um gráfico relacionando custo/pedido e pedido/hora, representando o impacto do congestionamento nas operações em função do aumento de separadores na simulação. Concluíram que, quanto mais separadores são inseridos na simulação, maior é o custo do pedido e menos pedidos por hora são separados devido a ocorrência congestionamento.

Ao utilizar dois critérios, Chan e Chan (2011) concluíram que diferentes combinações de políticas e fatores podem resultar em diferentes desempenhos para ambos os critérios, ou seja, a combinação que desempenha melhor em termos de tempo de separação pode resultar em uma maior distância percorrida. Mesmo assim, os dois artigos anteriores não consideram *trade-offs* entre os critérios utilizados.

Já os autores Chen et al. (2010) utilizaram o *trade-off* entre os critérios/objetivos nível de serviço e custo operacional, justificando que na CSs os gerentes de armazéns devem olhar além de um único índice de desempenho e considerar *trade-offs* entre diferentes critérios. Os autores definiram o custo operacional como o produto do tempo total trabalhado pela unidade

de custo operacional e o nível de serviço como a % de pedidos separados conforme um prazo predeterminado de tempo.

Os artigos dos autores Altarazi e Ammouri (2018), Roodbergen, Vis e Taylor (2015) e Shqair, Altarazi e Al-shihabi (2014) analisaram diferentes *layouts*. Todavia, somente Altarazi e Ammouri (2018) analisaram os *layouts* quanto a seu arranjo físico, mostrando que não somente a quantidade e comprimento dos corredores de separação e quantidade de corredores de cruzamento (que divide o *layout* em blocos) é estatisticamente significativa no desempenho do armazém. Os autores analisaram os arranjos de *layout* tradicionais horizontal, vertical e vertical com blocos e também o não tradicional *fishbone*. Os demais trabalhos utilizaram o *layout* vertical em seus estudos.

Embora os trabalhos de Altarazi e Ammouri (2018), Franzke et al. (2017) e Heath, Ciarallo e Hill (2013) tenham utilizado múltiplos separadores em suas análises, somente os dois últimos grupos de autores avaliaram o impacto do congestionamento no desempenho do armazém. Como já explicitado, a consideração do congestionamento dos separadores de pedidos deve ser considerada para representar as operações do armazém com maior aderência a realidade.

Como os principais resultados dos trabalhos de análise de interação estão sintetizados no texto dos tópicos 2.1.6 a 2.1.8, maior atenção será dado aos artigos que propuseram procedimentos de avaliação, classificação e seleção de combinações de alternativas de políticas, *layout* e fatores (CHEN et al., 2010; ROODBERGEN; VIS; TAYLOR, 2015).

Roodbergen, Vis e Taylor (2015) propuseram uma metodologia de projeto que visa encontrar um bom *layout* em combinação com eficientes políticas de controle operacionais. O modelo dos autores tem como dados de entrada o comportamento estocástico do tamanho da lista de separação (TLS) e a atribuição das locações, a largura dos corredores de separação e cruzamento, a capacidade de estocagem, o tipo de sistema de armazenagem e as limitações físicas do prédio. As variáveis de decisão compreendem um grupo de alternativas/valores (determinada pelo usuário) da política de roteirização, da política de estocagem, da quantidade e comprimento dos corredores de separação e da quantidade de corredores de cruzamento. O modelo considera este grupo de alternativas/valores para determinar a combinação de variáveis de decisão que resultará na menor distância média percorrida para se separar um pedido, calculada por meio de uma simulação de Monte Carlo.

Chen et al. (2010) propuseram uma metodologia híbrida baseada em simulação de Monte Carlo e DEA (*Data Envelopment Analysis*) para selecionar um grupo de combinações de políticas de controle operacionais (roteirização e estocagem) e fatores (capacidade de lote de separação e tipo de sequenciamento de coleta) que fossem robustas às mudanças previsíveis nas demandas (baseado no TEC de pedidos e tamanho da lista de separação (TLS)) por meio de cenários. Para tal consideraram o *trade-off* entre o custo operacional e o nível de serviço, onde cada combinação é avaliado conforme sua eficiência (robustez).

O modelo foi dividido em duas fases principais. Na primeira parte devem ser informados os dados do armazém (quantidade, largura e comprimento dos corredores de separação, e capacidade do armazém), as alternativas de cada política e fatores que devem ser combinados e os parâmetros do separador de pedidos (velocidade, tempo de preparação, coleta e classificação). Na segunda parte, denominada analítica, DEA analisa os dados de saída do modelo de simulação e retorna para cada cenário um grupo de combinações de políticas/fatores que possuam eficiências semelhantes. Neste ponto o gerente do armazém pode selecionar qual combinação adotar conforme suas preferências ou experiência com o ambiente de armazenagem.

Observa-se que ambos os artigos não consideram a questão de múltiplos separadores e conseqüentemente o congestionamento entre eles. Também, não abordam alternativas de arranjo físico do *layout* e consideram a política de separação por lote (CHEN et al., 2010) ou discreta (ROODBERGEN; VIS; TAYLOR, 2015). Logo, seria interessante considerar ambas alternativas de separação já que artigos anteriores relatam que a separação por lote é mais indicada quando se objetiva minimizar o critério tempo médio total de separação de todos os pedidos (CHACKELSON et al., 2013; PETERSEN; AASE, 2004), enquanto que a separação discreta é a mais indicada quando se objetiva minimizar o tempo médio de separação por pedido, onde o cliente demanda por respostas rápidas e assim *trade-offs* devem ser novamente considerados (CHACKELSON et al., 2013). Ainda, embora Chen et al. (2010) tenha utilizado conjuntamente os comportamentos estocásticos para a atribuição da locação, tamanho da lista de separação e TEC dos pedidos, a consideração da variabilidade do TEC dos pedidos ao longo da operação pode trazer maior realidade ao modelo, e não deve ser somente considerada para a construção de cenários como feito pelos autores.

#### 2.2.4. Grupo três – Abordagem de três políticas operacionais conjuntamente

Dos 19 trabalhos analisados, três artigos pertencem a esta classificação. As alternativas das políticas de roteirização, estocagem e separação que foram abordadas neste grupo de trabalho encontram-se listadas na TABELA 1.

Todos os artigos analisaram a interação ente as alternativas das políticas de estocagem, roteirização e separação e dois ou mais níveis de outros fatores, com foco no desempenho do armazém por intermédio de um ou mais critérios/objetivos (CHACKELSON et al., 2013; GILS et al., 2018; PETERSEN; AASE, 2004). Estes artigos empregaram diferentes níveis dos fatores: tamanho da lista de separação (TLS), localização do ponto de início e fim (I/F) da rota de separação, inclinação da curva de demanda, quantidade dos corredores de separação, capacidade do lote e regra de formação do lote.

Na TABELA 3, os fatores utilizados podem ser observados por trabalho. Estes fatores foram inseridos obedecendo uma variação determinística (escalonada, por exemplo) ou um comportamento estocástico. O fator mais preponderante foi novamente o tamanho da lista de separação (TLS).

O comportamento estocástico (TABELA 4) dos estudos foi representado pela atribuição das locações nas listas de separação, pelo tamanho da lista de separação (TLS) e pelo tempo de coleta de cada SKU. Neste grupo, nenhum dos trabalhos aborda o TEC entre pedidos e variação do TEC ao longo da operação. Todas as simulações foram feitas por meio de SED, sendo que Petersen e Aase (2004) utilizaram simulação de Monte Carlo.

Mais uma vez foram utilizados um ou mais critérios/objetivos conjuntamente para avaliação do desempenho do armazém (TABELA 2). Foram aplicados os critério/objetivos distância percorrida na separação de uma lista (GILS et al., 2018) e tempo total de separação de todas as listas (PETERSEN; AASE, 2004). Já conjuntamente foram abordados os critérios/objetivos tempo total de separação de todas as listas e tempo total separação de uma lista (CHACKELSON et al., 2013). Somente os últimos autores consideraram o *trade-off* entre os critérios abordados, e concluíram que as combinações entre políticas e fatores que levam a minimização de um dos critérios/objetivos tende a ter um resultado inverso para outro critério/objetivo.

Os três artigos deste grupo analisaram *layouts* com arranjo físico vertical e somente Van Gils et al. (2018) analisaram uma variação do *layout* (a quantidade de corredores de separação). Nenhum dos artigos analisou a questão de múltiplos separadores e conseqüentemente não

abordam o congestionamento, mesmo que isto seja um fator importante a ser considerado no desempenho geral do armazém (HEATH; CIARALLO; HILL, 2013).

Os principais resultados dos artigos de análise de interação deste grupo estão sintetizados no texto dos tópicos 2.1.6 a 2.1.8. Todavia, Van Gils et al. (2018) relataram que a combinação entre as alternativas das políticas de estocagem, separação e roteirização são estatisticamente significativas. Ainda, concluíram que estas interações devem ser levadas em conta ao se projetar as operações do armazém.

### **2.2.5. Conclusões da revisão sistemática**

Por meio da construção da revisão sistemática a respeito de como as políticas de controle operacional estão sendo relacionadas ao *layout* de forma a melhorar o desempenho do armazém, por meio do emprego de simulação, pode-se concluir:

- Dos 19 artigos que compõe a revisão sistemática, somente três artigos (CHACKELSON et al., 2013; GILS et al., 2018; PETERSEN; AASE, 2004) abordam a combinação de múltiplas alternativas das políticas de estocagem, separação e roteirização. Todos são artigos classificados como de interação;
- Do total de artigos analisados, somente dois artigos (CHEN et al., 2010; ROODBERGEN; VIS; TAYLOR, 2015) propuseram uma metodologia de avaliação, seleção e classificação da melhor combinação de alternativas de políticas de controle e (ou frente a) outros fatores. Destes, somente um deles propôs a construção de cenários (CHEN et al., 2010). Ambos os trabalhos abordam somente a combinação de alternativas de duas políticas de controle operacional, considerando ou a política de separação discreta ou a política de separação por lote e não ambas. Ainda, não consideram a temática do congestionamento e tão pouco alternativas de arranjo físico de *layout*.
- Do total de artigos analisados, somente dois artigos (FRANZKE et al., 2017; HEATH; CIARALLO; HILL, 2013) se preocupam com a temática do congestionamento e utilizaram SBA para abordar o tema. Também, estes trabalhos abordaram somente a combinação de alternativas de duas políticas de controle operacional e são classificados como de interação;
- Do total de artigos estudados, somente dois artigos (CHACKELSON et al., 2013; CHEN et al., 2010) consideram simultaneamente dois critérios/objetivos com análise do *trade-off* entre eles. Somente um destes artigos (CHEN et al., 2010) propôs uma

metodologia de avaliação, seleção e classificação da melhor combinação de alternativas de políticas de controle e (ou frente a) outros fatores. Nenhum deles aborda a questão do congestionamento e não consideram múltiplas alternativas de arranjo de *layout*;

- Somente um artigo (CHEN et al., 2010) considera os critérios/objetivos nível de serviço e custo operacional. A grande maioria considerou critérios/objetivos relacionados ao tempo e distância percorrida na separação dos pedidos;
- O fator com maior ocorrência foi o tamanho da lista de separação (TLS), seguido da quantidade e comprimento dos corredores de separação e quantidade dos corredores de cruzamento;
- Somente um artigo (ALTARAZI; AMMOURI, 2018) considera a questão da variação dos arranjos físicos do *layout*. Todavia não considera o congestionamento entre separadores e *trade-off* entre critérios/objetivos;
- Somente dois artigos (ALTARAZI; AMMOURI, 2018; CHEN et al., 2010) abordam simultaneamente o comportamento estocástico da atribuição das locações, TLS e TEC dos pedidos. Ambos não consideram a variação da frequência do TEC ao longo da operação. Somente um destes artigos (CHEN et al., 2010) propôs uma metodologia de avaliação, seleção e classificação da melhor combinação de alternativas de políticas de controle e (ou frente a) outros fatores. Nenhum deles aborda a temática do congestionamento.

Logo, pode-se inferir que existe uma lacuna para o estudo de uma metodologia que avalie e selecione uma combinação das alternativas das três políticas operacionais e alternativas do arranjo físico do *layout*, considerando:

- O caráter estocástico da operação de separação do armazém quanto à atribuição das locações na lista de separação, TLS, TEC dos pedidos e variação do TEC ao longo da operação;
- O congestionamento na atividade de separação;
- Multicritérios/objetivos e *trade-offs* entre eles, por intermédio da preferência do tomador de decisão;
- Construção de cenários para avaliar a robustez das possíveis combinações;

Para tal é proposto um modelo híbrido composto de um modelo de simulação de eventos discretos (SED), um modelo de análise de decisão multicritério (MCDA) com planejamento de cenários (SP).

## **2.3. Análise de decisão multicritério**

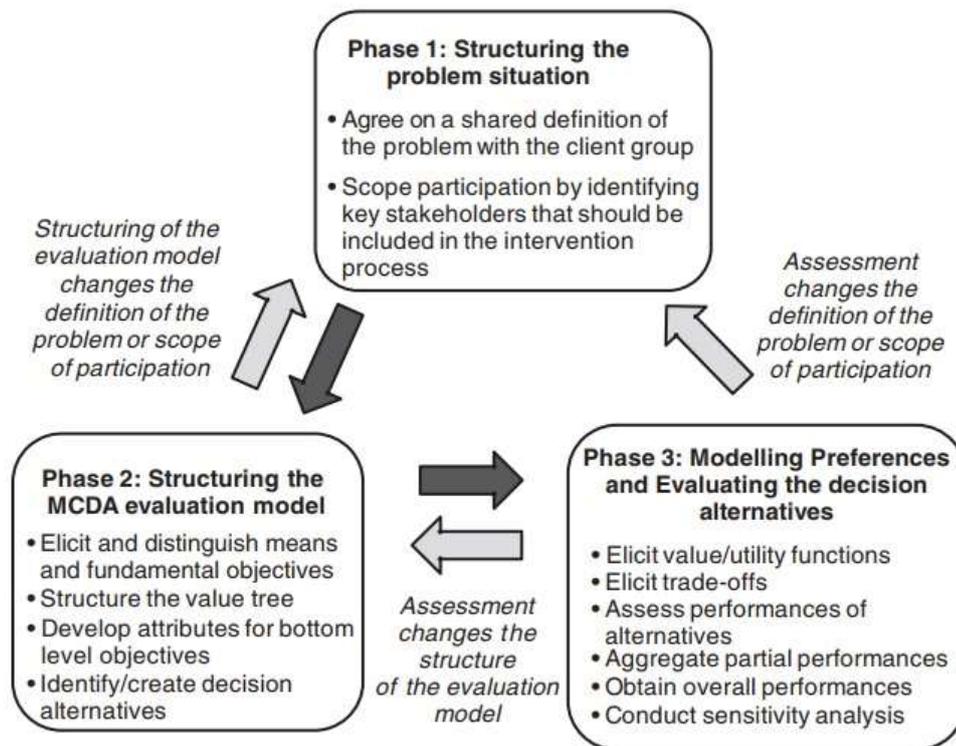
### **2.3.1. Modelo e elementos**

Frequentemente, diretores, gerentes e analistas são expostos a problemas de decisão caracterizados por múltiplos objetivos e alternativas, onde *trade-offs* devem ser analisados. A análise de decisão busca examinar formalmente e sistematicamente estes problemas de decisão (KEENEY, 1982). Por meio da divisão do problema em um conjunto de problemas menores, busca tornar a análise mais fácil e após lidar separadamente com estes problemas menores, a análise de decisão fornece um mecanismo formal para integrar os resultados para que uma alternativa possa ser selecionada provisoriamente (GOODWIN; WRIGHT, 2004; P. 4).

Logo, neste sentido, a análise de decisão multicritério (MCDA) busca: auxiliar na tomada de decisão levando em consideração os múltiplos e conflitantes critérios; ajudar na estruturação do problema; e ajudar os tomadores de decisão a aprender sobre o problema em questão e sobre os seus próprios valores e julgamentos e dos outros, levando-os por meio de uma extensa discussão à seleção de uma alternativa (BELTON; STEWART, 2002; P 5).

Franco e Montibeller (2010) elaboraram três passos para estruturar uma intervenção por meio de um modelo MCDA (FIGURA 5). Resumidamente, no primeiro passo, são definidos o problema de decisão em questão e os interessados neste problema, os tomadores de decisão. No segundo passo, é feito uma estruturação do modelo MCDA com definição clara dos objetivos fundamentais, elaboração de uma árvore de valor, desenvolvimento dos atributos e identificação ou criação de alternativas. Por fim, no terceiro passo, é feito a modelagem das preferências e avaliação das alternativas de decisão. Também é possível encontrar uma metodologia de análise de decisão em Keeney (1982) ou quando há risco envolvido (incertezas) é possível referenciar-se nos autores Montibeller e Franco (2007).

FIGURA 5 - Passos para estruturar modelos MCDA



Fonte: Franco e Montibeller (2010)

Os autores explicam que há uma interdependência entre os passos e que embora a sequência dos passos é do primeiro ao terceiro, o ciclo pode ser revertido em algumas situações. Por exemplo, se na estruturação do modelo há alguma alteração da definição do problema ou dos tomadores de decisão, deve-se retornar do passo dois para o um. Ou ainda, se a modelagem da preferência ou avaliação das alternativas altera a estruturação do modelo, deve-se retornar do passo três para o dois. Por fim, caso a modelagem da preferência ou avaliação das alternativas altera as questões do passo um, deve-se voltar do passo três para o um.

Keeney e Gregory (2005) afirmam que a fundação de qualquer análise de decisão é o conjunto de objetivos considerados e o conjunto de alternativas para alcançar estes objetivos. Logo, com relação à estruturação de modelos MCDA (passo dois), três importantes pontos se destacam: a representação dos objetivos em uma árvore de valor, a definição dos atributos para medir o alcance dos objetivos e a identificação das alternativas de decisão (FRANCO; MONTIBELLER, 2010).

A estrutura que caracteriza os objetivos da empresa é chamada de árvore de valor, a qual representa a hierarquização dos objetivos (MONTIBELLER; FRANCO, 2007). Uma árvore de valor desdobra a avaliação de um objetivo geral em objetivos operacionais, de modo a facilitar

a avaliação do desempenho das alternativas de decisão (FRANCO; MONTIBELLER, 2010). Diferentes abordagens podem ser utilizadas para a elaboração de uma árvore de valor, como, por exemplo, *top-down* ou *bottom-up* (MONTIBELLER; FRANCO, 2007) e mais podem ser encontradas em Belton e Stewart (2002) e Franco e Montibeller (2010). Embora a construção de uma estrutura hierárquica de decisão demande várias tentativas antes que se alcance uma estrutura aceitável, Keeney e Raiffa (1993) definem as propriedades que devem ser avaliadas para a sua elaboração:

- **Integralidade:** todos os objetivos de interesse do tomador de decisão devem ser inclusos;
- **Operacionalidade:** os objetivos do nível mais baixo da árvore devem ser suficientemente específicos para o tomador de decisão avaliar e compará-los para as diferentes alternativas;
- **Decomponível:** o desempenho de uma alternativa em relação a um critério deve ser considerado independentemente dos seus desempenhos sobre os outros critérios;
- **Ausência de redundância:** dois objetivos não podem ter o mesmo significado, em outras palavras, não podem representar a mesma coisa. Assim, não haverá dupla contagem na pontuação final das alternativas, o que poderia levar a uma decisão equivocada; e
- **Tamanho mínimo:** uma árvore grande pode tornar uma análise impossível, logo os objetivos não devem ser decompostos para além do nível onde podem ser avaliadas.

Para cada sub objetivo localizado no nível mais baixo de uma árvore de valor, um atributo deve ser associado (MONTIBELLER; FRANCO, 2007). Os atributos são as variáveis que possuem relevância ao analisar o problema. São utilizados para medir o desempenho em relação a um objetivo (GOODWIN; WRIGHT, 2004, p.28) e quando são agrupados de forma estruturada, representam a estrutura hierárquica dos objetivos da tomada de decisão. Vale ressaltar que os termos “medida de desempenho”, “métrica” e “critério” são comumente utilizados como sinônimos para o termo “atributo” (KEENEY; GREGORY, 2005).

Os atributos são classificados em três diferentes tipos (natural, *proxy* e construídos), porém podem conter ao mesmo tempo características de duas classificações diferentes (KEENEY; GREGORY, 2005). Atributos do tipo natural são os mais utilizados e tem uma interpretação comum, além disso eles medem diretamente o grau que um objetivo é alcançado. Em sua maioria podem ser contados ou fisicamente medidos.

Os atributos do tipo *proxy* são menos informativos que o atributo do tipo natural, pois indica indiretamente o grau que um objetivo é alcançado. Geralmente possuem uma escala que pode ser contada ou medida fisicamente, e são frequentemente utilizados quando é difícil de se utilizar um atributo do tipo natural. Por fim, os atributos do tipo construídos são utilizados para medir diretamente o grau que um objetivo é alcançado, quando não há um atributo natural para tal. Keeney e Gregory (2005) definem cinco propriedades suficientes para a elaboração de bons atributos:

1. ***Não ambiguidade:*** o atributo deve ter uma clara relação entre o valor real de uma alternativa e o desempenho desta alternativa para determinado objetivo;
2. ***Detalhamento:*** o nível de medição do atributo deve cobrir toda a faixa de possíveis repercussões deste atributo e qualquer juízo de valor implícito é apropriado para o problema de decisão;
3. ***Direto:*** os níveis dos atributos devem descrever diretamente as consequências dos objetivos fundamentais de interesse;
4. ***Operacionalidade:*** a coleta de informações ou de dados para avaliação dos objetivos por determinado atributo deve ser de fácil realização. Também, deve ser possível o julgamento de *trade-offs* entre os atributos;
5. ***Compreensível:*** os atributos devem ser compreensíveis a qualquer um interessado no problema de decisão: analista, tomadores de decisão ou outros *stakeholders*.

Segundo Keeney (1996), valores deveriam guiar as tomadas de decisões e desta maneira as decisões devem ser baseadas no “pensamento de valor” e não no “pensamento das alternativas”. O autor relata que, geralmente, o tomador de decisão foca primeiramente nas alternativas e somente depois aborda os objetivos e os critérios para avaliar as alternativas. Todavia, as alternativas devem ser consideradas como meio para se atingir os “valores” desejados. Pensando primeiramente nos “valores”, melhores oportunidades de tomada de decisão podem surgir assim como melhores alternativas, uma vez que o pensamento em “valor” faz o tomador de decisão a se questionar sobre os objetivos a serem buscados, para depois criar as alternativas que permitirão a alcançar estes objetivos.

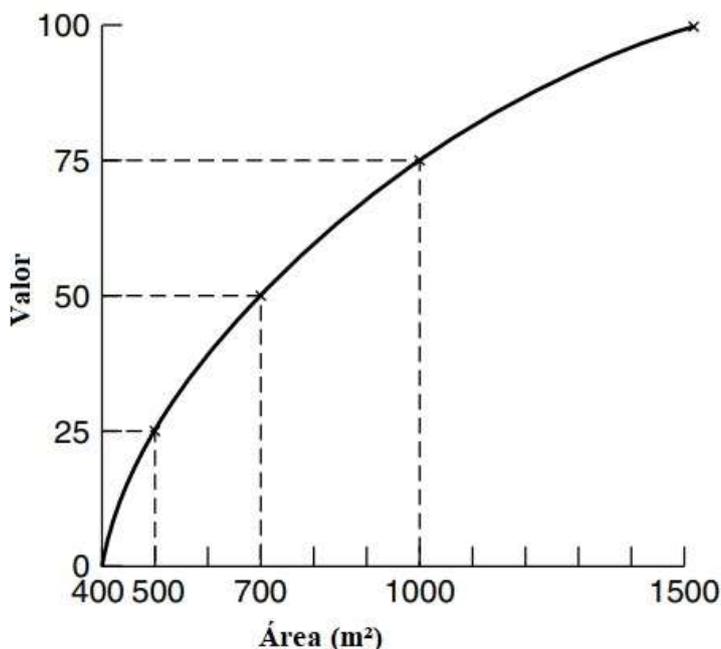
Logo, as alternativas a serem avaliadas no modelo de decisão devem ser geradas por meio do “pensamento de valor”. Ainda elas devem ter a mesma natureza de modo a criar uma árvore de valor coerente (FRANCO; MONTIBELLER, 2010). Os últimos autores listam diferentes ferramentas que podem ser utilizadas para a criação das alternativas de decisão, como

por exemplo técnicas de *brainstorming*, mapeamento cognitivo e mapa de diálogo. Já Montibeller e Franco (2007) relatam quatro maneiras diferentes, exemplificando-as.

O terceiro passo elencado por Franco e Montibeller (2010), a modelagem de preferências e avaliação das alternativas de decisão, é importante e demanda atenção. Nesta fase, deve ser feita a avaliação do desempenho das alternativas frente aos objetivos/atributos, levando-se em conta as preferências do tomador de decisão. Também, é feito a elicitação de pesos entre os objetivos de modo a se levantar os *trade-offs* do problema de decisão. Além disso, é obtido o desempenho geral das alternativas.

Para expressar suas preferências em relação ao desempenho das alternativas de decisão em um determinado atributo, os tomadores de decisão podem usar uma função de valor (GOODWIN; WRIGHT, 2004). Isto porque os tomadores de decisão podem atribuir diferentes valores a diferentes incrementos de desempenhos entre as alternativas em relação a um determinado atributo (FIGURA 6). Na figura, para o atributo “área”, observa-se que o tomador de decisão considera mais atrativo um incremento de área de 400 a 700 m<sup>2</sup>, valorizando este incremento em 50 pontos, do que um incremento de 700 a 1000 m<sup>2</sup> que possui para o TDum valor de 25 pontos.

FIGURA 6 - Exemplo de função de valor



Fonte: adaptado de Goodwin e Wright (2004)

Goodwin e Wright (2004) apresentam duas formas de se obter uma função de valor: por meio da bissecção ou medição direta. No método da bissecção, o tomador de decisão deve

identificar pontos médios de valor, considerando os níveis extremos da faixa valores do atributo. Já no método de medição direta, solicita-se ao tomador de decisão valorizar diretamente alguns níveis do atributo. O método da bissecção somente pode ser utilizado para critérios quantitativos, enquanto que o método da medição direta para quantitativos e qualitativos (MONTIBELLER; FRANCO, 2007).

Belton (1999, p. 362) indica que a função de valor deve ser monotônica, já que funções não monotônicas são frequentes indicativos de múltiplos valores que não se manifestam claramente, devendo haver uma reestruturação da árvore de valor quando isto ocorre, de modo a substituir tal função por uma ou mais funções monotônicas. Além disso, a autora comenta que embora uma correta estruturação do problema leve a funções de valores não descontínuas e lineares ou próximas de lineares, deve-se tomar cuidado para não se simplificar demais o problema pelo uso inapropriado de funções de valores lineares.

Montibeller e Franco (2007) afirmam que a priorização dos objetivos é uma tarefa importante e difícil. Keeney (1982) evidencia que neste ponto, o tomador de decisão deve avaliar o quanto deve (ou está apto a) desistir (ou “abrir mão”) de um determinado benefício alcançado em relação a um objetivo para se alcançar um outro benefício em relação a outro objetivo, ou seja, uma melhora em outro objetivo. O problema é então a respeito de possíveis *trade offs* entre valores.

Estes *trade-offs* são feitos por meio da elicitação de pesos, conforme as preferências dos tomadores de decisão frente aos objetivos do problema de decisão. Um possível método para o levantamento dos pesos é o *swing weights* (GOODWIN; WRIGHT, 2004). Este método consiste em solicitar ao tomador de decisão a comparar uma mudança do valor menos preferível ao mais preferível em um atributo à uma mudança similar em outro atributo. Todavia, faz-se necessário considerar as faixas de valores mínima e máxima de cada atributo (MONTIBELLER; FRANCO, 2007), pois para se comparar objetivos é necessário saber quanto se obtém de desempenho nesses objetivos para se avaliarem escolhas entre os valores em consideração (ALMEIDA, 2013). Outros métodos podem ser empregados para o levantamento dos pesos de modo a facilitar o entendimento dos tomadores decisão, como por exemplo o ROC (*Rock Order Centroid*) (EDWARDS; BARRON, 1994) ou AHP (SAATY, 1980).

Uma vez que é conhecido o desempenho de cada alternativa em cada atributo e o levantamento de pesos entre os atributos já foram definidos, torna-se possível verificar o desempenho geral de cada alternativa e assim tomar uma decisão provisória (GOODWIN;

WRIGHT, 2004). Um possível modelo para se calcular o desempenho geral é a utilização da soma ponderada por meio da função de valor multi atributo (MAVT). Neste tipo de modelo, o desempenho de cada alternativa em cada objetivo/atributo é multiplicado pelo respectivo peso deste objetivo/atributo. Após, para cada alternativa, estes desempenhos ponderados são somados para se verificar o desempenho geral de cada alternativa (MONTIBELLER; FRANCO, 2007). Para maiores detalhes sobre este e outros métodos, pode-se consultar Belton e Stewart (2002).

### 2.3.2. Métodos MCDA

Torna-se importante diferenciar modelo de método MCDA. O modelo MCDA é uma representação do problema específico em análise contendo a estrutura de preferência do decisor e, geralmente, é desenvolvido com base em algum método de apoio a decisão (ALMEIDA, 2013). Já o método MCDA, conforme evidencia o último autor, tem uma característica mais genérica e se aplica a uma classe mais ampla de problemas de decisão. O método MCDA, consiste numa formulação metodológica ou numa teoria, com estrutura axiomática bem definida. Assim, diferentes métodos MCDA podem ser encontrados na literatura.

Belton e Stewart (2002) dividem os métodos MCDA em três grupos: modelos de medição de valor; modelos de meta, aspiração ou nível de referência; e modelos *outranking*. No primeiro grupo, pontuações numéricas são construídas de modo a representar o grau com que uma alternativa de decisão pode ser preferida que outra. Estas pontuações são inicialmente desenvolvidas individualmente para cada atributo, e depois são agrupadas para refletir o desempenho geral de uma alternativa de decisão. Podem-se citar, como exemplo, os métodos AHP (*Analytic Hierarchy Process*), ANP (*Analytic Network Process*), MAVT (*Multi-Attribute Value Theory*), SMART (*Simple Multi-Attribute Rating Technique*), SMARTER e MAUT (*Multi-Attribute Utility Theory*).

Nos modelos de meta, aspiração ou nível de referência, níveis desejáveis ou de satisfação de conquista são estabelecidos para cada um dos atributos. Então, o processo busca descobrir alternativas que estão, em algum sentido, próximos de alcançar aquelas metas desejadas ou aspirações. Como exemplo deste método, cita-se o TOPSIS (*Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*).

Já nos modelos *outranking*, as alternativas de decisão são inicialmente comparadas em pares para cada critério, a fim de identificar até que ponto a preferência por uma alternativa sobre a outra pode ser afirmada. Ao agregar tais informações de preferência entre todos os

atributos relevantes, o modelo busca estabelecer a superioridade de uma alternativa sobre a outra. Citam-se, como exemplo, os métodos da família ELECTRE (*Elimination and Choice Expressing Reality*) e PROMETHEE (*Preference Ranking Organisation Method for Enrichment Evaluation*)

Vários métodos MCDA podem ser encontrados na literatura e revisões da literatura sobre a aplicação destes métodos também estão disponíveis. A TABELA 5 fornece alguns exemplos destes métodos e informa os respectivos trabalhos de revisão da literatura para uma possível consulta.

TABELA 5 - Métodos MCDA

| Método                  | Descrição   | Revisão da literatura   |
|-------------------------|---|-------------------------|
| AHP                     | Procedimento de comparação de pares baseado numa escala linguística para comparar a importância entre critérios e critérios e alternativas.                   | Ho e Ma (2018)          |
| ANP                     | Forma mais geral do AHP. O ANP o problema de decisão como uma rede de relações.   | Sipahi e Timor (2010)   |
| TOPSIS                  | Classifica as alternativas usando a distância geométrica a partir da solução ideal negativa e positiva  | Behzadian et al. (2012) |
| ELECTRE                 | Baseado em relações de superação ( <i>outranking</i> ) entre alternativas   | Durucasu et al. (2017)  |
| PROMETHEE               | Calcula os fluxos de preferência positiva e negativa para cada alternativa, baseado em comparações de pares de alternativas                                   | Durucasu et al. (2017)  |
| MAVT<br>(SMART/SMARTER) | Baseado nos pesos dos objetivos, nas funções de valores e no desempenho das alternativas em cada objetivo, o desempenho geral das alternativas são calculados |                         |
| MAUT                    | É uma extensão do MAVT, incluindo atitudes de probabilidade e risco para formar funções de utilidade  |                         |
| DEA                     | Baseado em programação matemática, avalia a eficiência de um conjunto de alternativas por meio da análise dos dados de entrada e saída de um processo         | Kao (2014)              |

Fonte: Próprio autor.

## 2.4. Combinações de métodos

Belton e Stewart (2002) entendem que o processo MCDA necessita ser visto e entendido de uma forma integrada, podendo fazer esta integração entre diferentes abordagens MCDA e métodos MCDA com outras ferramentas da pesquisa operacional, gerenciamento de sistemas e

estatística. Neste sentido, neste tópico são apresentadas uma breve exposição e características de trabalhos que utilizam conjuntamente os métodos MCDA e SED, MCDA e SP e SED e SP. Logo, o foco aqui não é fazer uma completa revisão da literatura a respeito destas combinações e sim prover o leitor de exemplos de trabalhos que utilizam estes métodos combinados.

### 2.4.1. Métodos MCDA e SED

A combinação dos métodos MCDA e SED tem sido utilizada para a tomada de decisões em diferentes áreas, como na agronômica, portuária, logística, armazenagem, gerenciamento de inventários, seleção de maquinários, hospitalar, construção civil, programação da produção, localização de plantas industriais e problemas de *layout* (TABELA 6).

TABELA 6 – Relação de artigos que abordam SED e MCDA

| Autor (es)                 | Área de aplicação           | Método MCDA  | Descrição  |
|----------------------------|-----------------------------|--------------|--|
| Meng et al. (2014)         | Agronômica                  | AHP          | Seleção do nível mais adequado de automatização da operação de enxerto de produtos hortícolas  |
| Aickelin et al. (2017)     | Portuária                   | AHP          | Avaliação da expansão de um porto  |
| Min e Park (2008)          | Portuária                   | DEA          | Avaliação da eficiência de movimentação e capacidade de armazenagem em diferentes terminais  |
| Chen et al. (2010)         | Armazenagem                 | DEA          | Avaliação e seleção de um conjunto de políticas operacionais do armazém  |
| Ayağ (2006)                | Seleção de máquinas         | AHP          | Avaliação e seleção de máquinas ferramentas (por exemplo: torno CNC)   |
| Duong (2016)               | Gerenciamento de inventário | AHP/DEA      | Avaliação de alternativas de gerenciamento de reposição de produtos perecíveis   |
| Brito et al. (2010)        | Sistema logístico           | Não menciona | Avaliação e seleção do tamanho da frota de navios cargueiros e capacidade de armazenagem   |
| Gharahighehi et al. (2016) | Hospitalar                  | AHP/DEA      | Avaliação de cenários envolvendo tempo de trabalho, turno, funcionários e leitos, para a melhoria do desempenho                      |
| Weng et al. (2011)         | Hospitalar                  | DEA          | Avaliação de cenários com alocação dos recursos médicos, enfermeiras e leitos, para a melhoria do atendimento                        |
| Al-Refaie et al. (2014)    | Hospitalar                  | DEA          | Avaliação de cenários envolvendo a organização das enfermeiras nas salas de atendimento, de modo a melhorar o atendimento            |
| Eskandari et al. (2011)    | Hospitalar                  | AHP/TOPSIS   | Avaliação de cenários para a melhoria do fluxo de pacientes e reduzir gargalos do atendimento.                                       |
| Gul et al. (2016)          | Hospitalar                  | FAHP/ELECTRE | Avaliação de cenários com relação a quantidade de médicos, enfermeiros e recepcionistas para a melhoria da eficiência do atendimento |
| Torabi e Mahlooji (2016)   | Construção Civil            | DEA          | Avaliação de cenários envolvendo a quantidade de operadores e máquinas em projetos de construção civis.                              |
| Ahmed e Al-Mashraie (2015) | Programação da produção     | DEA          | Avaliação de alternativas de sequenciamento de produtos na linha de produção   |

| Autor (es)             | Área de aplicação                  | Método MCDA | Descrição   |
|------------------------|------------------------------------|-------------|---|
| Kuo et al. (2008)      | Programação da produção            | TOSIS/AHP   | Avaliação de diferentes regradas de sequenciamento da produção para diferentes cenários, em um ambiente de produção <i>flow shop</i> com múltiplas estações de trabalho |
| Sameie e Arvan (2015)  | Localização de plantas industriais | AHP         | Avaliação de alternativas de localização de uma indústria movida a energia eólica   |
| Xu, Moon e Baek (2012) | Problemas de <i>layout</i>         | AHP         | Avaliação de alternativas de <i>layout</i> para a linha de montagem de transmissão em uma empresa automotiva  |
| Taylor et al. (2015a)  | Problemas de <i>layout</i>         | DEA         | Avaliação de <i>layouts</i> do sistema <i>job shop</i> para a seção de manutenção de uma empresa  |

Fonte: Próprio autor.

A aplicação conjunta dos métodos busca suprir deficiências quando aplicados sozinhos e assim melhorar a acuracidade dos resultados obtidos. Embora MCDA possa lidar com critérios qualitativos e quantitativos, deixa a desejar quando os critérios possuem uma característica dinâmica, e simulação pode auxiliar a lidar com estes critérios (AICKELIN et al., 2017).

Critérios de natureza dinâmica podem ser o tempo de ciclo do produto, a quantidade de produtos processados ou ainda a taxa de utilização de máquinas (AYAĞ, 2006) no caso da avaliação e seleção de máquinas em uma linha de produção. Também pode ser o tempo de espera dos pacientes, o fluxo de pacientes e a taxa de utilização de médicos, enfermeiras e leitos em um hospital (GUL et al., 2016). Nesta dissertação, os critérios são: tempo total de separação, tempo médio de separação e porcentagem de utilização média dos separadores.

De acordo com Aickelin et al. (2017), a simulação pode ser executada para cenários específicos, de modo a estimar a pontuação de cada critério dinâmico em cada cenário. Em seguida, estas pontuações podem ser inseridas em um modelo de análise de decisão multicritério para que uma decisão possa ser tomada, envolvendo os critérios dinâmicos e estáticos, em busca do melhor cenário (ou alternativa). Assim, para que isto seja possível, diferentes métodos MCDA podem ser aplicados.

Por meio dos artigos analisados, é possível observar que, geralmente, os métodos MCDA são utilizados na sua versão pura juntamente com SED, com maior incidência dos métodos AHP e DEA. Todavia, podem ser aplicados de maneira híbrida, ou seja, dois métodos MCDA aplicados conjuntamente com SED. Gul et al. (2016), por exemplo, utilizaram *Fuzzy AHP* para captar a preferência dos critérios pelos tomadores de decisão e *ELECTRE* para a comparação entre as alternativas e seleção da melhor. Assim, outros trabalhos utilizaram da

mesma ideia (ESKANDARI et al., 2011; GHARAHIGHEHI et al., 2016; KUO et al., 2008) de modo a unir os pontos fortes de cada método MCDA empregado.

Brito et al. (2010) provaram a eficiência da aplicação de MCDA e SED para decisões estratégicas envolvendo o dimensionamento da frota de navios e área de armazenagem, em um sistema logístico complexo de uma empresa produtora de ferro. Utilizando a mesma combinação de métodos, Chen et al. (2010) buscaram tomar decisões táticas e operacionais a respeito das políticas operacionais de estocagem, separação e roteirização em um armazém. Assim, pode-se inferir que a combinação de MCDA e SED pode ser aplicada a questões logísticas como o caso desta dissertação.

#### **2.4.2. Métodos MCDA e SP**

Segundo Montibeller, Gummer e Tumidei (2006), planejamento de cenários (SP) emprega o uso de cenários futuros imaginários para ajudar os tomadores de decisão a refletirem sobre as principais incertezas que eles enfrentam e desenvolver estratégias para lidar com estas incertezas. Logo, os cenários devem ser relevantes às preocupações dos tomadores de decisão e descrever diferentes futuros genericamente, representados por situações em que o sistema possa se encontrar por um período de tempo (SCHOEMAKER, 1995), tentando vincular as incertezas que são consideradas inerentes no futuro sem abordar probabilidades para estes futuros (GOODWIN; WRIGHT, 2001).

Todavia, o planejamento de cenários deixa a desejar quanto à avaliação das estratégias alternativas entre os cenários e isto pode levar à escolha de estratégias de baixo desempenho (GOODWIN; WRIGHT, 2001). Por outro lado, análise de decisão multicritério (MCDA) é uma metodologia planejada para avaliar alternativas, levando-se em consideração múltiplos tomadores de decisão e frequentemente objetivos conflitantes, além de proporcionar uma forte estrutura para suportar o projeto de melhores e mais robustas alternativas, uma vez que permite aos tomadores de decisão avaliar cada alternativa em cada objetivo da empresa e assim identificar suas fraquezas e oportunidades de melhoria (MONTIBELLER; GUMMER; TUMIDEI, 2006).

Logo, o uso integrado de planejamento de cenários (SP) e análise de decisão multicritério (MCDA) pode ser útil para a tomada de decisão estratégica (GOODWIN; WRIGHT, 2001; MONTIBELLER; GUMMER; TUMIDEI, 2006; STEWART; FRENCH; RIOS, 2013). Porém, esta combinação não é trivial, pois adiciona uma dimensão a mais para análise na já complexa análise de decisão multicritério (LIENERT et al., 2015).

A combinação de MCDA e SP tem sido empregada para tomada de decisão em questões estratégicas e, portanto, para horizontes de longo prazo. Na literatura é possível encontrar aplicação nas áreas de infraestrutura, análise de risco, ambiental, militar, transportes, avaliação de combustíveis, negócios, energia, agricultura, análise e prevenção de acidentes, negócios, silvicultura e avaliação de projetos. A TABELA 7 relaciona artigos que compreendem esta abordagem conjunta de métodos.

TABELA 7 - Relação de artigos que abordam MCDA e SP

| Autor(es)                              | Área de aplicação                     | Método<br>MCDA | Outras análises   |
|--|---------------------------------------|----------------|---|
| Scholten et al. (2013)                 | Infraestrutura                        | MAVT           |   |
| Hanafizadeh, Kazazi e Bolhasani (2011) | Negócios                              | PROMETHEE      | Análise de investimento   |
| Browne, O'regan e Moles (2010)         | Energia                               | NAIADE         | Pegada ecológica  |
| Ghanbarpour, Salimi e Hipel (2013)     | Infraestrutura e análise de risco     | TOPSIS         | Simulação de níveis de inundação  |
| Karvetski, Lambert e Linkov (2010a)    | Infraestrutura                        | MAVT           | Modificação da técnica <i>swing weights</i> para elicitação de pesos em diferentes cenários |
| Karvetski, Lambert e Linkov (2010b)    | Militar                               | AHP            | Utiliza uma função de ajuste dos pesos dos critérios ao variar os cenários                  |
| Karvetski et al. (2011)                | Gerenciamento de risco/Infraestrutura | MAVT           | Identifica quais cenários mais afetam os tomadores de decisão                               |
| Karvetski e Lambert (2012)             | Energia                               | MAVT           |   |
| Lambert et al. (2013)                  | Infraestrutura/Transportes            | MAVT           |   |
| Lienert et al. (2015)                  | Infraestrutura                        | MCDA           |   |
| Michnik (2013)                         | Seleção de projetos                   | VIKOR          |   |
| Nava e Daim (2007)                     | Avaliação de combustíveis             | AHP            |   |
| Parlak et al. (2012)                   | Análise e prevenção de acidentes      | MAVT           |   |
| Santoyo-Castelazo e Azapagic (2014)    | Energia                               | MAVT           | Análise de sensibilidade para verificar a variação dos pesos nos critérios                  |

| Autor(es)                            | Área de aplicação           | Método<br>MCDA           | Outras análises   |
|--------------------------------------|-----------------------------|--------------------------|---|
| Cairns, Goodwin e Wright (2016)      | Ambiental/Econômico         | MAVT                     | Considera os diferentes valores, objetivos e poderes de diferentes stakeholders |
| Bizikova e Kremer (2015)             | Silvicultura                | MOP                      |   |
| Stewart, French e Rios (2013)        | Agricultura                 | MAUT                     | Conceitualização do “metacritério”  |
| Gomes, Costa e Barros (2017)         | Energia                     | ELECTRE III<br>PROMETHEE |   |
| Goodwin e Wright (2001)              | Desenvolvimento de negócios | MAVT                     |   |
| Ram, Montibeller e Morton (2011)     | Segurança alimentar         | MAVT                     | Cálculo do arrependimento   |
| Montibeller, Gummer e Tumidei (2006) | Estratégia de negócios      | MAVT                     | Robustez entre cenários   |

Fonte: Próprio autor.

Alguns artigos analisados oferecem uma metodologia completa para a aplicação combinada de MCDA e SP (CAIRNS; GOODWIN; WRIGHT, 2016; HANAFIZADEH; KAZAZI; BOLHASANI, 2011; KARVETSKI; LAMBERT; LINKOV, 2010a; LIENERT et al., 2015; RAM; MONTIBELLER; MORTON, 2011; STEWART; FRENCH; RIOS, 2013), utilizando uma fase de estruturação do problema, estruturação do modelo de avaliação MCDA e modelagem das preferências e avaliação das alternativas de decisão (FRANCO; MONTIBELLER, 2010). Após detalhamento da metodologia, realizam uma demonstração da metodologia proposta em um caso específico para mostrar sua aplicabilidade.

Para tal, diferentes métodos MCDA foram aplicados no processo de avaliação das alternativas como o NAIDE (*Novel Approach to Imprecise Assessment and Decision Environments*), DEA, AHP, MAVT, MAUT, PROMETHEE, VIKOR (*ViseKriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje*), MOP (*multiple-objective programming*) e ELECTRE. É possível que outras análises possam ser desempenhadas em conjunto com os métodos MCDA para a classificação, seleção ou compreensão da robustez das alternativas, como, por exemplo, análise de investimento (HANAFIZADEH; KAZAZI; BOLHASANI, 2011), pegada ecológica (BROWNE; O’REGAN; MOLES, 2010) ou custo do arrependimento (RAM; MONTIBELLER; MORTON, 2011). Emprego específico de simulação também foi

encontrado, como, por exemplo, para avaliação de áreas inundadas (GHANBARPOUR; SALIMI; HIPEL, 2013).

Na análise de problemas envolvendo MCDA e SP, as alternativas devem ser avaliadas e comparadas em todos os critérios e cenários da análise (STEWART; FRENCH; RIOS, 2013) o que permite encontrar alternativas robustas, ou seja, que tenham um desempenho satisfatório em todos os cenários analisados (MONTIBELLER; GUMMER; TUMIDEI, 2006). Neste sentido é frequente a atribuição de diferentes pesos para os mesmos critérios em diferentes cenários (com exceção dos autores Hanafizadeh, Kazazi e Bolhasani (2011), Michnik (2013) e Goodwin e Wright (2001)). Isto pode ocorrer em função dos tomadores de decisão entenderem que em diferentes cenários os critérios podem ter diferentes preferências (MONTIBELLER; GUMMER; TUMIDEI, 2006).

Como a quantidade de elicitación de pesos pode ser alta, uma vez que se iguala ao produto da quantidade de critérios pela quantidade de cenários, diferentes técnicas foram desenvolvidas para facilitar a sua elicitación entre os diferentes cenários, e assim diminuir o fardo dos tomadores de decisão neste processo (KARVETSKI; LAMBERT; LINKOV, 2010a, 2010b; STEWART; FRENCH; RIOS, 2013). Isto porque, sob a perspectiva de fatores humanos e de cognição, tarefas repetitivas podem levar a efeitos indesejáveis e ocasionar resultados de baixa qualidade (LAMBERT et al., 2013).

Stewart, French e Rios (2013), por exemplo, promoveram a junção de um determinado critério em um determinado cenário, denominando-o de “metacritério”. Este “metacritério”, por meio de *swings weights* recebe um peso conforme o critério e cenário analisados. Para diminuir a quantidade de elicitaciones por parte dos tomadores de decisão, os autores propuseram duas abordagens: na primeira, para cada cenário compara-se a importância dos critérios e após, para o critério mais importante, compara-se sua relevância entre todos os cenários. Na segunda abordagem, primeiramente deve-se comparar a importância de cada critério entre os cenários e depois, para o cenário mais importante, deve-se comparar a relativa importância de todos os critérios. Os autores afirmam que a diferença entre as abordagens é a questão do tempo consumido nas comparações.

Nos artigos analisados, a quantidade de cenários avaliados variou de dois (GOODWIN; WRIGHT, 2001) a 12 (RAM; MONTIBELLER; MORTON, 2011). Amer, Daim e Jetter (2013) consideram que de três a cinco cenários são suficientes para um projeto de cenários, uma vez que menos do que três é considerado inapropriado e não se pode evidenciar todas as alternativas,

ao passo que muitos cenários também não são desejáveis. Porém, os autores afirmam que a quantidade de cenários depende da quantidade de incertezas e as possíveis combinações destas incertezas.

A construção de cenários pode ser auxiliada por ferramentas como: matriz de quatro quadrantes, matriz de Wilson, análise morfológica, análise de consistência e análise de impacto cruzado (AMER; DAIM; JETTER, 2013). Embora nem todos os artigos tenham sido claros a respeito da construção de cenários, em geral os cenários foram construídos por meio de workshops com participação dos tomadores de decisão ou *stakeholders* para a discussão das principais variáveis e incertezas do problema de decisão. O desenvolvimento dos cenários foi feito com base em dados da literatura (KARVETSKI et al., 2011; KARVETSKI; LAMBERT; LINKOV, 2010a, 2010b), dados de diretrizes governamentais (BROWNE; O'REGAN; MOLES, 2010), análise morfológica (RAM; MONTIBELLER; MORTON, 2011) e até em survey (PARLAK et al., 2012). Ainda, Gomes, Costa e Barros (2017) utilizaram análise de impacto cruzado para determinar as principais variáveis (incertezas) para o problema analisado em seu trabalho.

Por fim, observa-se que a combinação de MCDA e SP abrange muitas áreas de aplicação e geralmente diferem em como os cenários são construídos e utilizados, sendo que o objetivo principal, geralmente, é avaliar o desempenho de alternativas em diferentes cenários. Por mais que a análise integrada por meio de MCDA e SP possa ser complexa, os benefícios mútuos entre os métodos justificam sua aplicação, ou seja, SP se beneficia da avaliação multicritério proposta por MCDA para avaliação de diferentes cenários e MCDA se beneficia da construção de cenários para avaliação

### **2.4.3. Métodos SED e SP**

Para encontrar artigos que abordassem a combinação dos métodos simulação de eventos discretos e planejamento de cenários (ou análise de cenários), foi feita uma busca na principal coleção da base dados da *Web of Science* (WoS), utilizando-se as palavras chaves: "*discrete event simulation*", "*DES*", "*scenario planning*" e "*scenario analysis*" agrupadas com operadores booleanos do tipo "OR" e "AND" e aplicadas em busca avançada na principal base de dados da WoS (*Web of Science*).

Foram encontrados 29 artigos, dos quais 11 foram selecionados por realmente abordarem ambos métodos. Estes artigos são de diversas áreas e temas: energia, gerenciamento de inventários, gerenciamento de transportes, mineração, gerenciamento da produção, saúde

(hospitalar), logística reversa, tecnologia e infraestrutura portuária. A TABELA 8 resume estes artigos quanto a seus autores (ano), área, quantidade de cenários avaliados e como foi feita a construção dos cenários (ou seja, planejamento ou análise).

TABELA 8 - Relação de artigos que abordam SED e SP

| Autores                              | Área              | Qtde | Construção dos cenários   |
|--------------------------------------|-------------------|------|---|
| Kishita, Nakatsuka e Akamatsu (2017) | Energia           | 2    | Baseados em incertezas e construção de processos                                    |
| Birim e Sofyalioglu (2017)           | Inventário        | 10   | Variação dos níveis das variáveis de análise  |
| Lopes et al. (2017)                  | Transportes       | 4    | Variação dos recursos disponíveis, estudo de novos recursos e políticas de operação |
| Upadhyay e Askari-nasab (2018)       | Mineração         | 15   | Variação dos recursos disponíveis   |
| Opacic, Sowlati e Mobini (2018)      | Produção          | 11   | Variação dos recursos disponíveis, estudo de novos recursos e políticas de operação |
| Tuson et al. (2018)                  | Saúde             | 3    | Variação dos recursos disponíveis e políticas de operação e variação da demanda     |
| Elia e Gnoni (2015)                  | Logística reversa | 3    | Meios de operação   |
| Andriulo, Elia e Gnoni (2015)        | Tecnologia        | 3    | Meios de operação   |
| Chemweno et al. (2014)               | Saúde             | 5    | Variação dos recursos disponíveis, estudo de novos recursos e políticas de operação |
| Shi, Peng e Erdem (2014)             | Saúde             | 25   | Variação dos níveis das variáveis de análise  |
| Asteris, Collins e Jones (2012)      | Infraestrutura    | 2    | Variação dos níveis das variáveis de análise  |

Fonte: Próprio autor.

Com exceção dos autores Kishita, Nakatsuka e Akamatsu (2017) que utilizaram LCS como técnica de simulação, os demais trabalhos utilizaram simulação de eventos discretos,

apoiados por diversos softwares. LCS é uma subclassificação da técnica simulação de eventos discretos, abrangendo a análise do fluxo de material, dinheiro e informação ao longo do ciclo de vida do produto. Ainda, Upadhyay e Askari-nasab (2018) utilizaram otimização (programação por metas) em conjunto com simulação.

A quantidade de cenários varia de dois a 25. Geralmente os trabalhos constroem ou desempenham cenários por meio de uma variação dos níveis das variáveis do problema de interesse (ASTERIS; COLLINS; JONES, 2012; BIRIM; SOFYALIOGLU, 2017; SHI; PENG; ERDEM, 2014) ou variação do uso dos recursos físicos de um sistema vigente que está em análise (CHEMWENO et al., 2014; LOPES et al., 2017; OPACIC; SOWLATI; MOBINI, 2018; UPADHYAY; ASKARI-NASAB, 2018) conjuntamente com a demanda (TUSON et al., 2018). Os cenários também podem representar novos meios de operação para comparação com o vigente (ANDRIULO; ELIA; GNONI, 2015; ELIA; GNONI, 2015).

Por exemplo, Birim e Sofyalioglu (2017) avaliaram diferentes níveis de penalidades financeiras, bônus financeiros e *lead time* em uma CSs para o gerenciamento de inventários dos diferentes elos da cadeia. Lopes et al. (2017) avaliaram cenários alterando o destino final da produção, bem como as rotas e meios de transporte para o escoamento de soja no Brasil. Upadhyay e Askari-nasab (2018) avaliaram cenários com diferentes quantidades e características de caminhões para uma mineradora. Já Opacic, Sowlati e Mobini (2018) avaliaram os recursos vigentes (máquinas e operadores), novos recursos e novos meios de organização no sistema de produção de uma madeireira. Elia e Gnoni (2015), por sua vez, avaliaram meios de operar a logística reversa de paletes entre os elos da CSs.

Assim, estes cenários estão baseados em uma questão de avaliação do tipo *what-if* (CHEMWENO et al., 2014; TUSON et al., 2018). Estes tipos de cenários buscam comparar estados vigentes com futuros ou ainda com aqueles desejáveis. As comparações estão atreladas a métricas como tempo e quantidade em fila (CHEMWENO et al., 2014), tempo de processamento (ANDRIULO; ELIA; GNONI, 2015), quantidades produzidas (OPACIC; SOWLATI; MOBINI, 2018), entre outras, que representam métricas dinâmicas. Também há a ocorrência de métricas financeiras, como o custo (LOPES et al., 2017).

Diferentemente dos demais autores, Kishita, Nakatsuka e Akamatsu (2017) propuseram um método para análise de cenários no qual as influências das incertezas do futuro e medidas eficazes são investigadas. Para uma compreensão abrangente dos aspectos ambientais, econômicos e sociais da geração de energia por meio de biomassa de madeira, os autores

modelam cada cenário como uma combinação de desdobramento de narrativas e uma rede de processos. Eles explicam que o desdobramento de narrativas fornece uma história consistente do que pode acontecer no futuro, enquanto que a rede de processos permite a avaliação quantitativa dos cenários a partir do ponto de vista ambiental e econômico.

Os autores definem quatro etapas para o método de análise de cenários (definição do problema, descrição dos cenários, avaliação dos cenários e análise de sensibilidade). Logo, há uma semelhança dos passos seguidos pelos últimos autores para o planejamento de cenários com os passos propostos pelos autores SCHNAARS (1987) e Schoemaker (1995), por exemplo.

Embora não se tenha encontrado artigos que combinem SED com SP, onde planejamento de cenários é abordado conforme os últimos autores, por exemplo, ressalta-se a importância do método planejamento de cenários para o desdobramento das incertezas que cercam os futuros plausíveis que uma empresa pode passar. Ainda, que a simulação de eventos discretos pode auxiliar no desdobramento dos cenários criados, quantificando-os por meio de critérios dinâmicos por exemplo.

### 3. METODOLOGIA

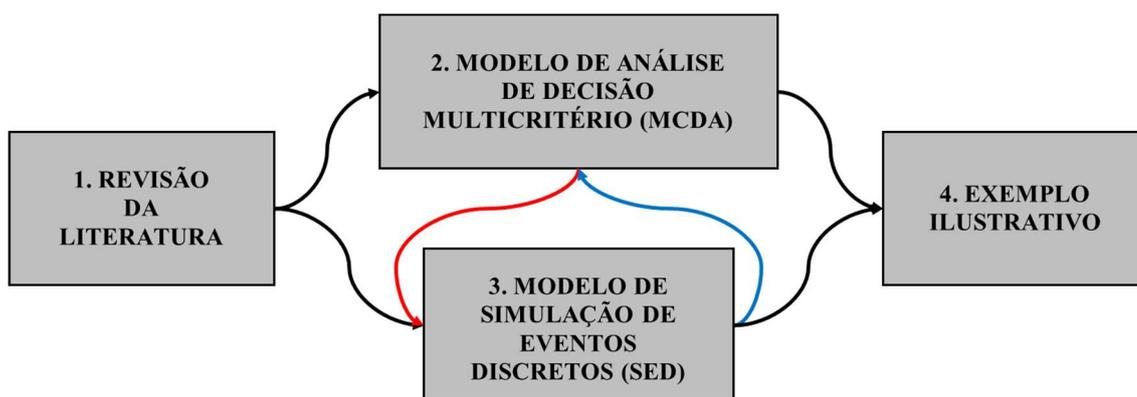
Neste capítulo são apresentados a classificação da pesquisa conforme seus objetivos e a estrutura geral do estudo quanto aos procedimentos metodológicos adotados para alcançar os objetivos propostos por esta pesquisa.

#### 3.1. Procedimentos de pesquisa

Esta pesquisa classifica-se como empírica quantitativa normativa, pois se preocupa em desenvolver políticas, estratégias e ações que melhorem a situação atual, com garantia que há uma adesão entre o problema real e o modelo feito desta realidade (FRANSOO; BERTRAND, 2002). De acordo com Fransoo e Bertrand (2002), na pesquisa quantitativa baseada em modelo, assume-se que se pode construir modelos objetivos que expliquem (parte do) o comportamento real dos processos operacionais ou capturar (parte do) o problema de tomada de decisão que são enfrentados pelos gestores em processos operacionais reais.

A estrutura resumida dos métodos empregados na presente pesquisa está ilustrada na FIGURA 7, contendo quatro etapas. A complexidade nas etapas do projeto do armazém e suas múltiplas alternativas de escolha (ROUWENHORST et al., 2000; THOMAS; MELLER, 2015) justificam a abordagem de diferentes métodos desta pesquisa, pois força os métodos a compartilharem a mesma problemática ao abordar assuntos mais complexos e ao coletarem uma série mais rica e mais forte de evidências do que poderiam obter por qualquer dos métodos aplicados isoladamente (YIN, 2001).

FIGURA 7 – Estrutura geral da pesquisa



Fonte: Próprio autor.

A primeira etapa consistiu em uma revisão da literatura para identificação das alternativas das políticas de controle operacional (de estocagem, *picking* e roteirização), das

alternativas do arranjo de *layout* (horizontal e vertical), de outros fatores que afetam o desempenho das operações do armazém, dos possíveis critérios/objetivos operacionais do armazém utilizados em estudos anteriores, dos comportamentos estocásticos das operações do armazém e do tipo de simulação que pode ser empregado para auxiliar na solução do problema.

A segunda etapa consistiu na elaboração de um modelo de análise de decisão multicritério (MCDA) (EDWARDS; BARRON, 1994; GOODWIN; WRIGHT, 2004), incluindo planejamento de cenários (SP) (RAM; MONTIBELLER; MORTON, 2011). Este modelo interage em dois momentos com um modelo de simulação de eventos discretos, onde em resumo, o modelo de análise de decisão e planejamento de cenários indica ao modelo de simulação quais cenários simular e o modelo de simulação retorna indicando o desempenho de cada alternativa, frente ao objetivo/critério quantitativo escolhido.

O modelo de simulação de eventos discretos (terceira etapa) consiste na representação da operação de separação de pedidos de um armazém atacadista/varejista de peças automotivas. Escolheu-se considerar a atividade de separação de pedidos por ser responsável por até 55% dos custos operacionais de um armazém (KHANZODE; SHAH, 2017). Uma melhoria nesta atividade pode trazer uma maior redução dos custos operacionais. Para esta etapa, seguiu-se as recomendações de Banks et al. (2010), Law e Kelton (1991) e Shannon (1998). Por fim, a quarta etapa consistiu na aplicação da metodologia proposta, utilizando dados reais.

A coleta de dados foi feita por meio de triangulação de fonte de dados de modo a se aumentar a confiança e validade do estudo (VOSS; TSIKRIKTSIS; FROHLICH, 2002). Dados numéricos como os de histórico de demanda, tempos em geral, custos operacionais, de investimento em equipamentos, por exemplo, foram coletados por intermédio de análise documental, banco de dados do sistema da empresa e observação em loco das operações do armazém. Além disto, entrevistas semiestruturadas foram realizadas com diferentes pessoas em diferentes momentos. A seguir são apresentadas as justificativas quanto aos métodos MCDA, SP e SED.

Análise de decisão multicritério (MCDA) é uma metodologia estruturada que objetiva fornecer uma recomendação aos tomadores de decisão com uma finita quantidade de alternativas (ações, objetos, soluções ou candidatos), sendo avaliados a partir de múltiplos pontos de vista, chamados critérios (atributos, recursos ou objetivos) (AGUEZZOUL, 2014; CHAI; LIU; NGAI, 2013). Diferentes métodos MCDA têm sido amplamente aplicados a questões logísticas (AGUEZZOUL, 2014) para a tomada de decisões em níveis estratégicos,

táticos e operacionais focados em armazéns (CHEN et al., 2010; SILVA; DORATIOTTO; VIEIRA, 2019; TAYLOR et al., 2015b; VIEIRA et al., 2017).

A tomada de decisão da melhor combinação entre as alternativas das políticas de operação e *layout* pode ser considerada como uma decisão multicritério onde critérios como custos, taxa de movimentação, capacidade de armazenagem e tempo de resposta devem ser levados em conta (HACKMAN et al., 2001; ROUWENHORST et al., 2000) e *trade-offs* entre as alternativas devem ser analisados (CHACKELSON et al., 2013; CHEN et al., 2010). Hudock (1998) afirma que o planejamento do *layout* tem como objetivo maximizar o uso dos recursos (equipamentos e funcionários), do espaço e acessibilidade dos itens. Já Chen et al. (2010), com relação à definição das políticas de controle, consideram que o objetivo é maximizar a quantidade de linhas separadas, mantendo um alto nível de serviço e minimizar os custos operacionais.

Métodos MCDA elencados na literatura podem ser escolhidos para auxiliar neste processo, de modo a atender os critérios/objetivos. No entanto, diferentes métodos geralmente representam diferentes abordagens para a tomada de decisões e a escolha entre os métodos pode depender do problema específico em consideração, dos valores do tomador de decisão e de muitos outros fatores, sendo que diferentes métodos podem resultar em diferentes escolhas para o mesmo problema (OZERNOY, 1992).

O método *Simple Multi-attribute Rating Technique* (SMART) já foi aplicado a problemas específicos na área ambiental, de construção, militar, manufatura, transporte e logística (VELASQUEZ; HESTER, 2013). SMART tem sido amplamente utilizada devido à simplicidade das respostas demandadas do tomador de decisão e a simplicidade com que estas respostas são analisadas (GOODWIN; WRIGHT, 2004, P.30). É uma metodologia proeminente, pois em sua análise pode-se incluir uma ampla variedade de critérios quantitativos e qualitativos (CHOU; CHANG, 2008). Além disso, Velasquez e Hester (2013) afirmam que é uma técnica fácil de se usar e que permite a utilização de diferentes técnicas de atribuição de peso (relativo, absoluto, etc.).

Ainda, a análise envolvida neste método é transparente, e, portanto, é provável que o método produza uma melhor compreensão do problema e seja aceitável para o tomador de decisão que desconfia de uma abordagem matemática de "caixa preta" (GOODWIN; WRIGHT, 2004, P.30). Embora os últimos autores contraponham que o custo dessa simplicidade é que o método pode não capturar todos os detalhes e complexidades do problema em análise, a

simulação de eventos discretos pode ajudar a suprir esta deficiência, para a problemática levantada por este trabalho.

SMARTS (SMART usando *swings*) corrige um erro intelectual no método SMART por intermédio do uso de *swing weights* (EDWARDS; BARRON, 1994). Todavia, a técnica de atribuição de pesos *swing weights* proposto em SMARTS captura a preferência relativa dos tomadores de decisão por *swings* entre a pior e melhor alternativa em cada critério (GOODWIN; WRIGHT, 2004, p.41), tornando o método SMARTS não atrativo quando há muitas alternativas e critérios, pois os tomadores de decisão podem ter dificuldades em aplicar o método inúmeras vezes.

Como a questão chave em desenvolver um modelo de decisão multicritério para selecionar a alternativa recomendada é a escolha da técnica de atribuição de peso aos critérios (BARRON; BARRETT, 1996a, 1996b), uma substituição de pesos baseado em classificação, como, por exemplo, o ROC (*Rank Order Centroid*), pode ser utilizado levando a uma aproximação satisfatória de resultado em relação ao método padrão (BARRON; BARRETT, 1996a, 1996b; EDWARDS; BARRON, 1994; ROBERTS; GOODWIN, 2002). A combinação de SMARTS com uma metodologia mais simples de atribuição de peso foi proposto por Edwards e Barron (1994), que combinou SMARTS e ROC, denominando a junção dos métodos de SMARTER (*SMART Exploiting Ranks*).

No SMARTER não há a utilização de *swing weights* e após a ordenação dos critérios, os pesos são atribuídos por meio de valores pré-determinados denominados ROC *weights* (EDWARDS; BARRON, 1994). De modo a facilitar o seu uso, Edwards e Barron (1994) forneceram uma tabela com os pesos ROC (Apêndice C) para a classificação de até 16 critérios, porém também fornecem as equações para seu cálculo para a quantidade de critérios do problema a ser avaliado. Os autores afirmam que a elicitação de pesos por meio de ROC conduz à escolha da melhor alternativa entre 75 a 87% das vezes. Eles também relatam que no pior dos casos, quando os pesos ROC não escolhem a melhor alternativa, o método não escolhe uma muito ruim. Por outro lado, a utilização de ROC para poucos critérios pode promover uma distribuição de pesos não conivente com a opinião do tomador de decisão quanto aos valores atribuídos aos critérios, já que em um caso hipotético de decisão contendo dois critérios para avaliação, um deles recebe 0,75 e o outro 0,25 do total de peso.

O método abordado neste trabalho será o SMARTS uma vez serão avaliados seis critérios na problemática levantada, sendo assim poucos critérios para avaliação por meio de

*swing weights*. Todavia, o método ROC também será aplicado para somente verificar as diferenças entre a atribuição dos pesos no problema em análise.

Planejamento de cenários (ou análise de cenários) é um método de planejamento estratégico para identificar e analisar futuros plausíveis, considerando as incertezas destes futuros sem utilizar probabilidades, e auxiliar as empresas a identificar estratégias para lidar com estes futuros (SCHOEMAKER, 1995). Logo, planejamento de cenários considera as incertezas sem o uso de probabilidades, considerando que qualquer cenário plausível aos tomadores de decisão com relação à problemática em estudo, tem probabilidade igual de acontecer. Todavia, para uma discussão a respeito de se usar ou não probabilidades em SP, pode-se consultar o autor (MILLETT, 2009). Ainda, para um conhecimento mais aprofundado a respeito das origens do planejamento de cenários, seus princípios e escolas, classificação de métodos e características, o leitor pode se referenciar em Chermack, Lynham e Ruona (2001) e (AMER; DAIM; JETTER, 2013).

Como exposto anteriormente, a integração de SP com MCDA traz benefícios, já que MCDA não lida com as incertezas de problemas de decisões estratégicas e SP não possui um método estruturado para a avaliação de alternativas entre os cenários em análise. Logo, os cenários em MCDA devem ser construídos para considerar as incertezas em todos os critérios de decisão e verificar seus impactos nas alternativas de decisão (STEWART; FRENCH; RIOS, 2013).

Embora SP tenha maior aplicação para tomadas de decisões estratégicas, acredita-se que a sua aplicação em decisões simultâneas de diferentes níveis (estratégica, táticas e operacionais), como a escolha da melhor combinação de *layout* e políticas de controle operacionais, também possa ser útil.

No projeto do armazém, Baker e Canessa (2009) afirmam que cenários podem ser construídos, ou por simulação ou por outra modelagem, para considerar diferentes situações na qual a flexibilidade do projeto possa ser testada. Os autores complementam que os cenários podem incluir por exemplo: previsão de crescimento alternativo, mudanças no perfil dos pedidos e picos anormais de demanda.

Gong e De koster (2011) relatam que nas últimas décadas, os armazéns tiveram que aprender a se adaptar a uma crescente incerteza de várias fontes (desde fora da CSs até internamente aos armazéns), sendo provenientes de eventos raros e imprevisíveis, tendências previsíveis e variabilidade interna dos processos da CSs. Ainda, os autores afirmam que cada

uma das fontes de incerteza pode causar um impacto imprevisto nas decisões estratégicas, táticas ou operacionais, mas deve ser cumprida diariamente na prática.

Embora a variação da demanda possa ser considerada uma tendência previsível em armazéns e a falta de funcionários uma variabilidade interna da operação do armazém (GONG; KOSTER, 2011), não há certeza das suas ocorrências e utilizar ferramentas de planejamento tradicionais como as extrapolações dos dados históricos (tendências do passado) pode não produzir previsões confiáveis (MAKRIDAKIS; GABA, 1998).

Como o SP pode ser utilizado para projetar uma estratégia que seja robusta, no sentido de que ela irá garantir que a empresa sobreviva, ou até mesmo prospere, sob todas as condições que são consideradas plausíveis (GOODWIN; WRIGHT, 2001), a aplicação de SP neste trabalho é utilizada de modo a considerar o perfil do pedido, a variação do TEC e a demanda como incertezas da operação e assim auxiliar na tomada de decisão de qual combinação entre as alternativas de *layout* e políticas de controle de operação seja mais robusta e melhor atenderá às incertezas e desafios que possivelmente podem ocorrer.

A metodologia proposta neste trabalho utiliza o método da simulação de eventos discretos (SED), pois auxilia a testar muitas soluções alternativas rapidamente e facilmente, com baixo risco e sem interrupção na operação dos processos existentes ou em processos que estão em fase de planejamento (BANKS et al., 2010, P.11), como o caso do projeto de um armazém. Logo, pode ser utilizado para o teste de cenários do tipo WHAT-IF em armazéns e centros de distribuição, envolvendo questões estratégicas, táticas e operacionais (BANKS et al., 2010, P. 575).

Além disto, a simulação pode capturar o comportamento estocástico das operações do armazém (ALTARAZI; AMMOURI, 2018; SHQAIR; ALTARAZI; AL-SHIHABI, 2014), permitindo a análise das várias combinações possíveis das políticas operacionais (GILS et al., 2018), o que não seria possível por meio de modelos matemáticos por exemplo. Isto porque abordam uma quantidade limitada de combinações de políticas, fazendo simplificações para a representação das operações, devido a sua complexidade de desenvolvimento (GILS et al., 2017).

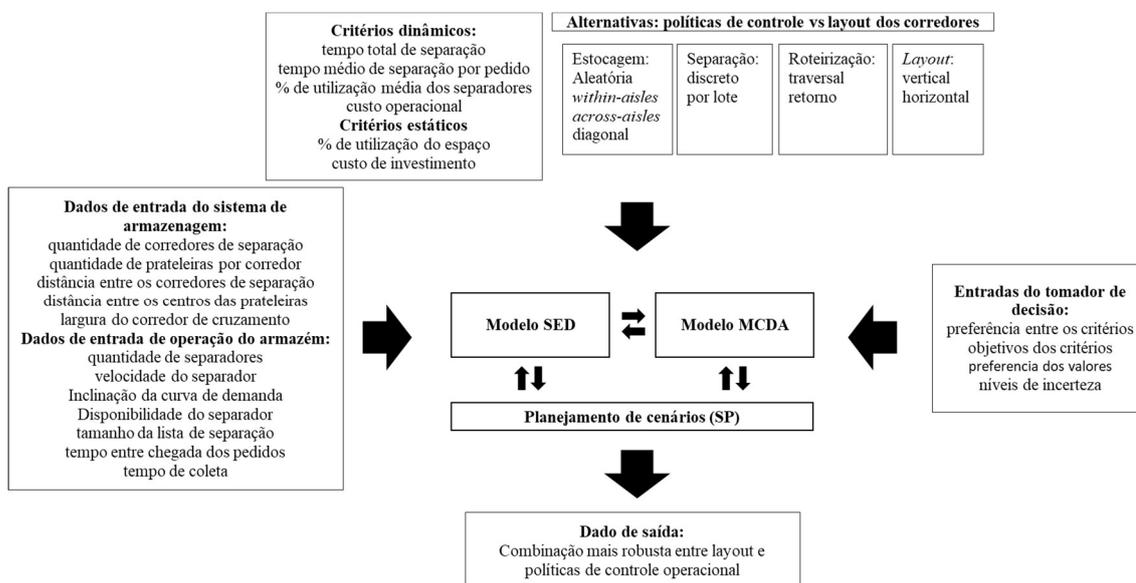
Corroborando com o exposto e finalizando a justificativa, os autores Baker e Canessa (2009) concluíram que mais da metade dos projetistas de armazéns usam um software de simulação durante o processo do projeto do armazém. Os autores indicam o uso de simulação em várias etapas do projeto de armazéns, inclusive para a avaliação de cenários.

A seguir, são apresentadas as etapas 2 a 4 com maiores detalhes quanto aos métodos aplicados nos tópicos 3.2 a 3.2.6.

### 3.2. Proposição de metodologia combinada entre MCDA, SP

A metodologia combinada trabalha em pares (FIGURA 8). O modelo MCDA depende das preferências dos critérios, dos objetivos dos critérios e das preferências de valor do tomador de decisão para avaliar as alternativas por meio dos critérios nos cenários planejados, que depende das incertezas do tomador de decisão. Para ajudar o modelo MCDA a avaliar os critérios dinâmicos (“tempo total de separação”, “tempo médio de separação por pedido”, “% de utilização média dos separadores” e “custos operacionais”) nas alternativas, o modelo DES depende dos dados do sistema de armazenagem do armazém, assim como os dados de operação do armazém. Os dados de entrada da operação, como “tamanho da lista de separação” e “tempo entre a chegada de pedidos”, são provenientes do planejamento de cenários (níveis de incertezas). Por fim, a saída da metodologia proposta é a combinação mais robusta entre as políticas operacionais e o *layout*.

FIGURA 8 – Metodologia combinada



Fonte: Próprio autor.

Ram, Montibeller e Morton (2011) desenvolveram uma estrutura geral para a aplicação conjunta dos métodos MCDA e SP. Neste trabalho, as etapas para a combinação dos métodos SMARTS/SMARTER e SP seguem as recomendações dos seguintes autores: Ram, Montibeller

e Morton (2011), Edwards e Barron (1994), Goodwin e Wright (2004, p.30) e Montibeller, Gummer e Tumidei (2006). Já a construção do modelo de simulação será feito por intermédio das recomendações de Law e Kelton (1991). A sequência de etapas desta combinação está na TABELA 9.

TABELA 9 – Etapas do método SMARTS/SMARTER e SED.

| <b>Etapas</b>   | <b>Objetivo</b>   | <b>Métodos</b>  |
|---|---|---|
| 1 - Entendimento do problema                                      | Identificar o propósito (objetivo) do modelo MCDA e SP e o tomador de decisão                       |   |
| 2 - Identificação dos critérios e alternativas                    | Identificar os critérios relevantes para o problema de decisão (árvore de decisão)                  | Entrevista com o tomador de decisão envolvido no problema e apoio na revisão da literatura        |
| 3 - Identificação das principais incertezas                       | Identificar as principais incertezas da atividade de separação de pedidos do armazém                |   |
| 4 - Desenvolvimento dos cenários                                  | Identificar os cenários plausíveis pelos quais a atividade de separação de pedidos pode passar      | Conforme Ram, Montibeller e Morton (2011)   |
| 5 - Desenvolvimento do Modelo de Simulação                        | Desenvolver um modelo de simulação para representar a atividade de separação de pedidos do armazém. | Conforme Law e Kelton (1991) por meio do <i>software</i> ARENA                                    |
| 6 - Aplicação do MCDA   | Capturar a preferência do tomador de decisão em relação aos critérios                               | SMARTS/SMARTER por meio do <i>software</i> VISA   |
|   | Verificar como cada alternativa se desempenha frente aos critérios                                  | Modelo SED por meio do <i>software</i> ARENA e SMARTS ou SMARTER por meio do <i>software</i> VISA |
| 7 - Identificação da alternativa mais robusta e fazer uma escolha | Calcular a robustez de cada alternativa   | Conforme Ram, Montibeller e Morton (2011)   |

Fonte: Próprio autor.

### **3.2.1. Entendimento do problema e identificação dos critérios e alternativas de escolha (Etapa 1 e 2)**

As duas primeiras etapas são realizadas com apoio na revisão da literatura, observação das operações do armazém e confirmação por meio de entrevistas semiestruturadas junto ao tomador de decisão. Esta triangulação das fontes de informações visou a maior validade e confiança do estudo (VOSS; TSIKRIKTSIS; FROHLICH, 2002; YIN, 2001). O roteiro da entrevista semiestruturada (Apêndice A) aborda primeiramente uma caracterização do respondente e em seguida assuntos relacionados a tomada de decisão quanto as políticas de controle operacional e *layout* do armazém.

Como afirmado anteriormente, os critérios (ou atributos) são as variáveis que possuem relevância ao analisar o problema, sendo utilizados para medir o desempenho em relação a um objetivo desejado. Quando agrupados de forma estruturada, representam a estrutura hierárquica dos objetivos da tomada de decisão. Sua definição deve levar em conta o pensamento de valor de modo a também se obter melhores alternativas.

Os autores De koster, Le-duc e Roodbergen (2007) listam possíveis objetivos/critérios para problemática em questão: minimizar o tempo médio de separação de um pedido, minimizar o tempo total de separação de todos os pedidos, maximizar o uso do espaço, minimizar o uso do equipamento, maximizar o uso do separador e maximizar a acessibilidade a todos os itens.

Rouwenhorst et al. (2000) afirmam que para o projeto do armazém, os seguintes critérios de desempenho devem ser abordados: custo, taxa de movimentação, capacidade de armazenagem e tempo de resposta. Já os autores Staudt et al. (2015) identificaram que medidas de desempenho relacionadas a custo, tempo, produtividade e qualidade, afetam as operações nos armazéns. Logo, os critérios (TABELA 10) utilizados por esta dissertação são definidos a partir da revisão da literatura.

TABELA 10 – Critérios e subcritérios do problema de decisão

| Critério                              | Indicador       | Descrição  |
|---------------------------------------|-----------------|--|
| Tempo total de separação              | Tempo [horas]   | Tempo total de separação de todos os pedidos   |
| Tempo médio de separação              | Tempo [minutos] | Tempo médio de separação por pedido  |
| % de utilização média dos separadores | Porcentagem [%] | Relação entre o tempo que o separador está separando um pedido e o tempo em que se encontra parado |
| % utilização do espaço                | Porcentagem [%] | Relação entre a quantidade de equipamentos de armazenagem e a área disponível                      |
| Custo operacional                     | Custo [R\$]     | Custo da operação da separação de pedidos  |
| Custo do equipamento de armazenagem   | Custo [R\$]     | Custo os equipamentos de armazenagem   |

Fonte: Próprio autor.

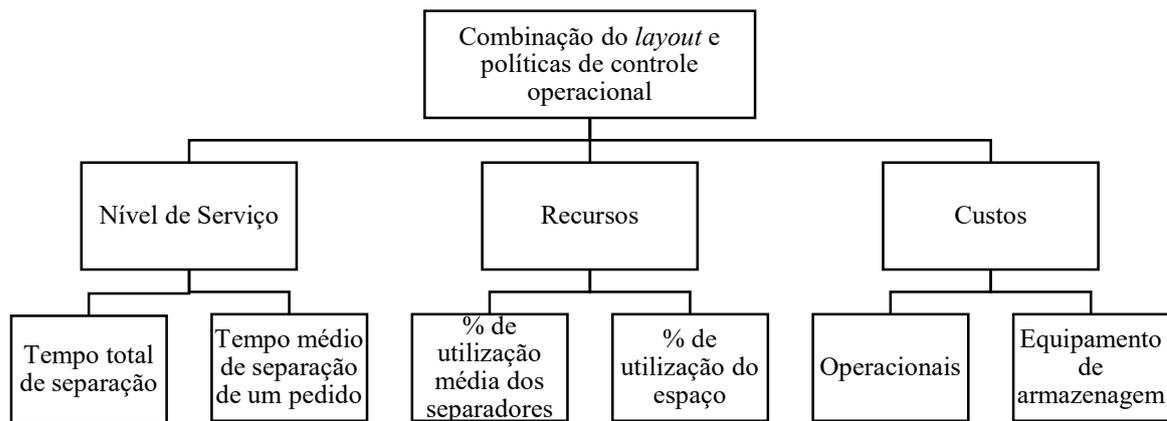
Com relação ao critério “tempo total de separação” e “tempo médio de separação por pedido”, Chackelson et al. (2013) relataram que são principalmente influenciados pela política de separação e roteirização, bem como pela quantidade de linhas por pedido, mas com diferentes magnitudes e diferentes sinais. Isto indica que algumas decisões podem melhorar o desempenho do armazém quanto a um critério e ao mesmo tempo piorar quanto ao outro critério. A importância em melhorar um destes critérios vai depender das condições de mercado e necessidades do cliente (CHACKELSON et al., 2013), o que refletirá nas escolhas do tomador de decisão.

O critério “% média de utilização dos separadores” considera que para uma quantidade fixa de separadores, diferentes combinações de *layout* e políticas operacionais resultam em diferentes utilizações dos separadores. Já para o critério “% de utilização do espaço”, leva-se em consideração que para uma mesma área, diferentes arranjos de *layout* podem comportar diferentes quantidades de equipamentos de armazenagem, e logo diferentes taxas de ocupação. Em outras palavras, corresponde à capacidade de armazenagem, já que diferentes *layouts* podem aumentar a capacidade de armazenagem em relação a outros, mesmo havendo o *trade-off* com os custos.

O critério “custos operacionais” é importante no armazém (BALLOU, 2012) e na tomada de decisão relacionados as questões de armazenagem compõe o *trade-off* custo vs nível de serviço (VIEIRA et al., 2017). Já o critério “custo do equipamento de armazenagem”, considera o *trade-off* entre a quantidade de unidades de equipamentos utilizados no *layout* (porcentagem do espaço totalmente utilizado) e o custo de aquisição dos equipamentos.

Uma organização dos critérios foi feita de modo a auxiliar o tomador de decisão a organizar suas ideias, em função da quantidade de critérios. Os critérios foram hierarquizados em critérios e subcritérios. Primeiramente, são criados os critérios “nível de serviço”, “recursos” e “custos”. Após, são adicionados os subcritérios até formar a estrutura hierárquica de decisão (FIGURA 9). Vale lembrar que a estruturação da hierarquia de decisão foi feita seguindo-se as cinco propriedades definidas por Keeney e Raiffa (1993).

FIGURA 9 – Estrutura hierárquica de decisão



Fonte: Próprio autor.

Isto foi feito para garantir que a estrutura seja uma representação precisa e útil das preocupações do tomador de decisão. Desta forma, os critérios e subcritérios, bem como a estrutura hierárquica de decisão, serão apresentados ao tomador de decisão para validação e ou alteração por meio de uma entrevista semiestruturada (Apêndice A).

Para se utilizar o método SMARTS/SMARTER (um modelo aditivo que agrega valores de diferentes critérios) é necessário garantir que exista independência de preferência mútua entre os critérios, uma vez que a não garantia pode levar à escolha de uma alternativa errada (GOODWIN; WRIGHT, 2004). Logo, considerando dois critérios “A” e “B”, a independência preferencial de “B” em relação à “A” é garantida quando as preferências sobre os resultados específicos de “B” não dependem dos níveis do critério “A” (CLEMEN; REILLY, 2004). Um método para identificar se as preferências dos tomadores de decisão são preferencialmente independentes (CLEMEN; REILLY, 2004; GOODWIN; WRIGHT, 2004) é descrito no apêndice A por meio de um exemplo e será aplicado ao tomador de decisão.

As alternativas foram definidas conforme levantamento bibliográfico. A validação seguirá o mesmo processo, conforme a mesma entrevista semiestruturada. As alternativas de *layout* e políticas de controle operacional avaliadas nesta dissertação, e que podem gerar uma alternativa para avaliação no modelo de decisão, encontram-se na TABELA 11.

TABELA 11 – Possíveis alternativas de avaliação pelo modelo

| Alternativas                 | Níveis | Descrição   |
|------------------------------|--------|---|
| Layout (l)                   | 2      | (1) Vertical<br>(2) Horizontal  |
| Política de estocagem (e)    | 4      | (1) Aleatória<br>(2) <i>Within-aisle</i><br>(3) <i>Across-aisle</i><br>(4) Diagonal |
| Política de separação (s)    | 2      | (1) Discreta<br>(2) Por lote (FCFS)   |
| Política de roteirização (r) | 2      | (1) Transversal<br>(2) Retorno  |

Fonte: Próprio autor.

Para facilitar o entendimento, uma alternativa A qualquer é definida como:

$$A = L \times E \times S \times R = \{(l, e, s, r) / l \in L, e \in E, s \in S, r \in R\}$$

Onde L, E, S e R representam as alternativas do *layout*, política de estocagem, política de separação e política de roteirização respectivamente. Logo, um exemplo de uma possível alternativa A é o *layout* horizontal, estocagem aleatória, separação por lote e roteirização transversal. Ao todo, o modelo considera  $2 \times 4 \times 2 \times 2 = 32$  alternativas.

As políticas de estocagem por classe (*within-aisle*, *across-aisle* e diagonal) seguem o padrão 80/20, onde 80% das separações são feitas em 20% das locações que estão posicionadas mais próximas do ponto de início e fim de rota de separação. Quanto às alternativas de *layout*, optou-se por incluir o *layout* horizontal (FIGURA 2) uma vez que é muito pouco avaliado na literatura e pode resultar em melhor desempenho que *layout* o vertical (ALTARAZI; AMMOURI, 2018). Em contrapartida o *layout* vertical (FIGURA 2) tem sido amplamente utilizado (CHACKELSON et al., 2013; CHEN et al., 2010; ELBERT et al., 2017; FRANZKE et al., 2017; GILS et al., 2017; PETERSEN; AASE, 2017; ROODBERGEN; VIS; TAYLOR, 2015).

Quanto às políticas de roteirização, considerou-se para a decisão as heurísticas de roteirização mais simples como a transversal e retorno (FIGURA 4). Isto porque a escolha pelas políticas básicas pode resultar em soluções próximas da roteirização ótima (HALL, 1993) além de evitar rotas complexas que podem causar confusão e conseqüentemente pode aumentar o tempo e erros na atividade de separação (PETERSEN; AASE, 2004).

Quanto à política de separação por lote, considerou-se o agrupamento dos pedidos (ou listas de separação) por intermédio do método FCFS em função da sua facilidade de aplicação e porque os agrupamentos por heurísticas mais complexas (*savings* e semente) não tem sido amplamente utilizadas na prática devido aos longos tempos computacionais para o cálculo de lotes e rotas ideais para cada roteirização (GILS et al., 2017). Ressalta-se que a aplicação de algoritmos mais complexos pode ser encontrada na prática quando o *picking* é organizado por onda e lote conjuntamente, envolvendo restrições de peso, tipo de produto, localização da coleta e capacidade.

### **3.2.2. Identificação das principais incertezas (Etapa 3)**

De acordo com Schoemaker (1995), incertezas são eventos cujos resultados são incertos, mas significativamente afetarão as questões em análise. Diferentes abordagens podem ser aplicadas para se lidar com a incerteza em problemas MCDA, como por exemplo: probabilidades, medidas de risco explícito, números *fuzzy* e cenários (DURBACH; STEWART, 2012).

Ram, Montibeller e Morton (2011) recomendam a prática tradicional de *brainstorming* para a identificação das principais incertezas sob o problema de decisão. Porém, este trabalho adota uma entrevista semiestruturada (Apêndice A) apoiada nas incertezas encontradas nos estudos avaliados que dizem respeito à alteração no padrão dos pedidos (GONG; KOSTER, 2011) sendo representados pelo tamanho da lista de separação (TLS), tempo entre chegada dos pedidos (TEC) e variação do TEC ao longo da operação.

### **3.2.3. Desenvolvimento dos cenários (Etapa 4)**

O desenvolvimento dos cenários pode ser auxiliado por ferramentas como: matriz de quatro quadrantes, matriz de Wilson, análise morfológica, análise de consistência e análise de impacto cruzado (AMER; DAIM; JETTER, 2013). O método proposto pelos autores Ram e Montibeller e Morton (2011) consiste na aplicação de análise morfológica (MA). Os autores justificam que MA é adequado para o desenvolvimento dos cenários, pois: pode lidar com uma

grande quantidade de incertezas quantitativas e qualitativamente definidas; estimula a investigação de múltiplas combinações dos valores limites de uma maneira eficiente; e facilita a descrição dos cenários a um nível de detalhamento que fornece informações suficientes ao tomador de decisão para a elicitación de suas preferências. Assim, MA permite visualizar os vários elementos e dimensões do sistema em análise e assim desenvolver cenários para o futuro e checar se são plausíveis aos tomadores de decisão (AMER; DAIM; JETTER, 2013).

A técnica consiste em solicitar aos tomadores de decisão a pensarem nas incertezas em seus melhores e piores níveis, ou seja, os níveis mais altos e mais baixos. Para manter a consistência, os tomadores de decisão devem considerar somente os níveis que acreditem serem plausíveis. Cada combinação de níveis de cada incerteza representará um cenário para análise.

De modo a diminuir a quantidade das possíveis combinações para análise, os autores recomendam assumir todas as incertezas em seus melhores (piores) níveis e fazer o *swing* de cada incerteza por vez para seu pior (melhor) nível. Isto ajuda o(s) tomador(es) de decisão a observar possíveis *trade-offs* e assim novas oportunidades. Um exemplo hipotético da técnica é explicado no Apêndice B.

A quantidade de cenários a se desenvolver também é uma questão importante. É difícil afirmar qual a quantidade ideal, pois depende da especificidade da aplicação e dos objetivos da análise (SCHNAARS, 1987). Contudo, o desenvolvimento dos cenários deve satisfazer alguns critérios (VAN DER HEIJDEN, 2011; P. 225):

- No mínimo dois cenários são necessários para refletir as incertezas;
- Cada cenário deve ser plausível, ou seja, eles devem evoluir logicamente (de uma maneira causa/efeito) a partir do passado e do presente e refletir o conhecimento corrente;
- Os cenários devem ser internamente consistentes, ou seja, dentro dos cenários os eventos devem ser relacionados por meio de argumentos de causa/efeito, o que não pode ser falho;
- Os cenários devem ser relevantes à problemática do tomador de decisão. Eles devem ser capazes de gerar ideias úteis, abrangentes e desafiadoras e fornecer condições de testes para estas ideias, contra as quais o tomador de decisão pode considerar planos de negócios futuros, estratégias e direções (ou seja, alternativas de curso).

Por fim, os cenários devem passar por uma análise de consistência. Isto é utilizado para checar a compatibilidade das variações de combinações dos vários geradores de cenários

(conceitos, tendências, incertezas, etc.), para após utilizar a análise morfológica (AMER; DAIM; JETTER, 2013).

### **3.2.4. Desenvolvimento do modelo de simulação (Etapa 5)**

O modelo de simulação foi elaborado seguindo-se as etapas: formulação do problema; coleta de dados e construção do modelo conceitual; modelagem computacional; verificação e validação; projeto dos experimentos e análise dos dados de saída (LAW; KELTON, 1991).

#### **• Formulação do problema**

Os objetivos e propósitos do modelo de simulação são definidos nesta etapa (SHANNON, 1998) bem como quais são os critérios para avaliação de desempenho do sistema em estudo (DE FREITAS FILHO, 2001). Os mesmos condizem com o objetivo geral desta dissertação e mais especificamente avaliar o desempenho das combinações de  $A = L \times E \times S \times R$  da seção 3.2.1 quanto aos subcritérios tempo total de separação, tempo médio de separação de um pedido e % de utilização dos separadores de pedidos.

#### **• Coleta de dados**

Nesta etapa são coletados informações e dados a respeito da atividade de separação de pedidos de um armazém atacadista/varejista de peças automotivas, de forma a especificar os procedimentos operacionais e as distribuições de probabilidade das variáveis aleatórias a ser usadas no modelo (LAW; KELTON, 1991). As variáveis com comportamento estocástico a serem coletadas são:

1. Histórico da demanda dos pedidos;
2. Tamanho da lista de separação (TLS);
3. Tempo entre chegada (TEC) de pedidos;
4. Perfil da demanda (variação do TEC de pedidos ao longo da operação); e
5. Tempo de coleta por item.

O tamanho da lista de separação (TLS) (FIGURA 10) refere-se à quantidade de linhas ou diferentes itens que uma lista (ou pedido) deve ter. O tempo entre chegada (TEC) dos pedidos (ou listas) refere-se à frequência com que os pedidos surgem para os separadores de pedidos. O perfil da demanda refere-se à variação do TEC do pedido ao longo de um dia de operação. Os dados a respeito do histórico da demanda dos pedidos e o TLS serão coletados por meio de relatórios do sistema. Já as variáveis em relação ao tempo serão coletadas em loco, com

tamanho de amostras entre 100 e 200 observações, na mesma ordem em que o fenômeno está ocorrendo e verificando se há ou não suspeita da sua variação em função do dia (CHWIF; MEDINA, 2010) de modo a garantir a representatividade das variáveis em estudo (DE FREITAS FILHO, 2001).

FIGURA 10 - Exemplo do tamanho da lista de um pedido

| DATA     | 16/04/2013                               |      |             |
|----------|--|------|-------------|
| PEDIDO   | 183797                                   |      |             |
| ITEM     | DESCRIÇÃO                                | QTDE | LOCAÇÃO     |
| 24422061 | ATUADOR DE EMBREAGEM 1999 TODOS          | 1    | E10 1 A 11  |
| 24578615 | JUNTA DOS COLETORES. ESCAPAMENTO         | 1    | E10 1 C 11  |
| 24580126 | SELO-TERMOST REFRT M                     | 1    | E12 6 E 51  |
| 90467661 | JUNTA DA TAMPA DE VALVULAS               | 1    | E13 6 F 11  |
| 9129998  | VEDADOR TERMOST                          | 1    | E14 7 D 71  |
| 93206675 | VELAS DE IGNICAO - PR6EY                 | 16   | E14 8 A 31  |
| 93255173 | JUNTA DOS COLETORES ADMISS -O            | 1    | E16 2 C 11  |
| 93294977 | BUCHA ALAV.TRASM. CORSA / CELTA / VECTRA | 2    | E17 11 D 31 |
| 93363560 | JUNTAS DO CABEÃOOTE                      | 1    | E17 12 B 11 |
| 98500014 | KIT DE EMBREAGEM                         | 1    | E18 5 E 21  |

} TLS = 10  
linhas/itens

Fonte: Próprio autor.

Após, estes dados coletados serão tratados pelo *software* estatístico *Input Analyzer*® e assim gerar os histogramas, as medidas descritivas e os testes de aderência para a determinação das distribuições estatísticas que melhor representem a operação (BANKS et al., 2010). Os testes de aderência a ser utilizados são Qui-quadrado ( $\chi^2$ ) e kolmogorov – Smirnov (KS) (somente para distribuições contínuas) (DE FREITAS FILHO, 2001).

Uma curva teórica de probabilidade é considerada aderente a amostra se o *p-value*, calculado pelo *software* estatístico *Input Analyzer*®, for maior que 0,1 para ambos os testes a um nível de significância de 95% (DE FREITAS FILHO, 2001). Porém, os últimos autores também afirmam que valores de *p-value* acima de 0,05 são confiáveis e que neste caso existem evidencias estatísticas de que os dados da amostra podem ser modelados segundo a curva teórica de probabilidade obtida. De acordo com Kelton, Sadowski e Sturrock (2007) o *p-value* é a probabilidade de obter um novo conjunto de dados que seja mais inconsistente com a distribuição ajustada do que o conjunto de dados atualmente utilizados, se a distribuição ajustada for a verdadeira distribuição da variável aleatória que se está tratando.

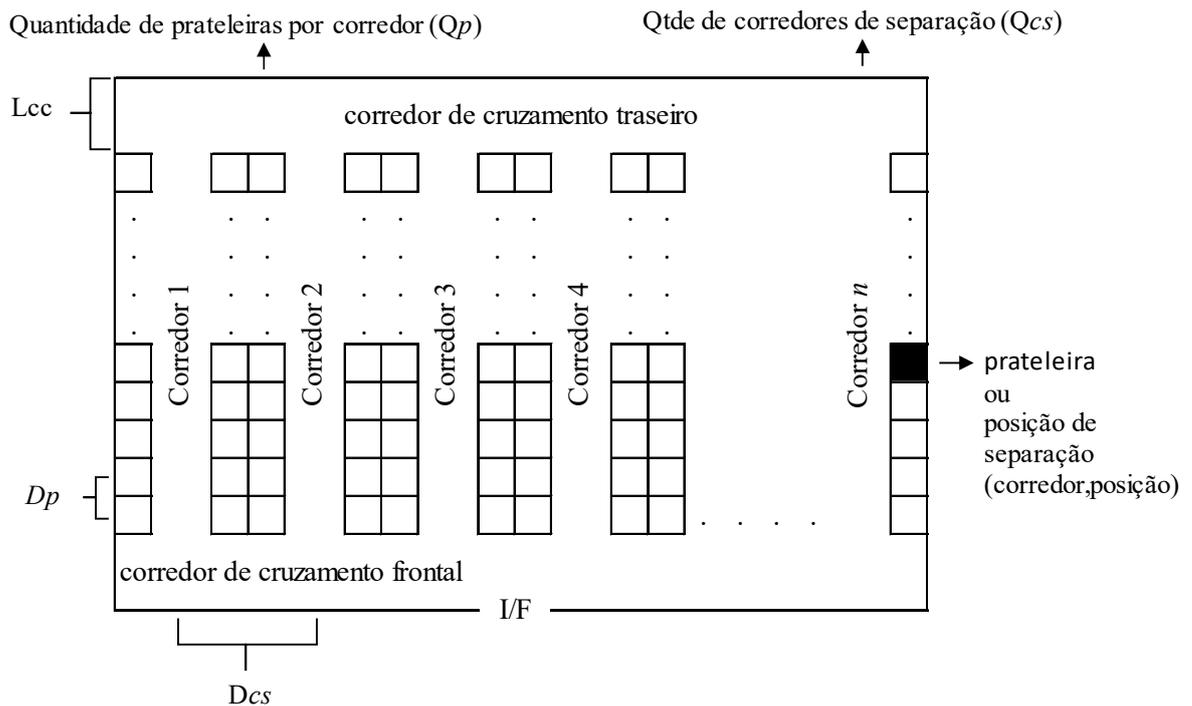
- **Modelagem conceitual**

O desenvolvimento do modelo conceitual define os componentes, os dados de entrada e saída, e as interações lógicas que constituem a operação de separação de pedidos de um

armazém atacadista/varejista de peças automotivas (SHANNON, 1998). Logo, o modelo conceitual retrata a entrada dos dados necessários, a geração de pedidos, a atribuição dos dados às entidades (pedidos), a requisição de um separador de pedidos (transportador), o fluxo de movimentação da entidade/transportador dentro da área de separação e a coleta de dados necessária. Os dados de entrada dividem-se em dados relativos ao sistema de armazenagem e a operação do armazém. Com relação sistema de armazenagem para um layout vertical (FIGURA 11) por exemplo, têm-se:

- Quantidade de corredores de separação ( $Qcs$ );
- Quantidade de prateleiras por corredor ( $Qp$ );
- Distância entre os corredores de separação ( $Dcs$ );
- Distância entre os centros das prateleiras ( $Dp$ );
- Largura dos corredores de cruzamento ( $Lcc$ );

FIGURA 11 - Dados de entrada layout vertical



Os dados relativos ao sistema de armazenagem do layout horizontal são os mesmos que o layout vertical. Estes dados são de natureza estratégica e estão relacionados ao sistema de armazenagem escolhido e capacidade de estocagem desejada de modo a atingir o nível de serviço e política de inventário da empresa (CORMIER; GUNN, 1992; GU; GOETSCHALCKX; MCGINNIS, 2010; ROUWENHORST et al., 2000). Também, estes dados estão ligados aos equipamentos de movimentação que podem ser utilizados, como por exemplo

uma empilhadeira. Embora o modelo SED esteja configurado para separação manual em sistemas de armazenagem por prateleiras ou *flow racks*, uma fácil alteração em sua configuração permitiria a sua utilização para uma separação por meio de empilhadeiras em um sistema de armazenagem por porta paletes, somente alterando o transportador por uma empilhadeira e adicionando a velocidade vertical na análise.

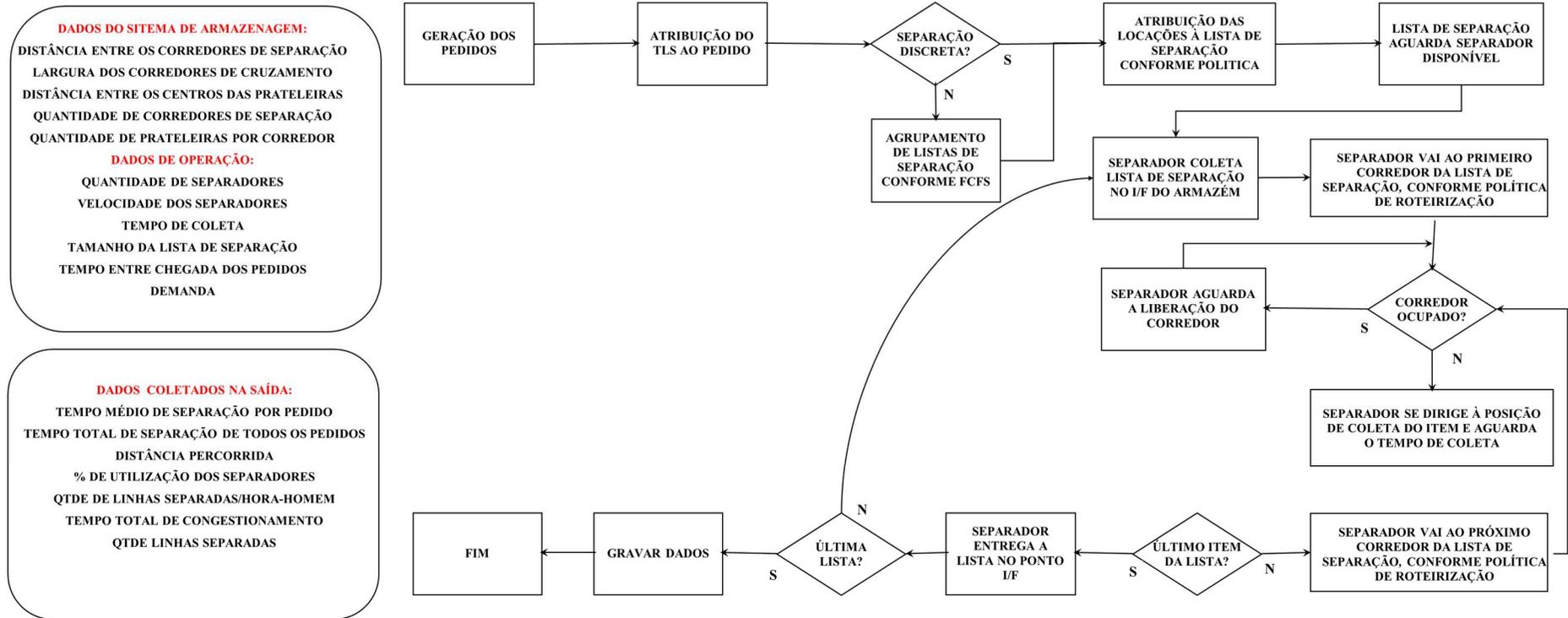
Dados relativos à operação do armazém compreendem:

- Quantidade de separadores;
- Velocidade dos separadores;
- Inclinação da curva de demanda;
- Disponibilidade do separador;
- Tempo de coleta;
- Tamanho da lista de separação;
- Tempo entre chegada dos pedidos;
- Demanda.

A quantidade de separadores é uma decisão tática e está correlacionado ao desempenho das atividades do armazém (ROUWENHORST et al., 2000) e ao congestionamento na atividade de separação (FRANZKE et al., 2017). Os quatro últimos dados listados possuem uma natureza estocástica e podem ser obtidos por meio de coleta na operação, histórico do banco de dados ou com um especialista da empresa (KELTON; SADOWSKI; STURROCK, 2007).

Logo, modelo conceitual pode ser representado conforme FIGURA 12. Ainda, na FIGURA 12 observam-se os pontos mais importantes do modelo conceitual. Primeiramente, devem-se informar as configurações do modelo como a política de estocagem, separação e roteirização que serão avaliadas, bem como as dimensões dos corredores, tempo de coleta e por fim dados referentes aos separadores de pedidos (quantidade e velocidade). Após, deve-se informar os dados de entrada de comportamento estocástico como o TEC dos pedidos, a variação do TEC, o TLS e a variação e a demanda dos pedidos. Logo, são gerados os pedidos (entidades) conforme os dados relacionados ao TEC e em seguida o TLS é atribuído à cada pedido. Neste momento cada pedido é representado por uma lista de separação.

FIGURA 12 – Modelo conceitual do problema



Fonte: Próprio autor.

Após, é verificada a política de separação selecionada. Para a separação por lote, duas listas ou mais de separações são agrupadas conforme a regra FCFS e na sequência são atribuídas as locações (corredor, posição) à lista de separação, conforme a política de estocagem adotada.

Posteriormente, as listas de separações aguardam por separadores (transportadores) disponíveis no ponto I/F (início/fim da rota de separação). Neste ponto, os separadores coletam as listas e visitam as locações conforme as informações (corredor, posição) já atribuídas à entidade (pedido/lista de separação) e a política de roteirização configurada. Neste processo, caso um corredor de separação esteja sendo utilizado por um separador, o próximo separador deve aguardar sua liberação devido a temática do congestionamento. Isto, porque o corredor é estreito e permite o trânsito de somente um separador por vez em um sentido de movimentação.

Após a visita de todas as locações de uma lista, o separador devolve a lista no ponto I/F e se houver outra lista para separação, inicia-se novamente uma separação até que a quantidade de listas de separação (ou pedidos) termine.

Os dados de saída levantados ao fim da simulação são: tempo médio de separação por pedido, tempo total de separação de todos os pedidos, distância percorrida, quantidade de linhas separadas/hora-homem e porcentagem de utilização média dos separadores. Em complementação ao modelo conceitual previamente descrito, algumas premissas foram consideradas para o desenvolvimento da modelagem computacional:

- O modelo deve ser executado para cada combinação de políticas operacionais;
- Cada arranjo de *layout* (horizontal e vertical) será tratado em modelos computacionais diferentes por razões das lógicas de modelagem;
- O separador caminha com velocidade constante a ser determinada como dado de entrada do modelo, não havendo período de aceleração e desaceleração;
- A separação por lotes pode separar no máximo dois pedidos independente do TLS de cada pedido, ou seja, não há restrição de capacidade para o separador;
- Os separadores de pedido iniciam e terminam a rota de separação no mesmo ponto I/F;
- Os separadores estão disponíveis para a atividade de separação conforme disponibilidade informada no modelo;
- O congestionamento é considerado no acesso aos corredores de separação, ou seja, o separador deve aguardar na cabeceira do corredor caso outro separador esteja visitando uma posição daquele corredor;

- O separador pode acessar cada corredor por ambos os lados, desde que o corredor não esteja ocupado;
- Embora seja o ideal, não há a consideração de espaço físico nas cabeceiras dos corredores para os separadores que estão esperando para entrar em cada corredor.

O modelo SED desenvolvido permite qualquer formato de armazém, uma vez que isto depende da quantidade de corredores de separação e da quantidade de prateleiras por corredor. Quando se fixa a área e se permite uma variação na capacidade de armazenagem é recomendável a utilização do formato 2:1 (largura/profundidade), de modo a proporcionar melhor desempenho no processo de separação do armazém (HALL, 1993). Por outro lado, quando a restrição é a capacidade de armazenagem e pode-se ter uma variação da área, é recomendável adotar formatos mais profundos de armazém (1:2) (PETERSEN, 1997). Por fim, o modelo assume que o ponto de I/F da rota de separação está localizado no meio do corredor de cruzamento frontal, uma vez que isto aumenta o desempenho da separação de pedidos em relação a localização do ponto de I/F no canto do corredor de cruzamento (PETERSEN; AASE, 2004).

#### • Modelagem computacional

A modelagem computacional é a tradução do modelo conceitual feito anteriormente (FIGURA 12) em um *software* de simulação de propósito geral ou específico (BANKS et al., 2010; LAW; KELTON, 1991; SHANNON, 1998). Nesta etapa foi construído um modelo quantitativo do modelo conceitual, definindo as relações causais entre os parâmetros do estudo (FRANSOO; BERTRAND, 2002) por meio do *software* ARENA® (utilização da licença acadêmica da UFSCAR campus Sorocaba).

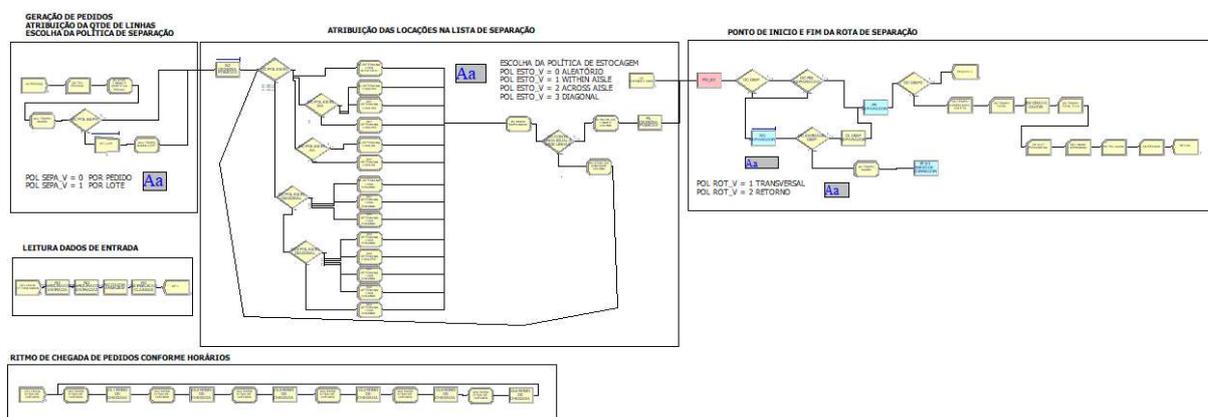
O tema do congestionamento foi abordado pelos autores Franzke et al. (2017) e Heath, Ciarallo e Hill (2013) por intermédio da simulação baseada em agentes (SBA) utilizando *softwares* específicos. Todavia, o *software* ARENA® também é capaz de abordar este tema sob ponto de vista do congestionamento (ou bloqueio) de corredores e ocupação da posição (HEATH; CIARALLO; HILL, 2013) por meio de uma lógica mais elaborada. Diversos trabalhos já utilizaram com sucesso o *software* ARENA® para análises do problemas relativos às atividades internas do armazém (ALTARAZI; AMMOURI, 2018; CHAN; CHAN, 2011).

Foram criadas lógicas com a entrada dos dados e a escolha da configuração feitas por intermédio de uma planilha de EXCEL®. Dados de saída também são exportados para uma planilha EXCEL® para análise e entrada no modelo de decisão. O modelo computacional está

dividido em três lógicas principais: geração dos pedidos e finalização com a exportação dos dados de saída; separação dos pedidos; e verificação do congestionamento.

Na lógica de geração de pedidos (FIGURA 13), os pedidos ou listas de separações (entidades) recebem informações com relação ao TLS e variáveis de controle do sistema definem quais políticas devem ser utilizadas na operação. A atribuição das locações a serem visitadas em cada pedido também é feita nesta lógica, utilizando uma análise cíclica condicional do tipo *IF-THEN*. Uma vez que uma entidade (pedido) passa por esta lógica inicial, ela para em uma estação ponto início/fim da rota de separação. Um transportador (separador) é requisitado conforme disponibilidade.

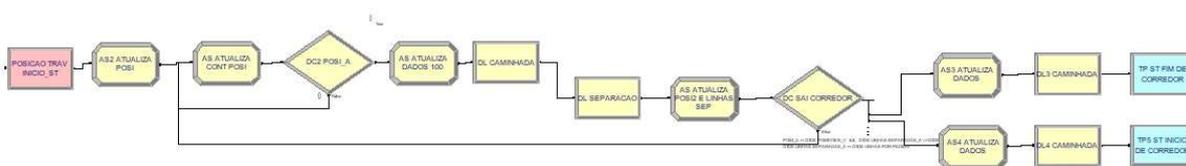
FIGURA 13 – Lógica de geração dos pedidos



Fonte: Próprio autor.

Na lógica de separação de pedido (FIGURA 14), o transportador (carregando a entidade) visita as locações (corredor, posição) atribuídas à entidade. Esta lógica permite que o separador aguarde o tempo de coleta na posição de separação, faz a atualização da distância percorrida e mostra o caminho ao separador para a próxima posição da lista ou ponto I/F, conforme os dados de entrada e alternativas de roteirização em avaliação.

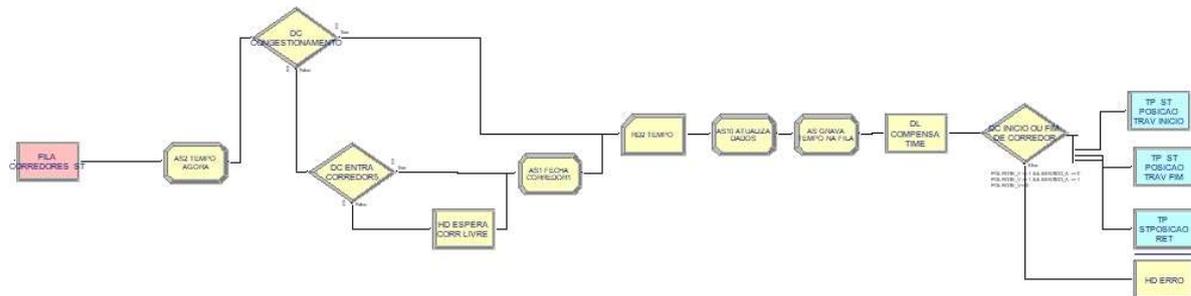
FIGURA 14 – Exemplo da lógica de separação do pedido



Fonte: Próprio autor.

A lógica do congestionamento (FIGURA 15) não permite o avanço de qualquer separador à um determinado corredor quando este está sendo utilizado por outro separador.

FIGURA 15 – Lógica do congestionamento



Fonte: Próprio autor.

Ao fim do processo de separação de cada entidade, o transportador retorna à estação início/fim de rota e a entidade libera o separador. Neste ponto a entidade passa por uma lógica que registra seus dados para posterior exportação para o EXCEL®. O modelo proposto é de fácil alteração quanto a quantidade de posições (locações, ou capacidade de armazenagem) bem como a quantidade de corredores.

#### • Verificação e validação

A verificação visa inspecionar se o modelo computacional se desempenha como esperado (SHANNON, 1998) por meio da mudança dos valores das variáveis aleatórias de entrada e checando se os dados de saída correspondem com as mudanças da entrada (BANKS et al., 2010). Logo, a verificação do modelo computacional será determinada por meio da conferencia das regras gerais das operações de separação de pedidos (TOMPKINS et al., 2010) e também utilizados pelos autores Heath, Ciarallo e Hill (2013):

- A utilização da política de estocagem aleatória reduz o tempo de congestionamento;
- A utilização da política de estocagem por classes reduz o tempo de separação dos pedidos;

Para tal, serão consideradas as mesmas condições de TLS e TEC, tempo de coleta, velocidade de caminhada do separador e mesma quantidade de separadores. Ainda, será considerada uma quantidade igual de pedidos para ambos os testes, mesma política de separação e roteirização, bem como a mesma semente geradora dos eventos aleatórios quanto a atribuição das locações. Estes dados serão considerados com valores determinísticos ao invés das variáveis aleatórias. De Freitas Filho (2001) relata que tais variáveis, necessárias para representar os

processos estocásticos que ocorrem nos sistemas do mundo real, podem dificultar o trabalho de verificação. Os autores complementam que a atribuição de valores determinísticos facilita a busca por erros no modelo computacional, uma vez que fica mais simples a previsão de respostas do sistema e assim sua verificação.

A validação visa determinar se o modelo representa ou não o sistema real em estudo (SHANNON, 1998). A validação então consiste no método subjetivo que busca a validação do modelo conceitual e computacional junto ao gerente do armazém, e no método objetivo que consiste em rodar o modelo computacional nas condições vigentes de operação e comparar os resultados quanto aos dados de saída, como, por exemplo, a quantidade de pedidos separados, esperando que os dados sejam estatisticamente não discrepantes (BANKS et al., 2010).

Todavia, a maioria das simulações busca estudar o desempenho de inúmeras e diversificadas alternativas para um novo projeto, sejam TDbaseado num sistema real existente ou não, onde mesmo com um sistema real presente, são poucas as possibilidades para a realização de comparações detalhadas para fins de validação (DE FREITAS FILHO, 2001). No caso deste projeto, como o objetivo é a avaliação e seleção da combinação mais robusta de *layout* e políticas de controle operacional para novos armazéns, ou seja, antes de se instalar o sistema real, o processo de validação não se aplica em função do exposto.

#### • Projeto de experimentos

Nesta etapa são decididas quais alternativas de projeto devem ser simulados frente a quais cenários. As alternativas são as 32 já mencionadas na seção 3.2.1 e os cenários definidos na seção 3.2.3 (após identificação das incertezas). Logo a quantidade de experimentos será dada pela equação 1:

$$(qtde\ de\ níveis)^{qtde\ de\ incertezas} \times quantidade\ de\ alternativas \quad Eq. (1)$$

Para cada um dos experimentos, Law e Kelton (1991) argumentam que decisões devem ser tomadas quanto às condições das rodadas de simulação, o comprimento do período de *warm up*, o comprimento do tempo de simulação e a quantidade de replicações. Todavia, antes de se abordar estas questões deve-se determinar se o sistema sob estudo é terminal ou não terminal, pois esta classificação determina os métodos de execução e análise dos resultados (SHANNON, 1998).

O sistema de separação de pedidos sob estudo é considerado como não terminal, pois além de não apresentarem condições iniciais fixas e um evento que determina um fim natural

para o processo de simulação, também considera que a separação de qualquer pedido não terminada ao final de um turno possa ser retomada de onde se parou no turno seguinte (DE FREITAS FILHO, 2001).

Para sistemas não terminais, o interesse das análises recai sobre o comportamento do sistema quando “em regime”, isto é, quando as variáveis de estado não mais sofrem a ação ou dependência do período transiente inicial, também conhecido como período *warm up* (DE FREITAS FILHO, 2001). Embora o período transiente deva ser descartado nas análises dos resultados (SHANNON, 1998), para este estudo será considerado, uma vez que neste período algumas alternativas sob estudo podem oferecer maior congestionamento de separadores de pedidos que outros. Logo, o interesse neste ponto é determinar o quão longo deve ser o período de simulação (DE FREITAS FILHO, 2001).

A definição do tempo de simulação será feita pelo método do loteamento com auxílio do *software Output Analyzer*® seguindo-se as instruções de De Freitas Filho (2001) e será apresentado diretamente nos resultados. O método do loteamento basicamente consiste em tentar fabricar “observações” quase não correlacionadas, dividindo-se o tempo de simulação em alguns grandes lotes de muitos pontos individuais, calculando-se as médias dos pontos dentro de cada lote e tratando-os como observações básicas IID (independentes identicamente distribuídas) sobre as quais fazer análises estatísticas (a começar pela estimativa de variância) (KELTON; SADOWSKI; STURROCK, 2007). Estas observações é a respeito de uma variável de saída do modelo sob escolha do modelador (DE FREITAS FILHO, 2001)

Os resultados dos experimentos do modelo de simulação serão analisados pelo *software* VISA por meio do método SMARTER.

### **3.2.5. Aplicação do MCDA (etapa 6)**

- **Determinação dos pesos dos critérios**

Nesta etapa é determinada a preferência relativa do tomador de decisão em relação aos critérios anteriormente adotados. Em outras palavras, o tomador de decisão deve atribuir pesos aos critérios conforme a importância dos mesmos para sua operação. Como abordado anteriormente, esta elicitação de pesos é feita por intermédio das técnicas *swing weights* ou *ROC weights*.

#### ***Swing weights***

Qualquer procedimento apropriado para a eliciação de pesos deve ser ancorado na faixa de valores dos atributos, uma vez que os *trade-offs* entre os atributos devem levar em conta seus níveis máximos e mínimos (MONTIBELLER; FRANCO, 2007). Uma técnica que pode auxiliar neste processo é o *swing weights* que de acordo com Goodwin e Wright (2004; p. 41), solicita ao tomador de decisão a comparar uma mudança (ou *swing*) do valor menos preferido ao mais preferido em um atributo a uma mudança similar em outro atributo.

Goodwin e Wright (2001) utilizam um conjunto padrão de pesos para todos os cenários estudados em seu estudo. Todavia, Montibeller, Gummer e Tumidei (2006) mostraram que o tomador de decisão pode ter diferentes prioridades para diferentes cenários e que resultados diferentes podem ocorrer em função disto. Isto leva a uma divisão do modelo, onde cada cenário deve ser analisado separadamente, aumentando-se os esforços, porém facilitando-se as análises (MONTIBELLER; GUMMER; TUMIDEI, 2006).

No Apêndice H é fornecido um exemplo de como aplicar a técnica *swing weights*. Para o levantamento dos pesos de cada critério, será solicitado ao tomador de decisão que avalie os critérios conforme a entrevista semiestruturada do apêndice A, por onde também será perguntado ao tomador de decisão se há ou não mudança na ordem da preferência dos critérios em função da mudança do cenário.

### **Pesos ROC**

Edwards e Barron (1994) relatam que as equações para o cálculo dos pesos têm uma forma computacional conveniente, dada pela Equação (2):

$$w_k = \frac{1}{K} \sum_{i=k}^K \frac{1}{K} \quad Eq. (2)$$

Na Equação (2),  $w_k$  corresponde ao valor do peso ROC dos critérios de ordem  $k$  e  $w_1 \geq w_2 \geq w_3 \geq w_4 \geq \dots \geq w_k$ . Neste caso,  $w_1$  é o critério mais preferido e  $w_k$  o menos preferido.

Goodwin e Wright (2004) relatam que a eliciação de pesos por intermédio do ROC consiste em propor ao(s) tomador(es) de decisão que pense em todos os critérios em suas piores condições para uma alternativa hipotética, e mais tarde (se puderem) mudar um desses critérios para sua melhor condição, e assim ordenar os critérios sucessivamente até o último critério de

preferência. Depois, os pesos devem ser atribuídos aos critérios com base no primeiro critério listado até o último, seguindo o cálculo da equação 4 ou usando a TABELA 41 (Apêndice C). Para o levantamento dos pesos de cada critério, pediu-se ao tomador de decisão que avaliasse os critérios conforme a entrevista semiestruturada do apêndice A.

- **Avaliação geral de cada alternativa**

Esta etapa visa medir o desempenho de cada alternativa em cada cenário (RAM; MONTIBELLER; MORTON, 2011). Logo, é feita uma média ponderada dos desempenhos atribuídos a essa alternativa em cada critério, considerando os pesos de cada critério (GOODWIN; WRIGHT, 2001). Isso permite ver como uma alternativa se desempenha em todos os critérios juntos em cada cenário.

O cálculo será feito conforme o método SMARTS/SMARTER (GOODWIN; WRIGHT, 2004; P. 44) porém considerando cenários (RAM; MONTIBELLER; MORTON, 2011), com auxílio do *software Visual Interactive Sensitivity Analysis - V.I.S.A®*. Isto implica que, o cálculo segue conforme equação 3 (RAM; MONTIBELLER; MORTON, 2011), onde cada cenário será tratado separadamente pelo *software V.I.S.A®*.

$$\sum (v_{kir} \times w_{ir}) \quad Eq.(3)$$

Onde,  $w_{ir}$  é o peso atribuído ao critério  $i$  no cenário  $r$  e  $v_{kir}$  é o desempenho da alternativa  $k$  no critério  $i$  e cenário  $r$ , ou seja, a pontuação da alternativa. Goodwin e Wright (2004, p.34) apresentam duas abordagens alternativas para medir o desempenho de uma alternativa frente a um critério: por meio de avaliação direta ou por meio de funções de valores. Nesta dissertação serão empregadas funções de valores, que de acordo com os autores, mede a preferência do tomador de decisão quanto a alterações de valores das alternativas. Ainda será utilizado para a elicitación, os valores médios dos critérios dinâmicos oriundos da simulação.

Embora funções de valores sejam utilizadas em decisões onde incerteza não é uma grande preocupação, e, portanto, não envolve nenhuma consideração a respeito de atitude de risco (GOODWIN; WRIGHT, 2004, P.102), esta técnica pode ser empregada pois as incertezas nesta dissertação são tratadas conforme abordagem de Ram, Montibeller e Morton (2011).

Para a obtenção de uma função de valor, Goodwin e Wright (2004, p.38) utilizam o método da bissecção. Embora este método possa resultar em curvas não lineares de preferência do tomador de decisão, será considerada a possibilidade de uma curva linear para cada critério,

questionando o tomador de decisão qual valor de alternativa corresponderia à maior pontuação e qual valor de alternativa corresponderia à menor pontuação. Isto será feito para tornar mais simples o entendimento do tomador de decisão e aplicação do método.

Vale ressaltar que o método SMARTER já prevê o uso de curvas lineares para as funções de valores, mas cuidado deve-se ser tomado com o seu uso para também não distorcer as preferências do decisor. Contudo, o leitor pode verificar os passos para construção de uma função de valor (GOODWIN; WRIGHT, 2004, P.48; MONTIBELLER; FRANCO, 2007) no Apêndice I.

Os resultados do modelo de simulação para cada alternativa frente aos critérios “*tempo total de separação*”, “*tempo médio de separação de um pedido*” e “*% de utilização média dos separadores*”, serão cruzados com as funções de valores destes critérios e assim será obtido o desempenho destas alternativas nestes critérios. O mesmo será feito para os demais critérios.

O *software* V.I.S.A.<sup>®</sup> necessita dos dados de entrada: estrutura hierárquica de decisão, pesos dos critérios, alternativas e desempenho das alternativas em cada critério para o cálculo do desempenho global de cada alternativa.

### **3.2.6. Identificação da alternativa mais robusta (etapa 7)**

Após todas as etapas descritas é possível identificar aquela alternativa que mais se aproxima do objetivo global, ou seja, a alternativa com a combinação de política de estocagem, separação e roteirização que associada a um arranjo de *layout*, terá o melhor desempenho entre as outras, considerando sua robustez. CHEN et al. (2010) buscou um conjunto de combinações de políticas operacionais para a separação de pedidos que fosse robusta, considerando a eficiência do processo de separação (quantidade de linhas separadas e custo operacional).

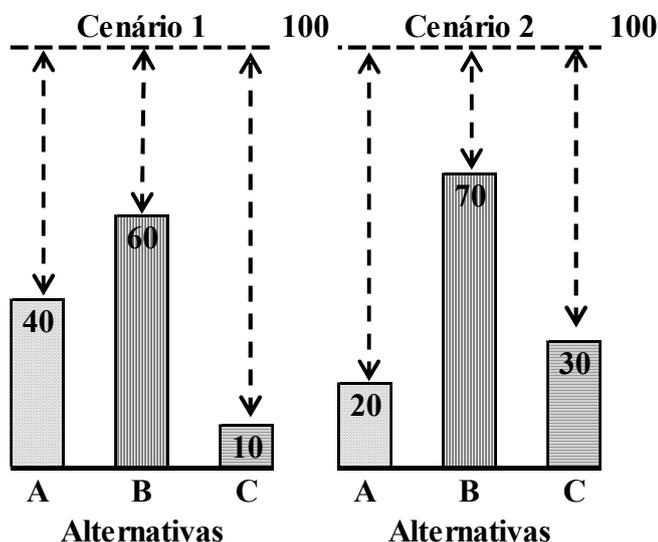
A análise de robustez procura uma alternativa que possua um desempenho estável entre todos os cenários e que esteja próxima do desempenho ideal (MONTIBELLER; GUMMER; TUMIDEI, 2006), o que é diferente de uma análise de sensibilidade que consiste no estudo de como uma solução pode variar com variações nos parâmetros de entrada do modelo de decisão (VINCKE, 1999).

Montibeller, Gummer e Tumidei (2006) relatam que uma maneira de avaliar a robustez das alternativas é calcular a distância, para cada cenário, entre o desempenho de uma dada alternativa e desempenho ideal (100). Os autores informam que quanto maior for esta distância, menos robusta será aquela alternativa para aquele cenário. Como medida geral da robustez, os

autores sugerem adotar a robustez do cenário menos robusto (ou seja, o pior caso), chamando esta medida de *robustez entre cenários*, o qual será adotado neste trabalho para escolha da alternativa mais robusta.

No exemplo extraído de Montibeller, Gummer e Tumidei (2006) pode-se observar o cálculo da robustez entre cenários (FIGURA 16). Utilizando o indicador *robustez entre cenários*, a robustez para a alternativa A é 80 ( $=\text{Max}\{[100-40],[100-20]\}$ ). Seguindo-se o mesmo raciocínio, para as alternativas B e C é 40 e 90 respectivamente. Neste caso, a alternativa a ser escolhida seria a B, pois seu desempenho está mais próximo do desempenho esperado para todos os cenários (1 e 2) (VINCKE, 1999).

FIGURA 16 – Robustez entre cenários



Fonte: Próprio autor.

## 4. APLICAÇÃO DE CASO

Nesta seção, uma aplicação de caso é feita de modo a exemplificar a metodologia proposta.

### 4.1. Entendimento do problema e perfil do tomador de decisão

O mercado de autopeças no Brasil movimentou R\$ 86,6 bilhões no ano de 2018 (SINDIPEÇAS; ABIPEÇAS, 2018). Os principais responsáveis por esta movimentação são as montadoras e o mercado de reposição. Na cadeia de distribuição do mercado de reposição, para que as peças possam chegar a seus clientes finais, atacadistas e varejistas de peças são importantes elos e possuem armazéns ou centros de distribuição conforme suas estratégias de negócio.

Nestes centros de distribuição, a correta definição de um arranjo de *layout* aliado a uma correta definição das políticas de controle operacional são fatores determinantes para uma eficiente movimentação interna dos produtos (baixo custo e alto nível de serviço) e devem ser consideradas na fase de projeto. Porém, isto demanda uma análise criteriosa, com avaliação das restrições dos recursos, custos e nível de serviço desejado.

A decisão da melhor combinação entre *layout* e políticas de controle operacional é uma decisão multicritério, onde *trade-offs* e preferências quanto aos critérios devem ser levados em conta. As decisões a respeito do *layout* e das políticas de estocagem e separação são decisões de longo e médio prazo e uma vez tomadas, alterações em suas concepções podem ser onerosas e acompanhadas de outros efeitos colaterais, como, por exemplo, a queda do nível de serviço e a diminuição da satisfação do cliente. Embora a decisão a respeito da política de roteirização seja operacional, esta deve ser tomada conjuntamente com as demais, uma vez que diferentes combinações das alternativas destas quatro decisões podem gerar diferentes resultados quanto ao desempenho do armazém.

Todavia, avaliar o desempenho operacional destas possíveis combinações em uma operação real torna-se uma tarefa impossível em função da quantidade de alternativas existentes, tempo e custos envolvidos. Assim, a utilização de técnicas de simulação e planejamento de cenários pode auxiliar neste processo de avaliação, incorporando as condições reais da operação de um armazém, de maneira rápida e a um baixo custo. Logo, a combinação de um método de apoio de decisão multicritério com técnicas de simulação e planejamento de

cenários pode auxiliar os envolvidos na decisão de qual *layout* e políticas controle operacional utilizar no armazém, já na fase de projeto.

O tomador de decisão (TD) entrevistado nesta etapa respondeu às questões do apêndice A quanto a seu perfil e da empresa que atua (TABELA 12), bem como com relação ao *layout* e as políticas de controle operacionais. As respostas com relação ao *layout* e políticas vigentes em sua empresa estão apresentadas no Apêndice E.

TABELA 12 – Perfil do entrevistado

| Perfil do entrevistado |  |
|------------------------|--|
| Idade                  | 34 anos  |
| Funções                | <i>Key user</i> responsável pelo módulo de WM do SAP do setor de <i>aftermarket</i><br>Responsável pelas migrações do sistema e mudanças físicas do armazém<br>Planejamento das operações <i>inbound</i> e <i>outbound</i><br>Planejamento da política de inventário de concessionários distribuidores |
| Experiência na área    | 4 anos   |
| Ramo da empresa        | Automotivo, fabricante de sistemas de direção e distribuição de componentes  |
| Tamanho do armazém     | 1.000 m <sup>2</sup>   |
| Tamanho da operação    | Movimentação de R\$ 5 milhões/mês (média de 800 pedidos e 5.100 linhas separadas)  |

Fonte: Próprio autor.

O TD considera que a metodologia apresentada, para avaliação e seleção da melhor combinação entre *layouts* e políticas de controle operacionais considerando uma abordagem multicritério, simulação e planejamento de cenários, pode ser útil para os planejadores ou gestores terem uma visão de como será o desempenho operacional, frente às suas preferências e demandas. Todavia, o TD salienta que as políticas têm que ser factíveis às condições de negócio da empresa e recursos disponíveis. O TD ressalta, por exemplo, que não é interessante testar uma política de roteirização que não possa ser empregada por motivos de limitações do sistema de gerenciamento ou que sejam difíceis de se transmitir aos separadores de pedidos.

Esta consideração é oriunda da experiência profissional do TD e não foi perguntada diretamente por meio da entrevista (FLYNN et al., 1990; VOSS; TSIKRIKTSIS; FROHLICH, 2002). Ainda, o TD observa que geralmente as empresas possuem limitações quanto a recursos físicos e financeiros. Recursos físicos recaem à localização e área disponível (tamanho, formato, pé direito, etc.), por exemplo. Já as limitações financeiras dizem respeito a um teto de investimento e custo operacional que o projeto deve ter, e que isto influencia, por exemplo, na

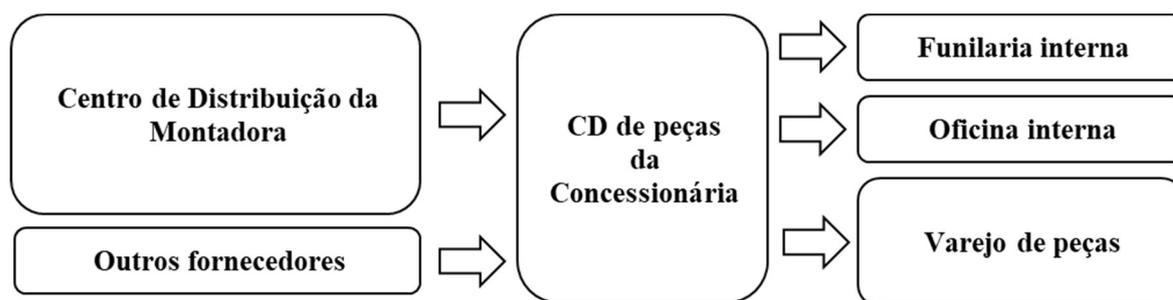
quantidade máxima de separadores que possa ser utilizado na operação. Por fim, o mesmo considera que dependendo do negócio, estas limitações ditarão o nível de serviço a ser oferecido.

#### 4.1.1. Entendimento do exemplo ilustrativo

Para aplicação do exemplo ilustrativo, serão considerados a experiência do TD com a área de projetos de armazéns e concessionários distribuidores de peças automotivas, e o banco de dados um concessionário.

O concessionário em questão possui três unidades distribuídas nos estados de São Paulo, Paraná e Santa Catarina. Nestas unidades, diferentes negócios são realizados como a venda de automóveis novos e usados, serviços de pós-vendas (oficina e funilaria), distribuição de peças, e outros. Básica e especificamente, os centros de distribuição atacadista desta concessionária recebem peças da montadora e outros fornecedores (em menor proporção) e tem como clientes a funilaria interna, a oficina interna e o varejo de peças (em maior proporção) (FIGURA 17). O varejo de peças é composto oficinas, funilarias, autopeças e consumidores finais.

FIGURA 17 – Distribuição de peças envolvendo um concessionário



Fonte: Próprio autor.

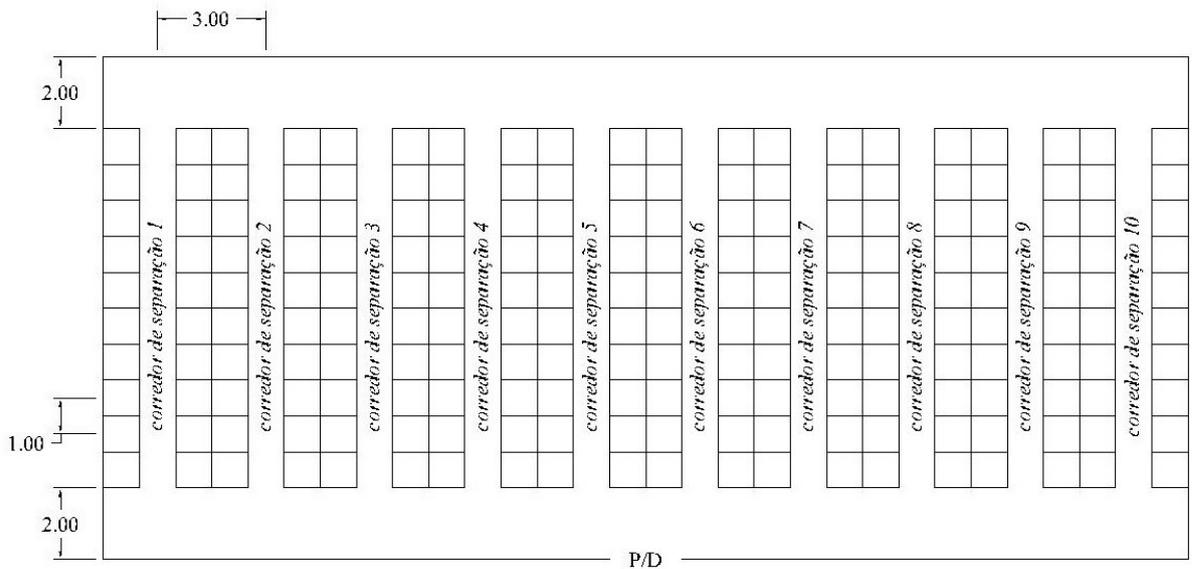
O faturamento médio mensal do canal distribuição de peças é de R\$ 10 milhões e a empresa tem um inventário médio de R\$ 18 milhões distribuídos entre suas unidades (em torno de 10.000 SKU e 250.000 unidades), em uma área total de armazenagem de 4.600 m<sup>2</sup>. Estas áreas são divididas entre área de armazenagem (porta paletes e estantes/mezanino), de recebimento e expedição, e área administrativa.

O banco de dados em análise refere-se aos itens de pequeno e médio porte que podem ser armazenados em estruturas do tipo estante metálica, e em sua grande maioria sem considerar a estratégia de armazenagem reserva. Os dados coletados serão apresentados no tópico 4.5.1.

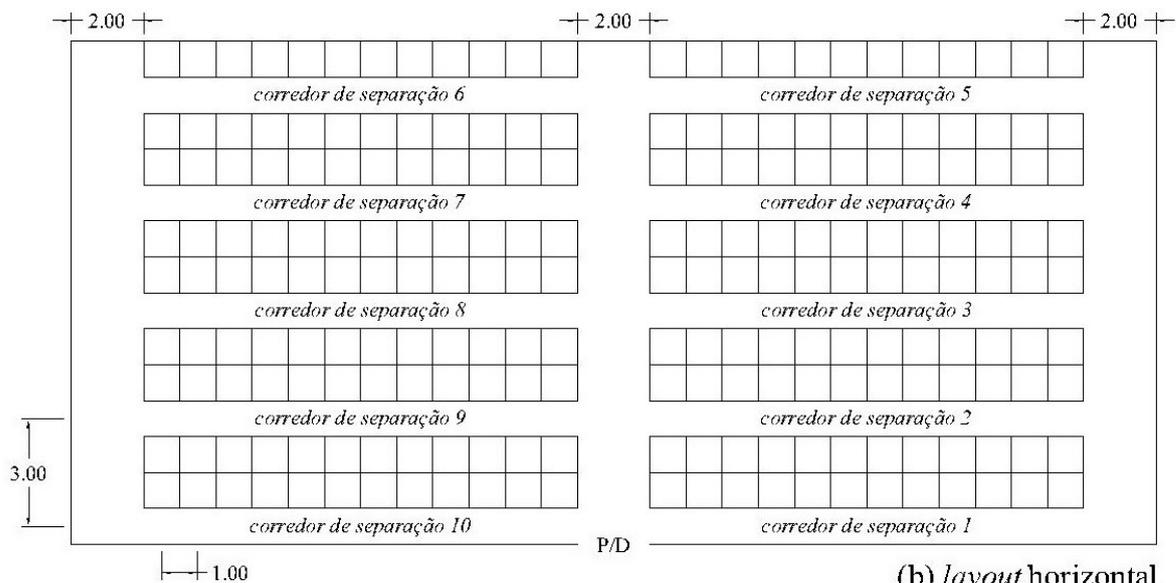
Especificamente para o caso ilustrativo em questão serão analisados os *layouts* vertical e horizontal com o sistema de armazenagem por estantes metálicas (FIGURA 18) e os seguintes dados:

- Quantidade de corredores de separação ( $Q_{cs}$ ) = 10;
- Quantidade de prateleiras por corredor ( $Q_p$ ) = 10 (vertical) e 12 (horizontal);
- Distância entre os corredores de separação ( $D_{cs}$ ) = 3,00 m;
- Distância entre os centros das prateleiras ( $D_p$ ) = 1,00 m;
- Largura dos corredores de cruzamento ( $L_{cc}$ ) = 2,00 m;
- Quantidade de separadores = 5 separadores;
- Velocidade dos separadores = 0,75 m/s;
- Inclinação da curva de demanda 80/20, ou seja, 80% das viagens de separação são feitos em 20% das locações;
- Disponibilidade do separador = 80%;
- Tempo de coleta = TRIA (10,20,30);
- Tamanho da lista de separação (tópico 4.5.1);
- Tempo entre chegada dos pedidos (tópico 4.5.1);
- Demanda (tópico 4.5.1).

FIGURA 18 – Alternativas de layout do caso ilustrativo



(a) layout vertical



(b) layout horizontal

Estes *layouts* correspondem a uma área de separação de 420 m<sup>2</sup> para itens de médio e pequeno porte, onde não há atividade de reabastecimento das locações (corredor, posição). Ainda, 12 prateleiras por corredor são consideradas para o *layout* horizontal de modo a se aproveitar o máximo da área disponível e ao mesmo tempo respeitar as restrições de  $Qcs$ ,  $Dcs$ ,  $Dp$  e  $Lcc$  para ambos *layouts*.

#### 4.2. Validação dos critérios e das alternativas de escolha

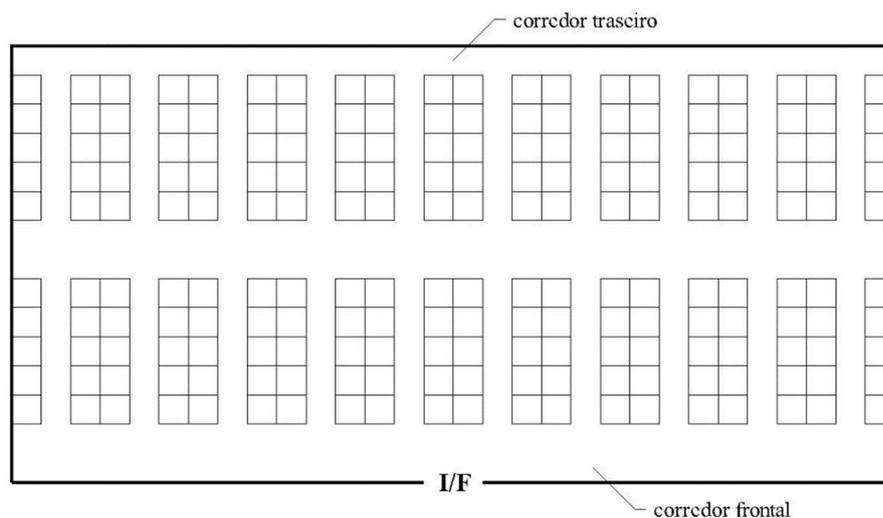
O TD considerou os critérios e a estrutura hierárquica de decisão condizentes com o projeto e operações de armazéns. Todavia, se na análise em questão a quantidade de posições

fosse considerada fixa, o TD sugere incluir um critério relacionado ao custo da área por m<sup>2</sup>. Isto, porque, quanto maior a quantidade de posições, maior a área necessária e assim maior custo total da área. Além disso, o TD salienta que outro indicador comumente utilizado na operação de armazéns, é a quantidade linhas separadas por hora-homem.

O teste para verificar a independência de preferência mútua entre os critérios foi aplicado ao decisor, levando-se em conta cada par de critério da análise. Tal análise revelou independência preferencial entre os seis critérios da estrutura hierárquica.

As alternativas de *layout* e políticas de controle operacionais foram consideradas plausíveis e de fácil aplicação. O TD pondera que o *layout* vertical com blocos (FIGURA 19) pode ser uma opção para avaliação futura, em função de já ter visto sua aplicação em outros armazéns. Já as alternativas de políticas de controle foram consideradas de fácil entendimento e aplicabilidade tanto sob o ponto de vista operacional quanto de sistema de gerenciamento.

FIGURA 19 – Layout vertical com blocos



Fonte: Próprio autor.

### 4.3. Identificação das principais incertezas

O TD considerou as incertezas condizentes com a operação de separação de pedidos em um ambiente atacadista/varejista. O TD afirma que dependendo do negócio, existe a tendência de picos de volumes de pedidos em determinados períodos do dia ou do mês, e que estes cenários devem ser considerados no projeto do armazém.

O TD entendeu que as incertezas TEC dos pedidos e variação do TEC devem ser avaliadas conjuntamente, ou seja, ou é uma média constante ao longo do período de operação,

ou possui diferentes valores ao longo do período da operação, mesmo que ao final da operação a quantidade de pedidos separados sejam semelhantes.

Neste sentido, o TD sugeriu a inclusão da incerteza demanda, complementando que não se sabe quando haverá um aumento ou diminuição, embora o histórico de vendas possa mostrar as tendências. Todavia, o TD pontua que ações de vendas, onde lotes de produtos são vendidos em valores promocionais, não são previsíveis pois depende de uma série de fatores como o nível de inventário, validade dos produtos, cumprimento de objetivos de venda, objetivo de compras com o fornecedor, compras casadas, etc. E isto pode aumentar a demanda de separação dos pedidos.

Logo, são consideradas as incertezas TLS, TEC dos pedidos (e variação) e demanda.

#### **4.4. Desenvolvimento dos cenários**

O desenvolvimento dos cenários seguiu o exemplo hipotético do Apêndice B. O TD considerou as tendências inerentes ao negócio de um atacadista/varejista de peças automotivas: de em determinados períodos do dia haver mais pedidos para se separar e de haver mais pedidos em determinados dias do mês (fechamento de comissão dos vendedores e cumprimento de metas de vendas, por exemplo).

Com relação aos níveis, o TD explicou que uma variação de 10% para mais ou para menos é aceitável para a empresa, pois a operação está dimensionada para absorver estas variações. Nestes casos, o TD explica que o custo do armazém é conhecido e será o mesmo, pois não há horas excedentes de trabalho, por exemplo. Todavia quando a variação é superior aos 10%, o custo do armazém aumenta em função das horas extras trabalhadas, por exemplo, sendo que nestes casos devem-se desenvolver novos métodos de trabalho.

Logo, o TD considerou que para o TLS, o melhor nível é o estimado para o projeto conforme análise do histórico e o pior nível é o aumento de uma linha em relação ao estimado. O TD justifica afirmando que a maioria dos pedidos possui somente uma linha e que isto corresponderia a um aumento de 50% sobre o tamanho da maioria dos seus pedidos.

Já para a incerteza TEC dos pedidos, o melhor nível é uma média constante ao longo do período de separação, enquanto que o pior nível é a variação do TEC ao longo do período de separação (estimado para o projeto). O TD entende que a frequência de chegada constante ao longo do período de separação proporcionaria uma melhor utilização dos separadores e menores filas de pedidos para serem separados.

Por fim, para a incerteza demanda, o melhor nível é o estimado para o projeto conforme histórico, enquanto que o pior nível é um aumento de 20%, que segundo o TD é superior à variação que possa ser acomodada pela operação.

A TABELA 13 resume as incertezas e seus melhores e piores níveis. As condições de projeto serão aquelas medidas na seção 4.5.3, por meio da análise do histórico.

TABELA 13 – Níveis das incertezas

| <b>Incertezas</b> | <b>TLS</b>  | <b>TEC dos pedidos</b> | <b>Demanda</b> |
|-------------------|-------------|------------------------|----------------|
| Melhor            | projeto     | média constante        | projeto        |
| Pior              | 1 + projeto | variável               | aumento de 20% |

Fonte: Próprio autor.

Logo, conforme análise morfológica proposta por Ram, Montibeller e Morton (2011), oito possíveis cenários devem compor os experimentos de simulação: MMM, PMM, MPM, MMP, PPP, MPP, PMP e PPM. MMM diz respeito ao experimento em que todas as incertezas são consideradas em seu melhor nível, ao passo que PPP todas as incertezas são consideradas em seu pior nível.

#### **4.5. Modelo de simulação de eventos discretos**

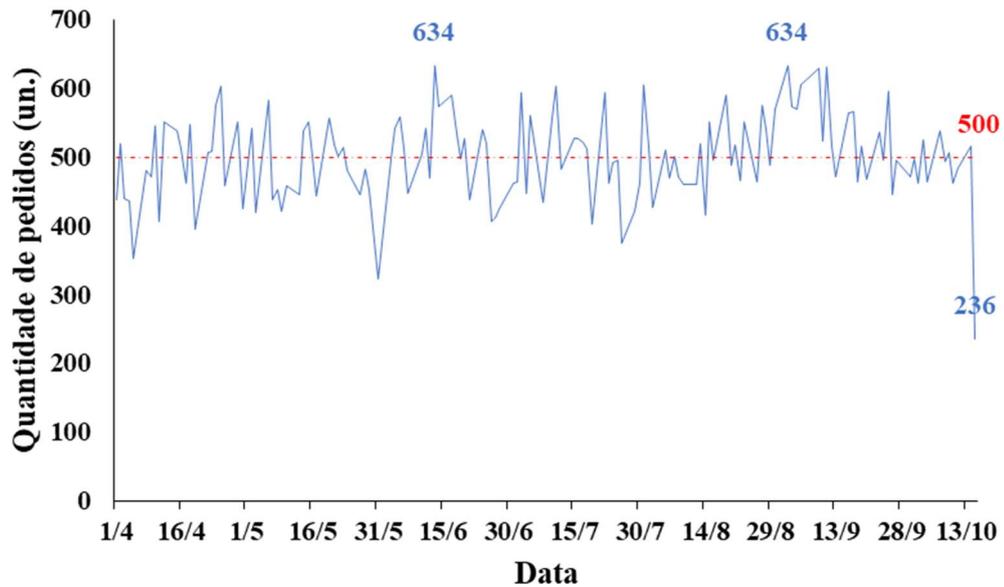
##### **4.5.1. Coleta de dados**

A coleta de dados inicial para o modelo de simulação correspondeu ao histórico da demanda dos pedidos, TLS, TEC dos pedidos e identificação da variação do TEC.

- **Histórico da demanda dos pedidos**

O histórico da demanda dos pedidos foi obtido por meio de relatório sistêmico da empresa, considerando o período de 01 de abril a 15 de outubro, totalizando 200 dias de operação. Deste conjunto de dados foram retirados dias cujo faturamento foi inferior a 100 pedidos, já que este nível de faturamento não é representativo conforme explicou o entrevistado. A FIGURA 20 mostra que o máximo de pedidos separados no período foi de 634, com média de 500 (desvio padrão = 64) e mínimo de 236.

FIGURA 20 – Histórico de pedidos separados em 200 dias de separação

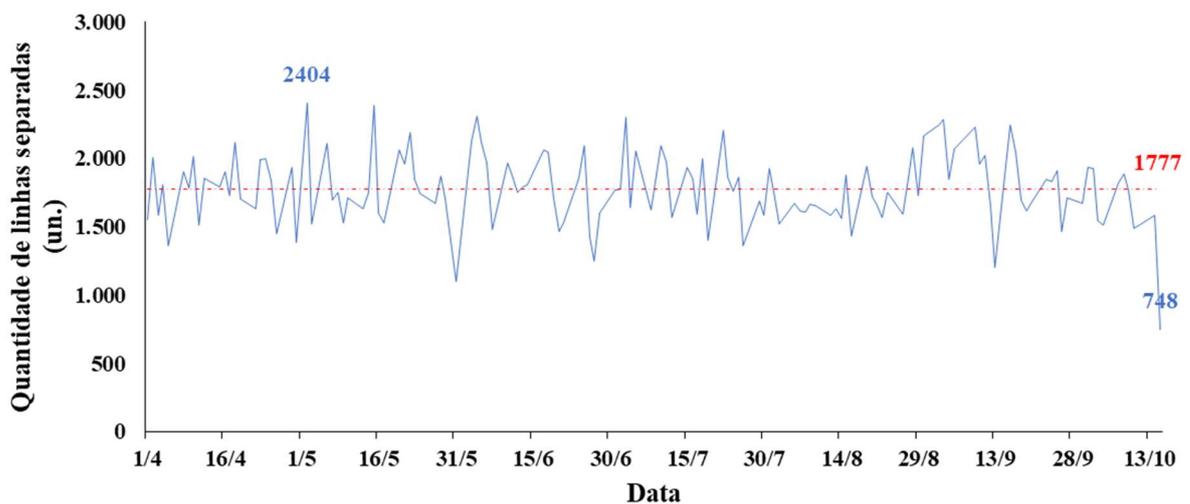


Fonte: Próprio autor.

- TLS

Assim como o histórico de pedidos, o TLS também foi obtido por meio de relatório do sistema. Considerou-se o mesmo banco de dados dos 200 dias de operação anteriormente mencionado. A FIGURA 21 mostra o valor máximo (2.404), médio (1.777) e mínimo (748) de linhas separadas no período por dia de operação.

FIGURA 21 – Quantidade de linhas separadas em 200 dias de operação



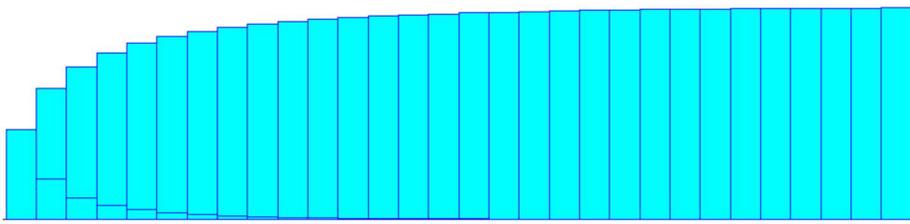
Fonte: Próprio autor.

Considerando que TLS é uma variável (de entrada) estocástica do modelo de simulação, buscou-se representar o comportamento da mesma por meio de uma curva de distribuição

teórica de probabilidade com auxílio do aplicativo *Input Analyzer*®. Em se tratando de uma variável discreta, o teste do  $\chi^2$  resultou em *p-value* não superior a 0,05 para um nível de significância de 95% e desta forma optou-se pela utilização da distribuição empírica.

Assim, opta-se pela utilização da distribuição empírica também resultante do aplicativo (TABELA 14). O uso de distribuições empíricas como dados de entrada em modelos de simulação pode produzir resultados com maior validade externa (FLYNN et al., 1990) porém o modelo trabalhará dentro dos limites estabelecidos pelos dados colhidos, não permitindo a avaliação desta variável em situações diferentes da do passado (DE FREITAS FILHO, 2001). Todavia, isto será remediado pela utilização de cenários.

TABELA 14 – Distribuição empírica do TLS

| Parâmetros   | Distribuição de probabilidade do TLS  |
|--------------|---|
| Histograma   |    |
| Distribuição | DISC (0.000, 1, 0.425, 2, 0.619, 3, 0.721, 4, 0.787, 5, 0.834, 6, 0.866, 7, 0.890, 8, 0.910, 9, 0.925, 10, 0.936, 11, 0.947, 12, 0.955, 13, 0.962, 14, 0.968, 15, 0.973, 16, 0.977, 17, 0.981, 18, 0.984, 19, 0.987, 20, 0.989, 21, 0.991, 22, 0.993, 23, 0.995, 24, 0.996, 25, 0.997, 26, 0.998, 27, 0.999, 28, 1, 30) |

Fonte: Próprio autor.

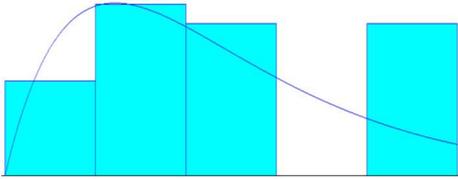
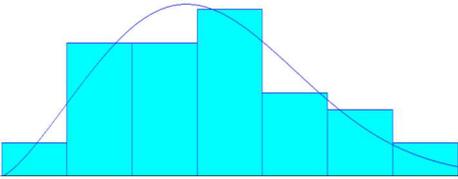
#### • TEC dos pedidos

Para obtenção do tempo entre chegadas (TEC) dos pedidos foram feitas coletas de quantos pedidos chegavam a cada período de 20 minutos (das 8:00 às 18:00 horas) durante 5 dias (TABELA 42 – Apêndice D). Dividindo-se 20 minutos por cada célula da TABELA 42, obteve-se o tempo médio entre chegada dos pedidos para cada período analisado (TABELA 43 – Apêndice D).

Para todos os dias analisados, observa-se uma variação do TEC ao longo da operação diária podendo ser de 20 minutos no início da operação e no horário de almoço (entre 12:00 e 13:00 horas) a menos de um minuto entre as 10:00 e 12:00 horas e entre as 16:00 e 18:00 horas, conforme TABELA 43 – Apêndice D. Logo, o TEC dos pedidos foi tratado em quatro intervalos distintos (A, B, C e D) e buscou-se representar, para cada intervalo (TABELA 15 e TABELA

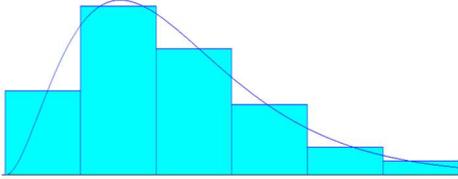
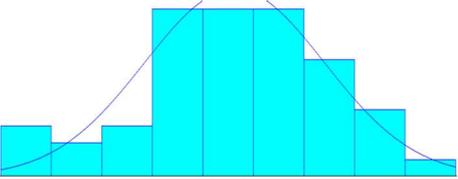
16), o comportamento desta variável por meio de uma curva de distribuição teórica de probabilidade com auxílio do aplicativo *Input Analyzer*®.

TABELA 15 – Distribuição de probabilidade TEC A e B

| Parâmetros            | Distribuição de probabilidade do TEC dos pedidos (minutos)                        |  |
|-----------------------|---|--|
|                       | A (8:00 as 9:40 e 12:00 as 13:00 horas)   | B (8:40 as 9:40 e 13:00 as 14:40 horas)  |
| Histograma            |  |  |
| Distribuição          | 1 + ERLA(4.62, 2)   | 1.01 + WEIB(1.03, 2.32)  |
| Erro quadrático       | 0.058015  | 0.005796   |
| Teste Ch <sup>2</sup> | <i>p-value</i> = 0.35   | <i>p-value</i> = 0.375   |
| Teste KS              | <i>p-value</i> > 0.15   | <i>p-value</i> > 0.15  |

Fonte: Próprio autor.

TABELA 16 – Distribuição de probabilidade TEC C e D

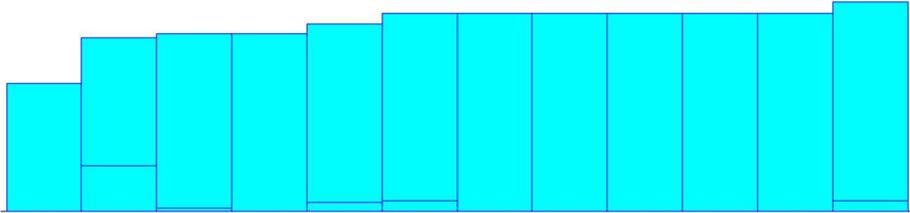
| Parâmetros            | Distribuição de probabilidade do TEC dos pedidos (minutos)                          |  |
|-----------------------|---|--|
|                       | C (9:40 as 12:00 horas)   | D (14:40 as 18:00 horas)   |
| Histograma            |  |  |
| Distribuição          | 0.59 + ERLA(0.0913, 3)  | NORM(0.866, 0.091)   |
| Erro quadrático       | 0.000752  | 0.005793   |
| Teste Ch <sup>2</sup> | <i>p-value</i> = 0.703  | <i>p-value</i> > 0.75  |
| Teste KS              | <i>p-value</i> > 0.15   | <i>p-value</i> > 0.15  |

Fonte: Próprio autor.

Para os quatro intervalos de tempo (A, B, C e D), o erro quadrático mostrou-se inferior a 1% para os intervalos B, C e D e inferior a 6% para o intervalo A. Contudo, os valores de *p-value* para todas as distribuições foram superiores a 0,10, o que indica que as distribuições ajustadas podem ser candidatas à representação da variável aleatória em questão (DE FREITAS FILHO, 2001).

Todavia, a TABELA 17 mostra a representação da variável TEC dos pedidos sem a consideração dos 4 intervalos. Nota-se que é uma distribuição empírica, uma vez que não houve uma curva de distribuição teórica de probabilidade que atingisse a qualidade desejada. O valor médio que representa esta distribuição é 1,2 minutos, de maneira constante.

TABELA 17 - Distribuição empírica do TEC sem intervalos

| Parâmetros   | Distribuição de proabilidade do TEC sem intervalos  |
|--------------|---|
| Histograma   |                               |
| Distribuição | DISC (0.000, 0.000, 0.613, 1.667, 0.832, 3.334, 0.852, 5.000, 0.852, 6.667, 0.897, 8.334, 0.948, 15, 1.000, 20) |

Fonte: Próprio autor.

#### 4.5.2. Verificação do modelo computacional

A verificação consistiu nos princípios gerais da operação de separação de pedidos elencados por Tompkins et al. (2010). Os dados (na sua forma determinística) considerados para a verificação do modelo computacional foram:

- Velocidade média de caminhada igual a 0,75 m/s, que se encontra na faixa considerada por outros trabalhos (CHAN; CHAN, 2011; CHEN et al., 2010; ELBERT et al., 2017; FRANZKE et al., 2017; ROODBERGEN; KOSTER, 2001);
- TLS igual a 10 linhas por pedido;
- Tempo de coleta de uma linha igual a 20 s em concordância com trabalhos anteriores (CHAN; CHAN, 2011; ELBERT et al., 2017; FRANZKE et al., 2017);
- TEC dos pedidos igual a 2 minutos por pedido e sem variação do TEC;
- Quantidade de separadores igual a 5;
- Quantidade de pedidos igual a 300; e
- Política de separação e roteirização discreta e transversal respectivamente.

O modelo de simulação (*layout* vertical) foi executado conforme as configurações elencadas acima e os dados de saída como a média do tempo total de separação por pedido, a média do tempo total de congestionamento por pedido e distância total percorrida por todos os pedidos foram coletados para comparação (TABELA 18).

TABELA 18 – Verificação do modelo computacional

| Política de estocagem | Média do tempo total de separação por pedido (s) | Média do tempo total de congestionamento por pedido (s) | Distância total percorrida (m) |
|-----------------------|--|---|--------------------------------|
| Aleatório             | 371  | 8   | 36.696                         |
| <i>Within-aisle</i>   | 345  | 52  | 20.828                         |
| <i>Across-aisle</i>   | 365  | 6   | 35.631                         |
| Diagonal              | 347  | 10  | 30.700                         |

Fonte: Próprio autor.

Como esperado, a utilização da política de estocagem aleatória proporciona uma menor média do tempo de congestionamento por pedido (8 s) em relação as políticas de estocagem por classes *within-aisle* (52 s) e diagonal (10 s), uma vez que as separações estão distribuídas uniformemente no armazém em relação ao ponto de início e fim de corredor.

Também, como esperado, a utilização das políticas de estocagem por classes proporciona uma menor média de tempo total de separação por pedido (*within aisle* com 345 s, *across-aisle* com 365 s e diagonal com 346 s) em relação a política de estocagem aleatória (371 s). Embora ocorra esta redução no tempo de separação por pedido, estas políticas incorrem em maior congestionamento e uma utilização desequilibrada do armazém (PETERSEN, 1999).

Todavia, estes resultados podem variar conforme a combinação da política de roteirização, o TLS, a inclinação da curva da demanda (PETERSEN; SCHMENNER, 1999) e a quantidade de separadores (HEATH; CIARALLO; HILL, 2013) empregados no teste de verificação. Isto explicaria o por quê a média do tempo total de congestionamento por pedido é menor para a política *across-aisle* (6 s) em relação a política aleatória (8 s).

Por fim, a distância total percorrida na separação de todos os pedidos é maior para a política de estocagem aleatória (36.696 m) em relação as políticas *within-aisle* (20.828 m), *across-aisle* (35.631 m) e diagonal (30.700 m). Isto está em concordância com os resultados dos autores Petersen e Schmenner (1999). Logo, pode-se considerar o modelo computacional verificado quanto ao comportamento de suas variáveis.

#### 4.5.3. Projeto dos experimentos

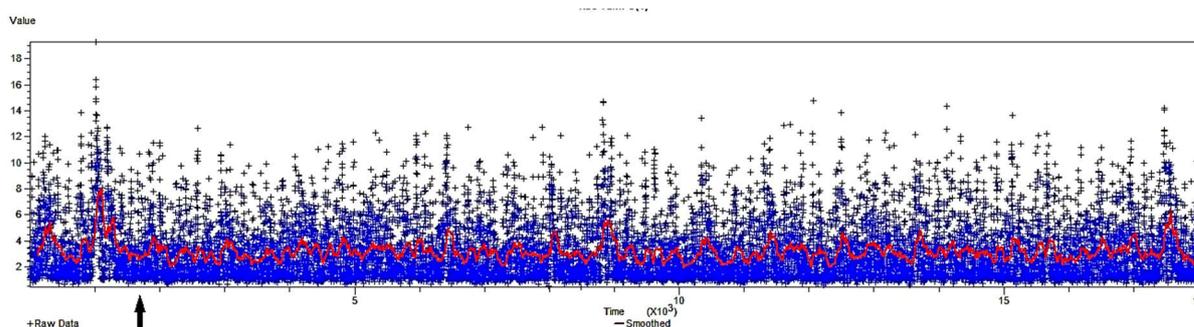
Após a coleta e tratamento dos dados de entrada e a verificação do modelo computacional, rodadas de simulação preliminares foram executadas para a determinação do período transiente (tempo de *warm-up*) e a determinação do período total de simulação. Para esta análise, utilizou-se do aplicativo *Output Analyzer*® e as condições:

- Políticas de estocagem, separação e roteirização adotadas para o *layout* vertical foram respectivamente *within-aisle*, discreta e transversal;
- As variáveis aleatórias TLS e TEC conforme estabelecido na seção 4.5.1;
- O tempo estimado de coleta por item igual a TRIA (10,20,30); e
- A quantidade de separadores igual a 5; e
- A velocidade média de caminhada igual a 0,75 m/s.

O período transiente do início da simulação foi determinado por meio de uma simulação de 30 dias (de 10 horas cada dia), onde observou-se o comportamento da variável “tempo total de separação de um pedido”, considerada representativa para a avaliação do sistema de separação de pedidos. Foi estabelecido que variações de até 5% em torno da média da variável de estudo seriam adequadas para o sistema, para um intervalo de confiança de 95%.

O método aplicado para a identificação do término do período transiente foi o visual, onde observaram-se em que momento as respostas da variável sob estudo apresenta uma conduta mais estabilizada (DE FREITAS FILHO, 2001). Ainda, utilizou-se da análise de média móvel da variável escolhida com agrupamento de 100 e 100 registros, para melhor visualizar o tempo em que o sistema entra em regime. A FIGURA 22 apresenta o comportamento dos registros da variável e observa-se que o período transiente se encerra próximo a 2000 minutos de operação, indicado pela seta, a partir do qual o “tempo total de separação de um pedido” apresenta comportamento estabilizado alcançando picos de tempo semelhantes, porém inferiores ao máximo identificado, no decorrer da simulação. Logo, de forma adotar um valor conservador, considerou-se que o período transiente é de 4 dias, ou seja, 2.400 minutos.

FIGURA 22 – Identificação do período transiente



Fonte: Próprio autor.

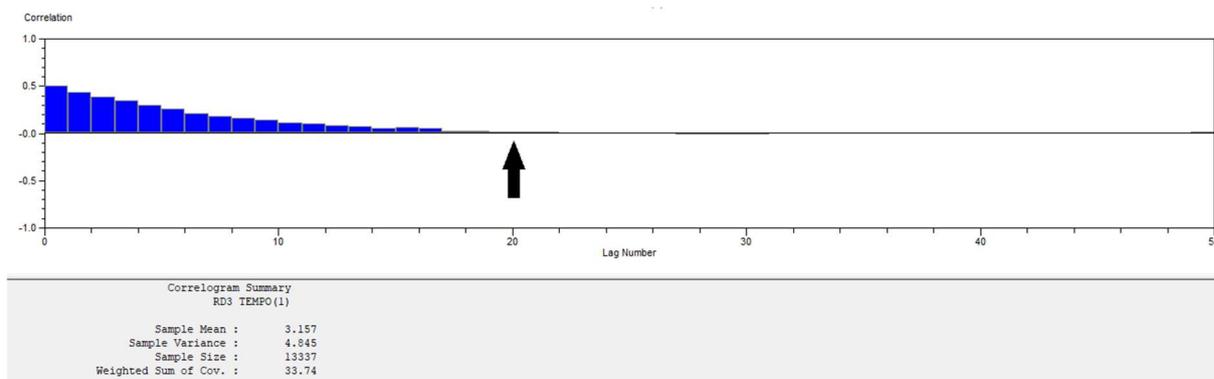
Ressalta-se que o período transiente foi determinado somente para o cálculo do período de simulação, uma vez que o comportamento inicial do sistema é de interesse em função da temática do congestionamento que diferentes combinações de políticas e layout possam

resultar. Logo, os dados de saída serão coletados desde o instante zero e não somente após o tempo de *warm up*.

Para a determinação do período de simulação aplicou-se o método do loteamento. Assim buscou-se um tamanho de lote suficientemente grande de tal forma que a correlação dos sucessivos registros da variável “tempo total de separação de um pedido” fosse insignificante. Este procedimento foi feito novamente com o auxílio do aplicativo *Output Analyzer*®.

Assim, como indicado pelas setas da FIGURA 23 e TABELA 19, para lotes formados por 20 observações, a análise apresentou baixa correlação (0.001238), ou seja, os registros sucessivos se mostraram independentes. Isto quer dizer que a influência do “tempo de separação total de um pedido” é praticamente nula em relação ao “tempo de separação total” por outro pedido registrado 20 posições anteriores em uma série histórica. Logo, após a consideração do período transiente, o longo período da simulação foi subdividido em lotes com esta quantidade mínima de observações. Todavia, como forma de assegurar a necessária independência entre as médias desses lotes, o lote mínimo identificado (20) deve ser multiplicado por um coeficiente de segurança igual 10, geralmente indicado pela literatura (DE FREITAS FILHO, 2001). Desta maneira, cada lote deverá ter 200 (10 x 20) registros.

FIGURA 23 – Correlação entre os sucessivos registros da variável TTS



Fonte: Próprio autor.

TABELA 19 – Correlação da variável tempo total de separação

| Lag | Covariance | Correlation | Lag | Covariance | Correlation | Lag | Covariance | Correlation |
|-----|------------|-------------|-----|------------|-------------|-----|------------|-------------|
| 1   | 2,4457     | 0,504740    | 21  | 0,06791    | 0,014016    | 41  | -0,02653   | -0,005475   |
| 2   | 2,0985     | 0,433100    | 22  | 0,05049    | 0,010419    | 42  | -0,02014   | -0,004157   |
| 3   | 1,8537     | 0,382560    | 23  | -0,01252   | -0,002583   | 43  | 0,01774    | 0,003661    |
| 4   | 1,6733     | 0,345340    | 24  | -0,02379   | -0,004909   | 44  | 0,04283    | 0,008840    |
| 5   | 1,4413     | 0,297450    | 25  | -0,03131   | -0,006462   | 45  | 0,02078    | 0,004288    |
| 6   | 1,2306     | 0,253960    | 26  | -0,03112   | -0,006423   | 46  | 0,03636    | 0,007505    |

| Lag       | Covariance     | Correlation     | Lag | Covariance | Correlation | Lag | Covariance | Correlation |
|-----------|----------------|-----------------|-----|------------|-------------|-----|------------|-------------|
| 7         | 1,0382         | 0,214270        | 27  | -0,04398   | -0,009076   | 47  | 0,02765    | 0,005705    |
| 8         | 0,88089        | 0,181800        | 28  | -0,07066   | -0,014583   | 48  | 0,01654    | 0,003413    |
| 9         | 0,78089        | 0,161160        | 29  | -0,09183   | -0,018952   | 49  | 0,04395    | 0,009071    |
| 10        | 0,67113        | 0,138510        | 30  | -0,05494   | -0,011339   | 50  | 0,05690    | 0,011744    |
| 11        | 0,56447        | 0,116490        | 31  | -0,05252   | -0,010839   |     |            |             |
| 12        | 0,48307        | 0,099695        | 32  | -0,01745   | -0,003601   |     |            |             |
| 13        | 0,40139        | 0,082838        | 33  | -0,00800   | -0,001652   |     |            |             |
| 14        | 0,33216        | 0,068551        | 34  | 0,00930    | 0,001919    |     |            |             |
| 15        | 0,27698        | 0,057164        | 35  | -0,03112   | -0,006422   |     |            |             |
| 16        | 0,29348        | 0,060569        | 36  | -0,02080   | -0,004292   |     |            |             |
| 17        | 0,24273        | 0,050094        | 37  | -0,01590   | -0,003282   |     |            |             |
| 18        | 0,13899        | 0,028686        | 38  | 0,00862    | 0,001779    |     |            |             |
| 19        | 0,11781        | 0,024315        | 39  | 0,02763    | 0,005702    |     |            |             |
| <b>20</b> | <b>0,05998</b> | <b>0,012380</b> | 40  | -0,02074   | -0,004279   |     |            |             |

Fonte: Próprio autor.

A simulação piloto de 30 dias contou com 14.999 registros da variável em estudo “tempo de separação total de um pedido” em um período de 18.000 minutos. Logo, o intervalo médio entre registros sucessivos da variável em estudo foi de 1,20 minutos entre observações.

Finalmente, o tempo total de simulação é dado pela equação empírica 4, sendo que a quantidade de amostras desejadas foi selecionada seguindo-se sugestão da literatura que indica que uma amostra de 30 observações é suficiente para se conhecer sua variabilidade e estimar intervalos de confiança no entorno da média (DE FREITAS FILHO, 2001).

$$\text{Tempo de simulação} = TD + N \times Q \times TA \quad \text{Eq. (4)}$$

Onde:

$TD$  = Tempo de descarte

$N$  = Quantidade de amostras

$Q$  = Quantidade de observações por amostras (tamanho dos lotes)

$TA$  = Tempo de simulação de cada amostra

Assim, atribuindo-se valores aos termos da equação 4, tem-se:

$$TS = 2.400 + (30 \times 200 \times 1,20) = 9.600 \text{ minutos}$$

O valor do TS calculado, 9.600 minutos (16 dias), foi menor que o tempo utilizado na primeira rodada de 30 dias. Logo, adotou-se o tempo de 30 dias para o passo seguinte, que foi

confirmar a quantidade de lotes formados de 200 registros cada (FIGURA 24). Observa-se que se formou 65 lotes (amostras) de 200 registros cada um.

FIGURA 24 – Quantidade de lotes formados em 30 dias de simulação

```

Batch/Truncate Summary
RD3 TEMPO

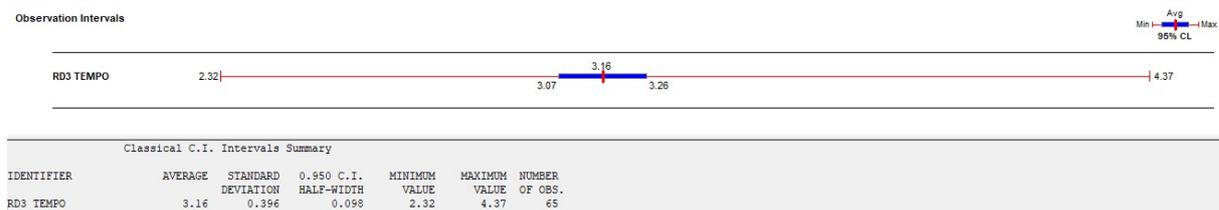
Batched observations stored in file : C:\Users\Usuario\Desktop\TTS.tru

Initial Time Truncated :      2400
Number of Batches :      65 ←
Number of Observations Per Batch :      200
Number of Trailing Obs'ns Truncated :      3
Estimate of Covariance Between Batches :      -0.07554
    
```

Fonte: Próprio autor.

Por fim, o intervalo de confiança da variável de referência “tempo total de separação de um pedido” foi obtido com base nas 65 amostras de lotes formados. No caso, conforme FIGURA 25, o semi-intervalo de confiança desta variável foi de 0,39 minutos no entorno da média de 3,16 minutos.

FIGURA 25 – Intervalo de confiança de 95% no entorno da média



Fonte: Próprio autor.

Considerando que se buscou um intervalo de confiança cujos os limites estivessem entorno de 5% da média amostral, ou seja, 0,15 minutos, e que este valor é superior ao semi-intervalo, conclui-se que as 65 amostras geradas são suficientes para garantir que a variável de interesse se encontre dentro do intervalo de confiança [3,01; 3,31] em 95% das observações (DE FREITAS FILHO, 2001).

O esforço computacional para se simular 30 dias é inferior a três minutos. Entretanto, optou-se por simular o modelo até a conclusão de 15.000 pedidos separados (30 dias x 10 horas/dia ÷ 1,2 minutos/pedido), para fins de comparação dos tempos das alternativas.

Após a conclusão do modelo e a determinação do período de simulação, o modelo foi utilizado para rodar 256 experimentos, considerando três incertezas e 32 alternativas (equação

3). Logo, a TABELA 13 pode ser agora substituída pela TABELA 20, onde as condições de projeto são evidenciadas e os cenários podem ser detalhados conforme TABELA 21.

TABELA 20 – Experimentos e cenários

| <b>Incertezas</b> | <b>TLS<br/>(unidades)</b>              | <b>TEC dos pedidos<br/>(minutos)</b>                                    | <b>Demanda<br/>(pedidos)</b> |
|-------------------|--|---|------------------------------|
| Melhor            | Distribuição Empírica<br>(TABELA 14)   | 1,2 constante   | 15.000                       |
| Pior              | 1+Distribuição Empírica<br>(TABELA 14) | Distribuições de<br>probabilidade teórica<br>(TABELA 15 e TABELA<br>16) | Aumento de 20%<br>(18.000)   |

Fonte: Próprio autor.

TABELA 21 – Detalhamento dos cenários

| <b>Cenários</b> | <b>TLS (unidades)</b>                     | <b>TEC dos pedidos<br/>(minutos)</b>                                    | <b>Demanda<br/>(pedidos)</b> |
|-----------------|---|---|------------------------------|
| MMM             | Distribuição<br>empírica (TABELA<br>14)   | 1,2 constante   | 15.000                       |
| PMM             | 1+Distribuição<br>Empírica (TABELA<br>14) | 1,2 constante   | 15.000                       |
| MPM             | Distribuição<br>Empírica (TABELA<br>14)   | Distribuições de<br>probabilidade teórica<br>(TABELA 15 e TABELA<br>16) | 15.000                       |
| MMP             | Distribuição<br>Empírica (TABELA<br>14)   | 1,2 constante   | 18.000                       |
| PPP             | 1+Distribuição<br>Empírica (TABELA<br>14) | Distribuições de<br>probabilidade teórica<br>(TABELA 15 e TABELA<br>16) | 18.000                       |
| MPP             | Distribuição<br>Empírica (TABELA<br>14)   | Distribuições de<br>probabilidade teórica<br>(TABELA 15 e TABELA<br>16) | 18.000                       |
| PMP             | 1+Distribuição<br>Empírica (TABELA<br>14) | 1,2 constante   | 18.000                       |
| PPM             | 1+Distribuição<br>Empírica (TABELA<br>14) | Distribuições de<br>probabilidade teórica<br>(TABELA 15 e TABELA<br>16) | 15.000                       |

Fonte: Próprio autor.

## 4.6. Aplicação do método MCDA

A aplicação do método seguiu os procedimentos explicados na metodologia quanto a avaliação de cada alternativa para cada critério em função das preferências do tomador de decisão, a hierarquização dos critérios conforme as preferências do tomador de decisão e a avaliação geral de cada alternativa frente a todos os critérios e cenários.

### 4.6.1. Avaliação de cada alternativa para cada critério

Esta etapa consistiu em definir uma função de valor para cada critério conforme as preferências do tomador de decisão. Logo, estas funções permitiram definir as preferências de uma alternativa sobre a outra pelo tomador de decisão, para cada critério analisado.

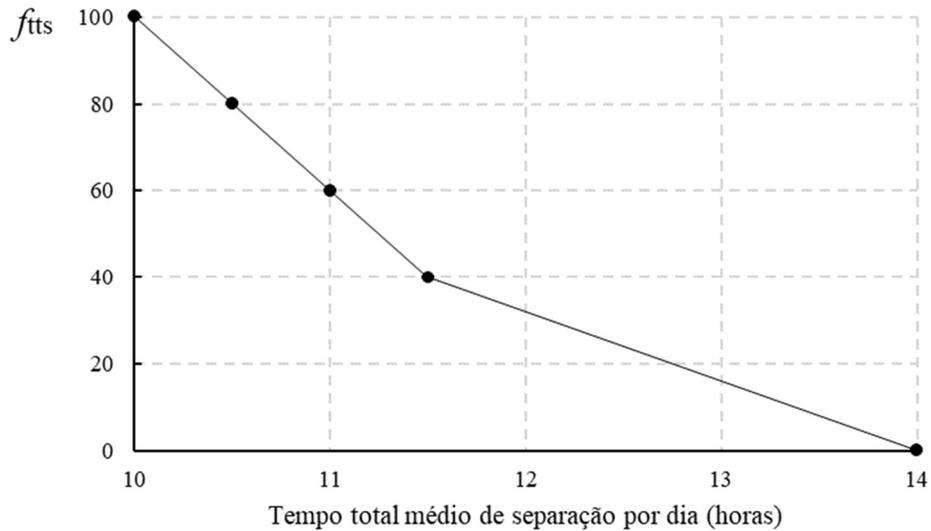
Para facilitar o entendimento, os resultados do modelo de simulação quanto aos critérios “*tempo total de separação*” (TABELA 44 e TABELA 45), “*tempo médio de separação de um pedido*” (TABELA 46) e “*% média de utilização dos separadores*” (TABELA 47), encontram-se no Apêndice F.

#### ***Critério “Tempo total de separação”***

Ao TD foi apresentado os resultados dos 256 experimentos com relação ao tempo total de separação. Como o tempo médio para a ocorrência de 15.000 e 18.000 pedidos são 30 e 36 dias respectivamente, o TD sentiu dificuldades em valorizar os dados fornecidos. Logo, o TD sugeriu dividir o tempo total de separação da TABELA 44 por 30 e 36 dias a depender do cenário avaliado (TABELA 45). O TD explica que assim é possível avaliar melhor o tempo total médio de separação por dia e assim verificar quantas horas a mais de separação estão sendo feitas para despachar os pedidos do varejo de modo a não haver atrasos (considerando que os pedidos feitos no dia “D” devem estar prontos para o despacho no fim do dia D ou início do dia “D+1”).

O TD atribuiu a pontuação máxima ao tempo total de separação menor ou igual a 10 horas e a pontuação mínima ao maior tempo total de separação. O TD lembra que tempos próximos a 10 horas não demandam muitas horas extras e assim menores custos, além de manter um bom atendimento aos clientes. Ainda, o TD justifica que as baixas pontuações dadas aos tempos superiores a 12 horas são em função do separador poder realizar somente até duas horas extras por dia, conforme lei trabalhista. Logo, a função de valor para o critério “*Tempo total de separação*” de todos os pedidos é graficamente representada pela FIGURA 26 e seus valores representados pela TABELA 22.

FIGURA 26 – Função de valor "tempo total médio de separação por dia"



Fonte: Próprio autor.

TABELA 22 – Pontuação do critério "tempo total médio de separação por dia"

| Valor $f_{tts}(x)$ | Tempo total de separação (horas) |
|--------------------|----------------------------------|
| 100                | $x \leq 10$                      |
| $-40x + 500$       | $10 < x \leq 11,5$               |
| $-16x + 224$       | $11,5 < x \leq 14$               |
| 0                  | $> 14$                           |

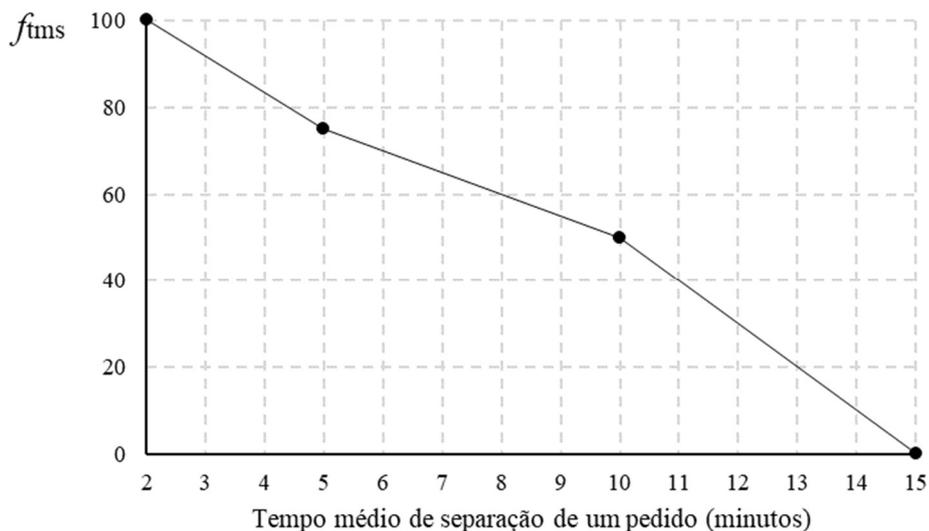
Fonte: Próprio autor.

**Critério "Tempo médio de separação de um pedido"**

Após analisar os resultados, O TD considerou que quanto menor o "tempo médio de separação de um pedido", melhor é o tempo de resposta à um cliente (oficina, funilaria e varejo) limitando o tempo máximo a 15 minutos, a depender do tamanho da lista de separação por exemplo e do cliente. Logo, para um tempo médio de separação igual ou menor que dois minutos o TD atribuiu a pontuação máxima, ou seja, 100 pontos. Já para um tempo médio de separação igual ou superior a 15 minutos, o TD atribuiu a pontuação zero.

Logo, a função de valor para o critério "Tempo médio de separação de um pedido" é graficamente representada pela FIGURA 27 e seus valores representados pela TABELA 23.

FIGURA 27 – Função de valor "tempo médio de separação de um pedido"



Fonte: Próprio autor.

TABELA 23 – Pontuação do critério "tempo médio de separação de um pedido"

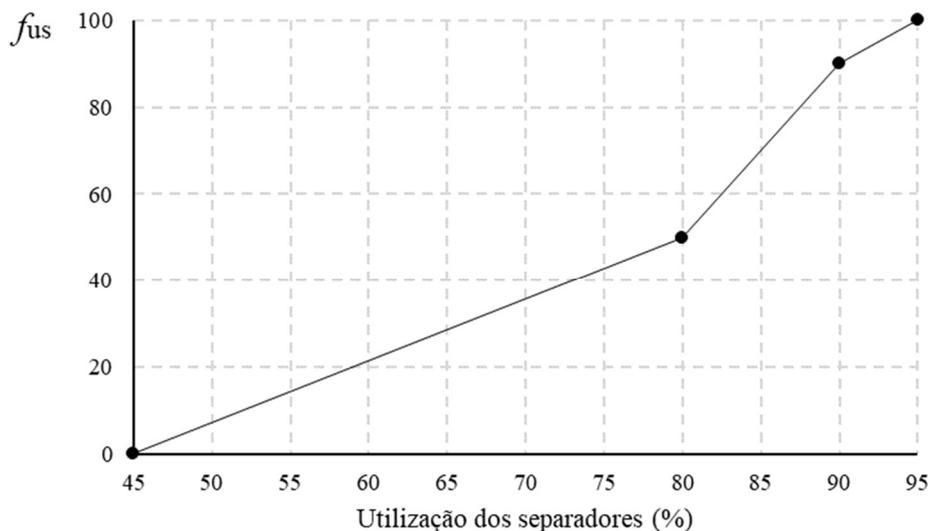
| Valor $ftms(x)$   | Tempo médio de separação de um pedido (minutos) |
|-------------------|---|
| 100               | $x \leq 2$                                      |
| $-8,33x + 116,67$ | $2 < x \leq 5$                                  |
| $-5x + 100$       | $5 < x \leq 10$                                 |
| $-10x + 150$      | $10 < x \leq 15$                                |
| 0                 | $x > 15$  |

Fonte: Próprio autor.

### Critério "porcentagem de utilização média dos separadores"

Ao TD foi lembrado que a simulação foi feita considerando uma disponibilidade do separador de 80%. Assim, o TD considerou que a porcentagem média ideal de utilização dos separadores é de 95% em função da necessidade de paradas não programadas e capacidade de absorção de algum imprevisto, atribuindo o valor de 100 pontos. Também, o TD considerou que uma taxa de utilização média abaixo de 80% significa que o separador está subutilizado. Assim, atribuiu menores pontuações a estes valores. Logo, a função de valor para o critério "porcentagem de utilização média dos separadores" é graficamente representada pela FIGURA 28 e seus valores representados pela TABELA 24.

FIGURA 28 – Função de valor "% média de utilização dos separadores"



Fonte: Próprio autor.

TABELA 24 – Pontuação do critério “% média de utilização dos separadores”

| Valor $f_{us}(x)$ | % média de utilização dos separadores |
|-------------------|---------------------------------------|
| $1,42x-64,28$     | $45 \leq x < 80$                      |
| $4x-270$          | $80 \leq x \leq 90$                   |
| $2x-90$           | $90 < x \leq 95$                      |

Fonte: Próprio autor.

### **Critério “% de utilização do espaço”**

O TD considerou que quanto maior a utilização do espaço pelos equipamentos de armazenagem (posições), melhor é devido ao maior aproveitamento da área e possibilidade de aumento do inventário quando necessário. A área dos *layouts* vertical e horizontal e quantidade de posições encontram-se na TABELA 25. Todavia, um aumento de 3,81% na utilização do espaço corresponde a 8% a mais de capacidade de armazenagem.

TABELA 25 – % de utilização do espaço

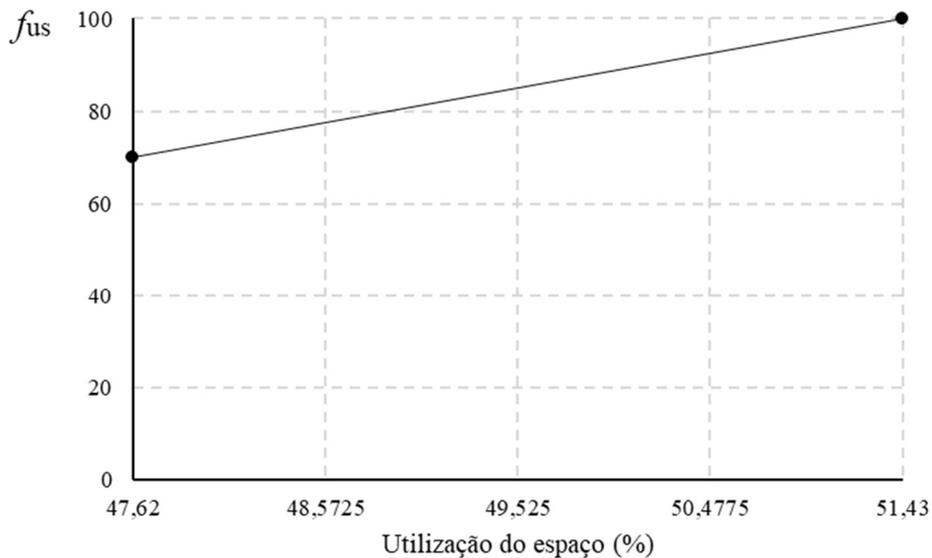
| <i>Layout</i> | Área do <i>layout</i> (m <sup>2</sup> ) | Qtde posições (unidades) | Área de cada posição (m <sup>2</sup> ) | % utilização do espaço |
|---------------|---|--------------------------|--|------------------------|
| Vertical      | 420,00                                  | 200                      | 1,00                                   | 47,62                  |
| Horizontal    | 420,00                                  | 216                      | 1,00                                   | 51,43                  |

Fonte: Próprio autor.

Logo, o TD atribuiu 100 pontos para uma ocupação de 51,43% e 70 pontos para uma ocupação de 47,62% (FIGURA 29). A maior importância dada ao melhor aproveitamento do

espaço se justifica conforme relatado no apêndice E. A preferência do TD é também coerente com os entrevistados pelos autores Davarzani e Norrman (2015), que relatam a importância do espaço para armazenagem e melhor aproveitamento deste espaço.

FIGURA 29 – Função de valor "% de utilização do espaço"



Fonte: Próprio autor.

### ***Critério "Custo operacional"***

De acordo com o TD, o custo operacional do armazém envolve os salários dos funcionários (operacional e administrativo), custo com materiais auxiliares, despesas da estrutura, depreciação dos equipamentos, entre outros. Isto está em coerência com os autores Huertas, Ramírez e Salazar (2007). Para a comparação de diferentes *layouts* em um mesmo armazém, deve-se considerar os custos dos equipamentos de movimentação (incluindo sua manutenção) e os custos com salários do separador, já que os demais custos permanecem os mesmos (HUERTAS; RAMÍREZ; SALAZAR, 2007).

Uma vez que o processo de separação é manual, os custos com equipamentos de movimentação não se aplicam e os custos operacionais resumem-se ao custo com salário dos separadores, sendo uma função das horas trabalhadas e o custo de cada hora de cada separador (HUERTAS; RAMÍREZ; SALAZAR, 2007) mais o custo das horas extras para concluir o processo de separação de todos os pedidos (equação 4):

$$\text{Custo com salário} = \left( \sum n \times cph \right) + \left( \sum n \times 1,50 \times cph \times \text{horas extras} \right) \text{ Eq. (4)}$$

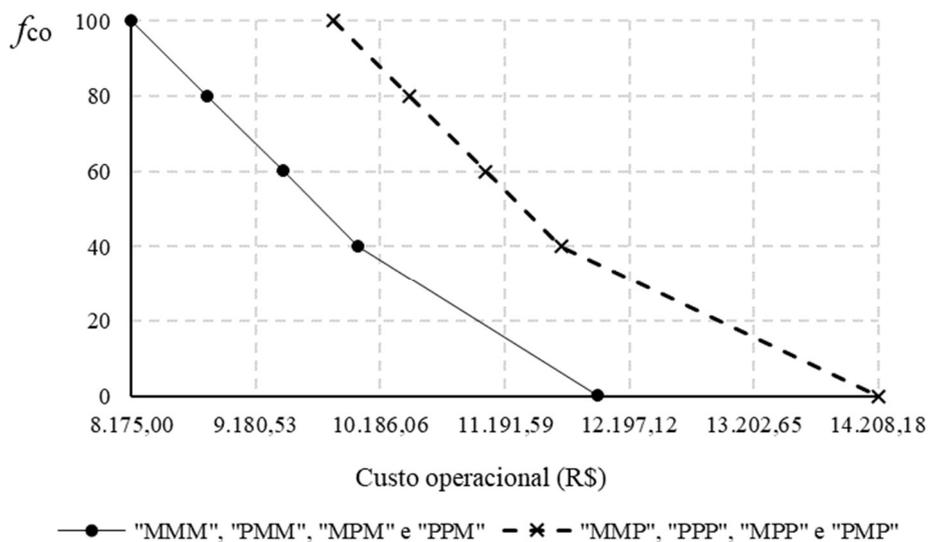
Onde:

$n$  é a quantidade de separadores ( $n = 5$ );

$cph$  é o custo por hora do separador = R\$ 5,45/hora.

Como os separadores são horistas, o custo operacional (TABELA 50 – Apêndice F) resultou da multiplicação do total de horas de separação de todos os pedidos (15.000 ou 18.000) pelo custo da hora de cada separador (cinco separadores no total) e a consideração das horas extras. As horas extras são aquelas que excedem os 30 dias dos cenários “MMM”, “PMM”, “MPM” e “PPM” e 36 dias para os cenários “MMP”, “PPP”, “MPP” e “PMP”. Logo, a função de valor para o critério “Custo operacional” é graficamente representada pela FIGURA 30 e seus valores representados pela TABELA 26 e TABELA 27. Observa-se que duas curvas foram geradas de modo a representar os dois grupos de cenários propostos. Em geral, o TD considerou que o menor custo equivale a 100 pontos e o maior custo equivale a 0 pontos.

FIGURA 30 – Função de valor “Custo operacional”



Fonte: Próprio autor.

TABELA 26 – Pontuação do critério “Custo operacional” para os cenários “MMM”, “PMM”, “MPM” e “PPM”

| Valor $f_{co}(x)$   | Custo operacional (R\$)        |
|---------------------|--------------------------------|
| 100                 | $x \leq 8.175,00$              |
| $-0,0326x + 366,67$ | $8.175,00 < x \leq 10.014,37$  |
| $-0,0207x + 247,45$ | $10.014,37 < x \leq 11.945,30$ |
| 0                   | $x > 11.945,30$                |

Fonte: Próprio autor.

TABELA 27 – Pontuação do critério "Custo operacional" para os cenários "MMP", "PPP", "MPP" e "PMP"

| Valor $fco(x)$      | Custo operacional (R\$)        |
|---------------------|--------------------------------|
| 100                 | $x \leq 9.810,00$              |
| $-0,0326x + 420,00$ | $9.810,00 < x \leq 11.649,37$  |
| $-0,0156x + 222,10$ | $11.649,37 < x \leq 14.208,20$ |
| 0                   | $x > 14.208,20$                |

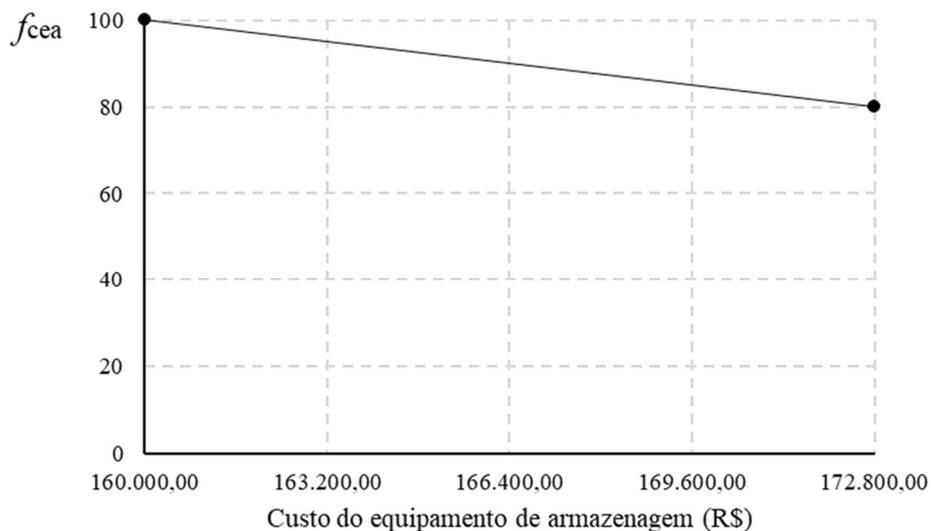
Fonte: Próprio autor.

### Critério "Custo equipamentos de armazenagem"

Os custos de equipamentos de armazenagem são considerados pela quantidade de posições que cada arranjo de *layout* (vertical ou horizontal) pode comportar. Cada posição custa R\$ 800,00. Considerando que o *layout* vertical comporta 200 posições e o horizontal 216 posições, os custos totais são de R\$ 160.000,00 e R\$ 172.800,00. O TD considera que quanto menor o custo de equipamento, melhor. Assim, atribuiu o valor de 100 pontos para o menor custo e 80 para o maior.

Logo, a função de valor para o critério "Custo equipamentos de armazenagem" é graficamente representada pela FIGURA 31.

FIGURA 31 – Função de valor "Custo equipamento de armazenagem"



Fonte: Próprio autor.

#### 4.6.1. Determinação dos pesos dos critérios – *swing weights*

A determinação dos pesos dos critérios foi feita conforme as preferências do TD por meio do método *swing weights*. O método foi aplicado utilizando-se a entrevista semiestruturada do Apêndice A conjuntamente com o exemplo da descrição do método no Apêndice H. Segundo as preferências do TD, a ordem dos critérios do mais ao menos importante é custos, recursos e nível de serviço respectivamente (TABELA 28).

TABELA 28 – Pesos atribuídos aos critérios – *swing weights*

| Critérios        | <i>Swing weights</i> | Pesos |
|------------------|----------------------|-------|
| Custos           | 100                  | 0,392 |
| Recursos         | 80                   | 0,314 |
| Nível de serviço | 75                   | 0,294 |
| Normalização     | 255                  | 1,000 |

Fonte: Próprio autor.

O TD explica que há um teto de investimento para a instalação do armazém e um *budget* do custo operacional mensal/anual que deve ser cumprido e que isto geralmente ditará o nível de serviço que será oferecido no caso de um concessionário distribuidor de peças. Por outro lado, recursos e nível de serviço possuem pesos próximos. Como há uma limitação de área física por exemplo, um melhor aproveitamento se faz necessário assim como dos separadores. Todavia, o TD complementa que dentro das limitações da empresa, sempre se busca o melhor nível de serviço possível, pois o armazém atende clientes internos e externos que demandam respostas rápidas quanto a suas solicitações de peças.

As atribuições de pesos aos subcritérios “custo operacional” e “custo do equipamento de armazenagem” (TABELA 29), “porcentagem de espaço utilizado” e “porcentagem de utilização média dos separadores” (TABELA 30), e “tempo total de separação” e “tempo médio de separação de um pedido” (TABELA 33) também foram julgados pelo TD.

TABELA 29 – Pesos atribuídos aos subcritérios custos – *swing weights*

| Subcritério                         | <i>Swing weights</i> | Pesos |
|-------------------------------------|----------------------|-------|
| Custo operacional                   | 100                  | 0,667 |
| Custo do equipamento de armazenagem | 50                   | 0,333 |
| Normalização                        | 150                  | 1,000 |

Fonte: Próprio autor.

TABELA 30 – Pesos atribuídos aos subcritérios recursos – *swing weights*

| Subcritério                           | <i>Swing weights</i> | Pesos |
|---------------------------------------|----------------------|-------|
| % de utilização média dos separadores | 100                  | 0,588 |
| % de utilização do espaço             | 70                   | 0,412 |
| Normalização                          | 170                  | 1,000 |

Fonte: Próprio autor

TABELA 31 – Pesos atribuídos aos subcritérios nível de serviço – *swing weights*

| Subcritério                           | <i>Swing weights</i> | Pesos |
|---------------------------------------|----------------------|-------|
| Tempo total de separação              | 100                  | 0,571 |
| Tempo médio de separação de um pedido | 75                   | 0,429 |
| Normalização                          | 175                  | 1,000 |

Fonte: Próprio autor

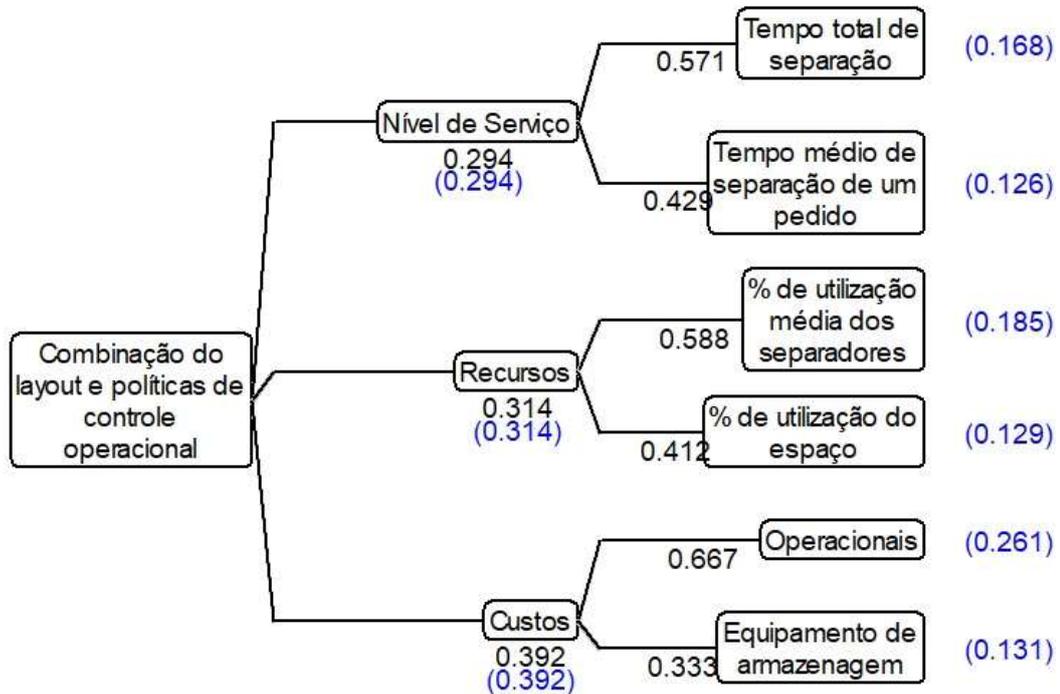
Assim, por meio dos pesos acumulados, é possível verificar a ordem dos subcritérios conforme as preferências do TD (TABELA 32). Logo, a estrutura hierárquica de decisão com os pesos atribuídos aos critérios e subcritérios é apresentada na FIGURA 32. Entre parênteses estão os pesos acumulados.

TABELA 32 – Pesos acumulados dos subcritérios – *swing weights*

| Ordem | Subcritério                           | Pesos acumulados |
|-------|---------------------------------------|------------------|
| 1º    | Custo operacional                     | 0,261            |
| 2º    | % de utilização média dos separadores | 0,185            |
| 3º    | Tempo total de separação              | 0,168            |
| 4º    | Custo do equipamento de armazenagem   | 0,131            |
| 5º    | % de utilização do espaço             | 0,129            |
| 6º    | Tempo médio de separação de um pedido | 0,126            |

Fonte: Próprio autor.

FIGURA 32 – Estrutura hierárquica de decisão e pesos pelo método *swing weights*



Fonte: Próprio autor.

#### 4.6.1. Determinação dos pesos dos critérios – ROC

A atribuição de pesos pelo método ROC foi feita conforme entrevista semiestruturada (Apêndice A) e TABELA 41. A ordem de preferência dos critérios e subcritérios foi mantida. Todavia, em função do método ROC, há uma atribuição de pesos aos critérios (TABELA 33) diferentes daquela resultante pelo método *swing weights*, assim como para os subcritérios (TABELA 34). Os pesos acumulados dos subcritérios e a estrutura hierárquica de decisão são apresentados na TABELA 35 e FIGURA 33 respectivamente.

TABELA 33 – Pesos atribuídos aos critérios – ROC

| Critério         | Ordem de preferência | Pesos Roc |
|------------------|----------------------|-----------|
| Custos           | 1°                   | 0,6111    |
| Recursos         | 2°                   | 0,2778    |
| Nível de Serviço | 3°                   | 0,1111    |

Fonte: Próprio autor.

TABELA 34 – Pesos atribuídos aos subcritérios – ROC

| Critério         | Subcritério                           | Ordem de preferência | Pesos Roc |
|------------------|---------------------------------------|----------------------|-----------|
| Custo            | Custo operacional                     | 1°                   | 0,75      |
|                  | Custo do equipamento de armazenagem   | 2°                   | 0,25      |
| Recursos         | % utilização média dos separadores    | 1°                   | 0,75      |
|                  | % utilização do espaço                | 2°                   | 0,25      |
| Nível de Serviço | Tempo total de separação              | 1°                   | 0,75      |
|                  | Tempo médio de separação de um pedido | 2°                   | 0,25      |

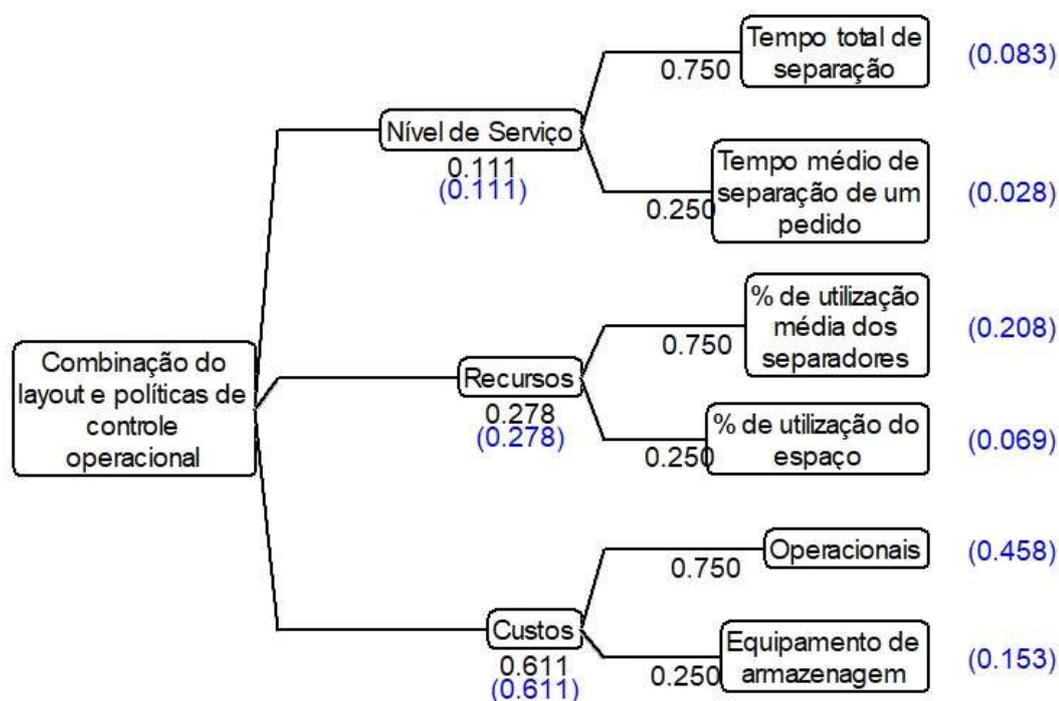
Fonte: Próprio autor.

TABELA 35 – Pesos acumulados dos subcritérios – ROC

| Ordem | Subcritério                           | Pesos acumulados |
|-------|---------------------------------------|------------------|
| 1°    | Custo operacional                     | 0,458            |
| 2°    | % utilização média dos separadores    | 0,208            |
| 3°    | Custo do equipamento de armazenagem   | 0,153            |
| 4°    | Tempo total de separação              | 0,083            |
| 5°    | % utilização do espaço                | 0,069            |
| 6°    | Tempo médio de separação de um pedido | 0,028            |

Fonte: Próprio autor.

FIGURA 33 – Estrutura hierarquica de decisão e pesos pelo método ROC



Fonte: Próprio autor.

Como esperado, diferentes métodos de atribuição de pesos geram diferentes resultados (TABELA 32 e TABELA 35). Embora o método ROC de atribuição de pesos seja mais simples de se utilizar em relação ao *swing weights*, pode não capturar as reais preferências do tomador de decisão, pois não força o tomador de decisão a refletir a respeito do problema e *trade-offs* envolvidos (GOODWIN; WRIGHT, 2004; P. 57).

Como relatado pelos últimos autores, a diferença de pesos atribuídos de maneira tabelada entre o atributo mais preferido e menos preferido, é alta e tende a aumentar com o aumento da quantidade de critérios (TABELA 41). Isto pode distorcer as preferências e conseqüentemente a escolha de uma alternativa. Logo, a avaliação geral de cada alternativa será feita por meio do método SMARTS.

#### 4.6.2. Avaliação geral de cada alternativa

Devido à grande quantidade de alternativas, foi feita uma codificação para tornar mais simples a identificação (TABELA 36). Assim, por exemplo, a alternativa com índice “1111” refere-se ao *layout* vertical, política de estocagem aleatória, política de separação discreta e política de roteirização transversal.

TABELA 36 – Índice das alternativas

| <i>Layout</i> | Política operacional de |                     |           |          |              |             |   |
|---------------|-------------------------|---------------------|-----------|----------|--------------|-------------|---|
|               | Estocagem               |                     | Separação |          | Roteirização |             |   |
| Vertical      | 1                       | Aleatória           | 1         | Discreta | 1            | Transversal | 1 |
| Horizontal    | 2                       | <i>Within-aisle</i> | 2         | Por lote | 2            | Retorno     | 2 |
|               |                         | <i>Across-aisle</i> | 3         |          |              |             |   |
|               |                         | Diagonal            | 4         |          |              |             |   |

Fonte: Próprio autor.

A avaliação geral de todas as alternativas em todos os cenários é apresentada na TABELA 37. Ao analisar cada cenário separadamente é possível observar que há muitas alternativas com o mesmo desempenho e muitas alternativas com desempenhos muito próximos, o que pode dificultar a identificação da melhor alternativa.

TABELA 37 – Avaliação geral das alternativas em cada cenário

| Alternativas | Cenários |     |     |     |     |     |     |     |
|--------------|----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|              | MMM      | PMM | MPM | MMP | PPP | MPP | PMP | PPM |
| 1111         | 84       | 85  | 85  | 84  | 85  | 79  | 85  | 84  |
| 1112         | 85       | 85  | 83  | 84  | 85  | 85  | 85  | 77  |
| 1121         | 82       | 82  | 81  | 82  | 82  | 80  | 82  | 82  |

| Alternativas | Cenários |     |     |     |     |     |     |     |
|--------------|----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|              | MMM      | PMM | MPM | MMP | PPP | MPP | PMP | PPM |
| 1122         | 82       | 82  | 82  | 81  | 78  | 82  | 82  | 82  |
| 1211         | 83       | 83  | 89  | 89  | 80  | 84  | 82  | 84  |
| 1212         | 83       | 76  | 85  | 92  | 75  | 89  | 74  | 73  |
| 1221         | 81       | 87  | 84  | 82  | 90  | 81  | 86  | 88  |
| 1222         | 80       | 85  | 80  | 82  | 85  | 82  | 90  | 84  |
| 1311         | 85       | 84  | 83  | 84  | 85  | 84  | 85  | 85  |
| 1312         | 85       | 82  | 84  | 84  | 79  | 83  | 84  | 83  |
| 1321         | 82       | 82  | 77  | 82  | 74  | 82  | 82  | 78  |
| 1322         | 82       | 82  | 80  | 82  | 82  | 81  | 82  | 82  |
| 1411         | 84       | 85  | 79  | 84  | 84  | 80  | 85  | 85  |
| 1412         | 84       | 85  | 83  | 84  | 82  | 84  | 85  | 84  |
| 1421         | 82       | 82  | 76  | 82  | 81  | 82  | 82  | 77  |
| 1422         | 82       | 82  | 82  | 82  | 75  | 82  | 82  | 82  |
| 2111         | 85       | 86  | 49  | 86  | 52  | 45  | 86  | 53  |
| 2112         | 86       | 86  | 51  | 86  | 49  | 47  | 86  | 49  |
| 2121         | 83       | 83  | 47  | 83  | 49  | 43  | 83  | 49  |
| 2122         | 83       | 83  | 44  | 83  | 51  | 42  | 83  | 52  |
| 2211         | 94       | 73  | 49  | 94  | 57  | 47  | 73  | 58  |
| 2212         | 94       | 69  | 52  | 94  | 57  | 48  | 69  | 58  |
| 2221         | 83       | 91  | 50  | 83  | 48  | 45  | 91  | 48  |
| 2222         | 83       | 91  | 49  | 83  | 48  | 46  | 90  | 49  |
| 2311         | 85       | 86  | 47  | 85  | 48  | 48  | 86  | 48  |
| 2312         | 85       | 86  | 50  | 85  | 51  | 49  | 86  | 52  |
| 2321         | 83       | 83  | 43  | 83  | 46  | 43  | 83  | 48  |
| 2322         | 83       | 83  | 44  | 83  | 49  | 44  | 83  | 50  |
| 2411         | 86       | 86  | 45  | 86  | 48  | 46  | 86  | 49  |
| 2412         | 85       | 86  | 47  | 85  | 49  | 47  | 86  | 49  |
| 2421         | 83       | 83  | 45  | 83  | 47  | 44  | 83  | 48  |
| 2422         | 83       | 83  | 46  | 83  | 46  | 46  | 83  | 47  |

Fonte: Próprio autor.

#### 4.7. Identificação da alternativa mais robusta

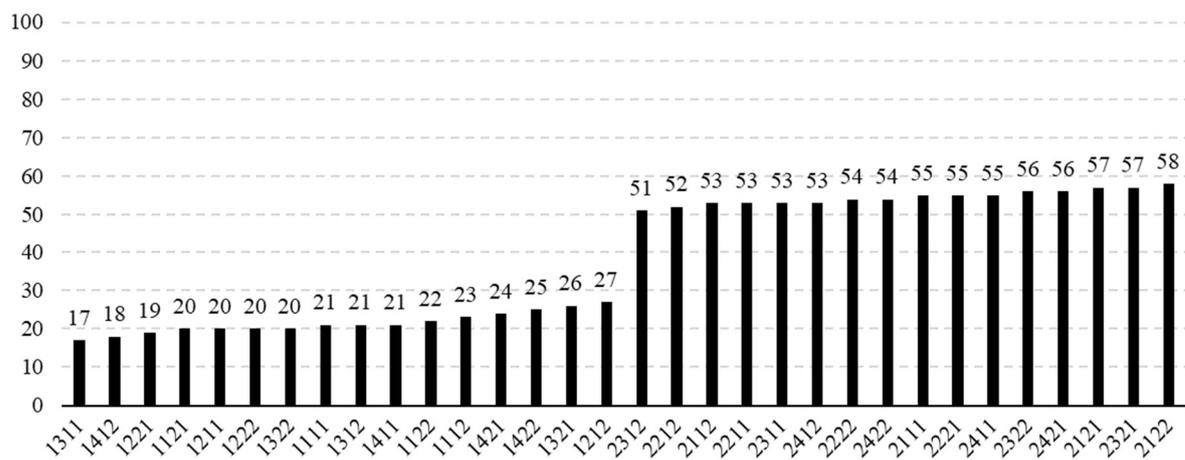
O cálculo da alternativa mais robusta foi feito conforme o indicador robustez entre cenários (MONTIBELLER; GUMMER; TUMIDEI, 2006). Para cada alternativa este indicador, assim como a robustez de cada alternativa em cada cenário, é apresentado na TABELA 52 (Apêndice G). Entretanto, um resumo da robustez entre cenários encontra-se na TABELA 38 assim como na FIGURA 34.

TABELA 38 – Resumo da robustez entre cenários das alternativas

| Robustez<br>ente cenários | Alternativas |      |           | Qtde de<br>alternativas |
|---------------------------|--------------|------|-----------|-------------------------|
| 17                        | 1311         |      |           | 1                       |
| 18                        | 1412         |      |           | 1                       |
| 19                        | 1221         |      |           | 1                       |
| 20                        | 1121         | 1211 | 1222 1322 | 4                       |
| 21                        | 1111         | 1312 | 1411      | 3                       |
| 22                        | 1122         |      |           | 1                       |
| 23                        | 1112         |      |           | 1                       |
| 24                        | 1421         |      |           | 1                       |
| 25                        | 1422         |      |           | 1                       |
| 26                        | 1321         |      |           | 1                       |
| 27                        | 1212         |      |           | 1                       |
| 51                        | 2312         |      |           | 1                       |
| 52                        | 2212         |      |           | 1                       |
| 53                        | 2112         | 2211 | 2311 2412 | 4                       |
| 54                        | 2222         | 2422 |           | 2                       |
| 55                        | 2111         | 2221 | 2411      | 3                       |
| 56                        | 2322         | 2421 |           | 2                       |
| 57                        | 2121         | 2321 |           | 2                       |
| 58                        | 2122         |      |           | 1                       |

Fonte: Próprio autor.

FIGURA 34 – Resumo da robustez entre cenários das alternativas



Fonte: Próprio autor.

Pela análise dos resultados obtidos é possível observar que a alternativa “1311” (*layout* vertical, política de estocagem *across aisle*, política de separação discreta e política de roteirização transversal) se destaca frente às outras, com uma robustez entre cenários resultando

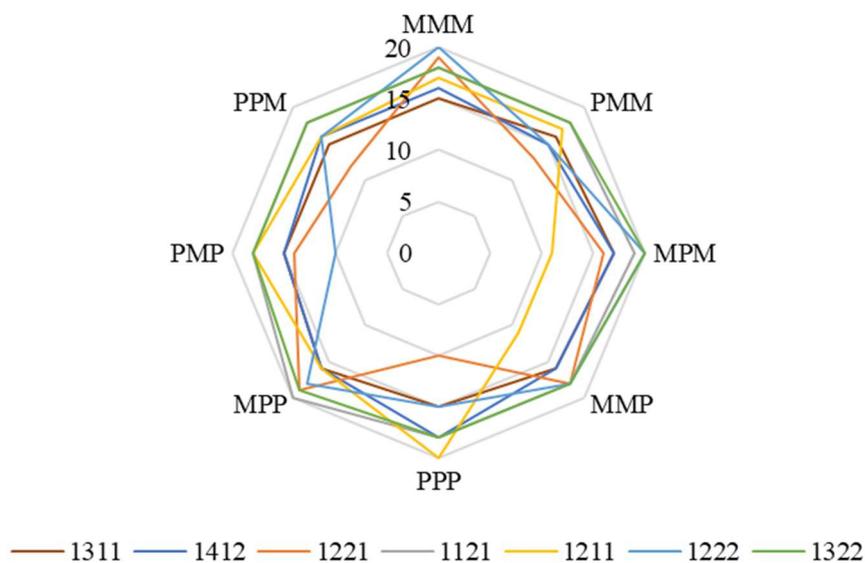
em 17 pontos. Isto quer dizer que entre os oito cenários avaliados, seu pior desempenho encontra-se a 17 pontos do ideal (100 pontos).

#### 4.8. Discussão dos resultados do exemplo ilustrativo

Desde já se faz necessário considerar que estes resultados estão vinculados diretamente às condições de simulação da operação de separação de pedidos, aos cenários e incertezas considerados, aos critérios e preferências do modelo de decisão em análise. Isto quer dizer que alterações nestas variáveis podem trazer diferentes resultados, principalmente quanto às preferências do tomador de decisão. Assim, por exemplo, uma alteração nos pesos dos critérios possivelmente levará a diferentes resultados.

Não distante da melhor alternativa, outras alternativas têm uma robustez entre cenários resultando em 18 pontos (“1412”), 19 pontos (“1221”) e 20 pontos (“1121”, “1211”, “1222” e “1322”). Dentre estas sete primeiras alternativas, observa-se que diferentes cenários são os responsáveis pelo indicador robustez entre cenários de cada alternativa (FIGURA 35). Por exemplo, o cenário “PPP” é o cenário de pior desempenho para as alternativas “1211” e “1412”, enquanto que o cenário “MPM” é o de pior desempenho para as alternativas “1311”, “1222” e “1322”. Isto vem a ressaltar que sob diferentes condições de avaliação (ou seja, diferentes cenários), diferentes alternativas (combinações de *layout* e políticas operacionais) podem ter diferentes desempenho. Logo, a necessidade de se avaliar combinadamente o *layout* e as políticas de controle operacionais em diferentes cenários e critérios.

FIGURA 35 – Robustez de cada cenário para as sete alternativas



Fonte: Próprio autor.

Os subcritérios “custo operacional”, “porcentagem de utilização média do separador” e “tempo total de separação dos pedidos” foram considerados respectivamente os mais importantes pelo tomador de decisão. As funções de valores desenhadas pelo tomador de decisão valorizaram uma minimização do subcritério “custo operacional”, maximização do subcritério “porcentagem de utilização média do separador” e minimização do subcritério “tempo total de separação dos pedidos”, frente aos cenários avaliados. Todavia, geralmente os trabalhos anteriores têm baseado a escolha das políticas de controle operacionais e ou *layout* em somente um critério, ou quando em dois ou mais critérios, não analisam seus *trade-offs*.

Cita-se como exemplo o critério “distância percorrida” objetivando a menor distância (GILS et al., 2017; PETERSEN, 1997, 2002; PETERSEN; AASE, 2017; PETERSEN; SCHMENNER, 1999; ROODBERGEN; VIS; TAYLOR, 2015; SHQAIR; ALTARAZI; AL-SHIHABI, 2014), o “tempo de separação um pedido” objetivando o menor tempo (ELBERT et al., 2017; FRANZKE et al., 2017; PETERSEN, 1999) e o “tempo total de separação de todos os pedidos” (CHAN; CHAN, 2011; HEATH; CIARALLO; HILL, 2013; PETERSEN, 2000; PETERSEN; AASE, 2004). Outros critérios podem ser lembrados na TABELA 2.

Logo, uma comparação na tomada de decisão da melhor alternativa entre o modelo proposto pela dissertação e por meio da utilização isolada dos critérios “distância percorrida”, “tempo total de separação de todos os pedidos” e o “tempo médio de separação de uma lista” se torna interessante (TABELA 39). A comparação é feita por meio do maior valor encontrado para a distância percorrida (TABELA 48 – Apêndice F), tempo total de separação (TABELA 45 – Apêndice F) e tempo médio de separação de um pedido (TABELA 46 – Apêndice F) entre os cenários avaliados, de modo que este maior valor represente a robustez entre cenário para este critério. Ainda, realiza-se a comparação com o indicador “linhas separadas/hora-homem” (TABELA 51), comumente utilizado em ambiente de armazenagem, objetivando sua maximização.

TABELA 39 – Comparação entre o método proposto e critérios isolados

| Alternativa | Metodologia Proposta<br>(pontos) | Distância percorrida<br>(x 1000 m) | Tempo total de separação por dia<br>(horas) | Tempo médio de separação por pedido<br>(minutos) | Linhas separadas/hora-homem<br>(unidades) |
|-------------|----------------------------------|------------------------------------|---|--|---|
| <b>1311</b> | <b><u>17</u></b>                 | 1.418                              | 10,07                                       | 3,24   | 43,37                                     |
| <b>2322</b> | 56                               | <b><u>656</u></b>                  | 12,77                                       | 5,32   | 34,72                                     |
| <b>1311</b> | 17                               | 1.418                              | <b><u>10,07</u></b>                         | 3,24   | 43,37                                     |
| <b>2312</b> | 51                               | 893                                | 12,49                                       | <b><u>2,77</u></b>                               | 35,40                                     |

| Alternativa | Metodologia Proposta<br>(pontos) | Distância percorrida<br>(x 1000 m) | Tempo total de separação por dia<br>(horas) | Tempo médio de separação por pedido<br>(minutos) | Linhas separadas/hora-homem<br>(unidades) |
|-------------|----------------------------------|------------------------------------|---|--|---|
| <b>1122</b> | 22                               | 1.1167                             | 10,21                                       | 6,36   | <b><u>43,77</u></b>                       |

Fonte: Próprio autor.

Na TABELA 39, a melhor alternativa com relação ao método de escolha (metodologia proposta ou critério isolado) e seu respectivo desempenho estão grafados em negrito. Primeiramente, observa-se que tanto pelo método proposto quanto pelo “tempo total de separação”, a alternativa escolhida seria a “1311”. Isto ocorre por que o TD considerou os subcritérios “custo operacional” e “tempo total de separação” como sendo o mais e o terceiro mais importante, respectivamente. Considerou também que ambos devem ser minimizados. Como o custo operacional está diretamente relacionado ao tempo total de separação (neste caso específico), conseqüentemente a escolha por esta alternativa é a mesma. Caso não houvesse uma direta ligação entre o custo operacional e o tempo total de separação, poderia haver um resultado diferente entre a metodologia proposta e o subcritério isolado “tempo total de separação”.

Considerando a minimização da distância percorrida, a alternativa escolhida seria a “2322”. Todavia, ela apresenta um índice de robustez elevado comparado a alternativa “1311”, em função do seu desempenho inferior nos critérios considerados na metodologia proposta, mais especificamente “tempo total de separação” e “tempo médio de separação”. Isto ocorre porque, a escolha baseada somente na menor distância percorrida não aborda a problemática do congestionamento, não considerando este efeito nos tempos de separação. Logo, a escolha baseada somente na menor distância percorrida pode ser equivocada.

A escolha pelo menor “tempo médio de separação por pedido”, coloca a alternativa “2312” em primeiro lugar. Todavia seu baixo desempenho no “tempo total de separação” e conseqüentemente no “custo operacional” levam esta alternativa a um alto índice de robustez entre cenários (51). Já a escolha considerando a maior quantidade de “linhas separadas por hora-homem” coloca a alternativa “1122” em primeiro lugar. Esta escolha tem um índice de robustez mais baixo (22) e próximo da alternativa “1311”. Nota-se também que ambas as alternativas possuem quantidades de “linhas separadas por hora-homem” muito próximas com menos de 1% de diferença.

Ainda com relação às sete melhores alternativas avaliadas, pode-se inferir que se o tomador de decisão está disposto a abrir mão de até três pontos no indicador robustez entre cenários (de 17 a 20 pontos), muitas combinações de políticas operacionais podem ser utilizadas (TABELA 40). Dentre estas combinações, há uma predominância da política de estocagem por classes (seis ocorrências) em relação a política de estocagem aleatória (uma ocorrência), um equilíbrio entre as políticas de separação discreta (três ocorrências) e por lote (quatro ocorrências) e também um equilíbrio entre as políticas de roteirização transversal (quatro ocorrências) e retorno (três ocorrências). Por fim, há uma predominância total do *layout* vertical.

TABELA 40 – Descrição das melhores alternativas do caso analisado

| Robustez<br>entre<br>cenários | Alternativa | Políticas operacionais |                         |                         |           |          |             |              |         |
|-------------------------------|-------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------|----------|-------------|--------------|---------|
|                               |             | Estocagem              |                         |                         | Separação |          |             | Roteirização |         |
|                               |             | Aleatória              | <i>Within<br/>aisle</i> | <i>Across<br/>aisle</i> | Diagonal  | Discreta | Por<br>lote | Transversal  | Retorno |
| 17                            | 1311        |                        |                         | x                       |           | x        |             | x            |         |
| 18                            | 1412        |                        |                         |                         | x         | x        |             |              | x       |
| 19                            | 1221        |                        | x                       |                         |           |          | x           | x            |         |
| 20                            | 1121        | x                      |                         |                         |           |          | x           | x            |         |
| 20                            | 1211        |                        | x                       |                         |           | x        |             | x            |         |
| 20                            | 1222        |                        | x                       |                         |           |          | x           |              | x       |
| 20                            | 1322        |                        |                         | x                       |           |          | x           |              | x       |
| Total                         | 7           | 1                      | 3                       | 2                       | 1         | 3        | 4           | 4            | 3       |

Fonte: Próprio autor.

Dentre as alternativas, se destaca a “1121” com uma política de estocagem aleatória, pois apresentam-se a frente de outras alternativas com políticas de estocagem por classes. Como visto na revisão da literatura, estudos anteriores mostram a superioridade das políticas de estocagem por classes quanto a distância percorrida e o tempo de separação quando não se considera o fator congestionamento (CHEN et al., 2010; PETERSEN, 1999). Aqui, a TABELA 48 (Apêndice F) confirma a menor distância percorrida, porém as políticas de estocagem por classe levaram (no geral) a maiores tempos de congestionamento (TABELA 49 – Apêndice F) e assim a maiores tempos médios de separação por pedido (TABELA 46 – Apêndice F). Isto está alinhado com os trabalhos de Heath, Ciarallo e Hill (2013) e Franzke et al. (2017).

Embora se espere que o tempo total de separação seja menor ao se utilizar uma separação por lote (PETERSEN; AASE, 2004), aqui não houve este efeito (TABELA 44 – Apêndice F). Provavelmente isto tenha acontecido, por que neste trabalho tenha se utilizado um

TEC dos pedidos, diferentemente de empurrar para o modelo de simulação a carga total de pedidos a serem separados como em outros trabalhos vistos na revisão da literatura. Por outro lado, assim como em Chackelson et al. (2013), o tempo médio de separação de um pedido foi maior para alternativas com a política de separação por lote do que a discreta (TABELA 46 – Apêndice F). Ainda, a porcentagem de utilização média dos separadores é maior para as alternativas com política de separação discreta do que por lote (TABELA 47 – Apêndice F), já que, por exemplo, os separadores andam mais com a política de separação discreta e assim permanecem mais tempos ocupados.

Embora ocorra um *trade-off* entre os subcritérios “custo do equipamento de armazenagem” e “% de utilização do espaço”, as alternativas que contam com o *layout* horizontal não obtiveram um desempenho satisfatório quanto ao indicador analisado ( $\geq 51$  pontos), evidenciando a superioridade do *layout* vertical sob as condições analisadas, ou seja, os cenários avaliados, os critérios utilizados, as preferências do TD e o banco de dados do concessionário utilizado. Ao utilizar somente o critério tempo de ciclo do item e outras condições diferentes da utilizadas desta dissertação, Altarazi e Ammouri (2018) identificaram a superioridade do *layout* horizontal frente a outros arranjos de *layout*, inclusive o vertical. Porém, os autores não consideraram o fator congestionamento em suas análises.

Por outro lado, considerando somente a minimização da distância percorrida e a minimização do tempo médio de separação de um pedido, o *layout* horizontal tem melhor desempenho (TABELA 39). Ainda, observa-se que o baixo desempenho deste *layout* ocorre nos cenários “MPM”, “PPP”, “MPP” e “PPM” (TABELA 37). Estes cenários possuem a incerteza TEC dos pedidos com maior variabilidade em termos de intensidade e distribuição, ou seja, em determinados horários da operação há mais pedidos para ser separados. Isto pode gerar filas e maiores congestionamentos no processo de separação, o que conseqüentemente aumenta o tempo total de separação dos pedidos, culminando em um baixo desempenho. Todavia, maiores investigações são necessárias para se avaliar o desempenho deste *layout*.



## 5. CONCLUSÕES

Esta pesquisa teve como objetivo propor uma metodologia para abordar a problemática da avaliação, seleção e classificação da melhor combinação de alternativas de arranjo de *layout* e políticas de controle operacionais. São abordadas duas alternativas de arranjo do *layout*, quatro alternativas de política de estocagem, duas políticas de separação e duas políticas de roteirização, totalizando 32 combinações destas alternativas. A metodologia composta de análise de decisão multicritério com planejamento de cenários baseado nas incertezas da operação do armazém (TLS, TEC dos pedidos e demanda) e simulação de eventos discretos de modo a incorporar o comportamento estocástico e o congestionamento da operação do armazém, é a principal contribuição desta pesquisa.

Especificamente, para a avaliação de alternativas de *layout* e políticas de operações de armazéns, principalmente os de pequeno porte, esta pesquisa contribui com um modelo de decisão multicritério que aborda seis critérios, entre custos, nível de serviço e taxa de utilização de recursos, sendo que somente alguns deles já foram utilizados na literatura. A utilização de mais de um critério provoca o tomador de decisão a pensar a respeito dos *trade-offs* entre eles e assim fazer suas preferências frente às suas condições de operação (incertezas por meio de cenários) e objetivos da empresa. Isto vem a colaborar para a organização da literatura sobre a tomada de decisão da escolha entre as alternativas de *layout* e políticas operacionais. Porém, a pesquisa também contribui com um modelo de simulação de eventos discretos à medida que aborda a temática do congestionamento conjuntamente com o caráter estocástico da operação de separação do armazém quanto à atribuição das locações na lista de separação, TLS, TEC dos pedidos e variação do TEC ao longo da operação. Isto se torna relevante pois, conforme os resultados da revisão sistemática, o congestionamento somente foi abordado por meio de modelos baseados em agentes. Como contribuição prática, os gestores de pequenos armazéns de separação manual de pedidos, podem utilizar a metodologia proposta para verificar já na fase de projeto do armazém, quais combinações de *layout* e políticas operacionais mais se adequam aos objetivos da empresa.

Embora planejamento de cenários seja aplicado exclusivamente a decisões estratégicas, a presente pesquisa também vem a contribuir com a literatura ao propor a aplicação de uma metodologia para decisões estratégicas (*layout*), táticas (políticas de controle de estocagem e separação) e operacionais (política de controle de roteirização) conjuntamente em uma questão logística, mais especificamente em armazéns.

Embora a análise de decisão multicritério possa lidar com critérios qualitativos e quantitativos, deixa a desejar quando os critérios possuem uma característica dinâmica, e simulação pode auxiliar a lidar com estes critérios. Por outro lado, planejamento de cenários é uma ferramenta para criar cenários futuros, plausíveis e relevantes à problemática de interesse, porém é falho quanto à avaliação de alternativas nos cenários criados e a análise de decisão multicritério pode auxiliar nesta tarefa. Por fim, a simulação auxilia no desdobramento dos cenários criados, quantificando-os por meio de critérios dinâmicos estipulados pela análise de decisão. Portanto, a metodologia híbrida proposta, envolvendo a análise de decisão multicritério com planejamento de cenários e simulação, busca suprir deficiências quando estes métodos são aplicados separadamente e assim melhorar a acuracidade dos resultados obtidos e prover uma riqueza de análises que podem ser úteis inclusive para trabalhos futuros, como, por exemplo, mensuração do risco por meio das curvas de utilidade aplicadas na análise multicritério. A aplicação da metodologia híbrida resulta em um valor denominado indicador de robustez entre cenários. Isto vem a facilitar a classificação e seleção da melhor alternativa. Este indicador retorna um valor que representa o pior desempenho de cada alternativa nos cenários avaliados. Logo, quando menor seu valor melhor é a alternativa.

A comparação da metodologia proposta nesta pesquisa com os métodos mais comumente aplicados na literatura (critérios isolados) mostrou a importância de se abordar o problema em questão por uma visão multicriterial, verificando-se os objetivos e as preferências do decisor, com base em cenários plausíveis. A escolha por meio de um critério pode levar a alternativas e decisões que não atendam aos múltiplos objetivos da empresa e assim não considerar os *trade-offs* envolvidos. Logo, a metodologia proposta aqui se mostra relevante às pesquisas elencadas pela revisão sistemática feita, podendo oferecer resultados mais robustos e confiáveis.

Adicionalmente, algumas limitações da metodologia proposta podem ser citadas e podem ser vistas como oportunidades futuras de pesquisa. A metodologia não foi validada por meio de um estudo de caso múltiplo de modo a trazer maiores generalizações quanto aos critérios e incertezas utilizados, bem como a estruturação da hierarquia destes critérios. Todavia, a metodologia proposta ainda é interessante à medida que avalia um conjunto de dados que envolve incerteza, múltiplos critérios e vários cenários. Sendo assim, a metodologia ainda é válida pois pode inspirar a construção de modelos e aplicações em diversas áreas da logística de armazenagem por meio de casos reais, tais como *e-commerce*, bens de consumo, etc., além do automotivo. Também, observa-se o tempo elevado necessário para efetuar todas as etapas

da metodologia proposta, em função da coleta de dados em loco, entrevistas com o tomador de decisão e simulação dos cenários. Ainda, a inclusão de mais critérios dinâmicos ou incertezas, podem demandar alterações nos modelos SED e MCDA.

Quanto aos modelos que constituíram a metodologia, as limitações são inerentes à cada modelo. Quanto ao modelo de simulação, as limitações são: (a) o modelo proposto aqui aborda somente a atividade de separação de pedidos. As demais atividades básicas de um armazém (recebimento, estocagem, reabastecimento e expedição) não estão incorporadas (ALTARAZI; AMMOURI, 2018). No entanto, o modelo ainda é válido pois aborda a atividade de maior custo operacional do armazém (FRAZELLE, 2001); (b) o modelo é capaz somente de avaliar os *layouts*, políticas de estocagem, separação e roteirização propostos, resultando em 32 combinações. Todavia, estas alternativas foram consideradas plausíveis pelo TD e heurísticas mais avançadas de roteirização, por exemplo, podem trazer desempenhos próximos das heurísticas mais simples utilizadas neste trabalho (HALL, 1993), bem como confundir os separadores (PETERSEN; AASE, 2004);

Quanto ao modelo de decisão multicritério, as limitações são: (a) o modelo somente aborda critérios quantitativos e a adoção de critérios qualitativos, como por exemplo segurança (CANEN; WILLIAMSON, 1996) pode dar maior validade ao modelo, mesmo que isto resulte em outra estrutura hierárquica de decisão; (b) o modelo aborda as preferências de somente um decisor e para questões estratégicas (*layout*) geralmente há mais decisores, logo um método de agregação de pesos pode ser interessante. No entanto, o modelo de decisão proposto ainda é válido pois aborda mais critérios de avaliação que trabalhos elencados pela revisão sistemática.

Além das oportunidades de pesquisas elencadas pelas limitações do presente trabalho, pode-se citar: (a) uma metodologia que aborde o congestionamento envolvendo as diversas atividades que ocorrem ao mesmo tempo em um armazém; (b) uma metodologia que aborde conjuntamente a questão das políticas de inventário; e (c) uma metodologia que aborde conjuntamente as questões ligadas ao efeito “*maverick picking*” (GLOCK et al., 2017) que podem gerar erros no processo de separação.

## 6. BIBLIOGRAFIA

AGUEZZOUL, A. Third-party logistics selection problem: A literature review on criteria and methods. **Omega (United Kingdom)**, v. 49, p. 69–78, 2014.

AHMED, A.; AL-MASHRAIE, M. **Evaluation of Dispatching Rules in Manufacturing Using Simulation and Data Envelopment Analysis**. Proceedings of the 2015 Industrial and Systems Engineering Research Conference. **Anais...2015**

AICKELIN, U. et al. Using simulation to incorporate dynamic criteria into multiple criteria decision-making. **Journal of the Operational Research Society**, v. 5682, p. 1–12, 2017.

AL-REFAIE, A. et al. Applying simulation and DEA to improve performance of emergency department in a Jordanian hospital. **Simulation Modelling Practice and Theory**, v. 41, p. 59–72, 2014.

ALMEIDA, A. T. DE. **Processo de decisão nas organizações: construindo modelos de decisão multicritério**. São Paulo: Atlas, 2013.

ALTARAZI, S. A.; AMMOURI, M. M. Concurrent manual-order-picking warehouse design: a simulation-based design of experiments approach. **International Journal of Production Research**, v. 7543, n. January, p. 1–19, 2018.

AMER, M.; DAIM, T. U.; JETTER, A. A review of scenario planning. **Futures**, v. 46, p. 23–40, 2013.

AMMOURI, M. M.; ALTARAZI, S. A.; ALZUBI, E. **Concurrent Manual-Order Picking Warehouses Design via Simulation**. Industrial and Systems Engineering Research Conference. **Anais...Amman, Jordan: 2012**

ANDRIULO, S.; ELIA, V.; GNONI, M. G. Mobile self-checkout systems in the FMCG retail sector: A comparison analysis. **International Journal of RF Technologies Research and Applications**, v. 6, n. 4, p. 207–224, 2015.

ASTERIS, M.; COLLINS, A.; JONES, D. F. Container port infrastructure in north-west Europe: Policy-level modeling. **Journal of Policy Modeling**, v. 34, n. 2, p. 312–324, 2012.

AYAĞ, Z. A hybrid approach to machine-tool selection through AHP and simulation. **International Journal of Production Research**, v. 45, n. 9, p. 2029–2050, 2006.

BAKER, P.; CANESSA, M. Warehouse design: A structured approach. **European Journal of Operational Research**, v. 193, n. 2, p. 425–436, 2009.

BALLOU, R. H. **Logística empresarial: transporte, administração de materiais e distribuição física**. 1. ed. São Paulo: Atlas, 2012.

BANKS, J. et al. **Discrete Event System Simulation**. 5. ed. Atlanta: Pearson, 2010.

BARRON, F. H.; BARRETT, B. E. The efficacy of SMARTER — Simple multi-attribute rating technique extended to ranking. **Acta Psychologica**, v. 93, n. 1–3, p. 23–36, 1996a.

BARRON, F. H.; BARRETT, B. E. Decision Quality Using Ranked Attribute Weights. **Management Science**, v. 42, n. 11, p. 1515–1523, 1996b.

BARTHOLDI, J. J.; HACKMAN, S. T. **Warehouse & Distribution Science - Release 0.96. The Supply Chain and Logistics Institute, Georgia Institute of Technology**. Atlanta, USA: Google Scholar, 2014.

BEHZADIAN, M. et al. A state-of-the-art survey of TOPSIS applications. **Expert Systems with Applications**, v. 39, n. 17, p. 13051–13069, 2012.

BELTON, V. Multi-criteria problem structuring and analysis in a value theory framework. In: **Multicriteria decision making**. Boston, MA: Springer, 1999. p. 335–366.

BELTON, V.; STEWART, T. **Multiple criteria decision analysis: an integrated approach**. 1. ed. [s.l.] Springer US, 2002.

BERG, J. P. V. DEN; ZIJM, W. H. M. Models for warehouse management: Classification and examples. **International Journal of Production Economics**, v. 59, n. 1, p. 519–528, 1999.

BIRIM, S.; SOFYALIOGLU, C. Evaluating vendor managed inventory systems: how incentives can benefit supply chain partners. **Journal of Business Economics and Management**, v. 18, n. 1, p. 163–179, 2017.

BIZIKOVA, L.; KRCCMAR, E. Integrated scenario planning and multi-criteria decision analysis framework with application to forest planning. **Open Journal of Forestry**, v. 5, n. 2, p. 139–153, 2015.

BRITO, T. B. et al. **Discrete event simulation combined with multi-criteria decision analysis applied to steel plant logistics system planning**. Proceedings - Winter Simulation Conference. **Anais...**2010

BROWNE, D.; O'REGAN, B.; MOLES, R. Use of multi-criteria decision analysis to explore alternative domestic energy and electricity policy scenarios in an Irish city-region. **Energy**, v. 35, n. 2, p. 518–528, 2010.

CAIRNS, G.; GOODWIN, P.; WRIGHT, G. A decision-analysis-based framework for analysing stakeholder behaviour in scenario planning. **European Journal of Operational Research**, v. 249, n. 3, p. 1050–1062, 2016.

CANEN, A. G.; WILLIAMSON, G. H. Facility layout overview: towards competitive advantage. **Facilities**, v. 16, n. 7/8, p. 198–203, 1996.

CARDONA, L. F. et al. Detailed design of fishbone warehouse layouts with vertical travel. **International Journal of Production Economics**, v. 170, p. 825–837, 2015.

CARON, F.; MARCHET, G.; PEREGO, A. Routing policies and COI-based storage policies in picker-to-part systems. **International Journal of Production Research**, v. 36, n. 3, p. 713–732, 1998.

CARON, F.; MARCHET, G.; PEREGO, A. Layout design in manual picking systems: A simulation approach. **Integrated Manufacturing Systems**, v. 11, n. 2, p. 94–104, 2000.

ÇELK, M.; SÜRAL, H. Order picking under random and turnover-based storage policies in fishbone aisle warehouses. **IIE Transactions (Institute of Industrial Engineers)**, v. 46, n. 3, p. 283–300, 2014.

CHACKELSON, C. et al. Evaluating order picking performance trade-offs by configuring main operating strategies in a retail distributor: A Design of Experiments approach. **International Journal of Production Research**, v. 51, n. 20, p. 6097–6109, 2013.

CHAI, J.; LIU, J. N. K.; NGAI, E. W. T. Application of decision-making techniques in supplier selection: A systematic review of literature. **Expert Systems with Applications**, v. 40, n. 10, p. 3872–3885, 2013.

CHAN, F. T. S.; CHAN, H. K. 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**, v. 38, n. 3, p. 2686–2700, 2011.

CHEMWENO, P. et al. Discrete event simulation case study: Diagnostic path for stroke patients in a stroke unit. **Simulation Modelling Practice and Theory**, v. 48, p. 45–57, 2014.

CHEN, C. M. et al. A flexible evaluative framework for order picking systems. **Production and Operations Management**, v. 19, n. 1, p. 70–82, 2010.

CHEN, F. et al. An ant colony optimization routing algorithm for two order pickers with congestion consideration. **Computers and Industrial Engineering**, v. 66, n. 1, p. 77–85, 2013.

CHERMACK, T. J.; LYNHAM, S. A.; RUONA, W. E. A review of scenario planning literature. **Futures Research Quarterly**, v. 17, n. 2, p. 7–32, 2001.

CHOU, S. Y.; CHANG, Y. H. A decision support system for supplier selection based on a strategy-aligned fuzzy SMART approach. **Expert Systems with Applications**, v. 34, n. 4, p. 2241–2253, 2008.

CHWIF, L.; MEDINA, A. C. **Modelagem e simulação de eventos discretos**. 3. ed. São Paulo: do autor, 2010.

CLEMEN, R. T.; REILLY, T. **Making Hard Decisions with Decision Tools Suite Update**. 1. ed. Pacific Grove, CA: Cengage Learning, 2004.

CORMIER, G.; GUNN, E. A. A review of warehouse models. **European Journal of Operational Research**, v. 58, n. 1, p. 3–13, 1992.

CORMIER, G.; GUNN, E. A. Simple models and insights for warehouse sizing. **Journal of the Operational Research Society**, v. 47, n. 5, p. 690–696, 1996.

DA CUNHA REIS, A. et al. Warehouse design: a systematic literature review. **Brazilian Journal of Operations & Production Management**, v. 14, n. 4, p. 542, 2017.

DAVARZANI, H.; NORRMAN, A. Toward a relevant agenda for warehousing research: literature review and practitioners' input. **Logistics Research**, v. 8, n. 1, 2015.

DE FREITAS FILHO, P. J. **Introdução à modelagem e simulação de sistemas: com aplicações em Arena**. 2. ed. Florianópolis: Visual Books, 2001.

DEKKER, R. et al. Improving order-picking response time at Ankor's warehouse. **Interfaces**, v. 34, n. 4, p. 303–313, 2004.

DUKIC, G.; OLUIC, C. Order-picking methods: improving order-picking efficiency. **International Journal of Logistics Systems and Management**, v. 3, n. 4, p. 451–460, 2007.

DUONG, L. N. K. **Replenishment policy for perishable and substitutable products at suppliers and retailers a multi-criteria approach**. [s.l.] Auckland University of Technology, 2016.

DURBACH, I. N.; STEWART, T. J. Modeling uncertainty in multi-criteria decision analysis. **European Journal of Operational Research**, v. 223, n. 1, p. 1–14, 2012.

DURUCASU, H. et al. Current Application Fields of ELECTRE and PROMETHEE: A Literature Review. **Alphanumeric Journal**, v. 5, n. 2, p. 229–270, 2017.

EDWARDS, W.; BARRON, F. H. Smarts and smarter: Improved simple methods for multiattribute utility measurement. **Organizational Behavior and Human Decision Processes**, v. 60, n. 3, p. 306–325, 1994.

ELBERT, R. M. et al. The effects of human behavior on the efficiency of routing policies in order picking: The case of route deviations. **Computers and Industrial Engineering**, v. 111, p. 537–551, 2017.

ELIA, V.; GNONI, M. G. Designing an effective closed loop system for pallet management. **International Journal of Production Economics**, v. 170, p. 730–740, 2015.

ESKANDARI, H. et al. **Improving the emergency department performance using simulation and MCDM methods**. Winter Simulation Conference, 2011. **Anais...2011**

FLYNN, B. B. et al. Empirical research methods in operations management. **Journal of Operations Management**, v. 9, n. 2, p. 250–284, 1990.

FRANCO, L. A.; MONTIBELLER, G. Problem structuring for multicriteria decision analysis interventions. **Wiley encyclopedia of operations research and management science**, 2010.

FRANSOO, J. C.; BERTRAND, J. W. M. Operations management research methodologies using quantitative modeling. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 22, n. 2, p. 241, 2002.

FRANZKE, T. et al. An investigation of the effects of storage assignment and picker routing on the occurrence of picker blocking in manual picker-to-parts warehouses. **International Journal of Logistics Management**, v. 28, n. 3, p. 841–863, 2017.

FRAZELLE, E. **World-Class Warehousing and Material Handling**. 1. ed. New York: McGraw Hill, 2001.

GHANBARPOUR, M. R.; SALIMI, S.; HIPEL, K. W. A comparative evaluation of flood mitigation alternatives using GIS-based river hydraulics modelling and multicriteria decision analysis. **Journal of Flood Risk Management**, v. 6, n. 4, p. 319–331, 2013.

GHARAHIGHEHI, A. et al. Improving performances of the emergency department using discrete event simulation, DEA and the MADM methods. **Digital Health**, v. 2, n. January 1, p. 1–14, 2016.

GIL, A. C. **Como Elaborar Projetos de Pesquisa**. 1. ed. São Paulo: Atlas, 2002.

GILS, T. VAN et al. Designing efficient order picking systems by combining planning problems: State-of-the-art classification and review. **European Journal of Operational Research**, v. 267, n. 1, p. 1–15, 2017.

GILS, T. VAN et al. Increasing order picking efficiency by integrating storage, batching, zone picking, and routing policy decisions. **International Journal of Production Economics**, v. 197, n. November 2017, p. 243–261, 2018.

GLOCK, C. H. et al. Maverick picking: the impact of modifications in work schedules on manual order picking processes. **International Journal of Production Research**, v. 55, n. 21, p. 6344–6360, 2017.

GOETSCHALCKX, M.; MCGINNIS, L.; SHARP, G. **Modeling foundations for formal warehouse design**. Progress in Material Handling Research. **Anais...**Dortmund, DE: The Material Handling Inst., 2008

GOMES, C. F. S.; COSTA, H. G.; BARROS, A. P. DE. Sensibility analysis of MCDA using prospective in Brazilian energy sector. **Journal of Modelling in Management**, v. 12, n. 3, p. 475–497, 2017.

GONG, Y.; KOSTER, R. B. M. DE. A review on stochastic models and analysis of warehouse operations. **Logistics Research**, v. 3, n. 4, p. 191–205, 2011.

GOODWIN, P.; WRIGHT, G. Enhancing Strategy Evaluation in Scenario Planning: a Role for Decision Analysis. **Journal of management studies**, v. 38, n. 1, p. 1–16, 2001.

GOODWIN, P.; WRIGHT, G. **Decision Analysis for Management Judgment**. Chichester: Wiley, 2004.

GU, J.; GOETSCHALCKX, M.; MCGINNIS, L. F. Research on warehouse operation: A comprehensive review. **European Journal of Operational Research**, v. 177, n. 1, p. 1–21, 2007.

GU, J.; GOETSCHALCKX, M.; MCGINNIS, L. F. Research on warehouse design and performance evaluation: A comprehensive review. **European Journal of Operational Research**, v. 203, n. 3, p. 539–549, 2010.

GUL, M. et al. Emergency department performance evaluation by an integrated simulation and interval type-2 fuzzy MCDM-based scenario analysis. **European J. of Industrial Engineering**, v. 10, n. 2, p. 196, 2016.

GUO, X.; YU, Y.; DE KOSTER, R. B. M. Impact of required storage space on storage policy performance in a unit-load warehouse. **International Journal of Production Research**, v. 54, n. 8, p. 2405–2418, 2016.

HACKMAN, S. T. et al. Benchmarking Warehousing and Distribution Operations: An Input-Output Approach. **Journal of Productivity Analysis**, v. 16, n. 1, p. 79–100, 2001.

HALL, R. W. Distance approximations for routing manual pickers in a warehouse. **IIE**

**Transactions (Institute of Industrial Engineers)**, v. 25, n. 4, p. 76–87, 1993.

HANAFIZADEH, P.; KAZAZI, A.; BOLHASANI, A. J. Portfolio design for investment companies through scenario planning Portfolio design for investment companies through scenario planning. **Management Decision**, v. 49, n. 4, p. 513–532, 2011.

HEATH, B. L.; CIARALLO, F. W.; HILL, R. R. An agent-based modeling approach to analyze the impact of warehouse congestion on cost and performance. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 67, n. 1–4, p. 563–574, 2013.

HO, W.; MA, X. The state-of-the-art integrations and applications of the analytic hierarchy process. **European Journal of Operational Research**, v. 267, n. 2, p. 399–414, 2018.

HUDOCK, B. Warehouse space and layout planning. In: **The Warehouse Management Handbook**. 2 ed ed. [s.l.] Tompkins Press, 1998. p. 229–253.

HUERTAS, J. I.; RAMÍREZ, J. D.; SALAZAR, F. T. Layout evaluation of large capacity warehouses. **Facilities**, v. 25, n. 7/8, p. 259–270, 2007.

HWANG, H.; KIM, D. G. Order-batching heuristics based on cluster analysis in a low-level picker-to-part warehousing system. **International Journal of Production Research**, v. 43, n. 17, p. 3657–3670, 2005.

ILOS. **Panamoram Ilos - Custos Logísticos no Brasil**. [s.l.: s.n.].

KAO, C. Network data envelopment analysis: A review. **European Journal of Operational Research**, v. 239, n. 1, p. 1–16, 2014.

KARVETSKI, C. W. et al. Climate change scenarios : risk and impact analysis for Alaska coastal infrastructure Bruce Sexauer. **International Journal of Risk Assessment and Management**, v. 15, n. 2/3, p. 258–274, 2011.

KARVETSKI, C. W.; LAMBERT, J. H. Evaluating Deep Uncertainties in Strategic Priority-Setting with an Application to Facility Energy Investments. **Systems Engineering**, v. 15, n. 4, p. 483–493, 2012.

KARVETSKI, C. W.; LAMBERT, J. H.; LINKOV, I. Emergent Conditions and

Multiple Criteria Analysis in Infrastructure Prioritization for Developing Countries. **Journal of Multi-criteria Decision Analysis**, v. 137, n. November 2009, p. 125–137, 2010a.

KARVETSKI, C. W.; LAMBERT, J. H.; LINKOV, I. Scenario and Multiple Criteria Decision Analysis for Energy and Environmental Security of Military and Industrial Installations. **Journal of Multi-criteria Decision Analysis**, v. 7, n. 2, p. 228–236, 2010b.

KEENEY, R. L. Decision analysis: an overview. **Operations research**, v. 30, n. 5, p. 803–838, 1982.

KEENEY, R. L. Value-focused thinking: Identifying decision opportunities and creating alternatives. **European Journal of Operational Research**, v. 92, n. 3, p. 537–549, 1996.

KEENEY, R. L.; GREGORY, R. S. Selecting attributes to measure the achievement of objectives. **Operations Research**, v. 53, n. 1, p. 2005, 2005.

KEENEY, R. L.; RAIFFA, H. **Decisions with multiple objectives—preferences and value tradeoffs**. Cambridge & New York: Cambridge University Press, 1993.

KELTON, W. D.; SADOWSKI, R. P.; STURROCK, D. T. **Simulation with ARENA**. 4. ed. New York: McGraw-Hill Higher Education, 2007.

KHAN, K. S. et al. Five steps to conducting a systematic review. **Jrsm**, v. 96, n. 3, p. 118–121, 2003.

KHANZODE, V.; SHAH, B. A comprehensive review of warehouse operational issues. **International Journal of Logistics Systems and Management**, v. 26, n. 3, p. 346, 2017.

KISHITA, Y.; NAKATSUKA, N.; AKAMATSU, F. Scenario analysis for sustainable woody biomass energy businesses: The case study of a Japanese rural community. **Journal of Cleaner Production**, v. 142, p. 1471–1485, 2017.

KOSTER, R. DE; LE-DUC, T.; ROODBERGEN, K. J. Design and control of warehouse order picking: A literature review. **European Journal of Operational Research**, v. 182, n. 2, p. 481–501, 2007.

KUO, Y. et al. Using simulation and multi-criteria methods to provide robust solutions

to dispatching problems in a flow shop with multiple processors. **Mathematics and Computers in Simulation**, v. 78, n. 1, p. 40–56, 2008.

LAMBERT, J. H. et al. Climate Change Influence on Priority Setting for Transportation Infrastructure Assets. **Journal of Infrastructure Systems**, v. 19, n. 1, p. 36–46, 2013.

LAW, A. M.; KELTON, W. D. **Simulation modeling and analysis**. New York: McGraw-Hill, 1991. v. 2

LIENERT, J. et al. Structured decision-making for sustainable water infrastructure planning and four future scenarios. **EURO Journal on Decision Processes**, v. 3, n. 1–2, p. 107–140, 2015.

LOPES, H. DOS S. et al. Scenario analysis of Brazilian soybean exports via discrete event simulation applied to soybean transportation: The case of Mato Grosso State. **Research in Transportation Business and Management**, v. 25, n. October, p. 66–75, 2017.

MAKRIDAKIS, S.; GABA, A. Judgment: its role and value for strategy. **INSEAD**, 1998.

MENG, C. et al. An integrated simulation and AHP approach to vegetable grafting operation design. **Computers and electronics in agriculture**, v. 147 (Part, p. 362–372, 2014.

MICHNIK, J. SCENARIO PLANNING + MCDA PROCEDURE. **Foundations of Computing and Decision Sciences**, v. 38, n. 3, p. 207–220, 2013.

MILLETT, S. M. Should probabilities be used with scenarios. **Journal of futures Studies**, v. 13, n. 4, p. 61–68, 2009.

MIN, H.; PARK, B.-I. A hybrid Data Envelopment Analysis and simulation methodology for measuring capacity utilisation and throughput efficiency of container terminals. **International journal of logistics systems and management**, v. 4, n. 6, p. 650–672, 2008.

MONTIBELLER, G.; FRANCO, A. Decision and Risk Analysis for the evaluation of Strategic Options. In: **Supporting strategy: frameworks, methods and models**. 1. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2007. p. 251–284.

MONTIBELLER, G.; GUMMER, H.; TUMIDEI, D. Combining scenario planning and multi-criteria decision analysis in practice. **Journal of Multi-Criteria Decision Analysis**, v. 14, n. 1–3, p. 5–20, 2006.

NAVA, M. R.; DAIM, T. U. Evaluating alternative fuels in USA : a proposed forecasting framework using AHP and scenarios. **International Journal of Automotive Technology and Management**, v. 7, n. 4, p. 289–313, 2007.

OPACIC, L.; SOWLATI, T.; MOBINI, M. Design and development of a simulation-based decision support tool to improve the production process at an engineered wood products mill. **International Journal of Production Economics**, v. 199, n. March 2017, p. 209–219, 2018.

OZERNOY, V. M. Choosing The “Best” Multiple Criterly Decision-Making Method. **INFOR: Information Systems and Operational Research**, v. 30, n. 2, p. 159–171, 1992.

PARLAK, A. I. et al. Population behavioral scenarios influencing radiological disaster preparedness and planning. **Accident Analysis and Prevention**, v. 48, n. September, p. 353–362, 2012.

PETERSEN, C. G. An evaluation of order picking routeing policies. **International Journal of Operations and Production Management**, v. 17, n. 11, p. 1098–1111, 1997.

PETERSEN, C. G. The impact of routing and storage policies on warehouse efficiency. **International Journal of Operations and Production Management**, v. 19, n. 10, p. 1053–1064, 1999.

PETERSEN, C. G. An Evaluation of Order Picking Policies for Mail Order Companies. **Production and Operations Management**, v. 9, n. 4, p. 319–335, 2000.

PETERSEN, C. G. Considerations in order picking zone configuration. **International Journal of Operations and Production Management**, v. 22, n. 7–8, p. 793–805, 2002.

PETERSEN, C. G.; AASE, G. A comparison of picking, storage, and routing policies in manual order picking. **International Journal of Production Economics**, v. 92, n. 1, p. 11–19, 2004.

PETERSEN, C. G.; AASE, G. R. Improving Order Picking Efficiency with the Use of Cross Aisles and Storage Policies. **Open Journal of Business and Management**, v. 05, n. 01, p. 95–104, 2017.

PETERSEN, C. G.; SCHMENNER, R. W. An evaluation of routing and volume-based storage policies in an order picking operation. **Decision Sciences**, v. 30, n. 2, p. 481–501, 1999.

PETERSEN, C. G.; SIU, C.; HEISER, D. R. Improving order picking performance utilizing slotting and golden zone storage. v. 25, n. 10, p. 997–1012, 2005.

POHL, L. M.; MELLER, R. D.; GUE, K. R. Optimizing fishbone aisles for dual-command operations in a warehouse. **Naval Research Logistics**, v. 56, n. 5, p. 389–403, 2009.

POHL, L. M.; MELLER, R. D.; GUE, K. R. Turnover-based storage in non-traditional unit-load warehouse designs. **IIE Transactions (Institute of Industrial Engineers)**, v. 43, n. 10, p. 703–720, 2011a.

POHL, L. M.; MELLER, R. D.; GUE, K. R. Turnover-based storage in non-traditional unit-load warehouse designs. **IIE Transactions**, v. 43, n. 10, p. 703–720, 2011b.

RAM, C.; MONTIBELLER, G. Exploring the impact of evaluating strategic options in a scenario-based multi-criteria framework. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 80, n. 4, p. 657–672, 2013.

RAM, C.; MONTIBELLER, G.; MORTON, A. Extending the use of scenario planning and MCDA for the evaluation of strategic options. **Journal of the Operational Research Society**, v. 62, n. 5, p. 817–829, 2011.

RAO, S. S.; ADIL, G. K. Analytical models for a new turnover-based hybrid storage policy in unit-load warehouses. **International Journal of Production Research**, v. 55, n. 2, p. 327–346, 2017.

RATLIFF, H. D.; ROSENTHAL, A. S. Order-Picking in a Rectangular Warehouse: A Solvable Case of the Traveling Salesman Problem. **Operations Research**, v. 31, n. 3, p. 507–521, 1983.

ROBERTS, R.; GOODWIN, P. Weight approximations in multi-attribute decision

models. **Journal of Multi-Criteria Decision Analysis**, v. 11, n. 6, p. 291–303, 2002.

ROODBERGEN, K. J.; KOSTER, R. DE. Routing methods for warehouses with multiple cross aisles. **International Journal of Production Research**, v. 39, n. 9, p. 1865–1883, 2001.

ROODBERGEN, K. J.; VIS, I. F. A.; TAYLOR, G. D. Simultaneous determination of warehouse layout and control policies. **International Journal of Production Research**, v. 53, n. 11, p. 3306–3326, 2015.

ROODBERGEN, K.; VIS, I. A model for warehouse layout. **IIE Transactions**, v. 38, n. 10, p. 799–811, 2006.

ROUWENHORST, B. et al. Warehouse design and control: Framework and literature review. **European Journal of Operational Research**, v. 122, n. 3, p. 515–533, 2000.

SAATY, T. L. The Analytic Hierarchy Process. **McGraw-Hill Inc**, 1980.

SAMEIE, H.; ARVAN, M. A simulation-based Data Envelopment Analysis (DEA) model to evaluate wind plants locations. **Decision Science Letters**, v. 4, n. 2, p. 165–180, 2015.

SANTOYO-CASTELAZO, E.; AZAPAGIC, A. Sustainability assessment of energy systems: integrating environmental, economic and social aspects. **Journal of Cleaner Production**, v. 80, n. 2014, p. 119–138, 2014.

SAUNDERS, M.; LEWIS, P.; THORNHILL, A. **Research Methods for Business Students**. Harlow, United Kingdom: Pearson education, 2008.

SCHNAARS, S. P. How to Develop and Use Scenarios. **Long range planning**, v. 20, n. 1, p. 105–114, 1987.

SCHOEMAKER, P. J. H. Scenario planning: a tool for strategic thinking. **Sloan management review**, v. 36, n. 2, p. 25–50, 1995.

SCHOLTEN, L. et al. ScienceDirect Strategic rehabilitation planning of piped water networks using multi-criteria decision analysis. **Water Research**, v. 49, p. 124–143, 2013.

SCHOLZ, A.; WÄSCHER, G. Order Batching and Picker Routing in manual order

picking systems: the benefits of integrated routing. **Central European Journal of Operations Research**, v. 25, n. 2, p. 491–520, 2017.

SHANNON, R. Introduction To the Art and Science of Simulation. **Proceedings of the 30th conference on Winter simulation**, p. 7–14, 1998.

SHI, J.; PENG, Y.; ERDEM, E. Simulation analysis on patient visit efficiency of a typical VA primary care clinic with complex characteristics. **Simulation Modelling Practice and Theory**, v. 47, p. 165–181, 2014.

SHQAIR, M.; ALTARAZI, S.; AL-SHIHABI, S. A statistical study employing agent-based modeling to estimate the effects of different warehouse parameters on the distance traveled in warehouses. **Simulation Modelling Practice and Theory**, v. 49, p. 122–135, 2014.

SILVA, L. E. DA; DORATIOTTO, K.; VIEIRA, J. G. V. Outsourcing or insourcing logistics activities: a Brazilian case study. **International Journal of Integrated Supply Management**, v. 12, n. 3, p. 167–192, 2019.

SINDIPEÇAS; ABIPEÇAS. **Brazilian Auto Parts Industry Performance 2018**. São Paulo: [s.n.].

SIPAHI, S.; TIMOR, M. The analytic hierarchy process and analytic network process: an overview of applications. **Management Decision**, v. 48, n. 5, p. 775–808, 2010.

STAUDT, F. H. et al. Warehouse performance measurement: A literature review. **International Journal of Production Research**, v. 53, n. 18, p. 5524–5544, 2015.

STEWART, T. J.; FRENCH, S.; RIOS, J. Integrating multicriteria decision analysis and scenario planning — Review and extension. **Omega**, v. 41, n. 4, p. 679–688, 2013.

TAYLOR, P. et al. Optimisation of facility layout design problem with safety and environmental factors by stochastic DEA and simulation approach. **International Journal of Production Research**, v. 53, n. 11, p. 37–41, 2015a.

TAYLOR, P. et al. A hybrid approach for selecting material handling equipment in a warehouse. **International Journal of Management Science and Engineering Management**, n. July, 2015b.

THOMAS, L. M.; MELLER, R. D. Analytical models for warehouse configuration. **IIE Transactions (Institute of Industrial Engineers)**, v. 46, n. 9, p. 928–947, 2014.

THOMAS, L. M.; MELLER, R. D. Developing design guidelines for a case-picking warehouse. **International Journal of Production Economics**, v. 170, p. 741–762, 2015.

TOMPKINS, J. A. et al. **Facilities Planning**. 4 ed ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2010.

TOMPKINS, J. A.; SIMITH, J. D. **The Warehouse Management Handbook**. 2. ed. Raleigh: Tompkins Press, 1998.

TORABI, M.; MAHLOOJI, H. An integrated simulation-DEA approach to multi-criteria ranking of scenarios for execution of operations in a construction project. **Iranian Journal of Management Studies**, v. 9, n. 4, p. 801–827, 2016.

TRANFIELD, D.; DENYER, D.; SMART, P. **Towards a Methodology for Developing Evidence-Informed Management Knowledge by Means of Systematic Review** **British Journal of Management**, 2003.

TUSON, M. et al. Modelling for the proposed roll-out of the ‘111’ service in Wales: a case study. **Health Care Management Science**, v. 21, n. 2, p. 159–176, 2018.

UPADHYAY, S. P.; ASKARI-NASAB, H. Simulation and optimization approach for uncertainty-based short-term planning in open pit mines. **International Journal of Mining Science and Technology**, v. 28, n. 2, p. 153–166, 2018.

VAN DER HEIJDEN, K. **Scenarios: the art of strategic conversation**. 2. ed. [s.l.] John Wiley & Sons, 2011.

VAUGHAN, T. S.; PETERSEN, C. G. The effect of warehouse cross aisles on order picking efficiency. **International Journal of Production Research**, v. 37, n. 4, p. 881–897, 1999.

VELASQUEZ, M.; HESTER, P. T. An analysis of multi-criteria decision making methods An Analysis of Multi-Criteria Decision Making Methods. **International Journal of Operations Research**, v. 5, n. 1, p. 49–58, 2013.

VENKITASUBRAMONY, R.; ADIL, G. K. Design of an order-picking warehouse factoring vertical travel and space sharing. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 91, n. 5–8, p. 1921–1934, 2017.

VIEIRA, J. G. V. et al. An AHP-based framework for logistics operations in distribution centres. **International Journal of Production Economics**, v. 187, n. June 2016, p. 246–259, 2017.

VINCKE, P. Robust solutions and methods in decision-aid. **Journal of Multi-Criteria Decision Analysis**, v. 8, p. 181–187, 1999.

VOSS, C.; TSIKRIKTSIS, N.; FROHLICH, M. Case research in operations management. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 22, n. 2, p. 195–219, 2002.

WENG, S.-J. et al. **Using simulation and data envelopment analysis in optimal healthcare efficiency allocations**. Proceedings of the 2011 Winter Simulation Conference. **Anais...2011**

XU, T.; MOON, D. H.; BAEK, S. G. A simulation study integrated with analytic hierarchy process (AHP) in an automotive manufacturing system. **Simulation**, v. 88, n. 4, p. 450–463, 2012.

YIN, R. K. **Estudo de Caso Planejamento e Métodos**. 2 ed. ed. Porto Alegre: Bookman, 2001.



## APÊNDICES

### Apêndice A – Roteiros de entrevista semiestruturada

Primeiramente foi feito um agradecimento ao entrevistado pela disposição e tempo de participar da entrevista e desta dissertação. Em seguida foi informado que todas as respostas seriam mantidas em confidencialidade e que não precisaria responder à uma questão caso não quisesse. Por fim, foi informado que poderia fazer qualquer comentário extra que julgasse necessário.

#### 1. Perguntas a respeito do perfil do tomador de decisão e da empresa

Qual a sua experiência com trabalhos relacionados a armazenagem?

Há quanto tempo você trabalha com funções voltadas para o armazém?

Quais as atividades você desempenha?

Qual o tamanho da sua operação em termos de faturamento mensal e quantidade de linhas faturadas?

#### 2. Perguntas a respeito de *layout* e políticas de controle operacional

Quais são as políticas de controle operacionais e o arranjo do *layout* vigentes no armazém?

Como foram definidas?

Quais fatores você consideraria relevante na tomada de decisão das políticas de controle operacional e *layout*?

Com qual frequência a política de roteirização é alterada?

Você acredita que uma ferramenta de auxílio à tomada de decisão envolvendo a avaliação de multicritérios e cenários, possa auxiliar na escolha da combinação mais robusta entre alternativas de *layout* e alternativas de políticas de estocagem, separação e roteirização?

#### 3. Perguntas a respeito dos critérios e alternativas de escolha

Com relação a esta estrutura hierárquica de objetivos (previamente estruturada, baseada nos critérios existentes na literatura), você concorda ou não concorda com os critérios selecionados?

Você adicionaria ou excluiria algum critério para esta análise? Se sim, qual e por quê?

Das alternativas das políticas operacionais e arranjo de *layout* para seleção, quais você julga adequada para sua operação?

Você adicionaria ou excluiria alguma alternativa para esta análise? Se sim, qual e por quê?

#### 4. Independência dos critérios

De modo a verificar a independência dos critérios, deve-se a realizar o seguinte teste (exemplo hipotético):

Suponha que se deseje verificar a independência preferencial do critério “custo do equipamento de armazenagem” em relação ao critério “tempo médio de separação de um pedido”. Conforme mostra a FIGURA 36, são definidos dois valores para “custo do equipamento de armazenagem” e dois valores para “tempo médio de separação de um pedido”. Em uma primeira análise, deve-se testar o mesmo valor de “tempo médio de separação de um pedido” para os dois valores de “custo do equipamento de armazenagem”. Logo, solicita-se ao tomador de decisão a fazer a escolha da melhor alternativa, ou seja, para o mesmo valor de “tempo médio de separação de um pedido”, o TD deve escolher o melhor valor para “custo do equipamento de armazenagem”. Em seguida, na segunda análise, repete-se a variação de valores do critério “custo do equipamento de armazenagem”, mas utiliza-se o segundo valor para “tempo médio de separação de um pedido”. Para que seja constatada a independência preferencial entre os critérios, a escolha do decisor em relação a “custo do equipamento de armazenagem” deve ser a mesma nas duas análises, ou seja, deve ser independente do “tempo médio de separação de um pedido”, como evidencia o exemplo hipotético. Este teste deve ser repetido de maneira inversa, de modo a constatar a independência mútua entre os critérios. Por fim, cada par de critérios utilizados na análise de decisão deve ser testado conforme o exemplo.

FIGURA 36 - Teste para avaliar a independência dos critérios

|   |
|---|
| <p><b>Critério 1 - Custo do equipamento de armazenagem</b><br/>Opções de avaliação: "R\$ 10.000,00" ou "R\$ 8.000,00"</p> <p><b>Critério 2 - Tempo médio de separação de um pedido</b><br/>Opções de avaliação: "10 minutos" ou "12 minutos"</p> <p><b>Primeira análise:</b><br/>Opção 1: custo R\$10.000,00 e tempo 10 minutos<br/>Opção 2: custo R\$ 8.000,00 e tempo 10 minutos (<b>Alternativa escolhida</b>)</p> <p><b>Segunda análise:</b><br/>Opção 1: custo R\$10.000,00 e tempo 12 minutos<br/>Opção 2: custo R\$ 8.000,00 e tempo 12 minutos (<b>Alternativa escolhida</b>)</p> |
|---|

Fonte: Próprio autor.

## 5. Identificação das principais incertezas

Estas incertezas são aplicáveis a sua operação? Se não, por quê?

Quais outras incertezas você consideraria na análise? Por quê?

## 6. Exemplo da elicitación de pesos dos critérios utilizando *swing weights*

Para uma alternativa hipotética, considere todos os critérios em seu pior nível. Caso você pudesse mudar um destes critérios para seu nível mais alto, qual critério você escolheria? Este critério será valorado com 100 pontos.

E depois deste, qual você escolheria? Considerando que o primeiro critério foi valorado em 100 pontos, em quanto você valorizaria uma mudança do pior para o melhor nível deste segundo critério em relação ao primeiro?

Este procedimento deve ser repetido até o fim dos critérios.

Para cada cenário montado, você mudaria a preferência pelos critérios analisados?

Um exemplo mais detalhado é mostrado no Apêndice H.

## 7. Elicitación de pesos dos critérios utilizando ROC

Para uma alternativa hipotética, considere todos os critérios em seu pior nível. Caso você pudesse mudar um destes critérios para seu nível mais alto, qual critério você escolheria?

E depois deste, qual você escolheria? Faça isto até acabar os critérios.

Para cada cenário montado, você mudaria a preferência pelos critérios analisados?

## Apêndice B – Construção de cenários

Ram, Montibeller e Morton (2011) sugerem os seguintes passos para construção de cenários. Os mesmos são ilustrados com um exemplo específico para esta dissertação.

1. Definir os limites de cada incerteza e então estabelecer 2 a 3 condições intermediárias.

Segundo os autores, os passos seguintes podem ser uteis:

- *Considere o melhor e o pior nível (plausível) que um critério possa alcançar.*

Considerando um critério hipotético chamado *nível de serviço* (medido por meio da quantidade de pedidos separados dentro de um período de tempo), seu melhor nível seria 100% dos pedidos separados e seu pior nível seria, por exemplo, 80% dos pedidos separados.

- *Tente visualizar quais níveis de incerteza pode levar a esta situação. Estes níveis definem os limites.*

Considerando a incerteza hipotética *TEC dos pedidos*, o nível de incerteza que poderia ocasionar 100% do NS seria *X% (abaixo do vigente)* e o nível de incerteza que poderia ocasionar 80% do NS seria, hipoteticamente, *Y% (acima do vigente)*. Estes níveis de *TEC dos pedidos* definem os limites.

- *Combinações de condições (uma condição de cada incerteza) representa diferentes cenários.*

2. Checar cada cenário para consistência, ou seja, se as relações entre as incertezas fazem sentido (RAM; MONTIBELLER, 2013).

### Apêndice C – Pesos ROC (*Rank Order Centroid*)

TABELA 41 – Pesos Roc para o número de critérios indicados

| Ordem | Número de critérios |        |        |        |        |        |        |        |
|-------|---------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|       | 9                   | 8      | 7      | 6      | 5      | 4      | 3      | 2      |
| 1     | 0,3143              | 0,3397 | 0,3704 | 0,4083 | 0,4567 | 0,5208 | 0,6111 | 0,7500 |
| 2     | 0,2032              | 0,2147 | 0,2276 | 0,2417 | 0,2567 | 0,2708 | 0,2778 | 0,2500 |
| 3     | 0,1477              | 0,1522 | 0,1561 | 0,1583 | 0,1567 | 0,1458 | 0,1111 |        |
| 4     | 0,1106              | 0,1106 | 0,1085 | 0,1028 | 0,0900 | 0,0625 |        |        |
| 5     | 0,0828              | 0,0793 | 0,0728 | 0,0611 | 0,0400 |        |        |        |
| 6     | 0,0606              | 0,0543 | 0,0442 | 0,0278 |        |        |        |        |
| 7     | 0,0421              | 0,0335 | 0,0204 |        |        |        |        |        |
| 8     | 0,0262              | 0,0156 |        |        |        |        |        |        |
| 9     | 0,0123              |        |        |        |        |        |        |        |

Fonte: Edwards e Barron (1994).

### Apêndice D – Quantidade de pedidos

TABELA 42 – Quantidade de pedidos por período de 20 minutos

| Período da coleta | Quantidade de pedidos (unidades) |       |       |       |       |
|-------------------|----------------------------------|-------|-------|-------|-------|
|                   | DIA 1                            | DIA 2 | DIA 3 | DIA 4 | DIA 5 |
| 08:00 - 08:20     | 2                                | 1     | 3     | 2     | 2     |
| 08:20 - 08:40     | 4                                | 3     | 1     | 2     | 2     |
| 08:40 - 09:00     | 10                               | 12    | 7     | 11    | 10    |
| 09:00 - 09:20     | 11                               | 8     | 5     | 9     | 8     |
| 09:20 - 09:40     | 9                                | 13    | 8     | 10    | 10    |
| 09:40 - 10:00     | 20                               | 16    | 21    | 17    | 18    |
| 10:00 - 10:20     | 20                               | 21    | 22    | 23    | 20    |
| 10:20 - 10:40     | 30                               | 25    | 20    | 24    | 24    |
| 10:40 - 11:00     | 30                               | 27    | 23    | 26    | 26    |
| 11:00 - 11:20     | 31                               | 30    | 27    | 27    | 28    |
| 11:20 - 11:40     | 29                               | 26    | 23    | 24    | 25    |
| 11:40 - 12:00     | 23                               | 21    | 24    | 20    | 21    |
| 12:00 - 12:20     | 1                                | 1     | 2     | 3     | 1     |
| 12:20 - 12:40     | 3                                | 3     | 2     | 4     | 3     |
| 12:40 - 13:00     | 1                                | 1     | 3     | 2     | 1     |
| 13:00 - 13:20     | 11                               | 10    | 8     | 9     | 9     |

| Período da coleta |       | Quantidade de pedidos (unidades) |       |       |       |       |
|-------------------|-------|----------------------------------|-------|-------|-------|-------|
|                   |       | DIA 1                            | DIA 2 | DIA 3 | DIA 4 | DIA 5 |
| 13:20             | 13:40 | 12                               | 13    | 7     | 10    | 10    |
| 13:40             | 14:00 | 13                               | 17    | 11    | 12    | 13    |
| 14:00             | 14:20 | 10                               | 12    | 9     | 10    | 10    |
| 14:20             | 14:40 | 14                               | 15    | 16    | 15    | 15    |
| 14:40             | 15:00 | 23                               | 24    | 21    | 23    | 22    |
| 15:00             | 15:20 | 22                               | 19    | 20    | 21    | 22    |
| 15:20             | 15:40 | 25                               | 23    | 23    | 22    | 23    |
| 15:40             | 16:00 | 29                               | 30    | 26    | 27    | 28    |
| 16:00             | 16:20 | 25                               | 20    | 23    | 22    | 21    |
| 16:20             | 16:40 | 21                               | 23    | 24    | 21    | 20    |
| 16:40             | 17:00 | 25                               | 21    | 22    | 22    | 22    |
| 17:00             | 17:20 | 30                               | 24    | 23    | 22    | 24    |
| 17:20             | 17:40 | 24                               | 21    | 27    | 25    | 23    |
| 17:40             | 18:00 | 23                               | 30    | 20    | 25    | 22    |
| Total de pedidos  |       | 531                              | 510   | 471   | 490   | 483   |

Fonte: Próprio autor.

TABELA 43 – TEC dos pedidos em minutos

| Período da coleta<br>(horas) |       | Tempo médio entre chegada de pedidos (minutos) |       |       |       |       | Intervalo<br>(horas)     |
|------------------------------|-------|--|-------|-------|-------|-------|--------------------------|
|                              |       | DIA 1  | DIA 2 | DIA 3 | DIA 4 | DIA 5 |                          |
| 08:00                        | 08:20 | 10,00  | 20,00 | 6,67  | 10,00 | 10,00 | A (8:00<br>as 8:40)      |
| 08:20                        | 08:40 | 5,00   | 6,67  | 20,00 | 10,00 | 10,00 |                          |
| 08:40                        | 09:00 | 2,00   | 1,67  | 2,86  | 1,82  | 2,00  | B (8:40<br>as 9:40)      |
| 09:00                        | 09:20 | 1,82   | 2,50  | 4,00  | 2,22  | 2,50  |                          |
| 09:20                        | 09:40 | 2,22   | 1,54  | 2,50  | 2,00  | 2,00  | C (9:40<br>as<br>12:00)  |
| 09:40                        | 10:00 | 1,00   | 1,25  | 0,95  | 1,18  | 1,11  |                          |
| 10:00                        | 10:20 | 1,00   | 0,95  | 0,91  | 0,87  | 1,00  | C (9:40<br>as<br>12:00)  |
| 10:20                        | 10:40 | 0,67   | 0,80  | 1,00  | 0,83  | 0,83  |                          |
| 10:40                        | 11:00 | 0,67   | 0,74  | 0,87  | 0,77  | 0,77  | C (9:40<br>as<br>12:00)  |
| 11:00                        | 11:20 | 0,65   | 0,67  | 0,74  | 0,74  | 0,71  |                          |
| 11:20                        | 11:40 | 0,69   | 0,77  | 0,87  | 0,83  | 0,80  | C (9:40<br>as<br>12:00)  |
| 11:40                        | 12:00 | 0,87   | 0,95  | 0,83  | 1,00  | 0,95  |                          |
| 12:00                        | 12:20 | 20,00  | 20,00 | 10,00 | 6,67  | 20,00 | A (12:00<br>as<br>13:00) |
| 12:20                        | 12:40 | 6,67   | 6,67  | 10,00 | 5,00  | 6,67  |                          |
| 12:40                        | 13:00 | 20,00  | 20,00 | 6,67  | 10,00 | 20,00 | B (13:00<br>as<br>14:40) |
| 13:00                        | 13:20 | 1,82   | 2,00  | 2,50  | 2,22  | 2,22  |                          |
| 13:20                        | 13:40 | 1,67   | 1,54  | 2,86  | 2,00  | 2,00  | B (13:00<br>as<br>14:40) |
| 13:40                        | 14:00 | 1,54   | 1,18  | 1,82  | 1,67  | 1,54  |                          |
| 14:00                        | 14:20 | 2,00   | 1,67  | 2,22  | 2,00  | 2,00  | B (13:00<br>as<br>14:40) |
| 14:20                        | 14:40 | 1,43   | 1,33  | 1,25  | 1,33  | 1,33  |                          |

| Período da coleta<br>(horas) |       | Tempo médio entre chegada de pedidos (minutos) |       |       |       |       | Intervalo<br>(horas)     |
|------------------------------|-------|--|-------|-------|-------|-------|--------------------------|
|                              |       | DIA 1  | DIA 2 | DIA 3 | DIA 4 | DIA 5 |                          |
| 14:40                        | 15:00 | 0,87   | 0,83  | 0,95  | 0,87  | 0,91  | D (14:40<br>as<br>18:00) |
| 15:00                        | 15:20 | 0,91   | 1,05  | 1,00  | 0,95  | 0,91  |                          |
| 15:20                        | 15:40 | 0,80   | 0,87  | 0,87  | 0,91  | 0,87  |                          |
| 15:40                        | 16:00 | 0,69   | 0,67  | 0,77  | 0,74  | 0,71  |                          |
| 16:00                        | 16:20 | 0,80   | 1,00  | 0,87  | 0,91  | 0,95  |                          |
| 16:20                        | 16:40 | 0,95   | 0,87  | 0,83  | 0,95  | 1,00  |                          |
| 16:40                        | 17:00 | 0,80   | 0,95  | 0,91  | 0,91  | 0,91  |                          |
| 17:00                        | 17:20 | 0,67   | 0,83  | 0,87  | 0,91  | 0,83  |                          |
| 17:20                        | 17:40 | 0,83   | 0,95  | 0,74  | 0,80  | 0,87  |                          |
| 17:40                        | 18:00 | 0,87   | 0,67  | 1,00  | 0,80  | 0,91  |                          |

Fonte: Próprio autor.

### Apêndice E – Repostas do TD a respeito da entrevista

O *layout* vigente no armazém da empresa possui um arranjo vertical e foi definido buscando-se a maior quantidade de posições em função das restrições do galpão (tamanho e formato da área e posição do ponto de expedição). Os corredores são estreitos e não permitem a passagem de dois separadores ao mesmo tempo e em sentidos opostos. Desde a última mudança de prédio, há quatro anos, já tentou-se revisar o *layout* de modo a aumentar-se a quantidade de posições de armazenagem, mas em função da possível perda de mobilidade dentro do armazém, não foi feita a alteração.

A política de estocagem vigente é a por grupos de produtos e classes com a distribuição *across aisle*. Além disso, dentro desta distribuição, o armazém utiliza a estratégia *golden zone*, que estoca itens de alta demanda a uma altura entre a cintura e o ombro do separador (PETERSEN; SIU; HEISER, 2005). Este conjunto de estratégias foram adotadas em função do mix de produtos (diferentes pesos e medidas) armazenados, classes de frequência de separação dos produtos e considerações sobre a ergonomia do separador que segundo o TD afetam significativamente o tempo de separação dos pedidos.

A política de separação utilizada é a discreta (por pedidos) e é utilizada em função da demanda de movimentação, facilidade de aplicação entre os separadores e pela segurança de se manter a integridade dos pedidos. Todavia, o TD informou que a empresa está avaliando a estratégia por lote e área.

A política de roteirização adotada é a transversal em função da sua facilidade de utilização e não gerar confusão entre os separadores. Foi definida por meio da nomenclatura dada aos corredores e posições, ou seja, a lista de separação segue uma ordem alfanumérica crescente. Neste sentido, os itens de maior frequência de separação estão nos primeiros corredores próximos a expedição.

## Apêndice F – Resultados do modelo de simulação

TABELA 44 – Tempo total de separação de todos os pedidos (dias)

| Alternativas | Cenários |       |       |       |       |       |       |       | Maior valor |
|--------------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------------|
|              | MMM      | PMM   | MPM   | MMP   | PPP   | MPP   | PMP   | PPM   |             |
| 1111         | 30,01    | 30,02 | 29,25 | 36,01 | 35,92 | 36,91 | 36,01 | 30,13 | 36,91       |
| 1112         | 30,02    | 30,02 | 30,31 | 36,02 | 35,23 | 35,53 | 36,02 | 31,28 | 36,02       |
| 1121         | 30,02    | 30,02 | 30,25 | 36,01 | 35,81 | 36,25 | 36,02 | 29,99 | 36,25       |
| 1122         | 30,02    | 30,01 | 29,84 | 36,02 | 36,77 | 35,78 | 36,02 | 29,57 | 36,77       |
| 1211         | 30,01    | 31,57 | 30,23 | 36,02 | 38,11 | 36,89 | 37,83 | 31,45 | 38,11       |
| 1212         | 30,01    | 32,76 | 31,00 | 36,03 | 39,13 | 36,61 | 39,24 | 33,15 | 39,24       |
| 1221         | 30,02    | 30,02 | 31,00 | 36,03 | 35,74 | 36,23 | 36,02 | 30,22 | 36,23       |
| 1222         | 30,03    | 30,01 | 30,33 | 36,02 | 36,78 | 36,00 | 36,02 | 30,99 | 36,78       |
| 1311         | 30,01    | 30,02 | 30,22 | 36,02 | 35,88 | 36,01 | 36,02 | 30,02 | 36,02       |
| 1312         | 30,01    | 30,02 | 29,56 | 36,01 | 36,82 | 36,06 | 36,02 | 30,31 | 36,82       |
| 1321         | 30,01    | 30,01 | 30,67 | 36,02 | 37,23 | 35,99 | 36,01 | 30,56 | 37,23       |
| 1322         | 30,01    | 30,02 | 30,34 | 36,01 | 35,84 | 36,12 | 36,03 | 29,98 | 36,12       |
| 1411         | 30,01    | 30,02 | 30,84 | 36,01 | 36,11 | 36,74 | 36,02 | 29,85 | 36,74       |
| 1412         | 30,01    | 30,02 | 30,20 | 36,01 | 36,36 | 35,96 | 36,02 | 30,12 | 36,36       |
| 1421         | 30,01    | 30,01 | 30,92 | 36,03 | 36,11 | 35,41 | 36,02 | 30,76 | 36,11       |
| 1422         | 30,01    | 30,01 | 29,03 | 36,01 | 37,16 | 35,82 | 36,02 | 29,52 | 37,16       |
| 2111         | 30,01    | 30,02 | 38,36 | 36,02 | 44,48 | 46,35 | 36,02 | 37,07 | 46,35       |
| 2112         | 30,01    | 30,02 | 37,92 | 36,01 | 45,81 | 45,54 | 36,03 | 38,40 | 45,81       |
| 2121         | 30,01    | 30,01 | 38,23 | 36,01 | 44,88 | 46,12 | 36,03 | 37,62 | 46,12       |
| 2122         | 30,02    | 30,02 | 39,22 | 36,01 | 44,11 | 46,76 | 36,02 | 36,62 | 46,76       |
| 2211         | 30,02    | 33,29 | 38,49 | 36,04 | 45,62 | 45,91 | 39,94 | 37,90 | 45,91       |
| 2212         | 30,04    | 34,14 | 37,65 | 36,02 | 46,12 | 45,21 | 40,86 | 38,25 | 46,12       |
| 2221         | 30,02    | 30,02 | 37,28 | 36,02 | 45,25 | 45,01 | 36,03 | 37,81 | 45,25       |
| 2222         | 30,02    | 30,07 | 37,72 | 36,02 | 45,21 | 45,02 | 36,07 | 37,49 | 45,21       |
| 2311         | 30,01    | 30,02 | 37,92 | 36,02 | 46,14 | 45,05 | 36,01 | 38,62 | 46,14       |
| 2312         | 30,01    | 30,01 | 37,07 | 36,01 | 44,88 | 44,63 | 36,02 | 37,46 | 44,88       |
| 2321         | 30,01    | 30,02 | 38,56 | 36,01 | 45,60 | 46,14 | 36,01 | 37,69 | 46,14       |
| 2322         | 30,02    | 30,01 | 38,32 | 36,02 | 44,58 | 45,72 | 36,01 | 37,08 | 45,72       |
| 2411         | 30,03    | 30,02 | 38,84 | 36,01 | 46,27 | 45,92 | 36,03 | 38,36 | 46,27       |
| 2412         | 30,02    | 30,02 | 38,18 | 36,02 | 45,79 | 45,49 | 36,02 | 38,21 | 45,79       |

| Alternativas | Cenários |       |       |       |       |       |       |       | Maior valor |
|--------------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------------|
|              | MMM      | PMM   | MPM   | MMP   | PPP   | MPP   | PMP   | PPM   |             |
| 2421         | 30,02    | 30,02 | 37,96 | 36,02 | 45,51 | 45,64 | 36,02 | 37,92 | 45,64       |
| 2422         | 30,01    | 30,03 | 37,56 | 36,02 | 45,97 | 45,01 | 36,02 | 38,21 | 45,97       |

Fonte: Próprio autor.

TABELA 45 – Tempo total médio de separação dos pedidos por dia (horas)

| Alternativas | Cenários |       |       |       |       |       |       |       | Maior Valor |
|--------------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------------|
|              | MMM      | PMM   | MPM   | MMP   | PPP   | MPP   | PMP   | PPM   |             |
| 1111         | 10,00    | 10,01 | 9,75  | 10,00 | 9,98  | 10,25 | 10,00 | 10,04 | 10,25       |
| 1112         | 10,01    | 10,01 | 10,10 | 10,01 | 9,79  | 9,87  | 10,01 | 10,43 | 10,43       |
| 1121         | 10,01    | 10,01 | 10,08 | 10,00 | 9,95  | 10,07 | 10,01 | 10,00 | 10,08       |
| 1122         | 10,01    | 10,00 | 9,95  | 10,01 | 10,21 | 9,94  | 10,01 | 9,86  | 10,21       |
| 1211         | 10,00    | 10,52 | 10,08 | 10,01 | 10,59 | 10,25 | 10,51 | 10,48 | 10,59       |
| 1212         | 10,00    | 10,92 | 10,33 | 10,01 | 10,87 | 10,17 | 10,90 | 11,05 | 11,05       |
| 1221         | 10,01    | 10,01 | 10,33 | 10,01 | 9,93  | 10,06 | 10,01 | 10,07 | 10,33       |
| 1222         | 10,01    | 10,00 | 10,11 | 10,01 | 10,22 | 10,00 | 10,01 | 10,33 | 10,33       |
| 1311         | 10,00    | 10,01 | 10,07 | 10,00 | 9,97  | 10,00 | 10,00 | 10,01 | 10,07       |
| 1312         | 10,00    | 10,01 | 9,85  | 10,00 | 10,23 | 10,02 | 10,01 | 10,10 | 10,23       |
| 1321         | 10,00    | 10,00 | 10,22 | 10,01 | 10,34 | 10,00 | 10,00 | 10,19 | 10,34       |
| 1322         | 10,00    | 10,01 | 10,11 | 10,00 | 9,96  | 10,03 | 10,01 | 9,99  | 10,11       |
| 1411         | 10,00    | 10,01 | 10,28 | 10,00 | 10,03 | 10,20 | 10,00 | 9,95  | 10,28       |
| 1412         | 10,00    | 10,01 | 10,07 | 10,00 | 10,10 | 9,99  | 10,00 | 10,04 | 10,10       |
| 1421         | 10,00    | 10,00 | 10,31 | 10,01 | 10,03 | 9,84  | 10,00 | 10,25 | 10,31       |
| 1422         | 10,00    | 10,00 | 9,68  | 10,00 | 10,32 | 9,95  | 10,01 | 9,84  | 10,32       |
| 2111         | 10,00    | 10,01 | 12,79 | 10,01 | 12,36 | 12,88 | 10,01 | 12,36 | 12,88       |
| 2112         | 10,00    | 10,01 | 12,64 | 10,00 | 12,72 | 12,65 | 10,01 | 12,80 | 12,80       |
| 2121         | 10,00    | 10,00 | 12,74 | 10,00 | 12,47 | 12,81 | 10,01 | 12,54 | 12,81       |
| 2122         | 10,01    | 10,01 | 13,07 | 10,00 | 12,25 | 12,99 | 10,01 | 12,21 | 13,07       |
| 2211         | 10,01    | 11,10 | 12,83 | 10,01 | 12,67 | 12,75 | 11,10 | 12,63 | 12,83       |
| 2212         | 10,01    | 11,38 | 12,55 | 10,00 | 12,81 | 12,56 | 11,35 | 12,75 | 12,81       |
| 2221         | 10,01    | 10,01 | 12,43 | 10,01 | 12,57 | 12,50 | 10,01 | 12,60 | 12,60       |
| 2222         | 10,01    | 10,02 | 12,57 | 10,00 | 12,56 | 12,51 | 10,02 | 12,50 | 12,57       |
| 2311         | 10,00    | 10,01 | 12,64 | 10,01 | 12,82 | 12,51 | 10,00 | 12,87 | 12,87       |
| 2312         | 10,00    | 10,00 | 12,36 | 10,00 | 12,47 | 12,40 | 10,01 | 12,49 | 12,49       |
| 2321         | 10,00    | 10,01 | 12,85 | 10,00 | 12,67 | 12,82 | 10,00 | 12,56 | 12,85       |
| 2322         | 10,01    | 10,00 | 12,77 | 10,00 | 12,38 | 12,70 | 10,00 | 12,36 | 12,77       |
| 2411         | 10,01    | 10,01 | 12,95 | 10,00 | 12,85 | 12,76 | 10,01 | 12,79 | 12,95       |
| 2412         | 10,01    | 10,01 | 12,73 | 10,01 | 12,72 | 12,64 | 10,00 | 12,74 | 12,74       |
| 2421         | 10,01    | 10,01 | 12,65 | 10,01 | 12,64 | 12,68 | 10,01 | 12,64 | 12,68       |
| 2422         | 10,00    | 10,01 | 12,52 | 10,01 | 12,77 | 12,50 | 10,01 | 12,74 | 12,77       |

Fonte: Próprio autor.

TABELA 46 – Tempo médio de separação de um pedido (minutos)

| Alternativas | Cenários |      |      |      |      |      |      |      | Média | Maior valor |
|--------------|----------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------------|
|              | MMM      | PMM  | MPM  | MMP  | PPP  | MPP  | PMP  | PPM  |       |             |
| 1111         | 2,57     | 3,24 | 2,65 | 2,61 | 3,32 | 2,65 | 3,18 | 3,30 | 2,94  | 3,32        |
| 1112         | 2,63     | 3,37 | 2,74 | 2,66 | 3,44 | 2,78 | 3,34 | 3,44 | 3,05  | 3,44        |
| 1121         | 4,71     | 5,71 | 4,88 | 4,73 | 5,97 | 4,89 | 5,77 | 5,98 | 5,33  | 5,98        |
| 1122         | 4,97     | 6,05 | 5,11 | 4,95 | 6,31 | 5,14 | 6,10 | 6,36 | 5,62  | 6,36        |
| 1211         | 3,87     | 5,10 | 4,06 | 3,90 | 5,14 | 4,01 | 5,10 | 5,05 | 4,53  | 5,14        |
| 1212         | 4,17     | 5,35 | 4,23 | 4,16 | 5,31 | 4,27 | 5,34 | 5,33 | 4,77  | 5,35        |
| 1221         | 5,86     | 7,90 | 5,46 | 5,85 | 8,30 | 6,71 | 7,83 | 8,34 | 7,03  | 8,34        |
| 1222         | 6,29     | 3,10 | 7,22 | 6,56 | 8,99 | 7,13 | 8,78 | 9,02 | 7,14  | 9,02        |
| 1311         | 2,49     | 2,65 | 2,59 | 2,52 | 3,24 | 2,62 | 3,15 | 3,24 | 2,81  | 3,24        |
| 1312         | 2,12     | 5,71 | 2,21 | 2,14 | 2,71 | 2,18 | 2,63 | 2,78 | 2,81  | 5,71        |
| 1321         | 4,64     | 5,01 | 4,73 | 4,62 | 5,86 | 4,84 | 5,67 | 5,84 | 5,15  | 5,86        |
| 1322         | 4,07     | 5,05 | 4,22 | 4,11 | 5,27 | 4,26 | 5,01 | 5,22 | 4,65  | 5,27        |
| 1411         | 2,65     | 3,34 | 2,76 | 2,65 | 3,46 | 2,77 | 3,32 | 3,46 | 3,05  | 3,46        |
| 1412         | 2,36     | 2,98 | 2,51 | 2,36 | 3,13 | 2,45 | 3,01 | 3,18 | 2,75  | 3,18        |
| 1421         | 4,71     | 5,82 | 4,99 | 4,75 | 6,11 | 5,03 | 5,86 | 6,09 | 5,42  | 6,11        |
| 1422         | 4,44     | 5,45 | 4,70 | 4,38 | 5,78 | 4,68 | 5,47 | 5,86 | 5,09  | 5,86        |
| 2111         | 2,78     | 3,47 | 2,83 | 2,78 | 3,51 | 2,81 | 3,46 | 3,52 | 3,15  | 3,52        |
| 2112         | 2,85     | 3,60 | 2,92 | 2,86 | 3,58 | 2,92 | 3,59 | 3,58 | 3,24  | 3,60        |
| 2121         | 5,06     | 6,09 | 5,19 | 5,04 | 6,21 | 5,18 | 6,09 | 6,24 | 5,64  | 6,24        |
| 2122         | 5,29     | 6,51 | 5,41 | 5,29 | 6,60 | 5,42 | 6,51 | 6,61 | 5,95  | 6,61        |
| 2211         | 4,30     | 5,45 | 4,10 | 4,34 | 5,23 | 4,12 | 5,45 | 5,25 | 4,78  | 5,45        |
| 2212         | 4,63     | 5,62 | 4,23 | 4,62 | 5,39 | 4,24 | 5,61 | 5,40 | 4,97  | 5,62        |
| 2221         | 6,62     | 8,72 | 6,65 | 6,61 | 8,37 | 6,62 | 8,71 | 8,36 | 7,58  | 8,72        |
| 2222         | 7,09     | 9,22 | 7,13 | 7,05 | 8,64 | 7,14 | 9,26 | 8,64 | 8,02  | 9,26        |
| 2311         | 2,58     | 3,26 | 2,59 | 2,57 | 3,24 | 2,58 | 3,26 | 3,23 | 2,91  | 3,26        |
| 2312         | 2,18     | 2,69 | 2,21 | 2,18 | 2,76 | 2,21 | 2,68 | 2,77 | 2,46  | 2,77        |
| 2321         | 4,86     | 5,94 | 4,91 | 4,86 | 6,02 | 4,93 | 5,93 | 6,03 | 5,43  | 6,03        |
| 2322         | 4,16     | 5,16 | 4,28 | 4,18 | 5,31 | 4,27 | 5,17 | 5,32 | 4,73  | 5,32        |
| 2411         | 2,76     | 3,58 | 2,88 | 2,76 | 3,59 | 2,89 | 3,58 | 3,61 | 3,21  | 3,61        |
| 2412         | 2,58     | 3,29 | 2,68 | 2,58 | 3,33 | 2,69 | 3,28 | 3,31 | 2,97  | 3,33        |
| 2421         | 5,02     | 6,12 | 5,20 | 5,03 | 6,35 | 5,21 | 6,13 | 6,35 | 5,68  | 6,35        |
| 2422         | 4,83     | 5,83 | 4,85 | 4,82 | 6,03 | 4,88 | 5,84 | 6,07 | 5,39  | 6,07        |

Fonte: Próprio autor.

TABELA 47 – Porcentagem de utilização média dos separadores

| Alternativas | Cenários |       |       |       |       |       |       |       | Média |
|--------------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|              | MMM      | PMM   | MPM   | MMP   | PPP   | MPP   | PMP   | PPM   |       |
| 1111         | 62,82    | 73,95 | 65,21 | 63,51 | 75,45 | 63,05 | 73,00 | 74,80 | 68,97 |
| 1112         | 65,00    | 76,07 | 65,17 | 64,29 | 78,56 | 66,97 | 75,68 | 74,95 | 70,84 |
| 1121         | 63,00    | 67,57 | 60,31 | 59,38 | 70,01 | 60,42 | 68,02 | 69,77 | 64,81 |
| 1122         | 66,00    | 70,39 | 62,83 | 61,19 | 71,40 | 63,02 | 70,77 | 73,70 | 67,41 |
| 1211         | 62,00    | 99,87 | 87,12 | 84,93 | 99,78 | 85,24 | 99,89 | 99,49 | 89,79 |
| 1212         | 69,00    | 99,93 | 88,24 | 89,27 | 99,76 | 90,04 | 99,98 | 99,21 | 91,93 |
| 1221         | 66,00    | 85,76 | 88,24 | 68,74 | 89,65 | 75,50 | 85,18 | 89,01 | 81,01 |
| 1222         | 61,00    | 71,61 | 79,46 | 74,63 | 93,28 | 79,36 | 93,16 | 92,71 | 80,65 |
| 1311         | 68,00    | 64,06 | 62,79 | 62,03 | 74,14 | 63,61 | 72,43 | 74,02 | 67,63 |
| 1312         | 62,00    | 67,53 | 57,32 | 55,66 | 64,22 | 56,25 | 63,83 | 65,78 | 61,57 |
| 1321         | 58,68    | 61,76 | 58,48 | 58,43 | 67,18 | 60,32 | 67,25 | 67,70 | 62,48 |
| 1322         | 53,92    | 62,02 | 54,73 | 54,21 | 64,08 | 55,38 | 61,72 | 63,47 | 58,69 |
| 1411         | 64,18    | 75,63 | 64,68 | 64,07 | 77,44 | 65,28 | 75,35 | 77,84 | 70,56 |
| 1412         | 59,30    | 69,57 | 61,56 | 59,31 | 71,56 | 60,77 | 70,07 | 72,71 | 65,61 |
| 1421         | 59,23    | 68,51 | 60,32 | 59,57 | 70,75 | 62,60 | 68,82 | 69,44 | 64,91 |
| 1422         | 56,94    | 65,39 | 60,46 | 56,45 | 66,66 | 59,21 | 65,53 | 69,57 | 62,53 |
| 2111         | 66,31    | 77,82 | 56,80 | 66,37 | 67,26 | 56,40 | 77,69 | 67,39 | 67,00 |
| 2112         | 67,52    | 79,96 | 58,50 | 67,72 | 66,88 | 58,47 | 79,84 | 66,62 | 68,19 |
| 2121         | 62,15    | 70,69 | 53,89 | 61,99 | 61,45 | 53,68 | 70,72 | 61,42 | 62,00 |
| 2122         | 64,04    | 74,21 | 54,44 | 64,08 | 64,86 | 54,73 | 74,20 | 65,13 | 64,46 |
| 2211         | 91,68    | 99,96 | 73,11 | 92,18 | 88,69 | 73,89 | 99,97 | 89,24 | 88,59 |
| 2212         | 97,05    | 99,97 | 76,09 | 96,94 | 90,06 | 76,27 | 99,97 | 90,58 | 90,87 |
| 2221         | 75,14    | 92,59 | 64,53 | 75,03 | 75,43 | 64,09 | 92,49 | 75,21 | 76,81 |
| 2222         | 79,06    | 96,63 | 67,24 | 78,70 | 77,25 | 67,55 | 96,94 | 77,60 | 80,12 |
| 2311         | 62,94    | 74,28 | 54,15 | 62,84 | 62,15 | 54,39 | 74,26 | 61,83 | 63,35 |
| 2312         | 56,31    | 64,87 | 49,80 | 56,37 | 56,91 | 49,69 | 64,68 | 56,98 | 56,95 |
| 2321         | 60,49    | 69,46 | 51,77 | 60,45 | 59,58 | 52,03 | 69,37 | 59,98 | 60,39 |
| 2322         | 54,67    | 62,98 | 47,91 | 54,80 | 55,71 | 48,00 | 63,09 | 55,83 | 55,38 |
| 2411         | 65,99    | 79,59 | 57,08 | 65,96 | 66,57 | 57,80 | 79,62 | 67,02 | 67,45 |
| 2412         | 62,99    | 74,75 | 55,08 | 62,94 | 63,58 | 55,48 | 74,69 | 63,33 | 64,10 |
| 2421         | 61,78    | 70,96 | 54,23 | 61,90 | 61,85 | 54,20 | 71,05 | 61,87 | 62,23 |
| 2422         | 60,25    | 68,48 | 52,23 | 60,16 | 59,31 | 52,53 | 68,64 | 59,71 | 60,17 |

Fonte: Próprio autor.

TABELA 48 – Distância total percorrida (x 1.000 metros)

| Alternativas | Cenários |       |       |       |       |       |       |       | Maior valor |
|--------------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------------|
|              | MMM      | PMM   | MPM   | MMP   | PPP   | MPP   | PMP   | PPM   |             |
| 1111         | 1.045    | 1.235 | 1.044 | 1.264 | 1.472 | 1.254 | 1.469 | 1.230 | 1.472       |
| 1112         | 1.077    | 1.282 | 1.084 | 1.301 | 1.535 | 1.302 | 1.537 | 1.283 | 1.537       |
| 1121         | 801      | 897   | 801   | 959   | 1.075 | 960   | 1.076 | 896   | 1.076       |

| Alternativas | Cenários |       |       |       |       |       |       |       | Maior valor |
|--------------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------------|
|              | MMM      | PMM   | MPM   | MMP   | PPP   | MPP   | PMP   | PPM   |             |
| 1122         | 855      | 971   | 852   | 1.023 | 1.165 | 1.030 | 1.167 | 972   | 1.167       |
| 1211         | 651      | 750   | 649   | 784   | 902   | 783   | 903   | 744   | 903         |
| 1212         | 703      | 818   | 698   | 832   | 974   | 838   | 977   | 818   | 977         |
| 1221         | 478      | 533   | 822   | 574   | 638   | 572   | 641   | 532   | 822         |
| 1222         | 531      | 1.169 | 534   | 645   | 727   | 643   | 721   | 609   | 1.169       |
| 1311         | 1.006    | 913   | 1.012 | 1.213 | 1.418 | 1.220 | 1.418 | 1.183 | 1.418       |
| 1312         | 779      | 875   | 782   | 939   | 1.092 | 936   | 1.091 | 914   | 1.092       |
| 1321         | 778      | 668   | 772   | 931   | 1.045 | 935   | 1.044 | 874   | 1.045       |
| 1322         | 594      | 670   | 594   | 715   | 808   | 718   | 805   | 670   | 808         |
| 1411         | 852      | 1.005 | 855   | 1.025 | 1.201 | 1.031 | 1.202 | 997   | 1.202       |
| 1412         | 700      | 825   | 706   | 841   | 991   | 834   | 991   | 831   | 991         |
| 1421         | 661      | 748   | 661   | 796   | 894   | 797   | 901   | 746   | 901         |
| 1422         | 557      | 627   | 553   | 659   | 756   | 661   | 756   | 628   | 756         |
| 2111         | 997      | 1.159 | 1.002 | 1.198 | 1.392 | 1.199 | 1.390 | 1.163 | 1.392       |
| 2112         | 1.037    | 1.214 | 1.039 | 1.246 | 1.454 | 1.246 | 1.455 | 1.213 | 1.455       |
| 2121         | 754      | 845   | 755   | 902   | 1.014 | 905   | 1.014 | 846   | 1.014       |
| 2122         | 812      | 931   | 818   | 974   | 1.115 | 982   | 1.117 | 931   | 1.117       |
| 2211         | 683      | 805   | 688   | 820   | 962   | 826   | 964   | 801   | 964         |
| 2212         | 718      | 841   | 713   | 861   | 1.010 | 856   | 1.006 | 843   | 1.010       |
| 2221         | 509      | 569   | 510   | 611   | 680   | 612   | 682   | 568   | 682         |
| 2222         | 554      | 624   | 551   | 665   | 746   | 662   | 748   | 623   | 748         |
| 2311         | 878      | 1.039 | 871   | 1.052 | 1.243 | 1.044 | 1.247 | 1.035 | 1.247       |
| 2312         | 647      | 741   | 650   | 777   | 893   | 780   | 889   | 745   | 893         |
| 2321         | 689      | 784   | 688   | 827   | 938   | 828   | 939   | 782   | 939         |
| 2322         | 483      | 544   | 489   | 581   | 656   | 586   | 653   | 547   | 656         |
| 2411         | 722      | 875   | 731   | 865   | 1.050 | 878   | 1.049 | 878   | 1.050       |
| 2412         | 609      | 719   | 615   | 729   | 863   | 737   | 862   | 719   | 863         |
| 2421         | 584      | 665   | 588   | 701   | 796   | 704   | 797   | 664   | 797         |
| 2422         | 491      | 560   | 487   | 588   | 670   | 585   | 671   | 560   | 671         |

Fonte: Próprio autor.

TABELA 49 – Tempo médio de congestionamento por pedido (segundos)

| Alternativas | Cenários |     |     |     |     |     |     |     | Maior valor |
|--------------|----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------------|
|              | MMM      | PMM | MPM | MMP | PPP | MPP | PMP | PPM |             |
| 1111         | 18       | 27  | 23  | 18  | 33  | 22  | 25  | 32  | 33          |
| 1112         | 19       | 30  | 25  | 20  | 35  | 26  | 29  | 35  | 35          |
| 1121         | 13       | 17  | 18  | 13  | 24  | 18  | 19  | 25  | 25          |
| 1122         | 15       | 21  | 21  | 15  | 29  | 20  | 21  | 29  | 29          |
| 1211         | 109      | 158 | 121 | 110 | 159 | 118 | 157 | 155 | 159         |
| 1212         | 122      | 166 | 127 | 123 | 165 | 129 | 166 | 165 | 166         |

| Alternativas | Cenários |     |     |     |     |     |     |     | Maior valor |
|--------------|----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------------|
|              | MMM      | PMM | MPM | MMP | PPP | MPP | PMP | PPM |             |
| 1221         | 63       | 101 | 152 | 63  | 114 | 89  | 99  | 114 | 152         |
| 1222         | 71       | 25  | 98  | 77  | 126 | 95  | 122 | 127 | 127         |
| 1311         | 17       | 21  | 22  | 18  | 31  | 22  | 26  | 32  | 32          |
| 1312         | 14       | 18  | 19  | 15  | 25  | 18  | 21  | 27  | 27          |
| 1321         | 13       | 17  | 16  | 12  | 24  | 18  | 18  | 23  | 24          |
| 1322         | 12       | 17  | 16  | 12  | 23  | 17  | 16  | 23  | 23          |
| 1411         | 29       | 41  | 35  | 28  | 50  | 36  | 41  | 49  | 50          |
| 1412         | 25       | 36  | 32  | 25  | 45  | 31  | 37  | 46  | 46          |
| 1421         | 19       | 27  | 27  | 20  | 36  | 28  | 27  | 36  | 36          |
| 1422         | 19       | 26  | 28  | 19  | 36  | 28  | 27  | 38  | 38          |
| 2111         | 21       | 30  | 23  | 21  | 31  | 23  | 30  | 31  | 31          |
| 2112         | 22       | 33  | 25  | 23  | 33  | 25  | 33  | 33  | 33          |
| 2121         | 15       | 19  | 18  | 15  | 23  | 18  | 20  | 23  | 23          |
| 2122         | 17       | 23  | 19  | 17  | 27  | 20  | 23  | 27  | 27          |
| 2211         | 126      | 166 | 112 | 128 | 152 | 113 | 166 | 154 | 166         |
| 2212         | 141      | 173 | 119 | 140 | 158 | 119 | 172 | 159 | 173         |
| 2221         | 77       | 117 | 79  | 77  | 107 | 78  | 117 | 106 | 117         |
| 2222         | 87       | 127 | 89  | 86  | 110 | 89  | 128 | 110 | 128         |
| 2311         | 18       | 27  | 21  | 18  | 28  | 21  | 27  | 28  | 28          |
| 2312         | 16       | 21  | 18  | 16  | 25  | 18  | 21  | 25  | 25          |
| 2321         | 15       | 19  | 16  | 15  | 23  | 16  | 19  | 23  | 23          |
| 2322         | 13       | 18  | 15  | 13  | 22  | 15  | 18  | 22  | 22          |
| 2411         | 34       | 51  | 38  | 34  | 52  | 39  | 51  | 52  | 52          |
| 2412         | 32       | 47  | 37  | 32  | 50  | 37  | 47  | 50  | 50          |
| 2421         | 25       | 33  | 30  | 25  | 39  | 30  | 33  | 39  | 39          |
| 2422         | 26       | 33  | 28  | 26  | 39  | 29  | 33  | 39  | 39          |

Fonte: Próprio autor.

TABELA 50 – Custo operacional (R\$)

| Alternativas | Cenários |          |          |          |           |           |           |          |
|--------------|----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|----------|
|              | MMM      | PMM      | MPM      | MMP      | PPP       | MPP       | PMP       | PPM      |
| 1111         | 8.179,42 | 8.182,69 | 8.175,00 | 9.813,43 | 9.810,00  | 10.181,33 | 9.814,87  | 8.228,04 |
| 1112         | 8.182,89 | 8.184,83 | 8.301,61 | 9.818,91 | 9.810,00  | 9.810,00  | 9.819,44  | 8.697,20 |
| 1121         | 8.181,37 | 8.181,79 | 8.275,90 | 9.814,71 | 9.810,00  | 9.913,13  | 9.817,44  | 8.175,00 |
| 1122         | 8.181,61 | 8.180,39 | 8.175,00 | 9.818,46 | 10.126,18 | 9.810,00  | 9.817,89  | 8.175,00 |
| 1211         | 8.179,82 | 8.815,92 | 8.268,29 | 9.818,76 | 10.671,72 | 10.173,63 | 10.556,25 | 8.768,78 |
| 1212         | 8.179,85 | 9.301,25 | 8.584,58 | 9.824,08 | 11.087,60 | 10.060,89 | 11.134,47 | 9.463,81 |
| 1221         | 8.181,40 | 8.184,83 | 8.584,58 | 9.820,32 | 9.810,00  | 9.904,35  | 9.818,73  | 8.263,13 |
| 1222         | 8.186,05 | 8.180,13 | 8.309,54 | 9.818,73 | 10.129,35 | 9.810,00  | 9.817,47  | 8.579,20 |
| 1311         | 8.177,85 | 8.181,17 | 8.264,44 | 9.816,38 | 9.810,00  | 9.815,28  | 9.816,32  | 8.184,82 |
| 1312         | 8.179,32 | 8.183,29 | 8.175,00 | 9.813,68 | 10.146,76 | 9.835,03  | 9.819,06  | 8.302,58 |

| Alternativas | Cenários |          |           |          |           |           |           |           |
|--------------|----------|----------|-----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|              | MMM      | PMM      | MPM       | MMP      | PPP       | MPP       | PMP       | PPM       |
| 1321         | 8.178,58 | 8.180,26 | 8.449,25  | 9.819,59 | 10.313,30 | 9.810,00  | 9.815,16  | 8.405,12  |
| 1322         | 8.179,80 | 8.181,50 | 8.315,30  | 9.815,79 | 9.810,00  | 9.860,08  | 9.821,31  | 8.175,00  |
| 1411         | 8.179,71 | 8.181,16 | 8.516,62  | 9.815,70 | 9.856,37  | 10.110,85 | 9.816,55  | 8.175,00  |
| 1412         | 8.179,14 | 8.183,13 | 8.257,41  | 9.815,14 | 9.956,88  | 9.810,00  | 9.816,53  | 8.224,90  |
| 1421         | 8.178,45 | 8.180,75 | 8.551,63  | 9.820,79 | 9.855,56  | 9.810,00  | 9.816,30  | 8.484,08  |
| 1422         | 8.178,63 | 8.180,92 | 8.175,00  | 9.814,32 | 10.284,28 | 9.810,00  | 9.818,63  | 8.175,00  |
| 2111         | 8.179,99 | 8.182,60 | 11.594,11 | 9.819,00 | 13.276,12 | 14.042,27 | 9.818,45  | 11.063,95 |
| 2112         | 8.180,43 | 8.181,58 | 11.414,11 | 9.815,22 | 13.818,89 | 13.710,63 | 9.820,83  | 11.608,57 |
| 2121         | 8.180,87 | 8.180,65 | 11.540,55 | 9.815,43 | 13.439,47 | 13.947,53 | 9.820,78  | 11.291,69 |
| 2122         | 8.181,13 | 8.182,98 | 11.945,26 | 9.813,31 | 13.126,84 | 14.208,23 | 9.817,64  | 10.881,70 |
| 2211         | 8.182,44 | 9.518,04 | 11.645,21 | 9.826,22 | 13.741,06 | 13.859,29 | 11.421,96 | 11.403,47 |
| 2212         | 8.191,69 | 9.865,61 | 11.302,15 | 9.817,27 | 13.946,32 | 13.574,92 | 11.796,68 | 11.548,24 |
| 2221         | 8.183,77 | 8.183,41 | 11.152,33 | 9.819,61 | 13.592,19 | 13.492,63 | 9.822,84  | 11.368,84 |
| 2222         | 8.181,64 | 8.201,71 | 11.330,46 | 9.816,14 | 13.576,37 | 13.496,29 | 9.837,85  | 11.236,49 |
| 2311         | 8.180,43 | 8.181,26 | 11.412,25 | 9.817,50 | 13.955,23 | 13.510,02 | 9.815,19  | 11.697,50 |
| 2312         | 8.180,09 | 8.178,33 | 11.063,52 | 9.812,69 | 13.439,51 | 13.338,78 | 9.818,26  | 11.222,80 |
| 2321         | 8.179,95 | 8.182,64 | 11.672,99 | 9.815,62 | 13.732,97 | 13.952,95 | 9.814,65  | 11.318,53 |
| 2322         | 8.181,49 | 8.180,21 | 11.576,19 | 9.817,21 | 13.318,59 | 13.785,09 | 9.814,98  | 11.069,01 |
| 2411         | 8.185,68 | 8.182,11 | 11.786,51 | 9.815,42 | 14.006,28 | 13.864,88 | 9.820,59  | 11.590,40 |
| 2412         | 8.181,15 | 8.181,56 | 11.517,55 | 9.818,57 | 13.812,81 | 13.690,19 | 9.817,07  | 11.529,16 |
| 2421         | 8.182,81 | 8.182,87 | 11.430,53 | 9.817,42 | 13.697,64 | 13.751,80 | 9.819,51  | 11.413,44 |
| 2422         | 8.179,55 | 8.185,84 | 11.266,36 | 9.818,23 | 13.885,04 | 13.494,17 | 9.819,64  | 11.530,78 |

Fonte: Próprio autor.

TABELA 51 – Linhas separadas por hora-homem

| Alternativas | Cenários |       |       |       |       |       |       |       |       | Maior valor |
|--------------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------------|
|              | MMM      | PMM   | MPM   | MMP   | PPP   | MPP   | PMP   | PPM   |       |             |
| 1111         | 43,67    | 54,18 | 44,45 | 44,43 | 53,91 | 42,74 | 53,64 | 53,62 | 42,74 |             |
| 1112         | 43,50    | 54,37 | 43,32 | 43,70 | 55,10 | 44,79 | 54,11 | 51,99 | 43,32 |             |
| 1121         | 43,84    | 53,52 | 43,55 | 43,99 | 54,20 | 43,82 | 53,78 | 53,89 | 43,55 |             |
| 1122         | 43,95    | 53,73 | 43,84 | 43,77 | 52,58 | 44,26 | 53,95 | 55,00 | 43,77 |             |
| 1211         | 43,72    | 51,32 | 43,42 | 44,27 | 51,55 | 42,55 | 51,60 | 51,22 | 42,55 |             |
| 1212         | 44,08    | 49,62 | 42,31 | 43,60 | 49,37 | 43,14 | 49,31 | 48,83 | 42,31 |             |
| 1221         | 43,60    | 53,93 | 44,03 | 43,86 | 53,81 | 43,27 | 53,86 | 53,61 | 43,27 |             |
| 1222         | 43,53    | 53,56 | 43,61 | 44,43 | 53,29 | 43,98 | 53,74 | 52,86 | 43,53 |             |
| 1311         | 43,37    | 53,71 | 43,55 | 43,99 | 54,50 | 44,25 | 54,44 | 54,25 | 43,37 |             |
| 1312         | 43,88    | 54,34 | 44,83 | 44,04 | 52,48 | 43,63 | 53,48 | 53,86 | 43,63 |             |
| 1321         | 44,01    | 53,49 | 42,49 | 43,75 | 51,88 | 44,39 | 53,76 | 52,68 | 42,49 |             |
| 1322         | 43,74    | 53,85 | 43,55 | 44,19 | 54,26 | 44,11 | 53,56 | 53,58 | 43,55 |             |
| 1411         | 43,73    | 54,29 | 42,75 | 43,86 | 53,59 | 42,99 | 53,93 | 53,88 | 42,75 |             |
| 1412         | 43,90    | 53,72 | 44,09 | 43,77 | 53,11 | 43,46 | 54,04 | 54,21 | 43,46 |             |

| Alternativas | Cenários |       |       |       |       |       |       |       | Maior valor |
|--------------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------------|
|              | MMM      | PMM   | MPM   | MMP   | PPP   | MPP   | PMP   | PPM   |             |
| 1421         | 43,63    | 53,95 | 42,64 | 44,00 | 53,41 | 44,74 | 54,15 | 52,01 | 42,64       |
| 1422         | 44,30    | 53,92 | 45,38 | 43,63 | 52,31 | 44,08 | 53,86 | 54,88 | 43,63       |
| 2111         | 43,98    | 54,16 | 34,52 | 44,03 | 43,97 | 34,16 | 54,05 | 44,11 | 34,16       |
| 2112         | 43,58    | 54,04 | 34,99 | 43,78 | 42,23 | 34,96 | 53,92 | 42,00 | 34,96       |
| 2121         | 44,15    | 53,61 | 34,84 | 43,91 | 43,23 | 34,60 | 53,69 | 43,16 | 34,60       |
| 2122         | 43,95    | 54,19 | 33,87 | 43,95 | 44,01 | 34,03 | 54,21 | 44,20 | 33,87       |
| 2211         | 43,54    | 48,80 | 34,46 | 43,65 | 42,80 | 34,73 | 48,71 | 42,99 | 34,46       |
| 2212         | 44,44    | 47,72 | 34,72 | 44,46 | 42,59 | 34,83 | 47,66 | 42,78 | 34,72       |
| 2221         | 44,13    | 53,86 | 34,98 | 44,00 | 42,78 | 34,74 | 53,86 | 42,76 | 34,74       |
| 2222         | 44,29    | 53,56 | 34,81 | 44,19 | 42,79 | 35,12 | 53,60 | 42,97 | 34,81       |
| 2311         | 44,32    | 54,36 | 34,72 | 44,24 | 41,90 | 34,96 | 54,33 | 41,61 | 34,72       |
| 2312         | 43,95    | 53,62 | 35,56 | 44,01 | 43,24 | 35,40 | 53,34 | 43,27 | 35,40       |
| 2321         | 44,17    | 54,07 | 34,31 | 44,14 | 42,51 | 34,52 | 54,02 | 42,86 | 34,31       |
| 2322         | 43,77    | 53,79 | 34,72 | 43,97 | 43,80 | 34,87 | 53,86 | 43,82 | 34,72       |
| 2411         | 43,38    | 53,93 | 34,42 | 43,38 | 42,19 | 34,91 | 53,97 | 42,58 | 34,42       |
| 2412         | 44,00    | 54,08 | 35,03 | 44,03 | 42,36 | 35,33 | 54,01 | 42,16 | 35,03       |
| 2421         | 43,56    | 53,47 | 34,68 | 43,70 | 42,54 | 34,64 | 53,47 | 42,55 | 34,64       |
| 2422         | 44,42    | 53,52 | 34,93 | 44,37 | 42,16 | 35,20 | 53,66 | 42,41 | 34,93       |

Fonte: Próprio autor.

## Apêndice G – Robustez entre cenários

TABELA 52 – Robustez entre cenários

| Alternativas | Robustez em cada cenário |     |     |     |     |     |     |     | Robustez ente cenários |
|--------------|--------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------------------------|
|              | MMM                      | PMM | MPM | MMP | PPP | MPP | PMP | PPM |                        |
| 1111         | 16                       | 15  | 15  | 16  | 15  | 21  | 15  | 16  | 21                     |
| 1112         | 15                       | 15  | 17  | 16  | 15  | 15  | 15  | 23  | 23                     |
| 1121         | 18                       | 18  | 19  | 18  | 18  | 20  | 18  | 18  | 20                     |
| 1122         | 18                       | 18  | 18  | 19  | 22  | 18  | 18  | 18  | 22                     |
| 1211         | 17                       | 17  | 11  | 11  | 20  | 16  | 18  | 16  | 20                     |
| 1212         | 17                       | 24  | 15  | 8   | 25  | 11  | 26  | 27  | 27                     |
| 1221         | 19                       | 13  | 16  | 18  | 10  | 19  | 14  | 12  | 19                     |
| 1222         | 20                       | 15  | 20  | 18  | 15  | 18  | 10  | 16  | 20                     |
| 1311         | 15                       | 16  | 17  | 16  | 15  | 16  | 15  | 15  | 17                     |
| 1312         | 15                       | 18  | 16  | 16  | 21  | 17  | 16  | 17  | 21                     |
| 1321         | 18                       | 18  | 23  | 18  | 26  | 18  | 18  | 22  | 26                     |
| 1322         | 18                       | 18  | 20  | 18  | 18  | 19  | 18  | 18  | 20                     |
| 1411         | 16                       | 15  | 21  | 16  | 16  | 20  | 15  | 15  | 21                     |
| 1412         | 16                       | 15  | 17  | 16  | 18  | 16  | 15  | 16  | 18                     |
| 1421         | 18                       | 18  | 24  | 18  | 19  | 18  | 18  | 23  | 24                     |
| 1422         | 18                       | 18  | 18  | 18  | 25  | 18  | 18  | 18  | 25                     |

| Alternativas | Robustez em cada cenário |     |     |     |     |     |     |     | Robustez ente cenários |
|--------------|--------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------------------------|
|              | MMM                      | PMM | MPM | MMP | PPP | MPP | PMP | PPM |                        |
| 2111         | 15                       | 14  | 51  | 14  | 48  | 55  | 14  | 47  | 55                     |
| 2112         | 14                       | 14  | 49  | 14  | 51  | 53  | 14  | 51  | 53                     |
| 2121         | 17                       | 17  | 53  | 17  | 51  | 57  | 17  | 51  | 57                     |
| 2122         | 17                       | 17  | 56  | 17  | 49  | 58  | 17  | 48  | 58                     |
| 2211         | 6                        | 27  | 51  | 6   | 43  | 53  | 27  | 42  | 53                     |
| 2212         | 6                        | 31  | 48  | 6   | 43  | 52  | 31  | 42  | 52                     |
| 2221         | 17                       | 9   | 50  | 17  | 52  | 55  | 9   | 52  | 55                     |
| 2222         | 17                       | 9   | 51  | 17  | 52  | 54  | 10  | 51  | 54                     |
| 2311         | 15                       | 14  | 53  | 15  | 52  | 52  | 14  | 52  | 53                     |
| 2312         | 15                       | 14  | 50  | 15  | 49  | 51  | 14  | 48  | 51                     |
| 2321         | 17                       | 17  | 57  | 17  | 54  | 57  | 17  | 52  | 57                     |
| 2322         | 17                       | 17  | 56  | 17  | 51  | 56  | 17  | 50  | 56                     |
| 2411         | 14                       | 14  | 55  | 14  | 52  | 54  | 14  | 51  | 55                     |
| 2412         | 15                       | 14  | 53  | 15  | 51  | 53  | 14  | 51  | 53                     |
| 2421         | 17                       | 17  | 55  | 17  | 53  | 56  | 17  | 52  | 56                     |
| 2422         | 17                       | 17  | 54  | 17  | 54  | 54  | 17  | 53  | 54                     |

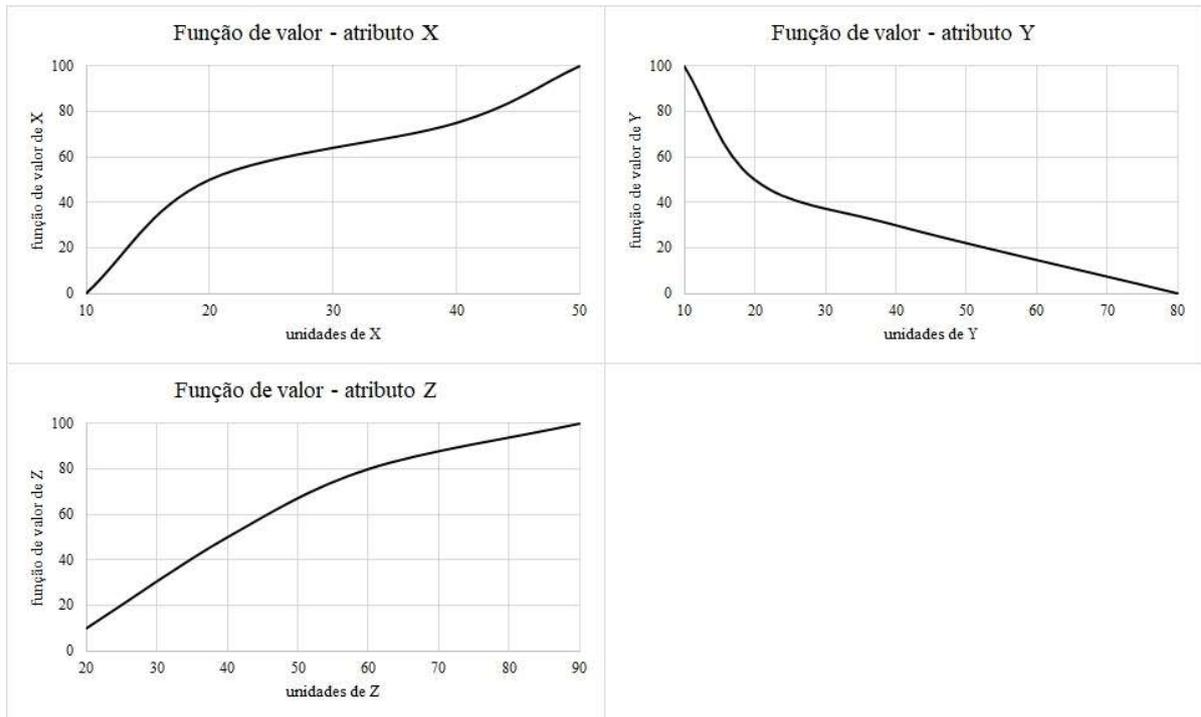
Fonte: Próprio autor.

#### **Apêndice H – Descrição do protocolo para aplicação da técnica *swing-weights***

Este exemplo é hipotético e segue os exemplos propostos por Goodwin e Wright (2004, p.40) e Montibeller e Franco (2007).

Suponha que um analista esteja auxiliando um tomador de decisão a respeito de um problema hipotético de decisão multicritério, onde são utilizados três atributos (ou critérios) “X”, “Y” e “Z” e suas funções de valores (FIGURA 37).

FIGURA 37 - Funções de valores para o exemplo *swing weights*



Fonte: Próprio autor.

Assim, o analista inicia o processo de *swing weights* junto ao tomador de decisão:

**Analista:** Imagine que você tenha uma alternativa que possua os piores desempenhos em todas os atributos, ou seja, que possua 10 unidades no atributo “X”, 80 unidades no atributo “Y” e 20 unidades no atributo “Z”. Agora, se você pudesse melhorar esta alternativa em somente um atributo, do pior para o seu melhor nível, qual atributo você escolheria?

**Tomador de decisão:** O atributo “X”.

**Analista:** Então considere que esta primeira melhoria de 10 para 50 unidades do atributo “X” vale 100 pontos. Logo, pode-se desenhar uma flecha ao lado esquerdo deste atributo e o valor deste *swing* (FIGURA 38).

**Analista:** Agora, desconsiderando o atributo “X”, se você tivesse uma alternativa com os piores níveis nos demais atributos (ou seja, 80 unidades no atributo “Y” e 20 unidades no atributo “Z”), qual atributo você melhora do seu pior nível para o melhor?

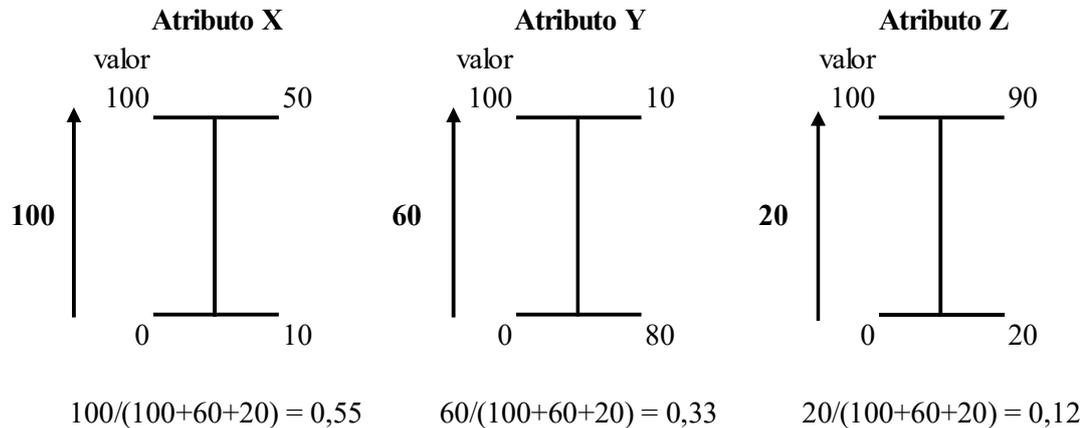
**Tomador de decisão:** O atributo “Y”, ou seja, reduzir de 80 para 10 unidades o atributo “Y”

**Analista:** Então, se a primeira melhoria no atributo “X” foi avaliada com 100 pontos, quanto você valorizaria esta segunda melhoria?

**Tomador de decisão:** Por volta de 60. Logo, pode-se desenhar uma flecha ao lado esquerdo deste atributo e o valor deste *swing* (FIGURA 38).

Este procedimento deve continuar até o fim dos atributos. Desta maneira os pesos são calculados de forma ponderada conforme a FIGURA 38.

FIGURA 38 - Exemplo do uso de *swing weights*



Fonte: Próprio autor.

### Apêndice I – Descrição do protocolo para a construção de uma função de valor pelo método da bissecção

Este exemplo é hipotético e segue os exemplos propostos por Goodwin e Wright (2004, p.39) e Montibeller e Franco (2007).

Suponha que um analista esteja auxiliando um tomador de decisão a levantar uma função de valor que represente o valor dado pelo tomador de decisão para o desempenho das alternativas de decisão frente a um atributo (ou critério) hipotético “W”.

**Analista:** Quais valores (ou resultados) você consideraria plausíveis, para o limite inferior e superior, que uma alternativa hipotética pode alcançar no atributo “W”?

**Tomador de decisão:** Por volta de 10 unidades o limite inferior e 50 unidades o limite superior.

**Analista:** Então, você pode atribuir o valor zero para 10 unidades (considerando que este seja o pior valor) e 100 para 50 unidades (o melhor valor). Assim, você pode iniciar a construção da função de valor (FIGURA 39a).

**Analista:** Agora, quantas unidades de “W” representaria o nível médio em termos de valor?

**Tomador de decisão:** Por volta de 25 unidades.

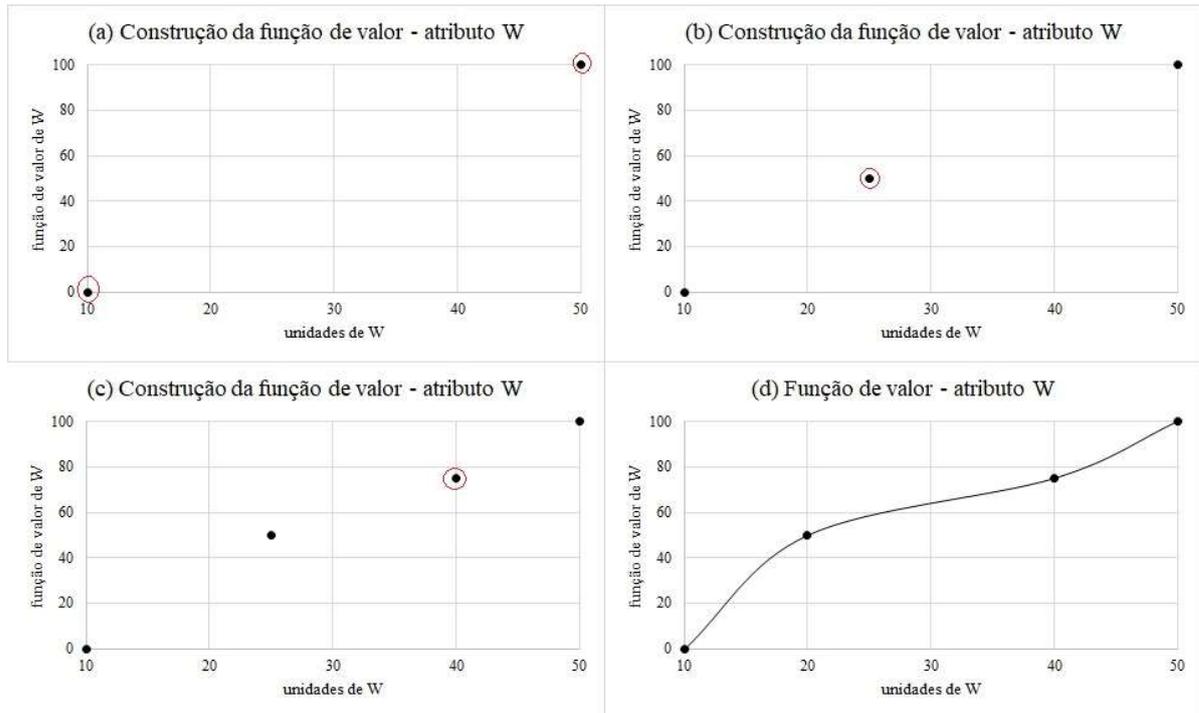
**Analista:** Então, você pode plotar o ponto (25;50) (FIGURA 39b).

**Analista:** Agora, qual seria o nível médio em termos de valor, entre 25 e 50 unidades do atributo “W”?

**Tomador de decisão:** Por volta de 40 unidades.

**Analista:** Então, você pode plotar o ponto (40;75) (FIGURA 39c). Em seguida, pode-se fazer uma interpolação linear, de modo a se obter a função de valor do atributo “W” (FIGURA 39d).

FIGURA 39 - Construção de uma função de valor



Fonte: Próprio autor.