

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA DE BAURU
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

LUCAS MARTINS IKEZIRI

**PROPOSTA DE INTEGRAÇÃO DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL AO
GERENCIAMENTO DINÂMICO DO PULMÃO PARA O
DIMENSIONAMENTO DE ESTOQUES EM CADEIAS DE SUPRIMENTOS**

**BAURU
2023**

LUCAS MARTINS IKEZIRI

**PROPOSTA DE INTEGRAÇÃO DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL AO
GERENCIAMENTO DINÂMICO DO PULMÃO PARA O
DIMENSIONAMENTO DE ESTOQUES EM CADEIAS DE SUPRIMENTOS**

Tese apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia de Produção pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, UNESP, Campus Bauru.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Bernardi de Souza

BAURU

2023

Ikeziri, Lucas Martins.

Proposta de integração de inteligência artificial
ao Gerenciamento Dinâmico do Pulmão para o
dimensionamento de estoques em cadeias de suprimentos
/ Lucas Martins Ikeziri, 2023

249 f. : il.

Orientador: Fernando Bernardi de Souza

Tese (Doutorado)-Universidade Estadual
Paulista (Unesp). Faculdade de Engenharia, Bauru, 2023

1. Gestão da Cadeia de Suprimentos. 2. Tambor-
Pulmão-Corda Simplificado. 3. Make to Availability. 4.
Reposição Puxada. 5. Gerenciamento Dinâmico do Pulmão.
I. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de
Engenharia. II. Título.



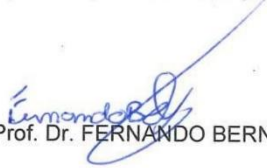
UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Bauru



ATA DA DEFESA PÚBLICA DA TESE DE DOUTORADO DE LUCAS MARTINS IKEZIRI, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 04 dias do mês de agosto do ano de 2023, às 14:00 horas, no(a) Via sistemas de videoconferência e outras ferramentas para comunicação a distância, realizou-se a defesa de TESE DE DOUTORADO de LUCAS MARTINS IKEZIRI, intitulada **PROPOSTA DE INTEGRAÇÃO DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL AO GERENCIAMENTO DINÂMICO DO PULMÃO PARA O DIMENSIONAMENTO DE ESTOQUES EM CADEIAS DE SUPRIMENTOS**. A Comissão Examinadora foi constituída pelos seguintes membros: Prof. Dr. FERNANDO BERNARDI DE SOUZA (Orientador(a) - Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia de Produção / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, Prof. Dr. JOÃO VICTOR ROJAS LUIZ (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia de Produção / Faculdade de Engenharia de Bauru UNESP, Prof.^a Dr.^a ANDREIA DA SILVA MEYER (Participação Virtual) do(a) Engenharia de Produção / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, Prof. Dr. MARCO AURÉLIO DE MESQUITA (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia de Produção / Escola Politécnica da USP, Prof. Dr. SILVIO ROBERTO IGNACIO PIRES (Participação Virtual) do(a) Departamento de Administração / Fundação Getúlio Vargas / FGV. Após a exposição pelo doutorando e arguição pelos membros da Comissão Examinadora que participaram do ato, de forma presencial e/ou virtual, o discente recebeu o conceito final: APROVADO. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelo(a) Presidente(a) da Comissão Examinadora.


Prof. Dr. FERNANDO BERNARDI DE SOUZA

RESUMO

Fornecer a devida atenção à demanda que percorre todos os elos de uma cadeia de suprimentos é um desafio que, se não for cumprido, implica alguns efeitos indesejáveis, por exemplo, baixa rotatividade de estoques, investimentos elevados em produtos e perda de vendas por ruptura de estoques. A fim de lidar com tais efeitos indesejáveis, a Teoria das Restrições (*Theory of Constraints – TOC*) propõe o sistema *Pull Replenishment and Distribution* (PRD) apoiado pelo método Gerenciamento Dinâmico do Pulmão (*Dynamic Buffer Management – DBM*) que, a partir de algoritmos e parâmetros definidos empiricamente, identifica as prioridades para o reabastecimento dos estoques e indica a necessidade de alterar os seus níveis-alvo. Assim, esta pesquisa tem como objetivo avaliar se a integração da técnica de inteligência artificial (IA), especificamente aprendizado por reforço (*reinforcement learning – RL*), ao DBM para calibrá-lo resulta em um método mais efetivo para o dimensionamento de estoques em dois estágios de uma cadeia de suprimentos. Para tanto, o ambiente foi modelado no software AnyLogic® e foram realizadas simulações em cenários distintos, viabilizando análises estatísticas da efetividade do método DBM por indicadores relacionados ao nível de serviço e de estoque no sistema. A partir dessas análises, dois cenários que proporcionaram desempenhos inferiores em relação aos demais foram selecionados para a integração da técnica RL ao DBM. Os resultados indicam que o método integrado não apresentou melhoras para o atendimento da demanda da cadeia de suprimentos em relação a uma combinação de regras do DBM tradicional. Portanto, a TOC possui regras tradicionais para o DBM que, se combinadas adequadamente, podem fornecer uma solução robusta que assegura um nível de serviço adequado ao passo que mantém a eficiência do controle dos níveis de estoques. Por outro lado, a integração de RL ao DBM pode ser uma alternativa viável para a recomendação de parâmetros adequados do DBM em função das especificidades de cada ambiente, uma vez que uma escolha indevida pode impactar negativamente a disponibilidade dos produtos, prejudicando o atendimento da demanda.

Palavras-chave: Gestão da Cadeia de Suprimentos. Tambor-Pulmão-Corda Simplificado. Make to Availability. Reposição Puxada. Gerenciamento Dinâmico do Pulmão.

ABSTRACT

Providing proper attention to demand that flows through all links of a supply chain is a challenge that, if not met, implies some undesirable effects, such as low inventory turnover, high product investments, and lost sales due to stockouts. In order to address these undesirable effects, the Theory of Constraints (TOC) proposes the Pull Replenishment and Distribution (PRD) system supported by the Dynamic Buffer Management (DBM) method, which, based on empirically defined algorithms and parameters, identifies priorities for stock replenishment and indicates the need to adjust the target levels. Thus, this research aims to evaluate whether the integration of the artificial intelligence (AI) technique, specifically reinforcement learning (RL), into the DBM to calibrate it results in a more effective method for sizing stocks in two stages of a supply chain. To achieve this, the environment was modeled in the AnyLogic® software, and simulations were conducted under different scenarios, enabling statistical analysis of the effectiveness of the DBM method based on service level and inventory in the system. Based on these analyses, two scenarios that exhibited lower performances compared to others were selected for the integration of the RL technique into DBM. The results indicate that the integrated method did not present improvements in meeting supply chain demand in relation to a combination of traditional DBM rules. Therefore, TOC has traditional rules for DBM that, if combined appropriately, can provide a robust solution that ensures an adequate service level while maintaining efficient control of inventory levels. On the other hand, the integration of RL into DBM can be a viable alternative for recommending appropriate DBM parameters depending on the specificities of each environment, since an inappropriate choice can negatively impact product availability, hindering demand fulfillment.

Keywords: Supply Chain Management. Simplified Drum-Buffer-Rope. Make to Availability. Pull Replenishment. Dynamic Buffer Management.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura e conteúdo da tese	28
Figura 2 - Método Drum-Buffer-Rope (DBR) tradicional.....	33
Figura 3 - BM para um pulmão do CCR	34
Figura 4 - Conflito inerente aos ambientes MTS	36
Figura 5 - Regiões do pulmão de estoque	42
Figura 6 - Agregação da demanda e a variabilidade na cadeia de suprimentos	46
Figura 7 - Pulmões de estoque na cadeia de suprimentos	48
Figura 8 - Aplicação do conceito de VBP	49
Figura 9 - VBP na priorização de ordens de serviço	50
Figura 10 - Algoritmo alternativo para TMR.....	54
Figura 11 - Algoritmo de permanência nas regiões para TMR e TMG	54
Figura 12 - Importância do CP após a identificação de um TMG	55
Figura 13 - Interação entre agente e ambiente no RL.....	58
Figura 14 - Estágios e passos da revisão sistemática da literatura.....	60
Figura 15 - Diagrama de fluxo do processo de seleção e avaliação de estudos.....	64
Figura 16 - Evolução das publicações sobre o sistema MTA	66
Figura 17 - Evolução das publicações sobre o sistema PRD	67
Figura 18 - Evolução das publicações sobre o método DBM	67
Figura 19 - Distanciamento entre as publicações sobre o sistema PRD e as que também abordam o DBM	68
Figura 20 - Evolução das publicações da amostra final	69
Figura 21 - Mapa das publicações da amostra final	72
Figura 22 - Distribuição dos métodos de pesquisa adotados pelos estudos	73
Figura 23 - Passos do projeto de simulação	80
Figura 24 - Etapas do processo de fabricação do vidro temperado	85
Figura 25 - Estoque de matéria-prima.....	85
Figura 26 - Cavalete de queda livre e mesa de entrada de matéria-prima.....	86
Figura 27 - Mesa de processamento de corte automático	86
Figura 28 - Mesa de destaque de peças	87
Figura 29 - Início da estação de lapidação.....	88
Figura 30 - Fim da estação de lapidação	89
Figura 31 - Lavadora vertical utilizada após o processo de lapidação	89

Figura 32 - Lavadora horizontal utilizada após o processo de furação	90
Figura 33 - Máquina de recorte e furação a jato d'água	90
Figura 34 - Detalhe do processo de furação	91
Figura 35 - Mesa de entrada do forno	92
Figura 36 - Mesa de saída do forno	92
Figura 37 - Estoque de box incolor para banheiros.....	93
Figura 38 - Carregamento dos produtos para o distribuidor	93
Figura 39 - Modelo conceitual e suas fronteiras.....	95
Figura 40 - Modelagem BPMN do modelo conceitual	96
Figura 41 - Rotina diária do método DBM	99
Figura 42 - Modelo computacional desenvolvido no software AnyLogic	100
Figura 43 - Gráficos do DBM, TVD e IVD implementados no software AnyLogic ...	101
Figura 44 - Determinação do período mínimo de warm-up para o cenário B.....	112
Figura 45 - Determinação do período mínimo de warm-up para o cenário D.....	112
Figura 46 - Determinação do número mínimo de replicações, de acordo com a medida estoque médio (AF), para o cenário G	114
Figura 47 - Desempenho do distribuidor e do AF para FRP no cenário A	121
Figura 48 - Desempenho do distribuidor e do AF para TVD Médio no cenário A....	121
Figura 49 - Desempenho dos dois estágios da cadeia de suprimentos no cenário A	122
Figura 50 - Desempenho do distribuidor e do AF para FRP no cenário B	125
Figura 51 - Desempenho do distribuidor e do AF para TVD Médio no cenário B....	125
Figura 52 - Desempenho dos dois estágios da cadeia de suprimentos no cenário B	126
Figura 53 - Desempenho do distribuidor e do AF para FRP no cenário C	129
Figura 54 - Desempenho do distribuidor e do AF para TVD Médio no cenário C....	129
Figura 55 - Desempenho dos dois estágios da cadeia de suprimentos no cenário C	130
Figura 56 - Desempenho do distribuidor e do AF para FRP no cenário D	133
Figura 57 - Desempenho do distribuidor e do AF para TVD Médio no cenário D....	133
Figura 58 - Desempenho dos dois estágios da cadeia de suprimentos no cenário D	134
Figura 59 - Desempenho do distribuidor e do AF para FRP no cenário E	137
Figura 60 - Desempenho do distribuidor e do AF para TVD Médio no cenário E....	137

Figura 61 - Desempenho dos dois estágios da cadeia de suprimentos no cenário E	138
Figura 62 - Desempenho do distribuidor e do AF para FRP no cenário F.....	141
Figura 63 - Desempenho do distribuidor e do AF para TVD Médio no cenário F	141
Figura 64 - Desempenho dos dois estágios da cadeia de suprimentos no cenário F	142
Figura 65 - Desempenho do distribuidor e do AF para FRP no cenário G	145
Figura 66 - Desempenho do distribuidor e do AF para TVD Médio no cenário G ...	145
Figura 67 - Desempenho dos dois estágios da cadeia de suprimentos no cenário G	146
Figura 68 - Estrutura de aprendizagem da técnica de RL	148
Figura 69 - Recompensas do agente do cenário C após 36 minutos de treinamento	149
Figura 70 - Recompensas do agente do cenário C após 4 dias e 6 horas de treinamento	150
Figura 71 - Curva de aprendizagem do agente do cenário C após 168.000 iterações	150
Figura 72 - Curva de aprendizagem do agente do cenário G após 162.000 iterações	151
Figura 73 - Desempenho do distribuidor e do AF para FRP no cenário C com o tratamento DBM+RL.....	155
Figura 74 - Desempenho do distribuidor e do AF para TVD Médio no cenário C com o tratamento DBM+RL.....	156
Figura 75 - Desempenho dos dois estágios da cadeia de suprimentos no cenário C com o tratamento DBM+RL	156
Figura 76 - Desempenho do distribuidor e do AF para FRP no cenário G com o tratamento DBM+RL.....	160
Figura 77 - Desempenho do distribuidor e do AF para TVD Médio no cenário G com o tratamento DBM+RL.....	161
Figura 78 - Desempenho dos dois estágios da cadeia de suprimentos no cenário G com o tratamento DBM+RL	161
Figura 79 - Determinação do período mínimo de warm-up para o cenário A.....	190
Figura 80 - Determinação do período mínimo de warm-up para o cenário C.....	190
Figura 81 - Determinação do período mínimo de warm-up para o cenário E.....	191

Figura 82 - Determinação do período mínimo de warm-up para o cenário F	191
Figura 83 - Determinação do período mínimo de warm-up para o cenário G	191
Figura 84 - Determinação do número mínimo de replicações para o cenário A.....	192
Figura 85 - Determinação do número mínimo de replicações para o cenário B.....	193
Figura 86 - Determinação do número mínimo de replicações para o cenário C	194
Figura 87 - Determinação do número mínimo de replicações para o cenário D	195
Figura 88 - Determinação do número mínimo de replicações para o cenário E.....	196
Figura 89 - Determinação do número mínimo de replicações para o cenário F.....	197
Figura 90 - Determinação do número mínimo de replicações para o cenário G	198
Figura 91 - Diagrama de diferenças críticas para FRP no cenário A	220
Figura 92 - Diagrama de diferenças críticas para TVD Médio no cenário A.....	220
Figura 93 - Diagrama de diferenças críticas para Estoque Médio no cenário A.....	221
Figura 94 - Diagrama de diferenças críticas para IVD Médio no cenário A.....	221
Figura 95 - Diagrama de diferenças críticas para as medidas de desempenho da cadeia de suprimentos no cenário A	222
Figura 96 - Diagrama de diferenças críticas para FRP no cenário B	223
Figura 97 - Diagrama de diferenças críticas para TVD Médio no cenário B.....	223
Figura 98 - Diagrama de diferenças críticas para Estoque Médio no cenário B.....	224
Figura 99 - Diagrama de diferenças críticas para IVD Médio no cenário B.....	224
Figura 100 - Diagrama de diferenças críticas para as medidas de desempenho da cadeia de suprimentos no cenário B	225
Figura 101 - Diagrama de diferenças críticas para FRP no cenário C	226
Figura 102 - Diagrama de diferenças críticas para TVD Médio no cenário C	226
Figura 103 - Diagrama de diferenças críticas para Estoque Médio no cenário C....	227
Figura 104 - Diagrama de diferenças críticas para IVD Médio no cenário C.....	227
Figura 105 - Diagrama de diferenças críticas para as medidas de desempenho da cadeia de suprimentos no cenário C	228
Figura 106 - Diagrama de diferenças críticas para FRP no cenário D	229
Figura 107 - Diagrama de diferenças críticas para TVD Médio no cenário D	229
Figura 108 - Diagrama de diferenças críticas para Estoque Médio no cenário D....	230
Figura 109 - Diagrama de diferenças críticas para IVD Médio no cenário D.....	230
Figura 110 - Diagrama de diferenças críticas para as medidas de desempenho da cadeia de suprimentos no cenário D	231
Figura 111 - Diagrama de diferenças críticas para FRP no cenário E	232

Figura 112 - Diagrama de diferenças críticas para TVD Médio no cenário E.....	232
Figura 113 - Diagrama de diferenças críticas para Estoque Médio no cenário E....	233
Figura 114 - Diagrama de diferenças críticas para IVD Médio no cenário E.....	233
Figura 115 - Diagrama de diferenças críticas para as medidas de desempenho da cadeia de suprimentos no cenário E	234
Figura 116 - Diagrama de diferenças críticas para FRP no cenário F.....	235
Figura 117 - Diagrama de diferenças críticas para TVD Médio no cenário F.....	235
Figura 118 - Diagrama de diferenças críticas para Estoque Médio no cenário F....	236
Figura 119 - Diagrama de diferenças críticas para IVD Médio no cenário F	236
Figura 120 - Diagrama de diferenças críticas para as medidas de desempenho da cadeia de suprimentos no cenário F	237
Figura 121 - Diagrama de diferenças críticas para FRP no cenário G	238
Figura 122 - Diagrama de diferenças críticas para TVD Médio no cenário G	238
Figura 123 - Diagrama de diferenças críticas para Estoque Médio no cenário G ...	239
Figura 124 - Diagrama de diferenças críticas para IVD Médio no cenário G	239
Figura 125 - Diagrama de diferenças críticas para as medidas de desempenho da cadeia de suprimentos no cenário G	240
Figura 126 - Desempenho do distribuidor e do AF para Estoque Médio no cenário A	241
Figura 127 - Desempenho do distribuidor e do AF para IVD Médio no cenário A...	241
Figura 128 - Desempenho do distribuidor e do AF para Estoque Médio no cenário B	242
Figura 129 - Desempenho do distribuidor e do AF para IVD Médio no cenário B...	242
Figura 130 - Desempenho do distribuidor e do AF para Estoque Médio no cenário C	243
Figura 131 - Desempenho do distribuidor e do AF para IVD Médio no cenário C...	243
Figura 132 - Desempenho do distribuidor e do AF para Estoque Médio no cenário D	244
Figura 133 - Desempenho do distribuidor e do AF para IVD Médio no cenário D...	244
Figura 134 - Desempenho do distribuidor e do AF para Estoque Médio no cenário E	245
Figura 135 - Desempenho do distribuidor e do AF para IVD Médio no cenário E...	245
Figura 136 - Desempenho do distribuidor e do AF para Estoque Médio no cenário F	246

Figura 137 - Desempenho do distribuidor e do AF para IVD Médio no cenário F ...	246
Figura 138 - Desempenho do distribuidor e do AF para Estoque Médio no cenário G	247
Figura 139 - Desempenho do distribuidor e do AF para IVD Médio no cenário G...	247
Figura 140 - Desempenho do distribuidor e do AF para Estoque Médio no cenário C com o tratamento DBM+RL.....	248
Figura 141 - Desempenho do distribuidor e do AF para IVD Médio no cenário C com o tratamento DBM+RL.....	248
Figura 142 - Desempenho do distribuidor e do AF para Estoque Médio no cenário G com o tratamento DBM+RL.....	249
Figura 143 - Desempenho do distribuidor e do AF para IVD Médio no cenário G com o tratamento DBM+RL.....	249

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Nove regras do OPT	30
Quadro 2 - Cinco passos de focalização	31
Quadro 3 - Síntese das regras do método DBM	56
Quadro 4 - Códigos de busca utilizados nas bases de dados.....	62
Quadro 5 - Critérios para inclusão ou exclusão de um estudo na amostra final	63
Quadro 6 - Síntese das evidências identificadas na literatura acadêmica	75
Quadro 7 - Classificações ABC para os produtos das classes fixo e porta.....	103
Quadro 8 - Tempos de processamento, em segundos, de elementos com tempos determinísticos	105
Quadro 9 - Síntese dos tratamentos da pesquisa experimental.....	108
Quadro 10 - Parâmetros das demandas de cada produto no distribuidor	111
Quadro 11 - Intervalos de parâmetros do DBM para os treinamentos da IA.....	148
Quadro 12 - Parâmetros do DBM para os tratamentos DBM+RL	151

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Definição das prioridades a partir do buffer status	40
Tabela 2 - Buffer status e priorização de acordo com a região do pulmão	42
Tabela 3 - Classificação dos artigos da amostra final	65
Tabela 4 - Fontes de publicação da amostra final	70
Tabela 5 - Autores com mais de uma publicação na amostra final	71
Tabela 6 - Instituições com mais de uma publicação na amostra final.....	71
Tabela 7 - Quantidade de publicações por país	72
Tabela 8 - Resumo dos ajustes dos dados de demanda para os seis produtos	104
Tabela 9 - Tomadas de tempo, em segundos, e testes de normalidade para os tempos de processamento	106
Tabela 10 - Resumo dos resultados do cenário A.....	119
Tabela 11 - Testes de normalidade e homogeneidade de variâncias para os tratamentos no cenário A	120
Tabela 12 - Testes de Friedman para o cenário A	120
Tabela 13 - Resumo dos resultados do cenário B.....	123
Tabela 14 - Testes de normalidade e homogeneidade de variâncias para os tratamentos no cenário B	124
Tabela 15 - Testes de Friedman para o cenário B	124
Tabela 16 - Resumo dos resultados do cenário C	127
Tabela 17 - Testes de normalidade e homogeneidade de variâncias para os tratamentos no cenário C	128
Tabela 18 - Testes de Friedman para o cenário C	128
Tabela 19 - Resumo dos resultados do cenário D	131
Tabela 20 - Testes de normalidade e homogeneidade de variâncias para os tratamentos no cenário D	132
Tabela 21 - Testes de Friedman para o cenário D	132
Tabela 22 - Resumo dos resultados do cenário E.....	135
Tabela 23 - Testes de normalidade e homogeneidade de variâncias para os tratamentos no cenário E	136
Tabela 24 - Testes de Friedman para o cenário E	136
Tabela 25 - Resumo dos resultados do cenário F.....	139

Tabela 26 - Testes de normalidade e homogeneidade de variâncias para os tratamentos no cenário F	140
Tabela 27 - Testes de Friedman para o cenário F	140
Tabela 28 - Resumo dos resultados do cenário G	143
Tabela 29 - Testes de normalidade e homogeneidade de variâncias para os tratamentos no cenário G	144
Tabela 30 - Testes de Friedman para o cenário G	144
Tabela 31 - Resumo dos resultados do cenário C com o tratamento DBM+RL	153
Tabela 32 - Testes de normalidade e homogeneidade de variâncias para o cenário C com o tratamento DBM+RL	154
Tabela 33 - Testes de Friedman para o cenário C com o tratamento DBM+RL	154
Tabela 34 - Testes post-hoc de Nemenyi para o cenário C com o tratamento DBM+RL	155
Tabela 35 - Resumo dos resultados do cenário G com o tratamento DBM+RL	157
Tabela 36 - Testes de normalidade e homogeneidade de variâncias para o cenário G com o tratamento DBM+RL	159
Tabela 37 - Testes de Friedman para o cenário G com o tratamento DBM+RL	159
Tabela 38 - Testes post-hoc de Nemenyi para o cenário G com o tratamento DBM+RL	160
Tabela 39 - Valores-p dos testes post-hoc de Nemenyi para o distribuidor no cenário A	199
Tabela 40 - Valores-p dos testes post-hoc de Nemenyi para o armazém da fábrica no cenário A	200
Tabela 41 - Valores-p dos testes post-hoc de Nemenyi para a cadeia de suprimentos no cenário A	201
Tabela 42 - Valores-p dos testes post-hoc de Nemenyi para o distribuidor no cenário B	202
Tabela 43 - Valores-p dos testes post-hoc de Nemenyi para o armazém da fábrica no cenário B	203
Tabela 44 - Valores-p dos testes post-hoc de Nemenyi para a cadeia de suprimentos no cenário B	204
Tabela 45 - Valores-p dos testes post-hoc de Nemenyi para o distribuidor no cenário C	205

Tabela 46 - Valores-p dos testes post-hoc de Nemenyi para o armazém da fábrica no cenário C	206
Tabela 47 - Valores-p dos testes post-hoc de Nemenyi para a cadeia de suprimentos no cenário C	207
Tabela 48 - Valores-p dos testes post-hoc de Nemenyi para o distribuidor no cenário D.....	208
Tabela 49 - Valores-p dos testes post-hoc de Nemenyi para o armazém da fábrica no cenário D.....	209
Tabela 50 - Valores-p dos testes post-hoc de Nemenyi para a cadeia de suprimentos no cenário D.....	210
Tabela 51 - Valores-p dos testes post-hoc de Nemenyi para o distribuidor no cenário E.....	211
Tabela 52 - Valores-p dos testes post-hoc de Nemenyi para o armazém da fábrica no cenário E	212
Tabela 53 - Valores-p dos testes post-hoc de Nemenyi para a cadeia de suprimentos no cenário E	213
Tabela 54 - Valores-p dos testes post-hoc de Nemenyi para o distribuidor no cenário F.....	214
Tabela 55 - Valores-p dos testes post-hoc de Nemenyi para o armazém da fábrica no cenário F	215
Tabela 56 - Valores-p dos testes post-hoc de Nemenyi para a cadeia de suprimentos no cenário F	216
Tabela 57 - Valores-p dos testes post-hoc de Nemenyi para o distribuidor no cenário G	217
Tabela 58 - Valores-p dos testes post-hoc de Nemenyi para o armazém da fábrica no cenário G.....	218
Tabela 59 - Valores-p dos testes post-hoc de Nemenyi para a cadeia de suprimentos no cenário G.....	219

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AF – Armazém da Fábrica
BM – *Buffer Management*
BS – *Buffer Status*
BS_{op} – *Buffer Status da Ordem de Produção*
CCR – *Capacity Constrained Resource*
CPFR – *Collaborative Planning, Forecasting and Replenishment*
CE – Critério de Exclusão
CI – Critério de Inclusão
CP – *Cooling Period*
DBM – *Dynamic Buffer Management*
DBR – *Drum-Buffer-Rope*
DWIP – *Downstream Work-in-Process*
ECR – *Efficient Consumer Response*
EM – Estoque Médio
FGI – *Finished Goods Inventory*
FIFO – *First In, First Out*
FRP – *Fill Rate Ponderado*
IA – Inteligência Artificial
IDD – *Inventory-Dollar-Days*
IVD – *Inventory-Value-Days*
ML – *Machine Learning*
MRP – *Material Requirements Planning*
MSER – Marginal Standard Error Rule
MTA – *Make to Availability*
MTO – *Make to Order*
MTS – *Make to Stock*
OPT – *Optimized Production Technology*
PRD – *Pull Replenishment and Distribution*
PRISMA – *Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analyses*
QR – *Quick Response*
RL – *Reinforcement Learning*
SCM – *Supply Chain Management*

S-DBR – *Simplified Drum-Buffer-Rope*

SKU – *Stock Keeping Unit*

TDD – *Throughput-Dollar-Days*

TL – *Target Level*

TMG – *Too Much Green*

TMR – *Too Much Red*

TOC – *Theory of Constraints*

TOCICO – *Theory of Constraints International Certification Organization*

TVD – *Throughput-Value-Days*

UDE – *Undesirable Effect*

VBP – *Virtual Buffer Penetration*

VMI – *Vendor Managed Inventory*

WIP – *Work in Process*

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	20
1.1	QUESTÃO DE PESQUISA.....	24
1.2	OBJETIVOS DA PESQUISA	24
1.3	JUSTIFICATIVA DA PESQUISA	25
1.4	ESTRUTURA DA TESE	26
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	29
2.1	TEORIA DAS RESTRIÇÕES.....	29
2.2	MAKE TO AVAILABILITY (MTA)	35
2.3	REPOSIÇÃO E DISTRIBUIÇÃO PUXADAS (<i>PULL REPLENISHMENT AND DISTRIBUTION – PRD</i>)	43
2.4	GERENCIAMENTO DINÂMICO DO PULMÃO (<i>DYNAMIC BUFFER MANAGEMENT – DBM</i>)	51
2.5	APRENDIZADO POR REFORÇO (<i>REINFORCEMENT LEARNING – RL</i>)..	56
3	REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA	59
3.1	FORMULAÇÃO DAS QUESTÕES DE PESQUISA.....	60
3.2	LOCALIZAÇÃO DOS ESTUDOS.....	61
3.3	SELEÇÃO E AVALIAÇÃO DOS ESTUDOS	62
3.4	ANÁLISE E SINTETIZAÇÃO DOS DADOS.....	64
3.4.1	Panorama das publicações identificadas na amostra final	64
3.4.1.1	Evolução das publicações entre 2001 e 2021	66
3.4.1.2	Fontes de publicação	69
3.4.1.3	Autores com mais de um artigo publicado	69
3.4.1.4	Instituições com mais de um artigo publicado	70
3.4.1.5	Publicações por país.....	71
3.4.2	Métodos de pesquisa adotados pelos estudos	72
3.4.3	Evidências identificadas na literatura acadêmica	74
4	MÉTODO DE PESQUISA	78
4.1	ABORDAGEM METODOLÓGICA	78
4.2	PASSOS DA PESQUISA EXPERIMENTAL	79
4.3	MEDIDAS DE DESEMPENHO DO SISTEMA.....	82
5	UNIDADES DE ANÁLISE SELECIONADAS.....	84
6	MODELAGEM DAS UNIDADES DE ANÁLISE	94

6.1	DEFINIÇÃO DO SISTEMA E CONSTRUÇÃO DO MODELO CONCEITUAL	94
6.2	CONSTRUÇÃO DO MODELO COMPUTACIONAL	98
6.3	VERIFICAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO COMPUTACIONAL.....	102
7	DELINEAMENTO DE EXPERIMENTOS.....	107
7.1	DEFINIÇÃO DOS TRATAMENTOS	107
7.2	PLANEJAMENTO DOS CENÁRIOS	108
7.3	DETERMINAÇÃO DO PERÍODO DE WARM-UP.....	110
7.4	DETERMINAÇÃO DO NÚMERO DE REPLICAÇÕES	113
7.5	DETERMINAÇÃO DO TEMPO DE DURAÇÃO DAS SIMULAÇÕES	114
8	RESULTADOS.....	115
8.1	EXECUÇÃO DOS EXPERIMENTOS E O PROCEDIMENTO PARA AS ANÁLISES DOS RESULTADOS.....	115
8.2	RESULTADOS E ANÁLISES ESTATÍSTICAS POR CENÁRIO	117
8.2.1	Resultados e análises estatísticas do cenário A.....	118
8.2.2	Resultados e análises estatísticas do cenário B.....	122
8.2.3	Resultados e análises estatísticas do cenário C.....	126
8.2.4	Resultados e análises estatísticas do cenário D.....	130
8.2.5	Resultados e análises estatísticas do cenário E.....	134
8.2.6	Resultados e análises estatísticas do cenário F	138
8.2.7	Resultados e análises estatísticas do cenário G	143
8.3	PROPOSTA DE INTEGRAÇÃO DE IA AO DBM.....	146
8.3.1	Resultados e análises estatísticas do cenário C com o tratamento DBM+RL	152
8.3.2	Resultados e análises estatísticas do cenário G com o tratamento DBM+RL	157
9	DISCUSSÕES	162
10	CONSIDERAÇÕES FINAIS	167
10.1	PRINCIPAIS RESULTADOS	167
10.2	CONTRIBUIÇÕES E IMPLICAÇÕES PARA A TEORIA E A PRÁTICA	169
10.3	LIMITAÇÕES DA PESQUISA E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	170
	FINANCIAMENTO	172

REFERÊNCIAS.....	173
APÊNDICE A – ARTIGOS EXCLUÍDOS DA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA	184
APÊNDICE B – APLICAÇÕES DO MÉTODO MSER PARA OS DEMAIS CENÁRIOS SIMULADOS.....	190
APÊNDICE C – DETERMINAÇÃO DO NÚMERO MÍNIMO DE REPLICAÇÕES...	192
APÊNDICE D – VALORES-P DOS TESTES POST-HOC DE NEMENYI.....	199
APÊNDICE E – DIAGRAMAS DE DIFERENÇAS CRÍTICAS PARA VISUALIZAÇÃO DOS RESULTADOS DO TESTE POST-HOC DE NEMENYI	220
APÊNDICE F – BOXPLOTS DAS MEDIDAS DE DESEMPENHO ESTOQUE MÉDIO E IVD MÉDIO POR ESTÁGIO DA CADEIA DE SUPRIMENTOS	241

1 INTRODUÇÃO

Fornecer devida atenção à demanda que percorre todos os elos de uma cadeia de suprimentos é um desafio que, se não for cumprido, implica efeitos indesejáveis (*Undesirable Effects* – UDEs)¹, ocasionando prejuízos e comprometendo as atividades e a saúde financeira das empresas que integram essa cadeia de suprimentos (LOWALEKAR; BASU, 2020; WAN; EVERS, 2011).

Baixa rotatividade de estoques, investimentos elevados em produtos, perda de vendas por ruptura de estoques, alto índice de obsolescência e falta de resposta às necessidades dos clientes são alguns dos UDEs presentes em cadeias de suprimentos tradicionais (MODI; LOWALEKAR; BHATTA, 2019; LOWALEKAR; RAVI, 2017; ZEMZAM et al., 2017; PONTE et al., 2016; SCHRAGENHEIM, A., 2010; GOLDRATT; ESHKOLI; BROWNLEER, 2009).

Historicamente, as empresas lidavam de forma isolada com tais UDEs por meio da adoção de políticas de gestão de estoques baseadas em sistemas de revisão contínua² ou revisão periódica³ (CHANG; CHANG; HUANG, 2014). No entanto, tais sistemas apresentam desempenhos satisfatórios para o atendimento da demanda em situações estacionárias, inviabilizando efetivas aplicações em situações reais devido às especificidades e às variabilidades presentes em cada ambiente (CHANG et al., 2019; CHANG; CHANG; SUN, 2015; WANG et al., 2015).

Desde a difusão do conceito de gestão da cadeia de suprimentos, estratégias mais recentes foram desenvolvidas para promover a cooperação e o compartilhamento efetivo de informações desde os consumidores finais até os primeiros fornecedores de matérias-primas. Algumas dessas estratégias são identificadas na literatura como *Quick Response* (QR) (CHAN; SHEN; CAI, 2018; CHOI; GUO, 2018), *Efficient Consumer Response* (ECR) (PFAHL; MOXHAM, 2014), *Vendor Managed Inventory* (VMI) (WETTASINGHE; LUONG, 2020; BODAGHI;

¹ De acordo com o Dicionário TOCICO (*Theory of Constraints International Certification Organization*), efeito indesejável (*Undesirable Effect* – UDE) é um aspecto negativo da realidade atual em relação à meta de uma organização, de um sistema ou de suas condições necessárias. Também é visto como um sintoma de uma causa raiz subjacente, de um problema central ou de um conflito central (COX III et al., 2012).

² Em um sistema de revisão contínua, o estoque é verificado sempre que houver uma mudança no seu nível. Quando o nível de estoque diminui e alcança o ponto de pedido, um pedido de reposição é liberado (BLACKSTONE, 2013).

³ Em um sistema de revisão periódica, um pedido de reposição é feito em uma frequência de tempo determinada. A quantidade do pedido é variável e deve repor os itens consumidos durante o período atual (BLACKSTONE, 2013).

JOLAI; RABBANI, 2018; LEE; CHO; PAIK, 2016) e *Collaborative Planning, Forecasting and Replenishment* (CPFR) (NARITA; IKEZIRI; SOUZA, 2021; NIMMY; CHILKAPURE; PILLAI, 2019; SINGHRY; RAHMAN, 2019; HILL; ZHANG; MILLER, 2018).

Paralelamente a esses desenvolvimentos, a fim de contribuir com o foco necessário para o atendimento da demanda, Goldratt (1994) introduziu os conceitos da Teoria das Restrições (*Theory of Constraints – TOC*), que fora originalmente aplicada em um ambiente de produção no livro “A Meta” (GOLDRATT; COX, 1984), em cadeias de suprimentos com o livro “Não é Sorte”. Posteriormente, esses conceitos foram apresentados de forma ampliada no livro “Necessária, Sim, mas Não Suficiente” (GOLDRATT; SCHRAGENHEIM; PTAK, 2000) e, em maior profundidade, no livro “Não é Óbvio?” (GOLDRATT; ESHKOLI; BROWNLEER, 2009).

A proposta de solução da TOC para os UDEs presentes em ambientes de cadeias de suprimentos, frequentemente designada na literatura como “distribuição puxada” ou “reposição puxada”⁴, baseia-se na agregação do estoque de produtos acabados no nível mais alto da cadeia de suprimentos, isto é, em um armazém situado na fábrica ou em um armazém central, e em reposições de estoque puxadas a partir do consumo real (IKEZIRI et al., 2023; CHANG et al., 2019; GUPTA; ANDERSEN, 2018; CHANG; CHANG; CHANG, 2017; PONTE et al., 2016; CHANG; CHANG; SUN, 2015; WU et al., 2013; SOUZA; PIRES, 2010).

Parte da efetividade da proposta da TOC é de responsabilidade do método Gerenciamento Dinâmico do Pulmão (*Dynamic Buffer Management – DBM*), pois ele identifica as prioridades para o reabastecimento dos estoques e fornece sinais que revelam a necessidade de alterar os seus níveis-alvo (*Target Levels – TLs*). Para tanto, o DBM possui algoritmos empíricos que recomendam ajustes nos TLs em função de determinados padrões de comportamento do estoque de produtos acabados que, por sua vez, é influenciado pela combinação entre demanda e tempo de reposição (IKEZIRI et al., 2023; RAZMI; BAKI; SABBAGHNIA, 2022; NARITA; IKEZIRI; SOUZA, 2021; CHANG; CHANG; CHANG, 2017; SOUZA; PIRES, 2014, 2010; SCHRAGENHEIM A., 2010; SCHRAGENHEIM E., 2010b; SCHRAGENHEIM; DETTMER; PATTERSON, 2009).

⁴ Na presente tese, a proposta da TOC para ambientes de cadeias de suprimentos é denominada de “Reposição e Distribuição Puxadas” (*Pull Replenishment and Distribution – PRD*).

Logo, o DBM é necessário para controlar os níveis de estoques de fábricas que executam suas atividades segundo o sistema *Make to Availability* (MTA), ou de centros de distribuição e varejistas que utilizem o sistema de Reposição e Distribuição Puxadas (*Pull Replenishment and Distribution* – PRD)⁵ (PACHECO; ANTUNES JUNIOR; MATOS, 2021; SOUZA; PIRES, 2014; SCHRAGENHEIM, E., 2010b; SCHRAGENHEIM; DETTMER; PATTERSON, 2009).

A TOC, com base em seu princípio da simplicidade inerente, visa a adoção de métodos simples que sejam de fácil compreensão. Assim, o DBM é composto por regras desenvolvidas através da experiência e que podem variar em função do produto, do local ou do ambiente no qual estão sendo aplicadas. Os ajustes dos TLs e a identificação das necessidades de tais ajustes, seja por meio da análise de permanência nas regiões dos pulmões de estoque ou no cálculo de invasões na região vermelha dos pulmões, podem substituir o uso de técnicas sofisticadas de previsão de demanda (RAZMI; BAKI; SABBAGHNIA, 2022; SCHRAGENHEIM, A., 2010). No entanto, apesar de sua simplicidade e viabilidade, o DBM não apresenta lógicas fundamentadas em conhecimentos científicos (KAIJUN; YUXIA, 2010; YUAN; CHANG; LI, 2003).

Desde a expansão dos conhecimentos da TOC para a área de cadeias de suprimentos, o número de estudos sobre essa vertente aumentou (LOWALEKAR; BASU, 2020; MODI; LOWALEKAR; BHATTA, 2019; LOWALEKAR; RAVI, 2017; MATEEN; MORE, 2013; SIMATUPANG; WRIGHT; SRIDHARAN, 2004; RAHMAN, 2002; WALKER, 2002; PÉREZ, 1997). Em recente revisão da literatura sobre as principais áreas de conhecimento da TOC, Ikeziri et al. (2019) identificaram que, na área denominada pelos autores de Gestão da Cadeia de Suprimentos (*Supply Chain Management* – SCM), o primeiro artigo científico foi publicado por Pérez (1997), mas que o crescimento da quantidade de publicações ocorreu apenas em 2009, coincidindo com a publicação de dois livros significativos para essa área de conhecimento da TOC (GOLDRATT; ESHKOLI; BROWNLEER, 2009; SCHRAGENHEIM; DETTMER; PATTERSON, 2009). No livro “*Supply Chain Management at Warp Speed*”, Schragenheim, Dettmer e Patterson (2009) introduzem os conceitos dos sistemas MTA e PRD com o uso do método DBM.

⁵ Os fundamentos conceituais dos sistemas *Make to Availability* (MTA) e de Reposição e Distribuição Puxadas (*Pull Replenishment and Distribution* – PRD) são apresentados, respectivamente, nos Subcapítulos 2.2 e 2.3 desta tese.

Apesar do crescente número de publicações na área de SCM, são escassos os estudos que exploram a gestão de estoques em cadeias de suprimentos com o uso do método DBM (IKEZIRI et al., 2019; GUPTA, 2003). Geralmente, apenas um parâmetro de ajuste é utilizado no redimensionamento dos pulmões (NARITA; IKEZIRI; SOUZA, 2021; MODI; LOWALEKAR; BHATTA, 2019; CHANG; CHANG; CHANG, 2017; CHANG; CHANG; SUN, 2015; CHANG; CHANG; HUANG, 2014; WATSON; POLITO, 2003; YUAN; CHANG; LI, 2003) ou não fica explícito como o DBM foi implementado durante a pesquisa (CHANG et al. 2019). Além disso, tais estudos abordam apenas um estágio da cadeia de suprimentos, geralmente a fábrica, mas não reportam o uso do sistema MTA da TOC (IKEZIRI et al., 2023; CHANG; CHANG; LEI, 2014; KAIJUN; YUXIA, 2010).

A partir da condução de uma revisão sistemática da literatura, apresentada no Capítulo 3, foram buscados artigos publicados em periódicos internacionais nas bases de dados *Scopus* e *Web of Science*. Notou-se que o DBM, em maior proporção, é tema de pesquisas com propostas de melhorias baseadas em simulações, mas que não exploram os seus princípios na forma como foram propostos pela literatura clássica da TOC, assim como acontece com os conceitos do sistema PRD. Sendo assim, há um contraste entre a literatura acadêmica e os casos reportados por praticantes da TOC nos eventos da *Theory of Constraints International Certification Organization* (TOCICO) e no *Handbook da TOC* (IKEZIRI et al., 2019; GUPTA, 2003). Sobre o sistema MTA, apenas um estudo de caso (MODI; LOWALEKAR; BHATTA, 2019) e um artigo teórico-conceitual (SOUZA; PIRES, 2014) foram encontrados através das buscas nas bases de dados.

Diante disso, revela-se na literatura acadêmica uma lacuna e, portanto, a possibilidade de uma pesquisa que verifique a efetividade do uso do método DBM para gerenciar os estoques e preservar a disponibilidade de produtos em mais de um estágio de uma cadeia de suprimentos e, que ao final, proponha melhorias fundamentadas em conhecimentos científicos, como o uso de técnicas de Inteligência Artificial (IA), por exemplo, de aprendizado por reforço (*reinforcement learning* – RL), aos seus procedimentos empíricos.

Sob essa perspectiva, a originalidade da presente tese consiste na realização de estudos a partir de simulações computacionais de um cenário real e cenários teóricos de parte de uma cadeia de suprimentos composta por dois estágios, sendo uma fábrica e um distribuidor de produtos de vidros temperados localizados no estado

de São Paulo, cuja modelagem incorpora as lógicas dos sistemas MTA e PRD, ambas pertencentes ao portfólio de aplicações da TOC em ambientes de produção para estoque (*Make to Stock* – MTS) e de distribuição em cadeias de suprimentos, respectivamente. Para isso, a pesquisa foi desenvolvida por meio do *software* AnyLogic® (versão *University Researcher*), que é uma ferramenta multimétodo capaz de simular eventos discretos, sistemas dinâmicos e realizar simulações baseadas em agentes (IVANOV, 2017).

1.1 QUESTÃO DE PESQUISA

Com base na contextualização apresentada, esta pesquisa é norteada pela seguinte questão:

“A integração da técnica RL ao DBM, desenvolvido pela TOC de forma empírica, resulta em um método mais efetivo para o dimensionamento de estoques em dois estágios de uma cadeia de suprimentos?”

1.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

Dada a questão formulada, o objetivo geral desta pesquisa consiste em avaliar se a integração da técnica RL ao DBM para calibrá-lo resulta em um método mais efetivo para o dimensionamento de estoques em dois estágios de uma cadeia de suprimentos.

Em concordância com o objetivo geral, os seguintes objetivos específicos são propostos:

1. Identificar qual ou quais combinações de parâmetros do método DBM oferecem oportunidades e ameaças para a disponibilidade de produtos em parte de uma cadeia de suprimentos real em cenários específicos;
2. Compreender os motivos pelos quais determinadas combinações de parâmetros do método DBM, eventualmente, possam ter apresentado baixas performances, segundo medidas de desempenho voltadas a níveis de serviço e estoque;
3. Identificar parâmetros mais adequados que os parâmetros tradicionais do método DBM em cenários específicos para a realização dos ajustes dos níveis de estoques a partir da integração da técnica de IA de RL.

1.3 JUSTIFICATIVA DA PESQUISA

Schrageheim, Dettmer e Patterson (2009) apresentam a vertente da TOC para ambientes MTS intitulando essa nova abordagem de MTA. Após cinco anos, Souza e Pires (2014) sintetizam o conhecimento existente sobre os conceitos do sistema MTA e ressaltam a escassez de publicações em periódicos científicos com discussões focadas nesse tema. Depois, apenas em um artigo mais recente, Modi, Lowalekar e Bhatta (2019) reportam um caso de implementação do sistema MTA em um ambiente de produção que também fabrica produtos sob encomenda (*Make to Order – MTO*). Dessa forma, como apontam Ikeziri et al. (2019), ainda há a necessidade de pesquisas que abordem esse elemento da TOC em maior profundidade.

Em contraste ao MTA, o sistema PRD tem sido objeto de pesquisa em diferentes cenários e alvo de maior interesse por parte de pesquisadores nessa área. Por exemplo, Lowalekar e Basu (2020) mostram como a TOC pode contribuir para o desenvolvimento de ofertas que podem gerar vantagens competitivas para fabricantes em cadeias de suprimentos de produtos perecíveis. Lowalekar e Ravi (2017) recomendam a utilização do sistema PRD no contexto dos bancos de sangue, e Margaretha e Sahroni (2017) apresentam como ele poderia ser implementado em uma empresa de bens de consumo rápido da Indonésia.

No entanto, algumas pesquisas sobre esse tópico têm dedicado esforços sobre concepções pelas quais a própria TOC se opõe (BARNARD, 2010; SCHRAGENHEIM A., 2010; SCHRAGENHEIM; DETTMER; PATTERSON, 2009; GOLDRATT, 2008b; GOLDRATT; SCHRAGENHEIM; PTAK, 2000; GOLDRATT, 1990a, 1990b), por exemplo, a dependência do uso das informações de previsões de demanda (CHANG et al., 2019; CHANG; CHANG; SUN, 2015; CHANG; CHANG; HUANG, 2014; CHANG; CHANG; LEI, 2014; JIANG et al., 2013; KAIJUN; YUXIA, 2010), o uso de modelagens matemáticas na tentativa de otimizar as frequências de reposições (WU; LEE; TSAI, 2014; JIANG et al., 2013; WU; HUANG; JEN, 2012; WU et al., 2010a) e as frequências de *setups* (JIANG; WU, 2013a, 2013b). Portanto, este estudo contribui para a literatura ao simular, em concordância com os princípios da TOC, a aplicação conjunta dos sistemas MTA e PRD suportados pelo método DBM.

O DBM é o mecanismo de controle da TOC que apoia a efetividade de implementações dos sistemas MTA e PRD (PACHECO; ANTUNES JUNIOR; MATOS, 2021; MODI; LOWALEKAR; BHATTA, 2019; SOUZA; PIRES, 2014;

SCHRAGENHEIM, A., 2010; SCHRAGENHEIM, E., 2010b). Eli Schragenheim, um dos autores do livro que introduziu os fundamentos dos sistemas MTA e PRD com o uso do método DBM (SCHRAGENHEIM; DETTMER; PATTERSON, 2009), afirma que aplicações da TOC podem obter suporte e serem significativamente melhoradas pelo uso de IA (SCHRAGENHEIM; SCHRAGENHEIM, 2022). No caso do DBM, de acordo com Schragenheim e Schragenheim (2022), a IA deve ser capaz de apontar as necessidades de ajustes dos tamanhos dos pulmões de estoque e de recomendar o quanto aumentar ou reduzir de forma segura esses pulmões. Até o desenvolvimento da presente tese, não foram identificados estudos publicados nas conceituadas bases *Scopus* e *Web of Science* sobre a integração entre IA e o DBM. Sendo assim, esta pesquisa preenche uma lacuna identificada na literatura acadêmica por analisar a efetividade do método DBM e propor a integração de IA aos seus procedimentos para o controle dos níveis de estoques de dois estágios de uma cadeia de suprimentos.

Destaca-se, ainda, que este estudo apresenta relevância nacional, pois, de acordo com a revisão sistemática da literatura apresentada no Capítulo 3, os três artigos desenvolvidos no Brasil, que abordam o tema desta tese, são teórico-conceituais. Logo, o método de simulação aqui proposto está em conformidade com o método de pesquisa mais utilizado por autores estrangeiros dos artigos identificados.

Em virtude das possibilidades de contribuições apresentadas, esta tese tem caráter original e inédito para a comunidade acadêmica por permitir a ampliação do conhecimento existente sobre a aplicação da TOC em cadeias de suprimentos e, especificamente, para o método DBM. Além disso, por explorar um ambiente real, esta pesquisa pode fornecer *insights* importantes para o desenvolvimento de melhorias aos processos de empresas fabricantes ou distribuidoras por meio de aplicações de conceitos baseados na TOC e da integração de tecnologias emergentes, como o uso de técnicas de IA.

1.4 ESTRUTURA DA TESE

A tese está estruturada em dez capítulos, conforme a Figura 1. O Capítulo 1 apresenta a contextualização do tema, a questão, os objetivos e a justificativa desta pesquisa.

No Capítulo 2, são apresentados os conceitos fundamentais da TOC, seus elementos de interesse para esta tese: MTA, PRD e DBM, e conceitos do RL.

O Capítulo 3 detalha os passos e os principais resultados da revisão sistemática da literatura.

O Capítulo 4 apresenta o método de pesquisa, os passos seguidos durante a realização da pesquisa experimental e as medidas de desempenho propostas para a avaliação do DBM.

O Capítulo 5 apresenta as unidades de análise selecionadas.

No Capítulo 6, são detalhadas as etapas das construções do modelo conceitual e do modelo computacional, assim como os procedimentos para verificação e validação dos modelos.

O Capítulo 7 evidencia os aspectos do delineamento dos experimentos, como a definição dos tratamentos, planejamento dos cenários e as determinações do período de aquecimento (*warm-up*), número de replicações e duração das simulações.

O Capítulo 8 mostra informações sobre as execuções dos experimentos, os procedimentos para as análises estatísticas, a proposta de integração de IA ao DBM e os resultados da pesquisa.

No Capítulo 9, são feitas as discussões com base nos resultados apresentados no capítulo anterior.

O Capítulo 10 destaca os principais resultados e contribuições do estudo para o avanço do conhecimento. Por fim, as limitações inerentes à pesquisa e as oportunidades identificadas para trabalhos futuros são apresentadas.

Figura 1 - Estrutura e conteúdo da tese

Capítulo 1 – Introdução	• Contextualização • Questão e objetivos da pesquisa • Justificativa
Capítulo 2 – Fundamentação teórica	• Teoria das Restrições • <i>Make to Availability</i> (MTA) • Reposição e Distribuição Puxadas (<i>Pull Replenishment and Distribution</i> – PRD) • Gerenciamento Dinâmico do Pulmão (<i>Dynamic Buffer Management</i> – DBM) • Aprendizado por Reforço (<i>Reinforcement Learning</i> – RL)
Capítulo 3 – Revisão sistemática da literatura	• Formulação das questões de pesquisa • Localização dos estudos • Seleção e avaliação dos estudos • Análise e sintetização dos dados
Capítulo 4 – Método de pesquisa	• Abordagem metodológica • Passos da pesquisa experimental • Medidas de desempenho do sistema
Capítulo 5 – Unidades de análise selecionadas	• Apresentação do ambiente formado por parte de uma cadeia de suprimentos real
Capítulo 6 – Modelagem das unidades de análise	• Definição do sistema e construção do modelo conceitual • Construção do modelo computacional • Verificação e validação do modelo computacional
Capítulo 7 – Delineamento de experimentos	• Definição dos tratamentos • Planejamento dos cenários • Determinação do período de <i>warm-up</i> • Determinação do número de replicações • Determinação do tempo de duração das simulações
Capítulo 8 – Resultados	• Execução dos experimentos e o procedimento para as análises dos resultados • Resultados e análises estatísticas por cenário • Proposta de integração de IA ao DBM
Capítulo 9 – Discussões	• Discussões dos resultados à luz dos objetivos específicos da pesquisa
Capítulo 10 – Considerações finais	• Principais resultados • Contribuições e implicações para a teoria e a prática • Limitações da pesquisa e recomendações para trabalhos futuros

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são apresentadas as bases conceituais da Teoria das Restrições (*Theory of Constraints* – TOC), incluindo a sua evolução ao longo do tempo na gestão de operações até o tema central desta tese. Em seguida, são apresentados os conceitos fundamentais dos elementos da TOC para a presente pesquisa: *Make to Availability* (MTA), Reposição e Distribuição Puxadas (*Pull Replenishment and Distribution* – PRD) e o Gerenciamento Dinâmico do Pulmão (*Dynamic Buffer Management* – DBM).

2.1 TEORIA DAS RESTRIÇÕES

As origens da TOC datam do final da década de 1970, quando o físico israelense Dr. Eliyahu Moshe Goldratt começou a aplicar os conceitos das ciências experimentais na resolução de problemas organizacionais (BACELAR-SILVA; COX III; RODRIGUES, 2020; COX III; SCHLEIER, 2010). Com o passar do tempo, os conceitos da TOC foram expandidos de ambientes de produção para as mais diversas aplicações, elevando-a como um modelo de filosofia de gerenciamento global capaz de alavancar o desempenho e oferecer vantagens competitivas decisivas às organizações (IKEZIRI et al., 2019; PUCHE et al., 2016; COX; SCHLEIER, 2010; SOUZA; PIRES, 2010; WU et al. 2010a, 2010b; RAHMAN, 2002; BLACKSTONE, 2001; GOLDRATT, 1990a, 1990b).

A princípio, Goldratt constatou que as máquinas de um sistema de produção não precisam ser utilizadas durante todo o tempo e compreendeu que apenas os recursos gargalos devem ser programados, pois as demais estações de uma linha têm capacidade ociosa (BLACKSTONE, 2010). Essa percepção levou ao desenvolvimento do *software Optimized Production Technology* (OPT) que otimizava os sistemas de produção com base em uma programação finita, considerada um diferencial se comparada à lógica de carregamento infinito do *Material Requirements Planning* (MRP) (GUPTA; SNYDER, 2009; WATSON; BLACKSTONE; GARDINER, 2007; RAHMAN, 2002, 1998).

Apesar da proposta diferenciada por considerar a capacidade finita dos recursos (IKEZIRI et al., 2019), o progresso com as implementações do OPT era lento e havia muita dificuldade para lidar com a forma pela qual as indústrias mensuravam

as suas eficiências (GOLDRATT, 2003), pois a avaliação dos colaboradores era individual e, portanto, eles deveriam manter-se sempre ocupados produzindo algo mesmo que não estivesse no programa de produção (WATSON; BLACKSTONE; GARDINER, 2007).

Assim, o esforço inicial para combater a falácia da eficiência como sendo a principal medida de produtividade do colaborador foi revelar as nove regras que fundamentam o OPT, conforme mostra o Quadro 1 (BLACKSTONE, 2010; WATSON; BLACKSTONE; GARDINER, 2007; RAHMAN, 1998; GOLDRATT; FOX, 1986; HAYLETT, 1986).

Quadro 1 - Nove regras do OPT

Regra	Descrição
1	Balancear o fluxo, não a capacidade;
2	O nível de utilização de um recurso não gargalo não é determinado por seu potencial, mas por alguma restrição do sistema;
3	Utilização e ativação de um recurso não são sinônimas;
4	Uma hora perdida em um gargalo é uma hora perdida em todo o sistema;
5	Uma hora economizada em um recurso não gargalo é apenas uma miragem;
6	Os gargalos determinam tanto o ganho quanto os estoques do sistema;
7	O lote de transferência pode não ser, e muitas vezes não deveria ser, igual ao lote de processamento;
8	O lote de processamento deve ser variável, não fixo;
9	As programações devem ser estabelecidas examinando-se simultaneamente todas as restrições. Os tempos de atravessamento resultam da programação e não é possível predeterminá-los.

Fonte: Adaptado de Goldratt e Fox (1986).

Depois, Goldratt e Cox (1984) publicaram o livro “A Meta”, exteriorizando uma série de conceitos revolucionários sob a forma de um romance. Nesse livro, os autores exploram as principais ideias do OPT e, em suas edições mais recentes, apresentam os cinco passos de focalização, como uma ferramenta do processo de melhoria contínua da TOC, e os métodos Tambor-Pulmão-Corda (*Drum-Buffer-Rope* – DBR) e Gerenciamento do Pulmão (*Buffer Management* – BM) para a execução, respectivamente, do planejamento e do controle da produção (GUPTA; SNYDER, 2009; WATSON; BLACKSTONE; GARDINER, 2007; GOLDRATT, 2003; RAHMAN, 2002, 1998).

A TOC presume que todo sistema, por mais complexo que possa parecer, possui uma simplicidade inerente - uma restrição - que ao ser identificada e explorada terá o seu desempenho elevado em relação à sua meta. Portanto, assim como o elo

mais fraco de uma corrente determina toda a sua resistência, na prática, as restrições assumem o papel dos elos mais fracos e são responsáveis por limitar o desempenho dos sistemas. Diante disso, os cinco passos de focalização da TOC foram verbalizados e são apresentados no Quadro 2 (BACELAR-SILVA; COX III; RODRIGUES, 2020; GARZA-REYES et al., 2019; BARNARD, 2010; BLACKSTONE, 2001; GOLDRATT; COX, 1984).

Quadro 2 - Cinco passos de focalização

Passo	Descrição
1	Identificar a restrição do sistema;
2	Decidir como explorar a restrição do sistema;
3	Subordinar todo o resto à decisão acima;
4	Elevar a restrição do sistema;
5	Voltar ao passo número 1, mas sem permitir que a inércia se torne uma restrição do sistema.

Fonte: Adaptado de Goldratt e Cox (1984).

No livro “A Meta”, o protagonista Alex Rogo desenvolve uma solução para os problemas da fábrica que ele gerenciava a partir da analogia entre seus processos de produção e a caminhada de uma tropa de escoteiros, dando origem ao tradicional método DBR⁶ como sucessor do OPT (BLACKSTONE, 2010; SCHRAGENHEIM; DETTMER, 2000; GOLDRATT; COX, 1984).

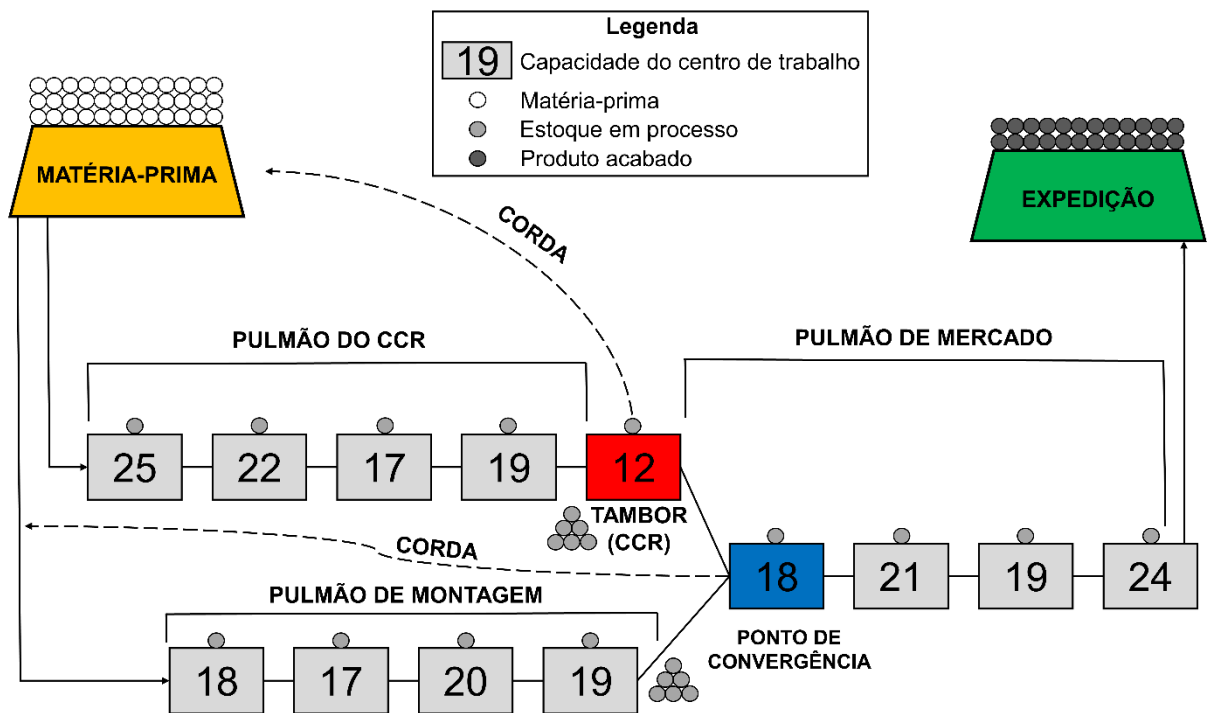
Os fundamentos do método DBR derivam da aplicação dos três primeiros passos de focalização da TOC. Sendo assim, no passo 1, deve-se estabelecer o tambor do sistema, isto é, identificar a restrição. No passo 2, com o intuito de explorar a restrição identificada, define-se o pulmão de mercado (ou expedição), o pulmão do recurso com restrição de capacidade (*Capacity Constrained Resource* – CCR) e, se necessário, o pulmão de montagem. Por fim, no passo 3, amarra-se as cordas entre os pulmões do CCR e de montagem e a liberação de matéria-prima para subordinar os demais recursos do sistema ao ritmo de produção da restrição (BLACKSTONE, 2010). Os conceitos fundamentais de cada um dos elementos que constituem o DBR são apresentados a seguir (COX III et al., 2012; SOUZA; BAPTISTA, 2010; GUPTA; SNYDER, 2009; SCHRAGENHEIM; DETTMER, 2000):

⁶ Apesar de a primeira edição do livro “A Meta” ter sido publicada em 1984, a terminologia *Drum-Buffer-Rope* (DBR) surgiu pela primeira vez em 1986, quando Goldratt e Fox publicaram o livro “A Corrida” (BLACKSTONE, 2010; SCHRAGENHEIM; DETTMER; PATTERSON, 2009; SCHRAGENHEIM; DETTMER, 2000; GOLDRATT; FOX, 1986; GOLDRATT; COX, 1984).

- Tambor: denominado gargalo ou CCR ativo, processa o trabalho em uma sequência específica baseada nos prazos acordados com os clientes. O tambor recebe esse nome, por estabelecer o ritmo de toda a produção do sistema.
- Pulmão: mecanismo de proteção do CCR ativo e da programação de expedição contra as variabilidades. O pulmão frequentemente é confundido com estoque de materiais aguardando para serem processados em frente ao CCR, mas para o DBR, ele é sempre definido na forma de tempo (oportunamente, em aplicações em sistemas de produção para estoque, será vista uma flexibilização dessa premissa). Três tipos de pulmões são utilizados no DBR tradicional:
 - Pulmão do CCR: se o CCR ativo (tambor) determina o ritmo da produção e, conseqüentemente, o desempenho global, então o sistema deve ser capaz de evitar ao máximo que esse recurso fique ocioso. Logo, o pulmão do CCR inclui todo o tempo necessário (considerando as incertezas) para que o estoque em processo (*Work in Process – WIP*) seja movimentado desde a liberação da matéria-prima até o ponto onde ele fica aguardando para ser processado em frente ao CCR.
 - Pulmão de mercado (expedição): protege a programação de entrega e trata-se de uma estimativa do tempo necessário de fabricação entre o CCR e a conclusão dos pedidos.
 - Pulmão de montagem: O pulmão de montagem protege o fluxo das peças que vieram do CCR de uma possível interrupção das operações cujo fluxo não passou pelo CCR. Assim, esse tipo de pulmão, quando utilizado, fica entre a liberação de matéria-prima e o ponto de convergência (montagem), onde as peças oriundas do CCR se combinam com as peças provenientes de um fluxo paralelo ao do CCR.
- Corda: dispositivo que estabelece o fluxo de informações entre a liberação de matéria-prima e o CCR. Portanto, novos materiais são liberados para o chão de fábrica de acordo com o ritmo do CCR, evitando excesso de WIP no sistema e a sobrecarga do CCR.

A Figura 2 ilustra um processo de produção com os três elementos do método DBR e os três tipos de pulmões apresentados. Os números dentro de cada retângulo correspondem à capacidade produtiva de cada centro de trabalho em um determinado período. O retângulo vermelho indica o tambor (CCR) e o retângulo azul indica o ponto de convergência (montagem).

Figura 2 - Método Drum-Buffer-Rope (DBR) tradicional



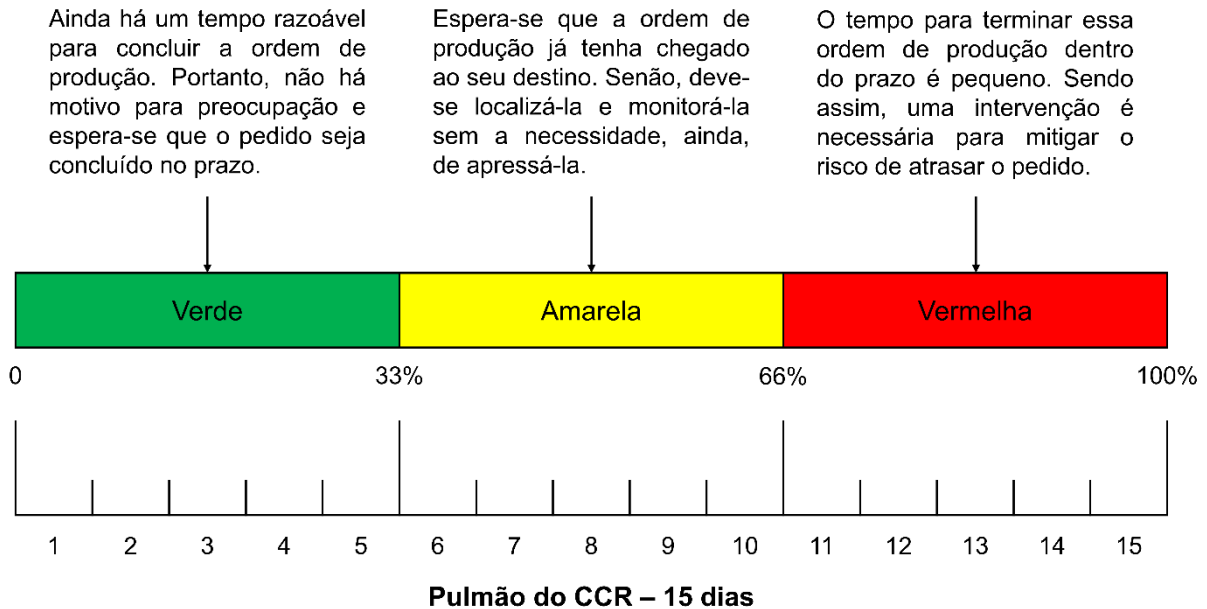
Fonte: Adaptado de Schragenheim, Dettmer e Patterson (2009).

O método BM, por sua vez, é o mecanismo de controle que apoia as implementações do DBR. Dessa forma, os pulmões de tempo (CCR, mercado e montagem) são divididos em três regiões, geralmente iguais, e cada região recebe uma cor (verde, amarela e vermelha) que indica uma ação a ser tomada em função do *buffer status* (penetração do pulmão calculada por meio da razão entre o tempo consumido do pulmão e o próprio tamanho do pulmão, expressa em porcentagem) de cada ordem de produção (COX III et al., 2012; LEE et al., 2010; SOUZA; BAPTISTA, 2010; SCHRAGENHEIM; DETTMER; PATTERSON, 2009). A Figura 3 exemplifica o BM para um pulmão de CCR de 15 dias e as ações que devem ser tomadas para cada região do pulmão, segundo o *buffer status*.

De acordo com Lee et al. (2010), o BM tem três funções: priorizar e apressar as ordens de produção que estão na zona vermelha; registrar os motivos e analisar a

frequência de pedidos que estão na zona vermelha para fomentar um processo de melhoria contínua; e fornecer *feedback* para o processo de planejamento de modo que o tamanho dos pulmões seja constantemente avaliado e reajustado.

Figura 3 - BM para um pulmão do CCR



Fonte: Adaptado de Schragenheim, Dettmer e Patterson (2009).

Com a experiência obtida depois de um amplo período de implementações bem sucedidas e de algumas dificuldades encontradas, Schragenheim e Dettmer (2000) introduzem uma variação do método DBR tradicional no livro “*Manufacturing at Warp Speed*” denominada Tambor-Pulmão-Corda Simplificado (*Simplified Drum-Buffer-Rope – S-DBR*). A principal diferença entre os dois métodos está no pressuposto fundamental do S-DBR, que é o estabelecimento da demanda de mercado como a principal restrição do sistema. Isso implica que todos os recursos da linha devem possuir capacidade protetiva ou em excesso, e os CCRs ativos (gargalos) deixam de existir, pelo menos na maior parte do tempo (CHAKRAVORTY; HALES, 2016; BENAVIDES; VAN LANDEGHEM, 2015; SOUZA; BAPTISTA, 2010; SCHRAGENHEIM; DETTMER; PATTERSON, 2009).

Sem um CCR ativo, não há necessidade de gerar programações detalhadas do CCR, e os três pulmões, que antes eram utilizados em implementações do DBR, agora são substituídos por um único pulmão de mercado também chamado de pulmão de produção. Além disso, a carga planejada, um mecanismo intrínseco do S-DBR, passa

a ser utilizada para computar todos os pedidos firmes que devem ser entregues em um horizonte de tempo determinado, permitindo o estabelecimento de datas de entrega confiáveis e a identificação de um potencial surgimento de um CCR ativo. Por fim, o BM continua sendo um método de controle da produção indissociável do S-DBR (BENAVIDES; VAN LANDEGHEM, 2015; COX III et al., 2012; LEE et al., 2010; SOUZA; BAPTISTA, 2010; SCHRAGENHEIM; DETTMER; PATTERSON, 2009; SCHRAGENHEIM; DETTMER, 2000).

Tanto o método DBR quanto o S-DBR pressupunham que as implementações ocorressem em ambientes de produção sob encomenda (*Make to Order* – MTO). Dessa forma, a combinação desses métodos com o BM poderia reduzir os prazos de entrega e, conseqüentemente, o estoque de produtos acabados, de tal forma que as organizações conseguissem satisfazer apenas as ordens firmes de seus clientes (SOUZA; IKEZIRI, no prelo; SOUZA; PIRES, 2014; SCHRAGENHEIM, E., 2010a; SCHRAGENHEIM; DETTMER; PATTERSON, 2009).

Contudo, a estratégia MTO não contempla as grandes empresas que disponibilizam os seus produtos para os consumidores finais por meio de centros de distribuição regionais ou redes de varejistas. Para essas organizações, tudo aquilo que é produzido está quase sempre preenchendo estoques em algum lugar. Portanto, foi natural a evolução do pensamento da TOC na gestão de operações para estender os conceitos do S-DBR aos ambientes de produção para estoque (*Make to Stock* – MTS) (SCHRAGENHEIM; DETTMER; PATTERSON, 2009). No próximo subcapítulo, os conceitos fundamentais da abordagem peculiar da TOC para ambientes MTS são apresentados.

2.2 MAKE TO AVAILABILITY (MTA)

Em virtude da grande variedade de produtos disponibilizados para o mercado, das frequentes mudanças nos projetos de novos produtos e das pressões organizacionais por reduções de estoques e de custos, adotar uma estratégia MTO, sem dúvidas, é a forma mais atrativa e adequada (SOUZA; PIRES, 2014).

No entanto, quando as organizações necessitam de centros de distribuição ou de uma rede de varejistas para que os produtos alcancem os consumidores finais, ou quando o tempo de produção de um pedido supera o tempo pelo qual os clientes estão dispostos a esperar, seguir a estratégia MTS torna-se uma decisão inevitável para

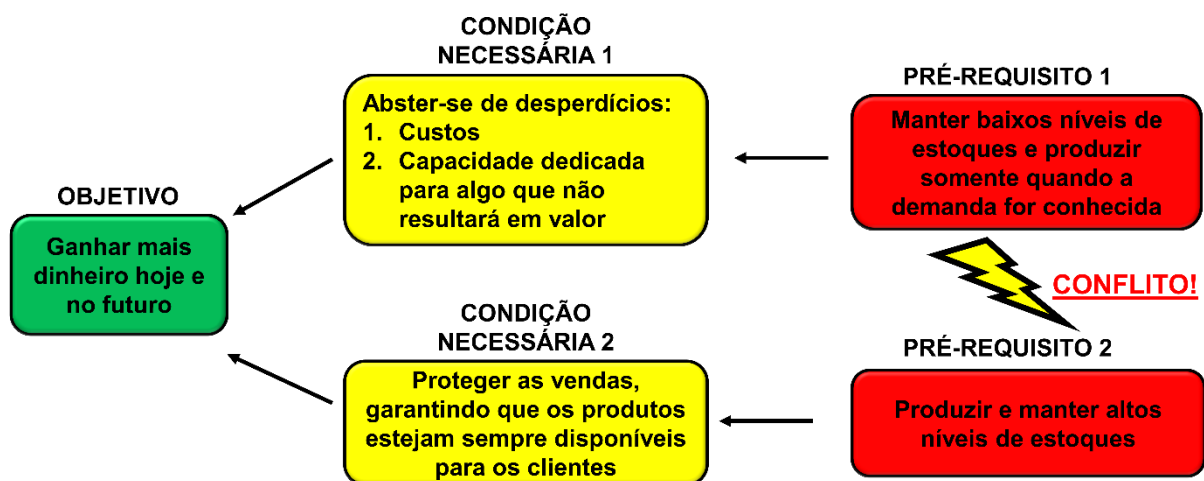
garantir a disponibilidade de produtos e proteger as vendas (SOUZA; PIRES, 2010; SCHRAGENHEIM; DETTMER; PATTERSON, 2009; GOLDRATT; GOLDRATT, 2003).

Em ambientes MTS, é comum que a produção esteja utilizando plenamente a sua capacidade para produzir algo com a expectativa de que possa ser vendido no futuro. De acordo com Schragenheim, Dettmer e Patterson (2009), existem dois problemas inerentes à produção de algo que não é necessário no momento:

1. Investimento na aquisição de materiais que podem não trazer retorno suficiente, se forem vendidos apenas em uma promoção, por exemplo, ou se não forem vendidos, tornando-se obsoletos.
2. Se houver um CCR ativo, uma confusão entre as prioridades pode desperdiçar capacidade com a produção de itens que serão estocados, sendo que a capacidade do CCR ativo deveria ser atribuída aos produtos que estão sendo realmente demandados pelos clientes no momento.

A Figura 4 ilustra o conflito comum entre manter baixos níveis ou altos níveis de estoques em um ambiente MTS.

Figura 4 - Conflito inerente aos ambientes MTS



Fonte: Adaptado de Goldratt e Goldratt (2003).

Anos após a introdução do conceito do método S-DBR para ambientes MTO (SCHRAGENHEIM; DETTMER, 2000), Schragenheim, Dettmer e Patterson (2009) apresentam como utilizá-lo em um ambiente MTS, dando origem a um sistema capaz de lidar com o conflito ilustrado na Figura 4, denominado *Make to Availability* (MTA). O sistema MTA é um compromisso com o mercado, ou com clientes específicos, para

manter disponibilidade suficiente de produtos em um armazém específico e entregar imediatamente sempre que houver um pedido. Essa definição é diferente da abordagem MTS tradicional, onde nenhum compromisso de disponibilidade é firmado (SOUZA; IKEZIRI, no prelo; MODI; LOWALEKAR; BHATTA, 2019; SOUZA; PIRES, 2014; SCHRAGENHEIM, E., 2010b; SCHRAGENHEIM; DETTMER; PATTERSON, 2009; SCHRAGENHEIM, 2007).

Schragenheim, Dettmer e Patterson (2009) apontam que demanda e tempo de reposição são as principais variáveis para determinar a dimensão “correta” dos estoques. Em relação à demanda, deve-se considerar a quantidade média para cada *Stock Keeping Unit* (SKU) e a faixa de dispersão dessa quantidade, por exemplo, com o uso do desvio padrão. O tempo de reposição é definido como o tempo entre o consumo de uma unidade do estoque até a reposição dessa unidade. Logo, um tempo de reposição menor viabiliza a manutenção de estoques menores para garantir a disponibilidade.

Ao considerar essas duas variáveis simultaneamente, a solução proposta pelo sistema MTA desafia o conflito inerente aos ambientes MTS (Figura 4). Diante disso, Schragenheim, Dettmer e Patterson (2009) definem cinco princípios essenciais para a implantação da proposta MTA com a finalidade de mitigar os riscos de perdas por ruptura ou por manter níveis excessivos de estoques:

1. Estoque e tempo de reposição são estritamente correlacionados – reposições em tempos curtos resultam em baixos níveis de estoques para assegurar a disponibilidade e evitar perda de vendas, assim como possibilitam uma projeção mais precisa da demanda. Por outro lado, se o tempo de reposição aumenta, mais estoque é necessário para garantir a disponibilidade e amparar o sistema contra mudanças na demanda.
2. Estoque em processo complementa a proteção da disponibilidade – estoque de produtos acabados representa a principal proteção para o mercado, mas o WIP também serve para assegurar a disponibilidade, pois espera-se que os produtos estejam quase prontos. Assim, mesmo que o nível de estoque de produtos acabados esteja baixo, o estoque alvo (Target Level – TL), composto pelo WIP somado ao estoque de produtos acabados, deve permanecer constante no sistema, tornando-o estável.
3. Amanhã será semelhante a hoje – essa é a base para as previsões de curto prazo. Logo, a menos que se note uma clara tendência de mudança na

demanda ou no tempo de reposição, assume-se que o TL atual é correto para assegurar a disponibilidade de produtos. A ramificação desse princípio combinado ao anterior é que sempre que um item for consumido do estoque, uma nova ordem de produção deve ser gerada. A ideia é manter o tempo de reposição o mais curto possível, atendendo a demanda rapidamente e mantendo o estoque no sistema relativamente constante.

4. Os *status* dos estoques de produtos acabados ditam as prioridades no chão de fábrica – seja para liberar uma nova ordem de produção ou para apressar uma que já esteja em processo. Para isso, deve-se determinar a prioridade de cada SKU por meio do seu *buffer status*, isto é, as quantidades de estoque em processo a jusante e de produtos acabados ausentes no sistema em relação ao seu respectivo TL.
5. Estagnação é indesejável – o *buffer status* de cada item pode indicar diversas regiões do pulmão de tempos em tempos, mas a permanência de um determinado item em apenas uma região do pulmão significa que o TL atual deve ser ajustado.

Esses princípios são as diretrizes que apoiam as implementações do sistema MTA. No entanto, sobre o primeiro princípio, Souza e Pires (2014) salientam que se o tempo de reposição for necessariamente longo, então a gerência deve aprender a conviver com altos níveis de estoques e suas consequências negativas. Sendo assim, a compreensão da interdependência entre estoque e tempo de reposição deve estimular o desenvolvimento de melhorias para romper essa limitação.

Após a definição dos cinco princípios, Schragenheim, Dettmer e Patterson (2009) detalham os quatro passos necessários para operar um processo de produção no modo MTA:

- **Passo 1: Determinar os níveis iniciais de TL**

Os TLs a serem mantidos para cada item do sistema no método MTA devem suportar a demanda média durante o tempo de reposição com a adição de um estoque de segurança, garantindo a proteção contra possíveis picos de demanda ou atrasos durante a reposição. Para que baixos níveis de estoque sejam obtidos, é fundamental que as reposições ocorram o mais rápido possível (princípio 1).

Nesse passo, não há necessidade de ser muito preciso na definição dos TLs iniciais, pois de acordo com o quinto princípio, a estagnação é indesejável e os TLs serão ajustados posteriormente de acordo com os comportamentos dos pulmões.

Souza e Pires (2014) complementam que os TLs iniciais devem ser dimensionados de forma conservadora, permitindo poucas rupturas de estoque no início da implementação do sistema MTA.

- **Passo 2: Gerar e liberar as ordens de produção**

Depois de definidos os TLs, a função produção é responsável por mantê-los sempre constantes. Isso significa que, se o estoque no sistema de qualquer SKU, isto é, a soma entre o estoque de produtos acabados e o WIP, for menor do que o TL, então uma nova ordem de produção deve ser gerada com o tamanho exato dessa diferença para estabilizar o sistema (princípios 2 e 3).

Segundo Souza e Pires (2014), apesar de simples e baseada no bom senso, essa lógica acaba gerando ordens de produção pequenas quando o estoque de produtos acabados está apenas um pouco abaixo do TL. Para lidar com esse problema, os autores recomendam dois mecanismos para gerar as ordens de produção:

1. Estabelecer uma política de lote mínimo⁷ de produção para que os recursos não se sobrecarreguem ao ponto de surgirem gargalos (CCR ativos) devido a um eventual aumento da quantidade de *setups*. De acordo com esse mecanismo, sempre que o estoque no sistema for menor que o TL, deve-se gerar uma ordem de produção com a quantidade igual ao lote mínimo ou igual à diferença entre o TL e o estoque no sistema, predominando o maior valor. Nota-se que apesar da intenção de evitar o surgimento de gargalos, esse mecanismo admitirá níveis de estoques no sistema superiores ao TL em alguns momentos, devendo sempre ser menor que o TL somado ao lote mínimo.
2. Liberar as ordens de produção para o chão de fábrica em função de suas prioridades e até um certo nível de carregamento da carga planejada⁸. No modo MTA, a prioridade é definida pelo *buffer status* de cada SKU e, para fins de liberação de uma nova ordem de produção, ele pode ser calculado por meio da Equação 1:

⁷ O lote mínimo não está relacionado ao cálculo de lotes econômicos (SOUZA; PIRES, 2014).

⁸ A carga planejada regular para o MTA é igual à soma da carga sobre o CCR de todas as ordens de produção liberadas para o chão de fábrica, mas que ainda não foram processadas pelo CCR (SCHRAGENHEIM, E., 2010b).

$$BS_{op} = \frac{TL - (FGI + DWIP)}{TL} \times 100 \quad (1)$$

Em que:

BS_{op} é o *buffer status*, expresso em porcentagem, da ordem de produção de um SKU a ser liberada para o chão de fábrica.

FGI é o estoque de produtos acabados (*finished goods inventory* – FGI) do SKU.

DWIP é o estoque em processo a jusante (*downstream work-in-process* – DWIP) do SKU cuja ordem de produção será liberada.

Quanto maior o BS_{op} , maior é a prioridade para liberação de uma ordem de produção.

O horizonte de tempo da carga planejada é igual ao tempo médio de reposição e Schragenheim, Dettmer e Patterson (2009) recomendam que a carga máxima fique sempre abaixo de 80% desse horizonte de tempo.

A Tabela 1 mostra como as prioridades para a reposição de 10 produtos são estabelecidas.

Tabela 1 - Definição das prioridades a partir do buffer status

Produto	Quantidade a repor	TL	BS_{op}^*	Carga sobre o CCR, incluindo o <i>setup</i> (horas)	Sequência de prioridade
P1	13	120	10,83%	1,5	3º
P2	3	95	3,16%	0,8	9º
P3	120	1000	12%	2	2º
P4	45	3000	1,5%	0,8	10º
P5	24	400	6%	3,2	5º
P6	114	3500	3,26%	2,5	8º
P7	100	1000	10%	1,5	4º
P8	100	2000	5%	2	6º
P9	33	750	4,4%	2	7º
P10	50	400	12,5%	3	1º

*Os 10 produtos não possuíam DWIP quando os BS_{op} foram calculados.

Fonte: Adaptado de Schragenheim, E. (2010b).

Supondo que para o exemplo da Tabela 1, o CCR trabalhe 16 horas por dia e que o tempo médio de reposição seja de 5 dias, tem-se que o horizonte de tempo da carga planejada regular é de 80 horas e que o seu limite máximo (80%) é de 64 horas. Se a carga planejada regular já possui 50 horas, sobram apenas 14 horas de trabalho para serem liberadas ao chão de fábrica. Sendo assim, os produtos P10, P3, P1, P7,

P5 e P8 seriam liberados e priorizados nessa sequência, totalizando 63,2 horas de carga planejada, e os produtos P9, P6, P2 e P4 aguardariam para liberação no dia seguinte, mantendo a carga planejada estabilizada abaixo de 80% do tempo médio de reposição (SCHRAGENHEIM, E., 2010b).

- **Passo 3: Gerenciar o pulmão**

Como foi mencionado no subcapítulo anterior, o BM é o mecanismo de controle da TOC (MODI; LOWALEKAR; BHATTA, 2019; SOUZA; PIRES, 2014; SCHRAGENHEIM, E., 2010a, 2010b; WATSON; BLACKSTONE; GARDINER, 2007). Essa ferramenta auxilia a estipular prioridades e alerta os operadores quando uma ordem de produção específica precisa ser apressada.

Os métodos DBR e S-DBR aplicados em ambientes MTO fazem uso de pulmões estipulados na forma de tempo. Por outro lado, no método MTA e no sistema PRD, os estoques são responsáveis por proteger a restrição de mercado. O pulmão de estoque também é dividido em três regiões iguais, cada qual correspondendo a uma cor (verde, amarela e vermelha) em função do *buffer status*.

O *buffer status* é definido como a porcentagem de penetração do pulmão (SCHRAGENHEIM, E., 2010b; SCHRAGENHEIM; DETTMER; PATTERSON, 2009) e é determinado pela razão entre a quantidade de unidades ausentes no pulmão (subtração entre o TL e a quantidade atual de estoque de produtos acabados) e o TL do SKU expresso em porcentagem, conforme a Equação 2.

$$BS = \frac{TL - FGI}{TL} \times 100 \quad (2)$$

Em que:

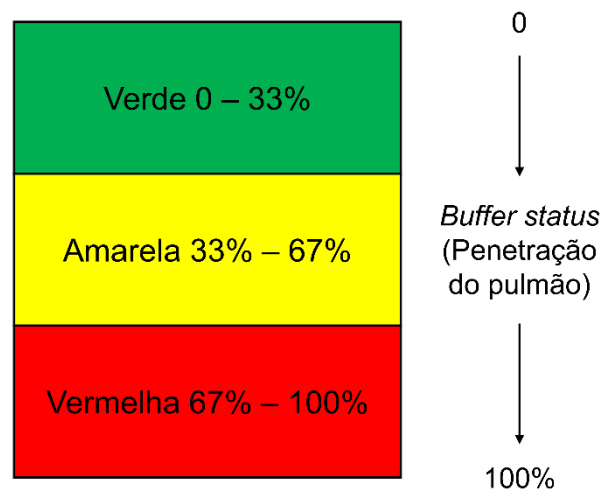
BS é o *buffer status* do SKU.

O *buffer status* indica uma cor de acordo com as regiões do pulmão. A região verde indica que mais de dois terços do TL se encontra no estoque de produtos acabados e a proteção é considerada suficiente (*buffer status* entre 0 e 33%). A região amarela significa que o estoque de produtos acabados contém entre um terço e dois terços do TL (*buffer status* entre 33 e 67%). Sendo assim, uma ordem de produção amarela tem prioridade maior que uma verde. A região vermelha alerta que a proteção é inferior a um terço do TL (*buffer status* entre 67 e 100%) e, portanto, a reposição deve ocorrer imediatamente com prioridade maior que as demais regiões, caso

contrário, o sistema estará exposto a sofrer rupturas de estoque (princípio 4) (COX III et al., 2012; SOUZA; PIRES, 2014, 2010; SCHRAGENHEIM, A., 2010; SCHRAGENHEIM, E., 2010b).

A Figura 5 mostra as regiões do pulmão de estoque em função do *buffer status* (penetração do pulmão).

Figura 5 - Regiões do pulmão de estoque



Fonte: Adaptado de Cox III et al. (2012).

Como exemplo, a Tabela 2 mostra os dados do TL, do estoque de produtos acabados e de três ordens de produção de um determinado produto. O *buffer status* do estoque de produtos acabados e os BS_{op} foram calculados, determinando as regiões do pulmão em que se encontram e suas respectivas prioridades.

Tabela 2 - Buffer status e priorização de acordo com a região do pulmão

Estoque e ordens de produção	Quantidade	Buffer status	Região
Estoque de produtos acabados	100	80%	Vermelha
Ordem de produção 1	200	80%	Vermelha
Ordem de produção 2	100	40%	Amarela
Ordem de Produção 3	100	20%	Verde
Target level	500		

Fonte: Adaptado de Schragenheim, E. (2010b).

Com apenas 100 unidades presentes no estoque de produtos acabados e para um TL de 500 unidades, o *buffer status* desse SKU e o BS_{op} da ordem de produção 1 são de 80%, indicando que o pulmão está na região vermelha e que a reposição deve ocorrer de forma emergencial. A ordem de produção 2 considera a ordem de produção

1 como DWIP e o estoque de produtos acabados no cálculo do seu BS_{op} (40%), que indica a região amarela do pulmão. Por sua vez, a ordem de produção 3 possui um BS_{op} de 20% e está na região verde. Vale destacar que o nível de estoque no sistema é igual ao TL.

- **Passo 4: Manter os TL corretos**

De acordo com Souza e Pires (2014), os passos anteriores estruturam o sistema para que as reposições rápidas aconteçam e as prioridades sejam identificadas mediante o *buffer status*. O quinto princípio do sistema MTA declara que a estagnação é indesejável. Desse modo, o quarto passo consiste em fornecer o *feedback* necessário para a etapa de planejamento, ajustando, sempre que necessário, os níveis de TL definidos inicialmente no passo 1.

O DBM é o método responsável por manter os TLs corretos no sistema e é abordado com maior profundidade no subcapítulo 2.4. No subcapítulo seguinte, são apresentados os conceitos fundamentais da aplicação da TOC em cadeias de suprimentos por meio do sistema PRD.

2.3 REPOSIÇÃO E DISTRIBUIÇÃO PUXADAS (*PULL REPLENISHMENT AND DISTRIBUTION* – PRD)

A produção por si só não assegura uma venda mesmo se houver demanda por parte dos consumidores. Para isso, os produtos fabricados precisam chegar até o usuário final, caso contrário, serão apenas estoques parados em um armazém de uma cadeia de suprimentos (SCHRAGENHEIM; DETTMER; PATTERSON, 2009).

Existem diversos efeitos indesejáveis (*Undesirable Effects* – UDEs) inerentes ao ambiente de cadeias de suprimentos dentre os quais pode-se citar (MODI; LOWALEKAR; BHATTA, 2019; LOWALEKAR; RAVI, 2017; ZEMZAM et al., 2017; PONTE et al., 2016; SCHRAGENHEIM, A., 2010; GOLDRATT; ESHKOLI; BROWNLEER, 2009; GOLDRATT; SCHRAGENHEIM; PTAK, 2000):

- Falta de responsividade em relação às necessidades dos clientes.
- Alto índice de obsolescência de estoque.
- Baixa rotatividade de estoque.
- Investimentos altos em estoque.
- Vendas perdidas por rupturas de estoque de determinados itens.

- Estoque excedente dos itens mencionados acima em outros locais.

A principal causa desses UDEs está relacionada com a tendência de uma cadeia de suprimentos tradicional empurrar os estoques para próximo do ponto de consumo com base em informações obtidas a partir de um modelo de previsão de demanda (SOUZA; IKEZIRI, no prelo; LOWALEKAR; BASU, 2020; MODI; LOWALEKAR; BHATTA, 2019; SIMATUPANG; WRIGHT; SRIDHARAN, 2004).

Esse comportamento de empurrar estoques baseia-se no pressuposto de que uma cadeia de suprimentos consiste em um conjunto de partes independentes, e que o alcance dos ótimos locais resulta no desempenho máximo global do sistema (COX III et al., 2012; BARNARD, 2010; GOLDRATT, 1990b).

Diante disso, a TOC estendeu o seu portfólio de aplicações para as cadeias de suprimentos e os conceitos fundamentais dessa abordagem foram introduzidos no livro “Não é Sorte” por Goldratt (1994) e desenvolvidos, posteriormente, por Goldratt, Schragenheim e Ptak (2000) no livro “Necessária, Sim, mas Não Suficiente” e, em maior profundidade, por Goldratt, Eshkoli e Brownleer (2009) no livro “Não é Óbvio?”.

Essa aplicação, denominada na presente tese como PRD, é definida no Dicionário TOCICO (*Theory of Constraints International Certification Organization*) como um método que envolve o dimensionamento de pulmões de estoque e, em seguida, o monitoramento e a reposição desses estoques com base no consumo real, ao invés de tomar como base as informações de previsão de demanda. Desse modo, cada elo da cadeia de suprimentos geralmente recebe o que foi vendido, embora esse valor possa variar para cima ou para baixo quando o DBM detecta mudanças na combinação entre demanda e tempo de reposição (COX III et al., 2012).

Portanto, a base para a solução proposta pela TOC está na análise do impacto que os fatores fornecimento e demanda exercem, de forma combinada, sobre a gestão dos estoques entre os seus integrantes (MODI; LOWALEKAR; BHATTA, 2019; SOUZA; PIRES, 2010). Schragenheim, A. (2010) define o procedimento para implementação do sistema PRD por meio de seis passos:

- **Passo 1: Agregar o estoque no nível mais alto da cadeia de suprimentos (armazém da fábrica ou armazém central)**

O primeiro passo estabelece que os pulmões de estoque maiores devem ficar situados no elo da cadeia onde ocorre a divergência, por exemplo, no armazém da fábrica (AF) ou armazém central. Entende-se que a partir desse elo, os estoques são encaminhados para atender necessidades distintas e os varejistas ficam responsáveis

por puxar o reabastecimento orientados por suas demandas reais (CHANG; CHANG; CHANG, 2017; CHANG; CHANG; SUN, 2015; SCHRAGENHEIM, A., 2010; WU et al. 2013, 2010a; WU; HUANG; JEN, 2012; SOUZA; PIRES, 2010).

Os varejistas costumam ter problemas com limitações de espaço e isso aumenta a dificuldade para que uma cadeia de suprimentos consiga manter os produtos sempre próximos dos consumidores finais. Logo, um AF ou um armazém central é adicionado num ponto intermediário entre os pontos de venda e a fábrica para compensar essa restrição de espaço físico e proporcionar reposições rápidas. Uma segunda justificativa para a implementação do AF ou armazém central é que geralmente eles ficam localizados em regiões afastadas e de baixo valor por unidade de área, enquanto que os varejistas atuam em lugares mais nobres, inviabilizando a manutenção de altos estoques para cada SKU (SCHRAGENHEIM; DETTMER; PATTERSON, 2009; GOLDRATT; GOLDRATT, 2003).

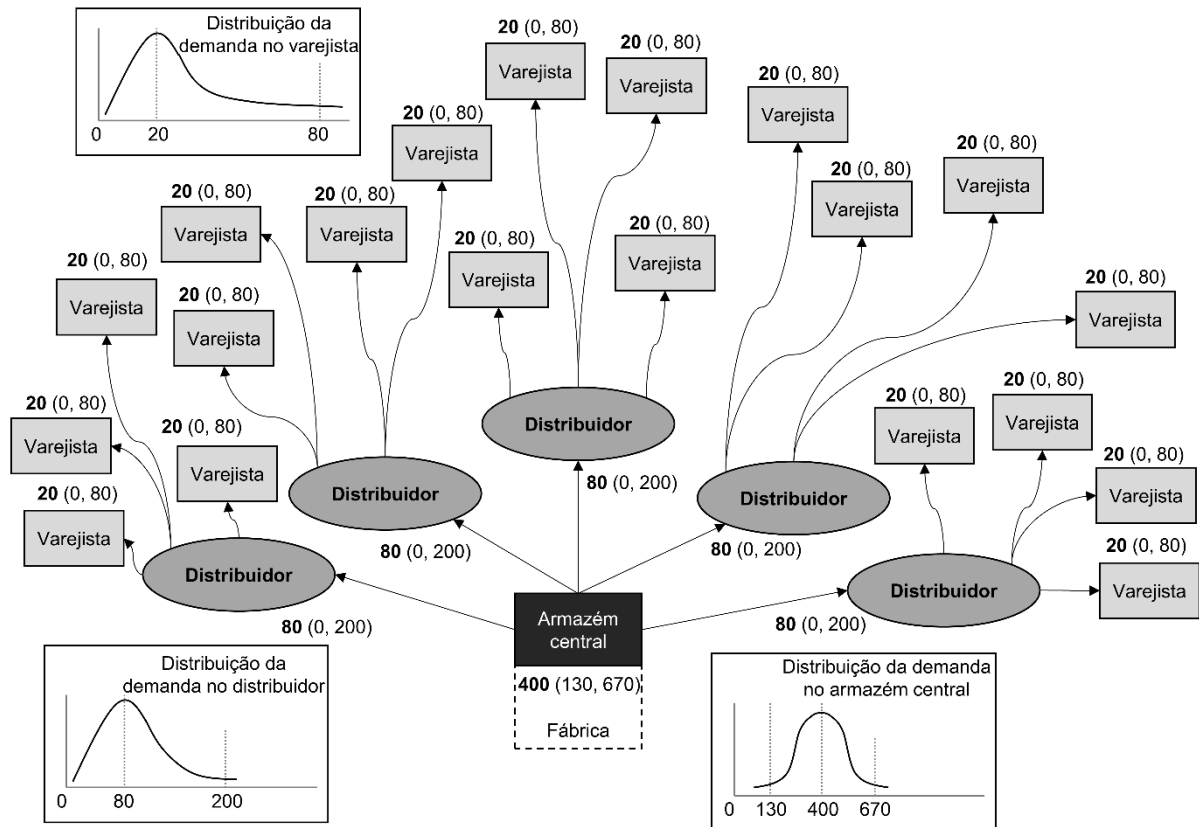
Além disso, de acordo com os princípios estatísticos, os estoques mantidos nos pontos de divergência estão sujeitos a variações menores da demanda e possibilitam a redução da quantidade total de estoque na cadeia de suprimentos (CHANG; CHANG; CHANG, 2017; CHANG; CHANG; SUN, 2015; SCHRAGENHEIM; DETTMER; PATTERSON, 2009; SOUZA; PIRES, 2010).

A Figura 6 mostra parte de uma cadeia de suprimentos composta pela fábrica, armazém central, distribuidores e varejistas. Destaca-se que o efeito da agregação de toda a demanda no armazém central origina uma distribuição mais próxima de uma normal, permitindo um maior controle sobre a variabilidade de toda a cadeia de suprimentos.

- **Passo 2: Dimensionar os pulmões de estoque para todos os locais da cadeia de suprimentos com base na demanda, no fornecimento e no tempo de reposição**

O TL indica a máxima quantidade mantida de um SKU entre os membros de uma cadeia de suprimentos para proteger o ganho (MODI; LOWALEKAR; BHATTA, 2019). Ele é determinado em função da demanda e da velocidade em que o sistema consegue responder a ela por meio das reposições (SOUZA; PIRES, 2014, 2010; WU et al., 2013; SCHRAGENHEIM, A., 2010).

Figura 6 - Agregação da demanda e a variabilidade na cadeia de suprimentos



Fonte: Adaptado de Schragenheim, Dettmer e Patterson (2009).

O tempo do pedido, isto é, o intervalo entre o consumo de uma unidade até a formalização de um pedido para reabastecê-la, normalmente ocupa a maior fração do tempo de reposição. Logo, se uma ordem de reposição de uma unidade for emitida simultaneamente ou próxima do momento do seu consumo, o tempo do pedido diminuirá para um valor próximo de zero, reduzindo o tempo de reposição em grande escala e permitindo um TL menor para satisfazer o mesmo nível de demanda (HUANG et al., 2014; GOLDRATT; ESHKOLI; BROWNLEER, 2009).

O TL inicial para cada SKU e em cada estágio de uma cadeia de suprimentos pode ser calculado multiplicando a demanda média dentro do tempo de reposição por um fator de segurança, que pode ser de 1,5 em ambientes de produção cujas prioridades são gerenciadas para um fluxo de trabalho rápido ou de 2, caso as flutuações de demanda sejam altas e os bloqueios no fluxo sejam frequentes (COX III et al., 2012; SCHRAGENHEIM E., 2010b; SOUZA; PIRES, 2010).

- **Passo 3: Aumentar a frequência de reposição**

O método tradicional utilizado por compradores incentiva a aquisição de grandes lotes por meio da economia de escala, visando o melhor desempenho local. Portanto, em vez de emitir pequenas ordens de reposição em frequências maiores, um único pedido é normalmente processado para otimizar tempo e esforço. A própria atitude de empurrar estoques pela cadeia de suprimentos também incentiva a negociação de grandes volumes, pois descontos maiores costumam ser oferecidos quando a quantidade comprada em um único pedido também é maior (CHANG et al., 2019; SIKILERO et al., 2014; SCHRAGENHEIM, A., 2010; SIMATUPANG; WRIGHT; SRIDHARAN, 2004).

A tecnologia da informação e comunicação, junto com as práticas de gestão da cadeia de suprimentos desenvolvidas nos últimos anos, tem contribuído para a integração dos processos entre organizações de uma mesma cadeia. Então, o esforço necessário para determinar e emitir pedidos de reposição não deve ser considerado como uma barreira para a implementação do sistema PRD (MODI; LOWALEKAR; BHATTA, 2019). Vale ressaltar que um aumento da frequência de entrega pode impactar o aumento dos custos das remessas. No entanto, quando a frequência de entrega é baixa, a disponibilidade dos produtos pode ficar comprometida e níveis de estoques mais altos passam a ser necessários para cobrir as variações da demanda, ocasionando os UDEs mencionados no início desse subcapítulo (GOLDRATT; GOLDRATT, 2003).

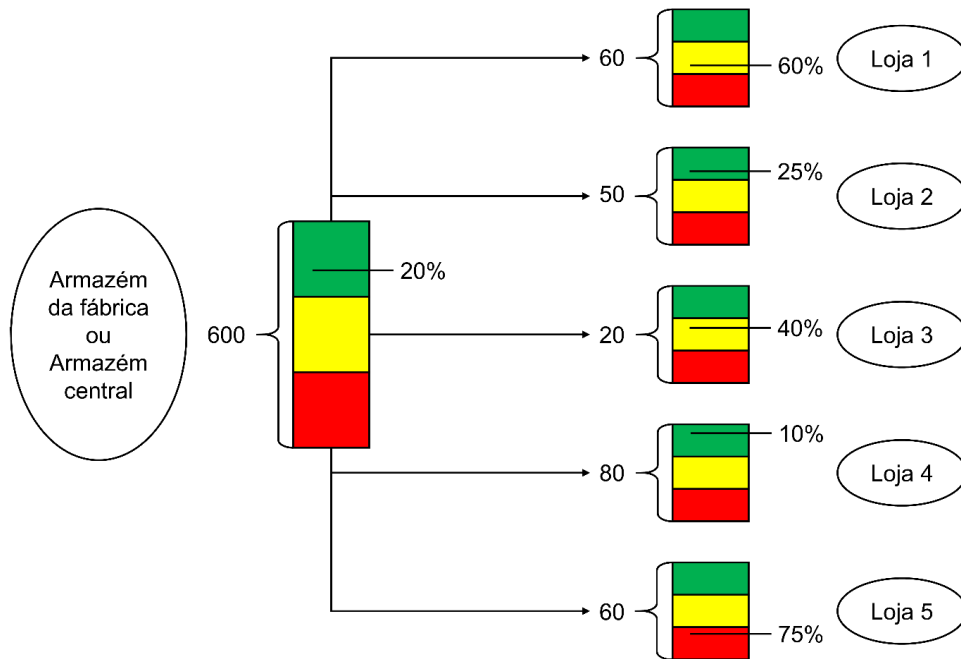
- **Passo 4: Gerenciar o fluxo dos estoques por meio dos pulmões e seus respectivos status**

Em aplicações da TOC em cadeias de suprimentos, assim como nas implementações do sistema MTA, os pulmões de estoque são utilizados para proteger os sistemas e processos de suas variabilidades e incertezas inerentes. Eles podem ser encontrados na forma de produtos acabados, WIP ou matéria-prima (MODI; LOWALEKAR; BHATTA, 2019; COX III et al., 2012; SCHRAGENHEIM, A., 2010).

A Figura 7 ilustra o uso dos pulmões para um mesmo SKU em diferentes locais de uma cadeia de suprimentos. Nota-se que para cada local existe um TL específico, por exemplo, 600 unidades para o AF ou armazém central e 60 unidades para a loja 1. A loja 5 tem prioridade para a reposição desse SKU, pois seu *buffer status* de 75% indica que apenas 15 unidades estão presentes no estoque de produtos acabados. Sendo assim, caso não tenha alguma entrega programada para a loja 5, um pedido

de reposição urgente de 45 unidades deve ser gerado e entregue o quanto antes para garantir a disponibilidade desse produto (SCHRAGENHEIM, A., 2010).

Figura 7 - Pulmões de estoque na cadeia de suprimentos

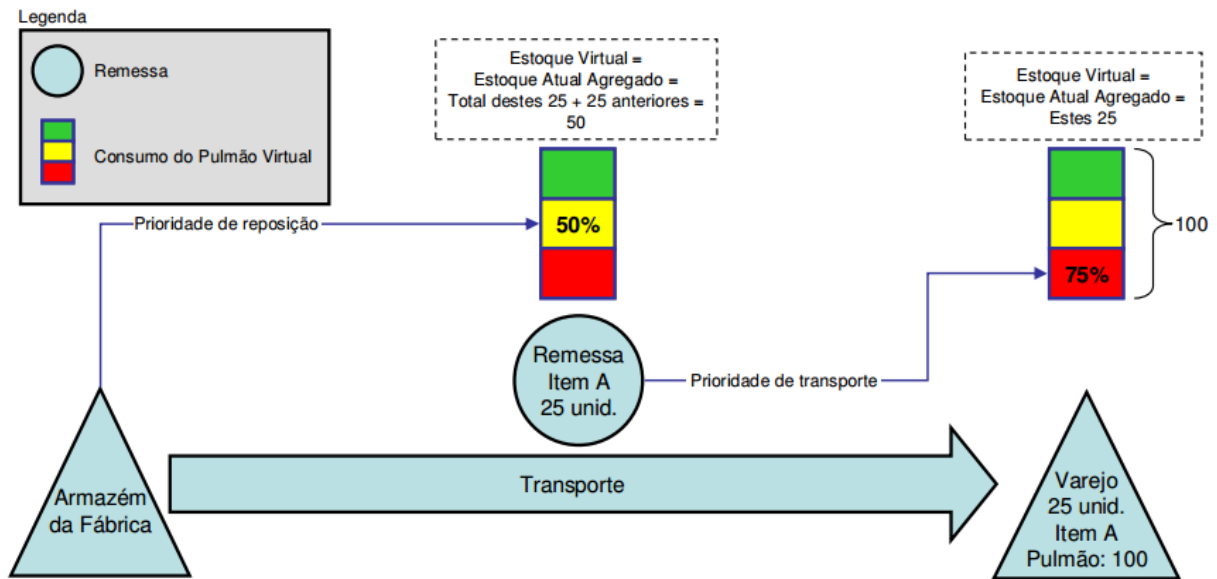


Fonte: Adaptado de Schragenheim, A. (2010).

O conceito de penetração do pulmão virtual (*Virtual Buffer Penetration – VBP*) foi desenvolvido pela companhia *Inherent Simplicity* (atualmente *Onebeat*) e permite que um mesmo pulmão possa ser visto sob diversas perspectivas, identificando as prioridades em qualquer local, desde que sejam considerados os estoques a jusante da cadeia de suprimentos (SCHRAGENHEIM, A., 2010, 2007). Esse conceito é semelhante ao cálculo do BS_{op} .

A Figura 8 exibe a utilização da VBP como apoio ao gerenciamento de estoque na cadeia de suprimentos. O TL do varejista para o item A é de 100 unidades, mas ele possui apenas 25 unidades disponíveis no momento, e ainda há uma remessa de mais 25 unidades que já está em trânsito. Em relação ao varejista, o estoque virtual é igual ao estoque real, ou seja, 25 unidades, correspondendo a uma VBP de 75%. Vale destacar que a prioridade de um SKU é sempre determinada pela VBP do próximo ponto de estoque a jusante. Então, sob a perspectiva do AF, a prioridade do próximo pedido de reposição a ser gerado é de 50% – amarela (VBP da remessa) e a prioridade de transporte da remessa é de 75% – vermelha (VBP do varejista) (SCHRAGENHEIM, A., 2010, 2007).

Figura 8 - Aplicação do conceito de VBP



Fonte: Adaptado de Schragenheim, A. (2007).

- **Passo 5: Usar o método DBM**

Os conceitos apresentados até o momento, como dimensionamento do TL, definição do *buffer status*, aumento da frequência de reposição e VBP, contribuem para inibir o uso de técnicas sofisticadas de previsão de vendas. O DBM também é um elemento chave da TOC e tem a função de ajustar o TL de um determinado item segundo o comportamento do seu estoque de produtos acabados, que é influenciado pela combinação entre demanda e tempo de reposição (RAZMI; BAKI; SABBAGHNIA, 2022; CHANG; CHANG; CHANG, 2017; COX III et al., 2012; SCHRAGENHEIM, A., 2010; SCHRAGENHEIM; DETTMER; PATTERSON, 2009).

Assim como foi mencionado no subcapítulo anterior, o subcapítulo 2.4 foi desenvolvido para explorar os conceitos do DBM em maiores detalhes.

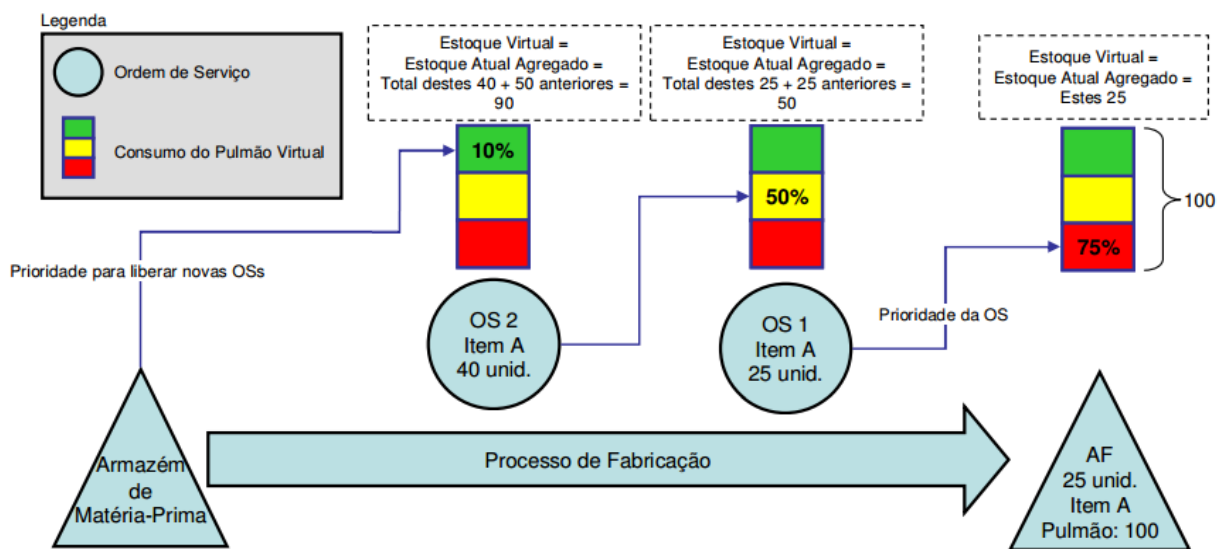
- **Passo 6: Definir as prioridades de produção de acordo com a urgência dos pulmões de estoque no armazém da fábrica ou armazém central**

O último passo do sistema PRD tem o objetivo de estabelecer, a partir da VBP, um sistema de prioridades de acordo com as urgências dos pulmões do AF (SCHRAGENHEIM, A., 2010, 2007).

No exemplo da Figura 9, o TL para o item A no AF é de 100 unidades, mas apenas 25 unidades estão disponíveis. Além disso, duas ordens de serviço de 25 e 40 unidades estão aguardando para serem finalizadas. Sendo assim, a VBP do AF corresponde a 75%, a VBP da ordem de serviço 1 deve considerar o estoque de

produtos acabados do AF e a sua própria quantidade, resultando em 50% e, por fim, para a ordem de serviço 2 deve-se considerar a sua própria quantidade somada à quantidade de estoque a jusante, resultando em uma VBP de 10% (SCHRAGENHEIM, A., 2010, 2007). Se uma nova ordem for emitida para reposição do item A, o seu tamanho deve ser igual à diferença entre o TL e o estoque total no sistema, ou seja, 10 unidades com a sua prioridade correspondendo a 10% – verde (VBP da ordem de serviço 2).

Figura 9 - VBP na priorização de ordens de serviço



Fonte: Adaptado de Schragenheim, A. (2007).

A medida de penetração do pulmão mostra que a produção está sincronizada com o uso atual do estoque. Além disso, a VBP fornece uma visão global do sistema, que alinha e sincroniza todos os elos de uma cadeia de suprimentos com a meta de um sistema de distribuição, que é responder rapidamente ao consumo atual dos consumidores ao longo da cadeia de suprimentos, explorando, dessa forma, a restrição de mercado (SCHRAGENHEIM, A., 2010).

De acordo com Goldratt (2008b), a aplicação da TOC em cadeias de suprimentos afeta positivamente as vendas de duas formas. A primeira forma é direta, pois a reposição correta reduz substancialmente as rupturas de estoque, e menos rupturas leva ao aumento das vendas. A segunda forma deve-se ao fato de que a reposição correta elimina o excesso de produtos de baixo giro do estoque, disponibilizando espaço físico para a introdução de novos itens de alto giro e, conseqüentemente, contribuindo para o aumento das vendas.

No próximo subcapítulo são apresentados os fundamentos conceituais do método DBM, como um mecanismo de controle das implementações dos sistemas MTA e PRD.

2.4 GERENCIAMENTO DINÂMICO DO PULMÃO (*DYNAMIC BUFFER MANAGEMENT – DBM*)

Goldratt e Goldratt (2003) afirmam que a reposição de estoque com base no consumo real, a redução do tempo de reposição com a minimização do tempo do pedido e o aumento da frequência de reposição são ações que contribuem para enfrentar os UDEs presentes em cadeias de suprimentos. Contudo, mudanças não previstas no comportamento da demanda podem exaurir rapidamente as reservas de estoque sem que o sistema tenha tempo hábil para reagir. Portanto, é necessário ter um *feedback* correto para a validação do TL definido para cada SKU e em cada local.

Após o dimensionamento inicial do TL, deve-se verificar se mesmo com eventuais mudanças na combinação entre demanda e tempo de reposição, esse alvo continua sendo adequado para garantir a disponibilidade. Nesse caso, dois alertas podem ser fornecidos, um para quando o TL estiver muito alto e outro para quando o TL estiver muito baixo (SOUZA; PIRES, 2014; SCHRAGENHEIM, A., 2010; SCHRAGENHEIM; DETTMER; PATTERSON, 2009).

O DBM é o método que realiza essas verificações com o intuito de responder rapidamente às variações das demandas reais de mercado. Dessa forma, mesmo que o sistema ainda esteja vulnerável a sofrer rupturas, elas poderão ocorrer em um intervalo de tempo pequeno e, conseqüentemente, as perdas de vendas devido à falta de estoque tendem a ser mínimas (PACHECO; ANTUNES JUNIOR; MATOS, 2021; MODI; LOWALEKAR; BHATTA, 2019; GUPTA; ANDERSEN, 2018; COX III et al., 2012; SOUZA; PIRES, 2010).

A indicação de que o TL atual para um determinado SKU é muito alto ocorre quando o nível de estoque de produtos acabados comparado ao seu TL se mantém elevado por um tempo relativamente longo. Com relação ao *buffer status*, isso significa que o pulmão permanece na região verde por um longo período e a literatura da TOC denomina essa situação de *Too Much Green* (TMG). Analogamente, um mecanismo é empregado para avaliar se o TL atual de um SKU está muito baixo, colocando em risco a disponibilidade. Assim, se o pulmão permanecer na região vermelha após um

longo período, a TOC caracteriza essa situação como *Too Much Red* (TMR) (IKEZIRI et al., 2023; NARITA; IKEZIRI; SOUZA, 2021; CHANG et al., 2019; IKEZIRI et al., 2019; CHANG; CHANG; CHANG, 2017; CHANG; CHANG; SUN, 2015; SOUZA; PIRES, 2014, 2010; COX III et al., 2012; SCHRAGENHEIM, A., 2010; SCHRAGENHEIM, E., 2010b; SCHRAGENHEIM; DETTMER; PATTERSON, 2009; GOLDRATT; GOLDRATT, 2003).

O período considerado como muito longo pelas análises do DBM depende do nível de serviço que se pretende disponibilizar. Goldratt (2008a), Goldratt e Goldratt (2003) e Souza e Pires (2010) orientam que, se durante um período igual ao tempo de reposição, o pulmão permanecer na região verde ou vermelha, o algoritmo deve registrar um TMG ou um TMR, respectivamente. Cox III et al. (2012) estabelecem que o tempo de permanência na região verde ou na região vermelha deve ser de três períodos de reposição consecutivos. Schragenheim, E. (2010b) e Souza e Pires (2014) recomendam a identificação de um TMG se o pulmão permanecer na região verde por um período igual ao dobro do tempo de reposição.⁹

Existe na literatura um algoritmo alternativo para identificar um TMR (SCHRAGENHEIM, A., 2010). Se a quantidade total de invasões, em unidades, na região vermelha do pulmão durante um período de reposição for igual ou maior que o próprio tamanho da região vermelha (um terço do TL), então o algoritmo deve reconhecer um TMR. Nesse caso, sempre que houver uma penetração na região vermelha, deve-se registrar a profundidade dessa penetração e considerá-la no cálculo de invasões dentro do período de reposição (IKEZIRI et al., 2023; SOUZA; PIRES, 2014; SCHRAGENHEIM, E., 2010b; SCHRAGENHEIM; DETTMER; PATTERSON, 2009). Schragenheim, Dettmer e Patterson (2009) ressaltam que quando a quantidade total de invasões alcança o tamanho da região vermelha antes de terminar o período vigente de reposição, um TMR deve ser identificado imediatamente.

Normalmente, um TMG pode ser provocado por redução da demanda, aumento na velocidade de reposição ou pela definição de um TL inicial alto. Em contrapartida, um TMR pode indicar um aumento da demanda, diminuição na velocidade de reposição ou a determinação de um TL inicial baixo (SCHRAGENHEIM, A., 2010). Sempre que houver um TMG ou um TMR, o DBM recomendará ajustes para o nível

⁹ O Quadro 3, apresentado no final desse subcapítulo, sintetiza e estabelece uma codificação para as cinco regras do método DBM identificadas na literatura.

do TL e o tamanho desse ajuste pode variar dependendo do parâmetro utilizado. Fatores como a velocidade de redução ou aumento dos estoques, importância do item dentro do *mix* ofertado e o próprio local de estoque são geralmente considerados antes da definição do quanto ajustar o TL (CHANG; CHANG; CHANG, 2017).

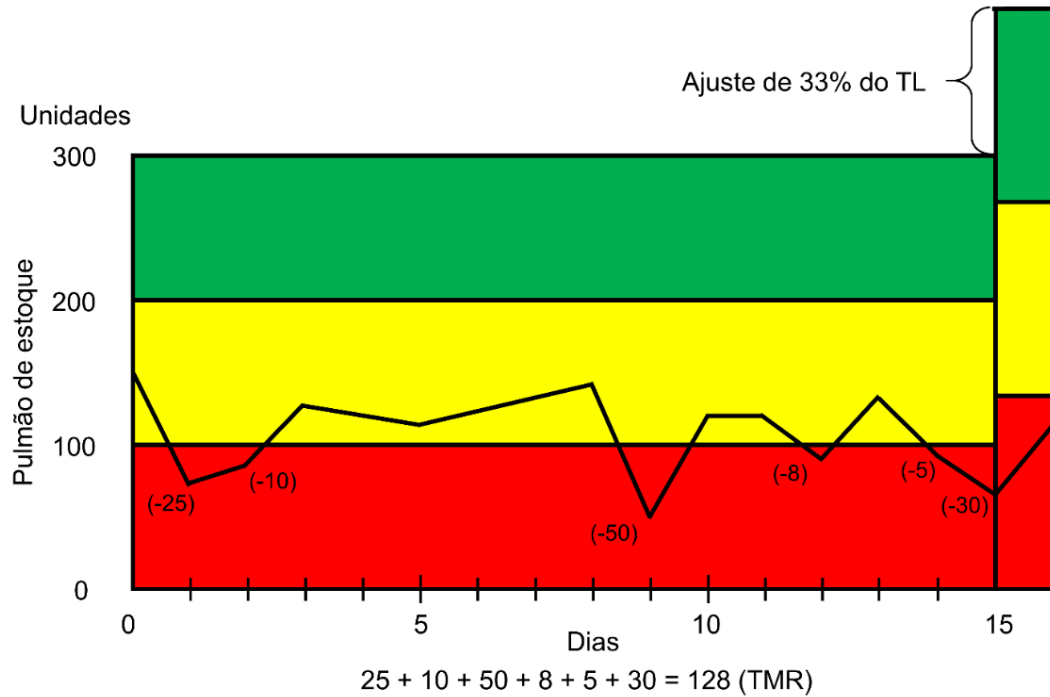
Há um padrão recomendado na literatura para o tamanho dos ajustes tanto para cima, como para baixo, correspondendo a 33% do TL ou o próprio tamanho de uma região do pulmão (CHANG et al., 2019; MODI; LOWALEKAR; BHATTA, 2019; CHANG; CHANG; CHANG, 2017; CHANG; CHANG; SUN, 2015; CHANG; CHANG; HUANG, 2014; SOUZA; PIRES, 2014, 2010; COX III et al., 2012; SCHRAGENHEIM, A., 2010; SCHRAGENHEIM, E., 2010b; SCHRAGENHEIM; DETTMER; PATTERSON, 2009; GOLDRATT (2008a); GOLDRATT; GOLDRATT, 2003). Ainda assim, Schragenheim, E. (2010b) e Souza e Pires (2014) sugerem ajustes mais modestos de 15% para reduções e 20% para aumentos, principalmente se o DBM estiver sendo aplicado em ambientes de produção (MTA).

A Figura 10 exemplifica o uso do algoritmo do DBM que considera o total de invasões na região vermelha para um SKU que possui um tempo médio de reposição de 15 dias e TL de 300 unidades. Nota-se que em 15 dias consecutivos foram registradas seis invasões na região vermelha e que a soma das profundidades dessas invasões (128 unidades) apresentou um resultado maior do que o próprio tamanho da região vermelha. Logo, o DBM identificou um TMR e foi feito o ajuste de 33% do TL. Caso a soma das invasões na região vermelha não tivesse apresentado um resultado igual ou superior a 100 unidades (tamanho da região vermelha, que corresponde a um terço do TL) dentro do período de reposição, então o DBM não teria ajustado o TL para cima.

A Figura 11 mostra o pulmão de estoque de um item em um determinado local. Nesse exemplo, o tempo de reposição é de 3 dias e as ordens de reposição são emitidas diariamente. Com o algoritmo que verifica a permanência nas regiões verde ou vermelha durante um período de reposição (3 dias) e parâmetros de ajuste de 33% para TMG ou TMR (SOUZA; PIRES, 2010; GOLDRATT; GOLDRATT, 2003), nota-se que a partir do primeiro dia, o pulmão de estoque vai sendo consumido e ao final do dia 4 ocorre a primeira reposição. Ainda no dia 4, a primeira invasão na região vermelha foi registrada. Ao final do dia 6, o DBM confirma a permanência do pulmão na região vermelha durante um período completo de reposição e identifica um TMR. Nesse momento, o TL é ajustado em 33% e o pedido de reposição realizado no início

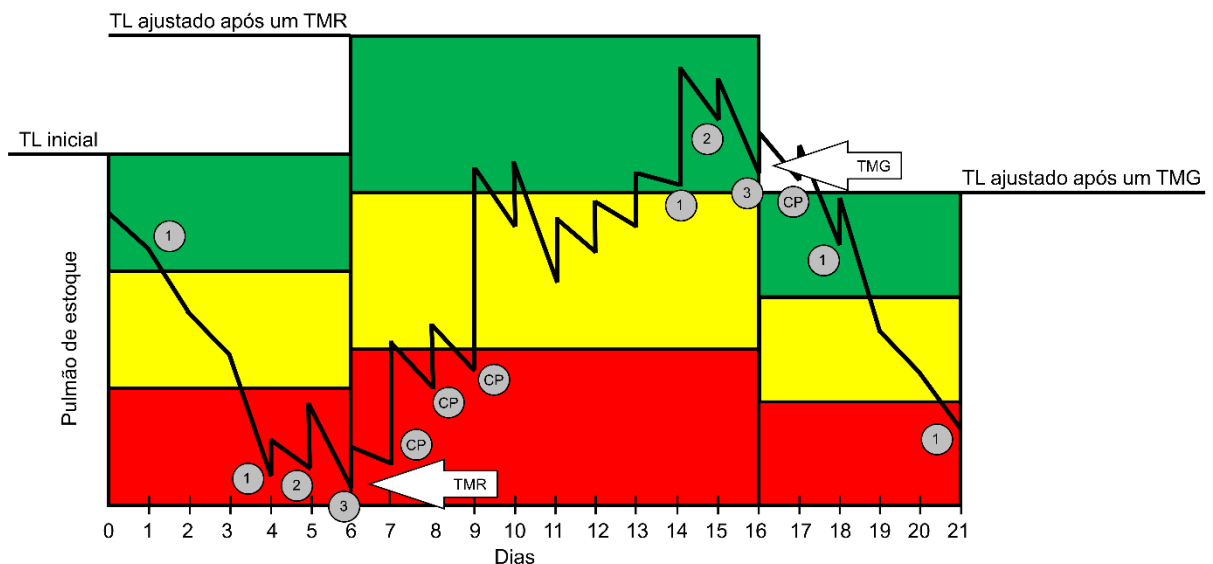
do dia 7 somou a quantidade vendida no dia anterior com o aumento do TL, mantendo a estabilidade do sistema.

Figura 10 - Algoritmo alternativo para TMR



Fonte: Adaptado de Schragenheim, Dettmer e Patterson (2009).

Figura 11 - Algoritmo de permanência nas regiões para TMR e TMG



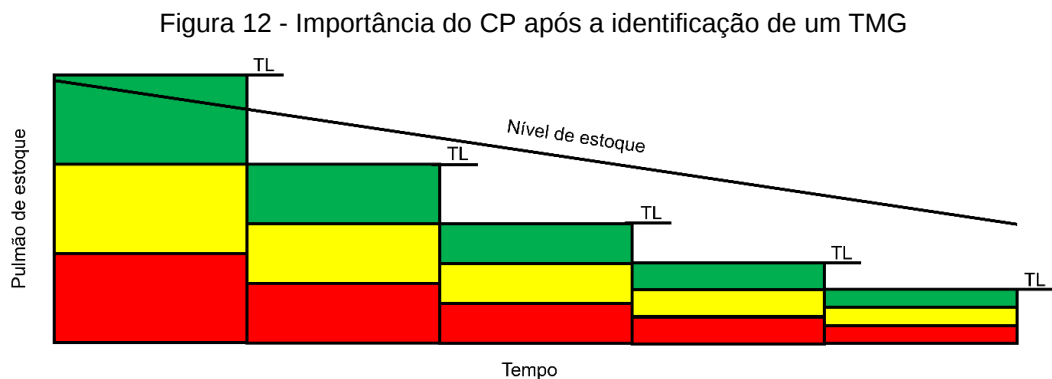
Fonte: Adaptado de Chang et al. (2019) e Goldratt e Goldratt (2003).

Observa-se que ao final dos dias 7, 8 e 9 o pulmão novamente permanece na região vermelha, mas o DBM não fez novos ajustes. Como o TL aumentou após o

TMR, o pulmão desse item estará definitivamente na região vermelha e nenhuma verificação deve ser feita enquanto não chegar a nova ordem de reposição que contém o aumento do TL nesse local. Essa ação recebe o nome de período de congelamento (*Cooling Period* – CP) (SOUZA; PIRES, 2014; SCHRAGENHEIM, A., 2010; GOLDRATT; GOLDRATT, 2003). Essa espera é essencial para a eficácia do DBM, pois, nesse exemplo, o sistema se estabilizou com apenas um ajuste do TL.

Nos dias 14, 15 e 16, o DBM detecta a permanência do pulmão na região verde por três dias consecutivos, caracterizando um TMG e imediatamente reduz o TL em 33%. Nenhuma verificação é feita e nenhuma ordem de reposição é emitida no início dos dias 17 e 18, pois o estoque de produtos acabados é maior que o novo TL. Sendo assim, após um TMG, o DBM deve permanecer congelado enquanto o estoque real estiver acima do novo TL para que o sistema se estabilize (CHANG; CHANG; CHANG, 2017; SOUZA; PIRES, 2014; SCHRAGENHEIM, A., 2010; SCHRAGENHEIM, E., 2010b; GOLDRATT; GOLDRATT, 2003).

A Figura 12 ilustra a importância do CP após a identificação do TMG, pois se o algoritmo não aguardasse a estabilização do sistema, o TL seria constantemente reduzido até um valor próximo de zero (GOLDRATT; GOLDRATT, 2003).



Fonte: Adaptado de Goldratt e Goldratt (2003).

O Quadro 3 sintetiza e estabelece uma codificação para as cinco regras do método DBM identificadas na literatura, conforme os parâmetros de gatilho e de ajuste para TMG e TMR. A primeira coluna traz a recomendação para a aplicação de cada regra em um determinado ambiente: fábrica (MTA) e/ou distribuição (PRD).

Quadro 3 - Síntese das regras do método DBM

Aplicação	Código	Parâmetro de gatilho TMG	Parâmetro de gatilho TMR	Parâmetro de ajuste TMG	Parâmetro de ajuste TMR	Autores
MTA e PRD	1-1-33-33	Permanência na região verde durante um período completo de reposição	Permanência na região vermelha durante um período completo de reposição	Redução de 33%	Aumento de 33%	Goldratt (2008a), Goldratt e Goldratt (2003) e Souza e Pires (2010)
PRD	3-3-33-33	Permanência na região verde durante três períodos completos de reposição consecutivos	Permanência na região vermelha durante três períodos completos de reposição consecutivos	Redução de 33%	Aumento de 33%	Cox III et al. (2012)
PRD	1-INV-33-33	Permanência na região verde durante um período completo de reposição	Invasões na região vermelha durante um período de reposição são iguais ou maiores que a região vermelha	Redução de 33%	Aumento de 33%	Schragenheim, Dettmer e Patterson (2009)
PRD	2-INV-33-33	Permanência na região verde durante dois períodos completos de reposição consecutivos	Invasões na região vermelha durante um período de reposição são iguais ou maiores que a região vermelha	Redução de 33%	Aumento de 33%	Schragenheim, E. (2010b) e Souza e Pires (2014)
MTA	2-INV-15-20	Permanência na região verde durante dois períodos completos de reposição consecutivos	Invasões na região vermelha durante um período de reposição são iguais ou maiores que a região vermelha	Redução de 15%	Aumento de 20%	Schragenheim, E. (2010b) e Souza e Pires (2014)

Fonte: Autor (2023).

2.5 APRENDIZADO POR REFORÇO (*REINFORCEMENT LEARNING* – RL)

A inteligência artificial (IA), devido a diversos benefícios comprovados, vem sendo utilizada em diversas áreas, como engenharia, transporte, saúde, finanças,

comércio eletrônico, cadeias de suprimentos e planejamento e controle da produção (LI et al., 2023; BELSARE; BADILLA; DEHGHANIMOHAMMADABADI, 2022; GIANNOCARO; PONTRANDOLFO, 2002).

Atualmente, um dos tópicos mais influentes na área de conhecimento em IA é o aprendizado de máquina (*machine learning* – ML), que pode ser definido como o campo científico que pesquisa e desenvolve algoritmos e modelos estatísticos para fornecer às máquinas a capacidade de aprender determinadas tarefas sem serem explicitamente programadas para isso (NIAN; LIU; HUANG, 2020). ML ainda pode ser ramificado em aprendizado supervisionado, aprendizado não supervisionado, aprendizado semi-supervisionado e aprendizado por reforço (*reinforcement learning* – RL) (BELSARE; BADILLA; DEHGHANIMOHAMMADABADI, 2022).

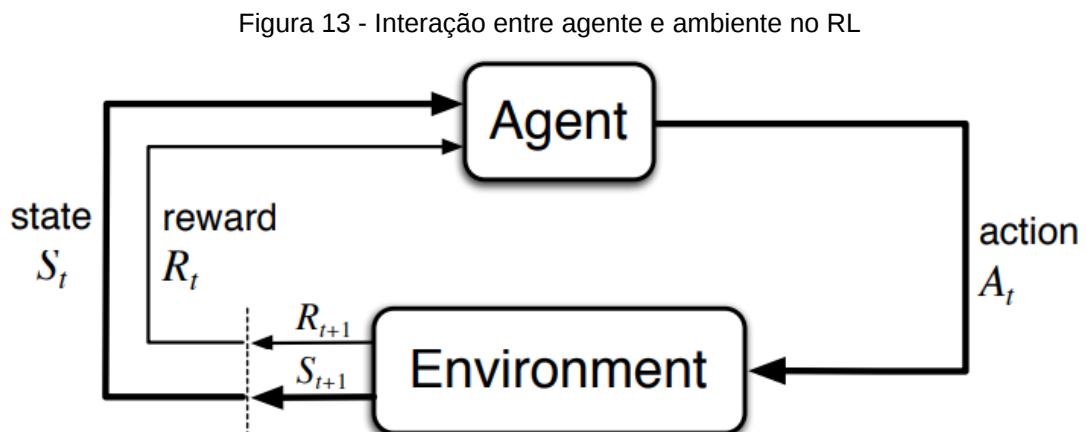
O agente de um aprendizado supervisionado aprende a partir de um conjunto de dados para treinamento rotulados por especialistas em um determinado assunto. Um agente de aprendizado não supervisionado é utilizado para encontrar padrões ocultos em estruturas de dados não rotulados por meio de redução dimensional, extração de características e agrupamento dos dados. O aprendizado semi-supervisionado combina os conceitos dos dois anteriores e é utilizado quando a quantidade de dados rotulados é pequena em relação à quantidade de dados não rotulados e, normalmente, a rotulagem manual dos dados é dispendiosa. O RL, por sua vez, é um subcampo do ML que lida com agentes autônomos que aprendem a interagir com os ambientes com base em experiências e aprendizados passados (NIAN; LIU; HUANG, 2020).

O RL é uma técnica de otimização baseada em simulação que considera a interação entre dois elementos: o agente e o ambiente (SUTTON; BARTO, 2018; CREIGHTON; NAHAVANDI, 2002). O agente seleciona as suas ações por tentativa e erro e a partir do conhecimento que ele possui sobre o ambiente. O ambiente responde a essas ações com uma recompensa imediata (reforço), e evolui para um estado diferente (DAYAN; NIV, 2008; GIANNOCARO; PONTRANDOLFO, 2002; KAEHLING, L. P.; LITTMAN, M. L.; MOORE, 1996).

Uma boa ação resulta diretamente em altas recompensas imediatas ou leva o sistema a estados onde altas recompensas podem ser obtidas. A partir das informações recebidas, isto é, as recompensas obtidas, o agente atualiza seu conhecimento do ambiente e seleciona a próxima ação. O algoritmo de atualização garante que uma boa resposta do ambiente, obtida como consequência da execução

de uma ação em um estado, resulta no aumento do valor da ação correspondente, enquanto uma resposta fraca resulta na sua redução. Assim, à medida que as boas ações são recompensadas e as más ações são punidas ao longo do tempo, alguns valores de ação tendem a crescer e outros tendem a diminuir. Eventualmente, o agente escolhe uma ação aleatória, realizando uma exploração que garante que todas as ações sejam realizadas em todos os estados. A fase de aprendizagem termina quando uma tendência aparece de modo que fica claro qual é a melhor ação em cada estado. O vetor que mapeia cada estado na ação ótima associada representa a política ótima aprendida (SUTTON; BARTO, 2018; DAYAN; NIV, 2008; GIANNOCARO; PONTRANDOLFO, 2002, Kaelbling; Littman; Moore, 1996).

A Figura 13 mostra o ciclo de interações entre o agente e o ambiente durante o processo de RL.



Fonte: Sutton e Barto (2018).

3 REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos com a revisão sistemática da literatura sobre a aplicação da Teoria das Restrições (*Theory of Constraints* – TOC) em cadeias de suprimentos, por meio do sistema *Make to Availability* (MTA), Reposição e Distribuição Puxadas (*Pull Replenishment and Distribution* – PRD) e/ou Gerenciamento Dinâmico do Pulmão (*Dynamic Buffer Management* – DBM). Esta revisão identificou e analisou, sistematicamente, o conteúdo disponível na literatura acadêmica sobre a área de conhecimento da TOC denominada Gestão da Cadeia de Suprimentos (*Supply Chain Management* – SCM) por Ikeziri et al. (2019).

Assim, com base nesse tipo de revisão da literatura, foi possível mapear e avaliar os estudos existentes sobre esses tópicos de interesse e especificar um problema de pesquisa para esta tese que permita o progresso do conhecimento atual (CAUCHICK-MIGUEL et al., 2017; TRANFIELD; DENYER; SMART, 2003).

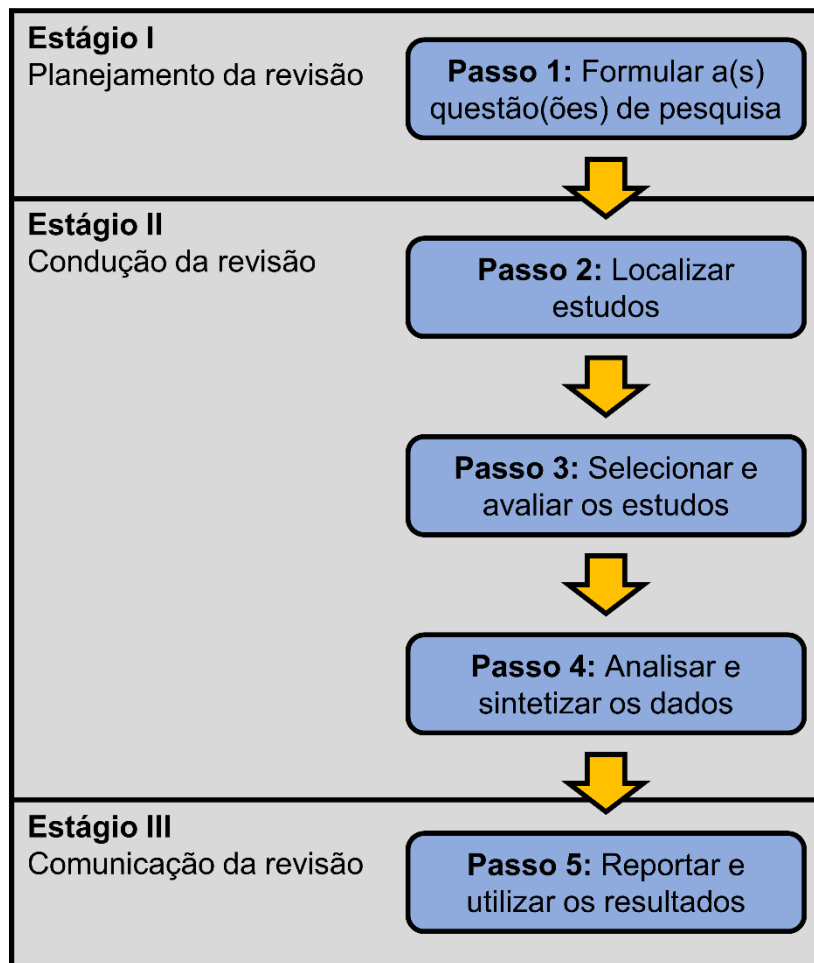
Algumas revisões sistemáticas da literatura sobre a TOC foram conduzidas para fornecer uma visão geral e classificar os estudos em diferentes áreas de aplicação (IKEZIRI et al., 2019; WATSON; BLACKSTONE; GARDINER, 2007; BLACKSTONE, 2001; RAHMAN, 1998). Recentemente, uma revisão da literatura foi desenvolvida para explorar as formas de integração entre o Lean e a TOC em gestão de operações (PACHECO et al., 2019), e uma revisão sistemática foi feita para identificar os resultados obtidos com implementações da TOC na gestão de serviços de saúde (BACELAR-SILVA; COX III; RODRIGUES, 2020). Destaca-se, portanto, que não há estudos baseados em revisões sistemáticas da literatura focados em analisar profundamente elementos da aplicação da TOC em cadeias de suprimentos, como os sistemas MTA e PRD e o método DBM.

A revisão foi elaborada de acordo com os três estágios propostos por Tranfield, Denyer e Smart (2003): planejamento, condução e comunicação da revisão, e seguiu o método baseado em cinco passos recomendado por Denyer e Tranfield (2009), conforme ilustra a Figura 14.

No primeiro passo, as questões de pesquisa que nortearam o desenvolvimento da revisão sistemática da literatura foram formuladas. Em seguida, no segundo passo, definiu-se a estratégia para a localização de estudos, incluindo as bases de dados, palavras-chave e códigos de busca utilizados, resultando na amostra inicial. No

terceiro passo, foram estabelecidos os critérios para inclusão ou exclusão dos estudos na amostra final. No quarto passo, os dados foram extraídos e analisados de forma quantitativa e qualitativa. Por fim, no quinto passo, a comunicação dos resultados da revisão é feita por meio deste capítulo da tese.

Figura 14 - Estágios e passos da revisão sistemática da literatura



Fonte: Autor (2023).

Os próximos subcapítulos mostram os detalhes de cada passo dos estágios I e II aplicados na revisão sistemática da literatura.

3.1 FORMULAÇÃO DAS QUESTÕES DE PESQUISA

Pesquisas teórico-conceituais, assim como as pesquisas práticas e aplicadas, devem possuir uma questão de pesquisa motivadora (CAUCHICK-MIGUEL et al.,

2017; DENYER; TRANFIELD, 2009). Portanto, as questões que representam o propósito desta revisão foram formuladas como:

“Qual é o panorama das publicações sobre a aplicação da TOC em cadeias de suprimentos, por meio dos sistemas MTA, PRD e/ou DBM?”

“Quais métodos de pesquisa são utilizados em estudos sobre a aplicação da TOC em cadeias de suprimentos, por meio dos sistemas MTA, PRD e/ou DBM?”

“Quais as evidências existentes na literatura acadêmica sobre a aplicação da TOC em cadeias de suprimentos, por meio dos sistemas MTA, PRD e/ou DBM?”

3.2 LOCALIZAÇÃO DOS ESTUDOS

A localização de estudos foi feita a partir do desdobramento da estratégia adotada inicialmente por Ikeziri et al. (2019). Sendo assim, as bases de dados *Scopus* (www.scopus.com) e *Web of Science* (www.webofknowledge.com) também foram selecionadas e utilizadas para pesquisar publicações acadêmicas.

Inicialmente, realizou-se uma análise exploratória com as palavras-chave e o código de busca que Ikeziri et al. (2019) utilizaram para encontrar estudos sobre TOC na área de SCM¹⁰. Novos termos foram adicionados ao código de busca a fim de verificar se pesquisas relacionadas a este tema não haviam sido identificados pelos autores anteriormente. A adição dos termos “*Pull Distribution*”, “*Replenishment System*”, “DBM” e “MTA” com o uso do operador booleano *OR* não proporcionou a identificação de mais artigos. Apenas a inclusão do termo “*Demand Pull*” resultou em um artigo relevante a mais na amostra inicial, pois alguns autores denominam o sistema PRD da TOC de “*demand-pull and buffer management*” ou “*demand-pull replenishment strategy with buffer management*” ou “*demand-pull inventory replenishment strategy combined with a buffer management mechanism*” (CHANG et al., 2019; CHANG; CHANG; CHANG, 2017; CHANG; CHANG; SUN, 2015).

Após a análise exploratória, foram definidos os códigos de busca e as palavras-chave utilizados para título, resumo e palavras-chave durante as pesquisas nas bases de dados, conforme o Quadro 4. Vale ressaltar que a palavra-chave “*Theory of Constrain**” foi inserida, pois algumas pesquisas empregam os termos “*Theory of*

¹⁰ Código de busca utilizado por Ikeziri et al. (2019) na área de SCM da TOC: ‘Theory of Constrain*’ OR ‘Goldratt’ for TITLE, ABSTRACT AND KEYWORDS AND ‘Pull Replenishment’ OR ‘Dynamic Buffer Management’ OR ‘Make to Availability’ OR ‘Supply Chain’ for TITLE, ABSTRACT AND KEYWORDS.

Constrains” (STEVENSON; HENDRY; KINGSMAN, 2005) e “*Theory of Constraint*” (CHANG; CHANG; HUANG, 2014; CHANG; CHANG; LEI, 2014; TSOU, 2013), em vez do tradicional termo “*Theory of Constraints*”. Logo, o caractere “*” permitiu a busca por ambos os termos (DENYER; TRANFIELD, 2009).

Quadro 4 - Códigos de busca utilizados nas bases de dados

Base de dados	Código de busca
Scopus	(TITLE-ABS-KEY ("Theory of Constrain*") OR TITLE-ABS-KEY ("Goldratt")) AND (TITLE-ABS-KEY ("Pull Replenishment" OR "Dynamic Buffer Management" OR "Make to Availability" OR "Supply Chain" OR "Demand Pull"))
Web of Science	(TS=("Theory of Constrain*" OR "Goldratt") AND TS=("Pull Replenishment" OR "Dynamic Buffer Management" OR "Make to Availability" OR "Supply Chain" OR "Demand Pull"))

Fonte: Autor (2023).

A busca por estudos foi atualizada em dezembro de 2020 e os resultados das bases de dados *Scopus* e *Web of Science* foram de 150 e 102 documentos, respectivamente. Após a aplicação do filtro por tipo de documento “*Article*” e “*Review*”¹¹ (não havia documentos “*In press*” no momento da pesquisa), os resultados diminuíram para 93 artigos na *Scopus* e 65 artigos na *Web of Science*. Portanto, a soma desses resultados junto com os 5 artigos reclassificados por Ikeziri et al. (2019), da área “*Initially Unidentified*” para a área de SCM (YANG et al., 2012; WANG; ZHEN; GAO, 2009; WANKE; ARKADER; HIJJAR, 2007; OLIVI, 2005; YUAN; CHANG; LI, 2003), compôs a amostra inicial com 163 artigos.

3.3 SELEÇÃO E AVALIAÇÃO DOS ESTUDOS

Para assegurar um procedimento sistemático na seleção e avaliação dos estudos, alguns critérios de inclusão e exclusão foram determinados e estão descritos no Quadro 5.

De acordo com os Critérios de Inclusão (CI), um artigo publicado em qualquer período anterior ao da pesquisa (CI1), desde que fosse em periódico acadêmico (CI2), poderia ser considerado. Além disso, 5 artigos foram incluídos na amostra inicial (CI3), pois foram reclassificados na área de SCM da TOC por Ikeziri et al. (2019).

¹¹ A revisão sistemática da literatura não abordou estudos de revisão, mas o autor percebeu que alguns artigos, que de fato não eram de revisão da literatura, foram indexados nas bases de dados como tal.

Quadro 5 - Critérios para inclusão ou exclusão de um estudo na amostra final

Inclusão/Exclusão	Critério
Critério de Inclusão (CI)	• CI1: artigo publicado em qualquer período anterior ao da pesquisa. • CI2: artigo publicado em periódico acadêmico. • CI3: artigos reclassificados por Ikeziri et al. (2019), da área “<i>Initially Unidentified</i>” para a área de SCM.
Critério de Exclusão (CE)	• CE1: artigo duplicado. • CE2: os esforços de pesquisa do artigo não são explícita e especificamente dedicados à aplicação da TOC em cadeias de suprimentos (análise de título, resumo e, eventualmente, texto completo). • CE3: o artigo não possui o texto completo disponível para avaliação. • CE4: o artigo não foi publicado na língua inglesa ou língua portuguesa. • CE5: o artigo não relata, em detalhes e fundamentado na literatura, uma aplicação da TOC em cadeias de suprimentos, por meio dos sistemas MTA, PRD e/ou DBM (análise do texto completo).

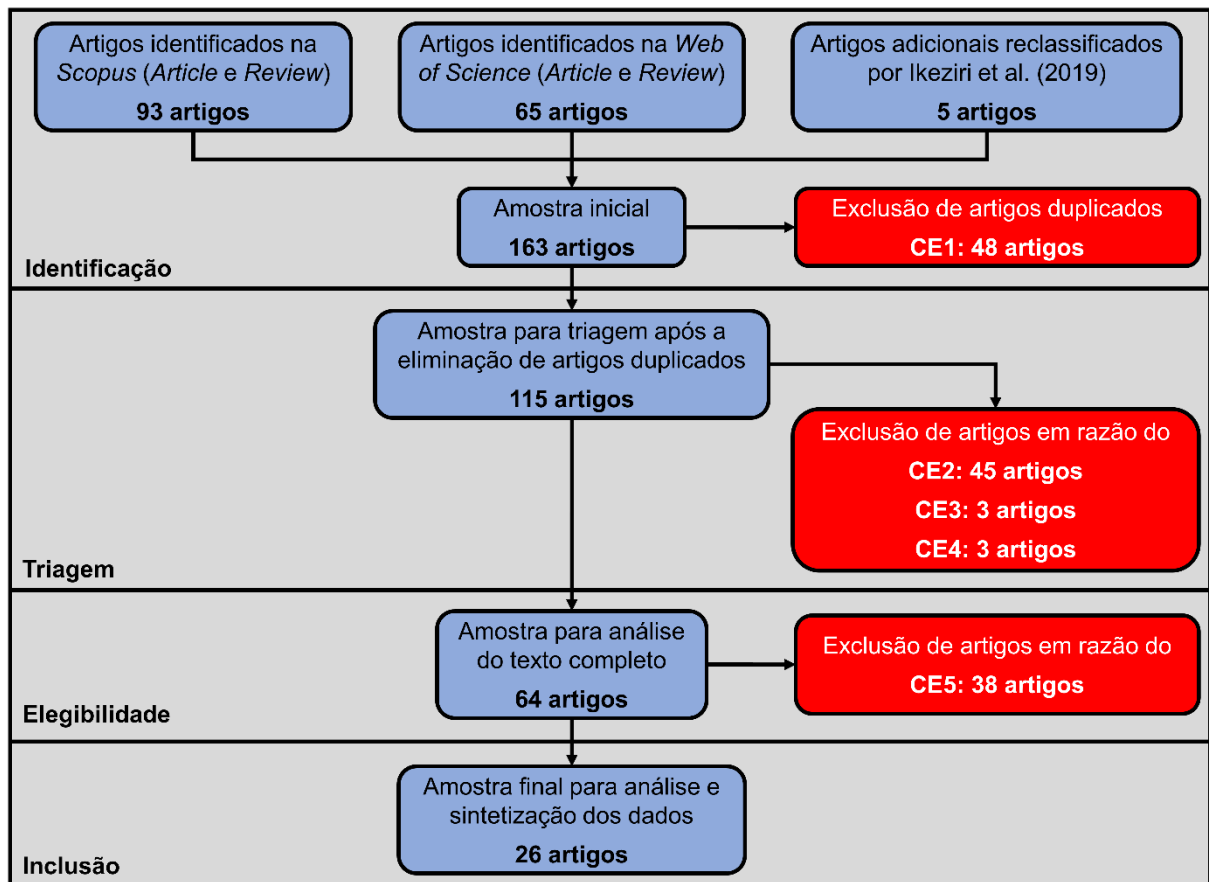
Fonte: Autor (2023).

O primeiro Critério de Exclusão (CE) eliminou artigos duplicados (CE1) da amostra inicial. Em seguida, foram analisados os títulos, resumos e, caso fosse necessário, os textos completos dos artigos remanescentes para verificar se os esforços de cada pesquisa foram dedicados à aplicação da TOC em cadeias de suprimentos (CE2). Depois, foram excluídos artigos cujos textos completos não estavam disponíveis para avaliação (CE3), ou que não foram publicados na língua inglesa ou portuguesa (CE4). Por fim, mediante a análise dos textos completos, foram eliminados artigos que não relatam detalhes dos tópicos de interesse desta pesquisa (CE5), obtendo-se uma amostra final de 26 artigos para análise e sintetização dos dados.

A fim de ilustrar os detalhes desse processo, a Figura 15 mostra o diagrama de fluxo desenvolvido com base na declaração *Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analyses* (PRISMA) (MOHER et al., 2009).

O Apêndice A traz a lista com os autores, títulos, datas de publicação e os CE dos 89 artigos excluídos nas fases de triagem e elegibilidade do processo de seleção e avaliação dos estudos, conforme a Figura 15.

Figura 15 - Diagrama de fluxo do processo de seleção e avaliação de estudos



Fonte: Autor (2023).

3.4 ANÁLISE E SINTETIZAÇÃO DOS DADOS

Neste subcapítulo, as três questões de pesquisa da revisão sistemática da literatura são respondidas e, portanto, a análise e sintetização dos dados foi dividida em três etapas. Na primeira etapa, a partir de uma análise quantitativa, expõe-se o panorama das publicações. Na segunda etapa, os métodos de pesquisa empregados nos estudos são expostos e, por último, com base em uma análise qualitativa, apresenta-se as evidências existentes na literatura acadêmica sobre a aplicação da TOC em cadeias de suprimentos, por meio dos sistemas MTA, PRD e/ou DBM.

3.4.1 Panorama das publicações identificadas na amostra final

Os 26 artigos identificados na amostra final foram classificados de acordo com suas aplicações dos conceitos da TOC em cadeia de suprimentos, sejam por meio dos sistemas MTA, PRD e/ou DBM. Vale destacar que qualquer artigo poderia ser

classificado por utilizar um, dois ou três dos elementos mencionados. A Tabela 3 mostra a classificação de cada artigo da amostra final.

Tabela 3 - Classificação dos artigos da amostra final

Autores	MTA	PRD	DBM
Lowalekar e Basu (2020)		✓	
Chang et al. (2019)		✓	✓
Modi, Lowalekar e Bhatta (2019)	✓	✓	✓
Chang, Chang e Chang (2017)		✓	✓
Lowalekar e Ravi (2017)		✓	
Margaretha e Sahroni (2017)		✓	
Chang, Chang e Sun (2015)		✓	✓
Chang, Chang e Huang (2014)		✓	✓
Chang, Chang e Lei (2014)		✓	✓
Sikilero et al. (2014)		✓	
Souza e Pires (2014)	✓		✓
Wu, Lee e Tsai (2014)		✓	
Jiang e Wu (2013a)		✓	
Jiang e Wu (2013b)		✓	
Jiang et al. (2013)		✓	
Tsou (2013)			✓
Wu, Huang e Jen (2012)		✓	
Jasinavičius e Jasinavičius (2011)		✓	
Wu et al. (2011)		✓	
Kaijun e Yuxia (2010)		✓	✓
Souza e Pires (2010)		✓	✓
Wu et al. (2010a)		✓	
Simatupang, Wright e Sridharan (2004)		✓	
Watson e Polito (2003)		✓	✓
Yuan, Chang e Li (2003)		✓	✓
Blackstone (2001)		✓	
Total	2	24	12

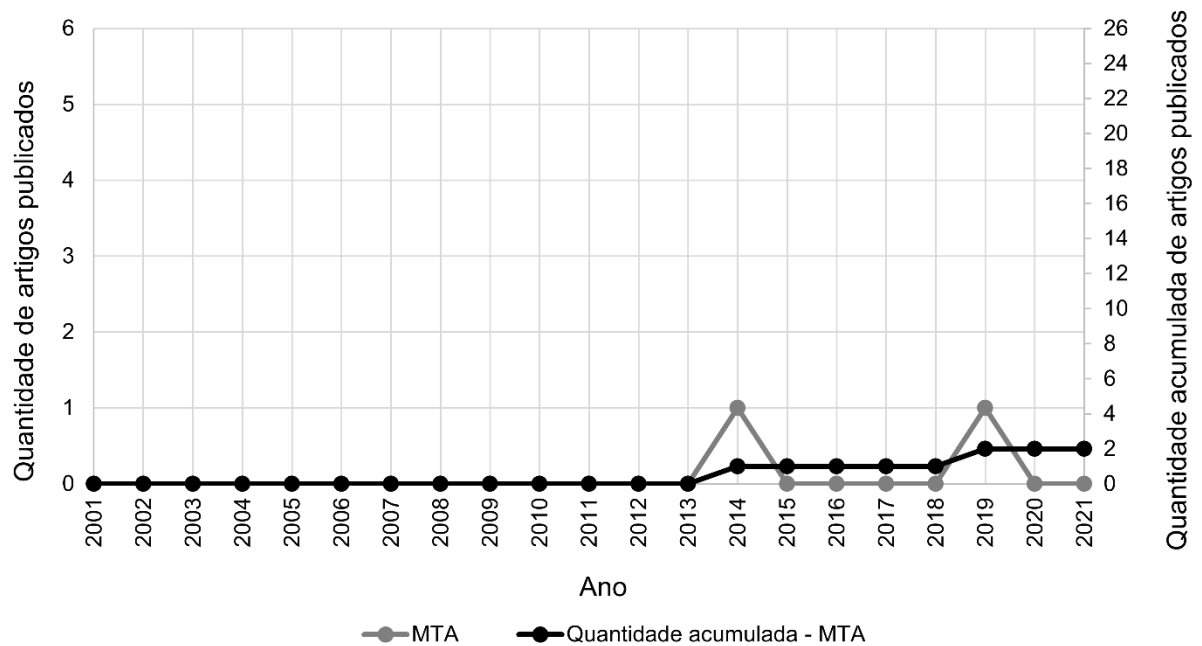
Fonte: Autor (2023).

A partir dessa classificação, o panorama das publicações é apresentado, primeiramente, por meio da evolução da quantidade de artigos publicados entre 2001 (ano em que o artigo mais antigo da amostra final foi publicado) e 2021. Depois, as fontes de publicação, autores e instituições com mais de um artigo publicado, e países que fazem parte da amostra final são expostos.

3.4.1.1 Evolução das publicações entre 2001 e 2021

As Figuras 16, 17 e 18, para cada elemento da pesquisa (aplicação da TOC em cadeias de suprimentos), e a Figura 20, para a amostra final, retratam gráficos que relacionam a quantidade de artigos publicados por ano (linhas cinzas) e a quantidade acumulada de artigos publicados (linhas pretas) ao longo do tempo. Os limites dos eixos das abscissas (tempo em ano) e das ordenadas principais (quantidade de artigos publicados por ano) e secundárias (quantidade acumulada de artigos publicados) possuem os mesmos parâmetros para favorecer a comparação entre as figuras.

Figura 16 - Evolução das publicações sobre o sistema MTA



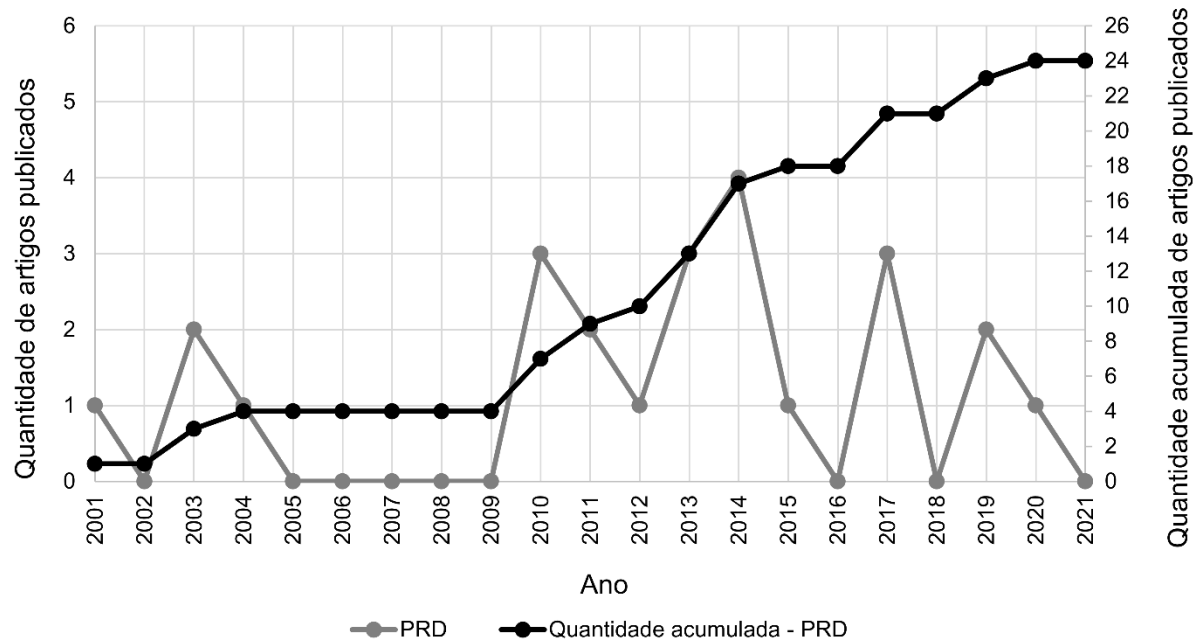
Fonte: Autor (2023).

Os conceitos do sistema MTA foram apresentados no livro de Schragenheim, Dettmer e Patterson (2009) e a Figura 16 mostra que, desde então, esse elemento tem sido pouco abordado na literatura acadêmica, representando apenas 7,69% da amostra final com 2 artigos identificados (MODI; LOWALEKAR; BHATTA, 2019; SOUZA; PIRES, 2014).

Em contrapartida, o sistema PRD é o elemento que tem recebido maior atenção por pesquisadores (92,31% da amostra final – 24 artigos) e, de acordo com a Figura 17, nota-se uma tendência de crescimento na quantidade de publicações após 2009,

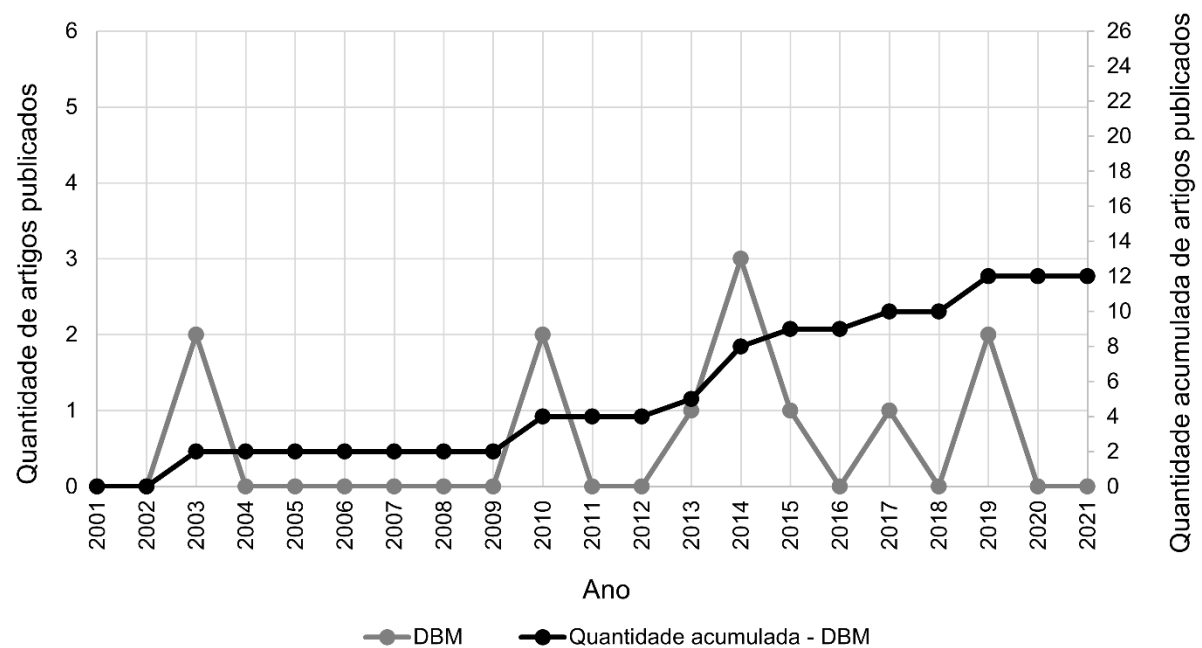
ano em que Goldratt, Eshkoli e Brownleer (2009) e Schragenheim, Dettmer e Patterson (2009) publicaram dois livros significativos sobre a aplicação da TOC na área de cadeia de suprimentos.

Figura 17 - Evolução das publicações sobre o sistema PRD



Fonte: Autor (2023).

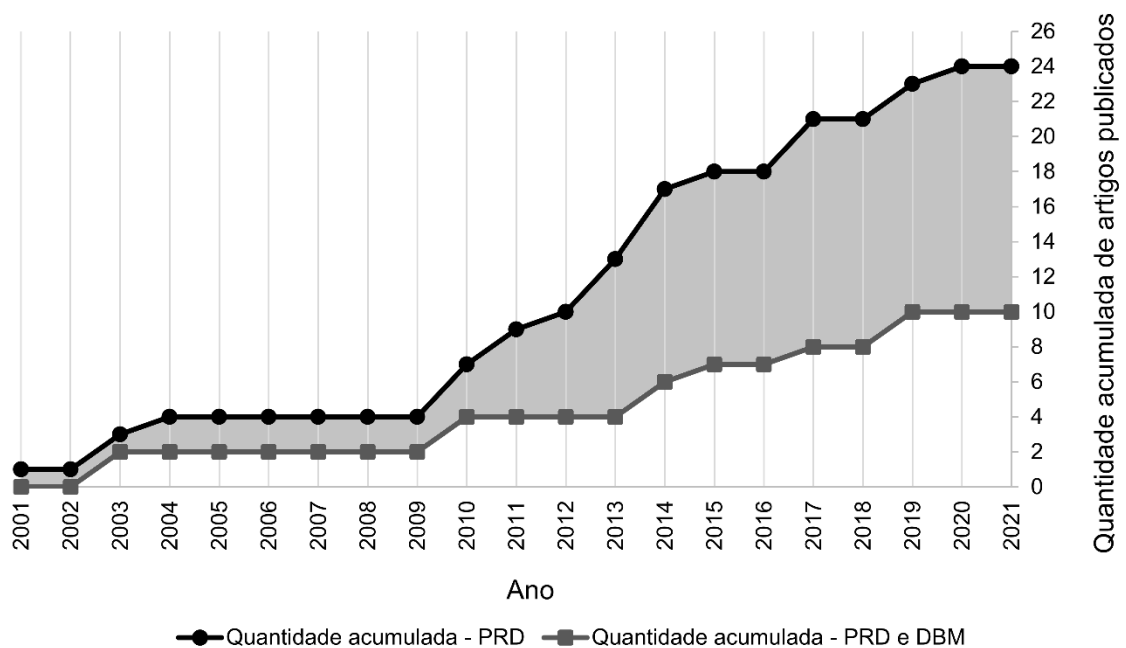
Figura 18 - Evolução das publicações sobre o método DBM



Fonte: Autor (2023).

A Figura 18 mostra que o DBM também passou a ter uma tendência de crescimento na quantidade de publicações após 2009. No entanto, artigos que exploram esse elemento representam 46,15% da amostra final (12 artigos) e apenas 41,67% da quantidade de artigos que abordam o sistema PRD (10 artigos foram classificados por abordar os dois elementos simultaneamente). Sendo assim, fica evidente o distanciamento entre os estudos que abordam o sistema PRD e as pesquisas que exploram esse tema na forma tradicional como a TOC propõe, incluindo o mecanismo de controle DBM. A Figura 19 destaca esse distanciamento ao mostrar as quantidades acumuladas dos artigos publicados ao longo do tempo.

Figura 19 - Distanciamento entre as publicações sobre o sistema PRD e as que também abordam o DBM



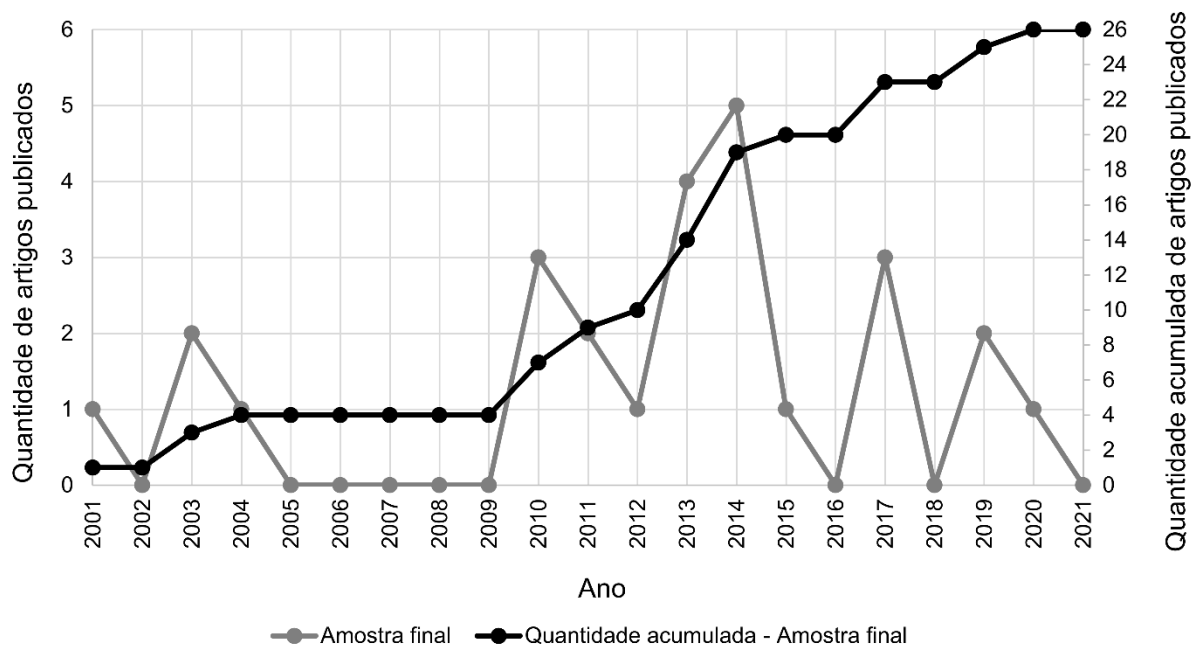
Fonte: Autor (2023).

A Figura 20 exibe a evolução dos estudos que constituem a amostra final, sendo importante notar que a aplicação da TOC em cadeias de suprimentos passou a receber maior atenção nos últimos dez anos.

O artigo mais antigo da amostra final foi publicado por Blackstone (2001). Nele, o autor apresenta os fundamentos do sistema PRD, e evidencia que, na época, não havia livros publicados por Goldratt dedicados à gestão da cadeia de suprimentos por meio da TOC, embora o assunto tenha sido brevemente abordado no livro “Não é

Sorte” (GOLDRATT, 1994). De fato, o livro “Necessária, Sim, mas Não Suficiente” foi publicado em 2000, ano em que o artigo de Blackstone (2001) foi submetido ao periódico *International Journal of Production Research*, e o livro “Não é Óbvio?” foi publicado apenas em 2009. Ambos desenvolvem a aplicação dos conceitos da TOC em cadeias de suprimentos (GOLDRATT; ESHKOLI; BROWNLEER, 2009; GOLDRATT; SCHRAGENHEIM; PTAK, 2000).

Figura 20 - Evolução das publicações da amostra final



Fonte: Autor (2023).

3.4.1.2 Fontes de publicação

A Tabela 4 mostra as 19 fontes de publicação identificadas na amostra final. Observa-se que há dispersão nos periódicos cujos artigos foram publicados e que apenas o *International Journal of Production Research* e o *Journal of Testing and Evaluation* possuem mais de um artigo identificado, representando, juntos, 34,62% da amostra final.

3.4.1.3 Autores com mais de um artigo publicado

A amostra final contém 47 autores, mas apenas 9 possuem mais de um artigo identificado. A Tabela 5 mostra que o autor Wu possui 7 artigos identificados sobre o

sistema PRD, mas nenhum aborda o DBM como mecanismo de controle da TOC. Wu também é coautor de todos os artigos identificados de Jiang, Tsai, T. P. e Tsai, C. H. Os autores Chang, K. H. e Chang, Y. C. são coautores das 5 publicações identificadas e são os que mais desenvolvem estudos sobre o método DBM. Souza e Pires são coautores dos 2 artigos identificados e, junto a Modi, Lowalekar e Bhatta (2019), são os únicos autores que abordam os três elementos de interesse desta pesquisa.

Tabela 4 - Fontes de publicação da amostra final

Fonte de publicação	MTA	PRD	DBM	Amostra final
International Journal of Production Research	1	6	3	6
Journal of Testing and Evaluation	0	3	3	3
African Journal of Business Management	0	1	0	1
Applied Mathematical Modelling	0	0	1	1
Business: Theory and Practice	0	1	0	1
Computers and Industrial Engineering	0	1	0	1
Espacios	0	1	0	1
Expert Systems with Applications	0	1	0	1
Gestao e Producao	1	0	1	1
International Journal of Computational Intelligence Systems	0	1	1	1
International Journal of Modelling, Identification and Control	0	1	0	1
International Journal of Production Economics	0	1	0	1
International Journal of Supply Chain Management	0	1	0	1
International Journal of Systems Science: Operations and Logistics	0	1	1	1
Journal of Networks	0	1	0	1
Management Research Review	0	1	1	1
Neural Computing and Applications	0	1	0	1
Journal of Engineering Manufacture	0	1	1	1
Supply Chain Management	0	1	0	1
Total	2	24	12	26

Fonte: Autor (2023).

3.4.1.4 Instituições com mais de um artigo publicado

A Tabela 6 mostra as 8 instituições com mais de um artigo identificado das 31 instituições que compõem a amostra final. Nota-se que as instituições estão relacionadas com as afiliações dos autores destacadas na Tabela 5, mas que a *National Chiao Tung University Taiwan* aparece com 6 artigos (um artigo a mais) na amostra final. Isso se deve ao fato de essa instituição ter um estudo identificado sem a coautoria de Chang, Y. C. (YUAN; CHANG; LI, 2003).

Tabela 5 - Autores com mais de uma publicação na amostra final

Autor	Instituição	MTA	PRD	DBM	Amostra final
Wu, H. H.	Chung Hua University	0	7	0	7
Chang, K. H.	Chinese Military Academy Taiwan	0	5	5	5
Chang, Y. C.	National Chiao Tung University Taiwan	0	5	5	5
Jiang, X. Y.	Xiamen University of Technology	0	3	0	3
Lowalekar, H.	Indian Institute of Management Indore	1	3	1	3
Tsai, T. P.	Chung Hua University	0	3	0	3
Pires, S. R. I.	Universidade Metodista de Piracicaba	1	1	2	2
Souza, F. B.	UNESP-Universidade Estadual Paulista	1	1	2	2
Tsai, C. H.	Yuanpei University of Medical Technology	0	2	0	2

Fonte: Autor (2023).

Tabela 6 - Instituições com mais de uma publicação na amostra final

Instituição	País	MTA	PRD	DBM	Amostra final
Chung Hua University	Taiwan	0	7	0	7
National Chiao Tung University Taiwan	Taiwan	0	6	6	6
Chinese Military Academy Taiwan	Taiwan	0	5	5	5
Indian Institute of Management Indore	India	1	3	1	3
Xiamen University of Technology	China	0	3	0	3
UNESP-Universidade Estadual Paulista	Brazil	1	1	2	2
Universidade Metodista de Piracicaba	Brazil	1	1	2	2
Yuanpei University of Medical Technology	Taiwan	0	2	0	2

Fonte: Autor (2023).

3.4.1.5 Publicações por país

A Tabela 7 traz a quantidade de publicações por país e foi desenvolvida a partir das origens das afiliações dos autores. Logo, se um artigo foi publicado por autores de países distintos, então essa publicação foi contabilizada para cada país envolvido.

Taiwan aparece em primeiro lugar com 14 artigos publicados, representando 53,85% da amostra final, seguida da China, com 4 artigos. Brasil, Índia e Estados Unidos dividem a terceira colocação, cada um com apenas 3 artigos identificados na amostra final.

O *website gpsvisualizer.com* possibilita a projeção de dados quantitativos no mapa-múndi, auxiliando na análise e compreensão dos países que mais contribuem para o tema desta pesquisa (FIORINI; JABBOUR, 2017; FAHIMNIA; SARKIS;

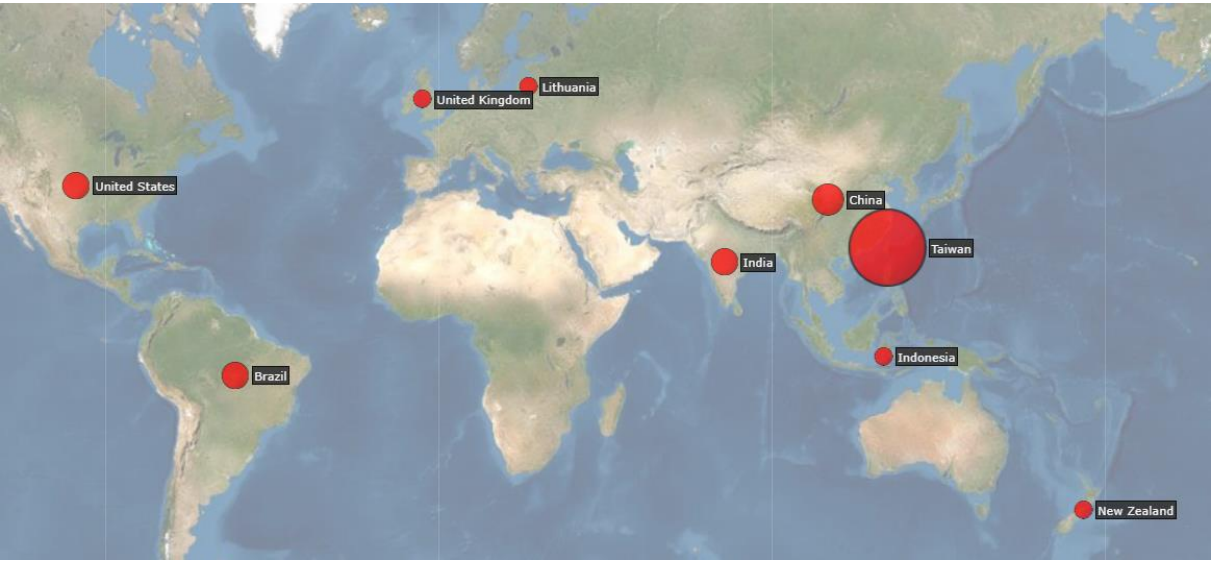
DAVARZANI, 2015). A Figura 21 mostra a distribuição das publicações de acordo com a localização geográfica de cada país.

Tabela 7 - Quantidade de publicações por país

País	MTA	PRD	DBM	Amostra final
Taiwan	0	13	7	14
China	0	4	1	4
Brazil	1	2	2	3
India	1	3	1	3
United States	0	2	1	3
Indonesia	0	1	0	1
Lithuania	0	1	0	1
New Zealand	0	1	0	1
United Kingdom	0	1	0	1

Fonte: Autor (2023).

Figura 21 - Mapa das publicações da amostra final

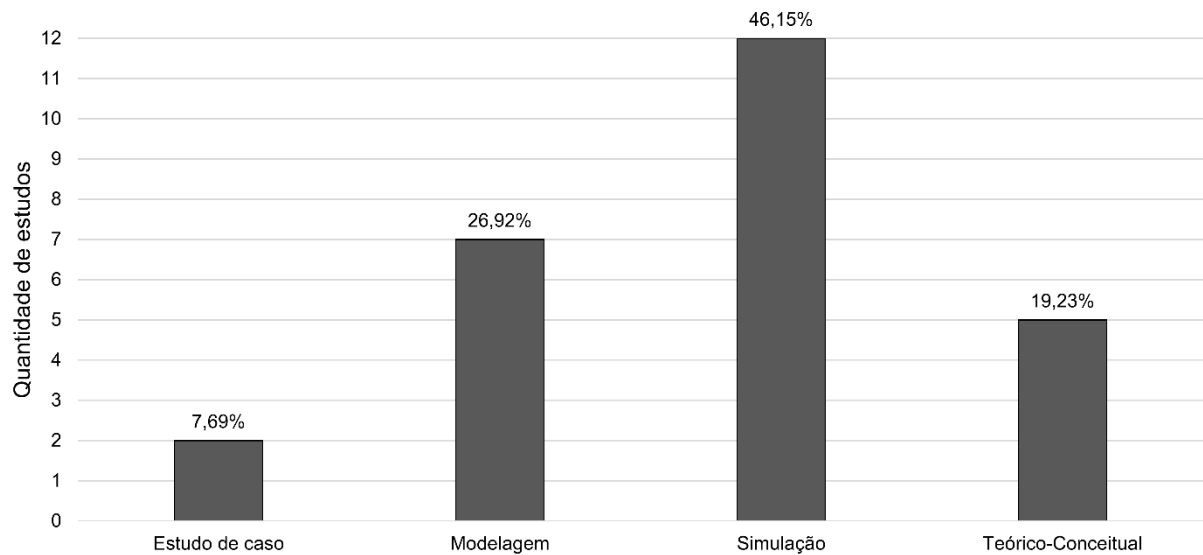


Fonte: Autor (2023).

3.4.2 Métodos de pesquisa adotados pelos estudos

Após a leitura dos estudos, identificou-se os métodos de pesquisa empregados em cada artigo. A Figura 22 mostra a forma como os 26 artigos se distribuem pelos quatro métodos de pesquisa observados na amostra final: estudo de caso, modelagem, simulação e teórico-conceitual (AMOAKO-GYAMPAH; MEREDITH, 1989).

Figura 22 - Distribuição dos métodos de pesquisa adotados pelos estudos



Fonte: Autor (2023).

Observa-se que uma pequena quantidade de estudos de caso foi conduzida ao longo do tempo (2 artigos). O recente artigo de Modi, Lowalekar e Bhatta (2019) reporta um caso de sucesso de uma cadeia de suprimentos que empregou os três elementos da TOC abordados nesta pesquisa. Sendo assim, novos estudos de caso poderiam contribuir com as boas práticas, benefícios e barreiras para a aplicação da TOC em cadeias de suprimentos.

A modelagem é o segundo método mais utilizado (7 artigos), mas os modelos matemáticos têm sido desenvolvidos para otimizar as frequências de reposições (WU; LEE; TSAI, 2014; JIANG et al., 2013; WU; HUANG; JEN, 2012; WU et al., 2010a) e a frequências de *setups* (JIANG; WU, 2013a, 2013b) em ambientes com restrições de capacidade. Vale destacar que dos 7 artigos publicados pelo autor Wu, 6 artigos foram desenvolvidos com base em modelagem matemática.

O método de pesquisa mais utilizado pelos estudos é a simulação (12 artigos) e ele passou a ser mais utilizado depois de 2009, normalmente em pesquisas sobre o DBM. No entanto, os esforços têm sido dedicados para propostas de melhorias voltadas ao uso de informações de previsões de demanda integradas com os elementos da TOC (CHANG et al., 2019; CHANG; CHANG; SUN, 2015; CHANG; CHANG; HUANG, 2014; CHANG; CHANG; LEI, 2014; JIANG et al., 2013; KAIJUN; YUXIA, 2010).

Os princípios que alicerçam a TOC se opõem à ênfase dada sobre as otimizações e as previsões de demanda (BARNARD, 2010; SCHRAGENHEIM A., 2010; SCHRAGENHEIM; DETTMER; PATTERSON, 2009; GOLDRATT, 2008b; GOLDRATT; SCHRAGENHEIM; PTAK, 2000; GOLDRATT, 1990a, 1990b). Sendo assim, mesmo que o sistema PRD e o DBM venham recebendo uma atenção maior por parte da literatura acadêmica, nota-se que esses estudos baseados em métodos quantitativos, como a modelagem e a simulação, não exploram os seus conceitos na forma como foram propostos pela literatura clássica da TOC. Logo, há divergências entre a literatura acadêmica e os casos reportados por praticantes da TOC nos eventos da Theory of Constraints International Certification Organization (TOCICO) e no Handbook da TOC (IKEZIRI et al., 2019; GUPTA, 2003).

Artigos teórico-conceituais estão em quantidade menor na amostra final (5 artigos), ficando à frente apenas dos estudos de caso. Ressalta-se que os três artigos desenvolvidos no Brasil, conforme a Tabela 7, são teórico-conceituais (SIKILERO et al., 2014; SOUZA; PIRES, 2014; SOUZA; PIRES, 2010). Consequentemente, há uma lacuna entre os estudos nacionais e os que são desenvolvidos em Taiwan, China e Índia, por exemplo. Pesquisas aplicadas para a área de SCM da TOC baseadas em estudo de caso, pesquisa-ação, modelagem ou simulação são, portanto, oportunidades para investigações futuras no contexto do Brasil.

3.4.3 Evidências identificadas na literatura acadêmica

Por último, a análise qualitativa da amostra final proporcionou a identificação das evidências existentes na literatura acadêmica sobre a aplicação da TOC em cadeias de suprimentos, por meio dos sistemas MTA, PRD e/ou DBM.

Essa análise respaldou e contribuiu para o desenvolvimento da questão, dos objetivos e das justificativas da pesquisa presentes no Capítulo 1 desta tese.

O Quadro 6 sintetiza as evidências identificadas e mostra os autores, métodos de pesquisa empregados e as contribuições de cada um dos estudos analisados.

Quadro 6 - Síntese das evidências identificadas na literatura acadêmica

Autores	Método de pesquisa	Contribuições
Modi, Lowalekar e Bhatta (2019)	Estudo de caso	Mostram como a ideia de simplicidade inerente da TOC, a partir do uso de ferramentas dos processos de raciocínio e outras soluções como MTA, PRD, DBM, entre outras, é válida mesmo para grandes cadeias de suprimentos que, tradicionalmente, são consideradas muito complexas.
Jasinavičius e Jasinavičius (2011)	Estudo de caso	Fornecem uma fundamentação teórica sobre a aplicação da TOC na gestão da cadeia de suprimentos e relatam brevemente a experiência prática dos autores com as criações de vantagens competitivas para três produtores têxteis do leste europeu.
Lowalekar e Basu (2020)	Modelagem	Mostram como o sistema PRD pode contribuir para o desenvolvimento de uma <i>Mafia Offer</i> para produtores em cadeias de suprimentos de produtos perecíveis.
Wu, Lee e Tsai (2014)	Modelagem	Propõem um modelo para determinar a frequência de reposição de dois níveis de produtos baseados na capacidade necessária para fabricá-los quando o sistema PRD é aplicado em um ambiente com restrição de capacidade. A abordagem proposta pode trazer benefícios econômicos significativos e é mais adequada em ambientes cujos diferentes produtos têm uma grande variação no volume de vendas.
Jiang e Wu (2013a)	Modelagem	Usam o método de Pareto e o algoritmo de otimização por enxame de partículas (<i>particle swarm optimization</i>) para otimizar as frequências de <i>setup</i> de ambientes que utilizam o sistema PRD e que tenham restrições de capacidade.
Jiang e Wu (2013b)	Modelagem	Usam algoritmos genéticos e de otimização por enxame de partículas (<i>particle swarm optimization</i>) para otimizar as frequências de <i>setup</i> de uma fábrica hipotética que utiliza o sistema PRD e que tenha restrições de capacidade.
Jiang et al. (2013)	Modelagem	Propõem um modelo para agrupar produtos com base na magnitude da demanda e determinar a frequência de reposição em um ambiente com restrição de capacidade que utiliza o sistema PRD.
Wu, Huang e Jen (2012)	Modelagem	Desenvolvem um modelo para avaliar e suprimir as rupturas de estoque durante os períodos de diminuição da frequência de reposição devido ao aumento das vendas e a consequente limitação de capacidade das fábricas.
Wu et al. (2010a)	Modelagem	Apresentam um modelo para solucionar o conflito entre quantidade, frequência e o tempo de reposição em um ambiente que tenha restrição de capacidade e utilize o sistema PRD.
Chang et al. (2019)	Simulação	Integram o método da média móvel exponencialmente ponderada para identificar tendências na demanda e o método DBM para analisar e realizar ajustes nos níveis dos pulmões, mitigando as deficiências do DBM tradicional.

Chang, Chang e Chang (2017)	Simulação	Propõem uma estratégia de reposição baseada na TOC para resolver a alocação de memória de armazenamento em nuvem. Essa estratégia integra informações de mercado e o DBM para construir um sistema de previsão contínuo para prever as demandas de armazenamento em nuvem. Por meio de simulações de uma empresa internacional de tecnologia da informação, a estratégia proposta apresentou resultados melhores comparados aos do método DBM tradicional, da média móvel ponderada e da suavização exponencial.
Lowalekar e Ravi (2017)	Simulação	Demonstram como a TOC pode ser aplicada no contexto de um grande banco de sangue da Índia para lidar com problemas como escassez, desperdício, baixa variedade de produtos, altos níveis de estoque, grande taxa de erro e baixo desempenho financeiro. Dessa forma, a lógica do sistema PRD pode ser utilizada nesse cenário, onde um banco de sangue regional, que sofre menos influências de variabilidades, fica responsável por coletar e distribuir o sangue para os hospitais da região baseado no consumo de cada hospital, em vez de previsões de demanda individuais.
Margaretha e Sahroni (2017)	Simulação	Mostram como o sistema PRD poderia ser implementado em uma empresa de bens de consumo rápido da Indonésia para eliminar perdas por rupturas de estoque, enquanto reduz custos com a manutenção de estoque.
Chang, Chang e Sun (2015)	Simulação	Propõem um método que utiliza informações da previsão de demanda de mercado para melhorar o sistema PRD e o DBM tradicional no contexto das indústrias de semicondutores.
Chang, Chang e Huang (2014)	Simulação	Propõem a integração de informações da previsão de demanda de mercado ao sistema PRD para melhorar a eficácia da gestão de estoque influenciada pelos longos prazos de entrega e as grandes variações de demanda da fabricação de materiais semicondutores.
Chang, Chang e Lei (2014)	Simulação	Propõem regras para o agrupamento de produtos, com padrões distintos de demanda da indústria de semicondutores, para melhorar a eficácia da gestão de estoques baseada no sistema PRD e no DBM.
Tsou (2013)	Simulação	Propõe um método sistemático para decidir o momento de ajuste dos níveis de estoque por meio de três técnicas para detecção da mudança do padrão da demanda e dois modelos de reposição baseados no <i>just in time</i> e no ponto de reposição com o lote econômico de compra.
Wu et al. (2011)	Simulação	Aplicam os conceitos do sistema PRD para desenvolver um mecanismo de reabastecimento adequado para os pontos de armazenagem de uma cadeia de suprimentos de telas de TFT-LCD.
Kaijun e Yuxia (2010)	Simulação	Propõem três diferentes políticas para realizar o controle de estoque em empresas que adotam o sistema PRD e comparam, por meio de simulações, com uma política tradicional. A política que foi proposta em função da previsão de demanda apresentou os melhores desempenhos em nível de serviço e quantidade de estoque.
Watson e Polito (2003)	Simulação	Comparam o uso do sistema PRD e do DBM com o uso do planejamento das necessidades de distribuição (<i>distribution resource planning</i> - DRP). A solução baseada na TOC fornece desempenho financeiro global superior se comparada ao DRP tradicional.

Yuan, Chang e Li (2003)	Simulação	Propõem um procedimento genérico de DBM para dimensionar, monitorar e ajustar o tamanho dos pulmões em um sistema de distribuição. Em comparação à política tradicional de um sistema de revisão contínua, o procedimento proposto apresentou níveis mais baixos de estoque para o mesmo nível de serviço.
Sikilero et al. (2014)	Teórico- Conceitual	Identificam e analisam as possibilidades de contribuições da TOC para os elementos estoque, transporte, localização e serviços logísticos presentes no tema da Gestão da Cadeia de Suprimentos.
Souza e Pires (2014)	Teórico- Conceitual	Apresentam as técnicas e as características peculiares da forma como a TOC realiza o planejamento e o controle da produção para estoque através da abordagem MTA.
Souza e Pires (2010)	Teórico- Conceitual	Apresentam e discutem as contribuições que a TOC oferece à logística de distribuição a partir de uma pesquisa teórica sobre o assunto na literatura. Os passos para a implementação do sistema PRD, assim como o mecanismo do DBM, são descritos.
Simatupang, Wright e Sridharan (2004)	Teórico- Conceitual	Mostram como a abordagem da TOC pode ser usada para: 1) superar as dificuldades em perceber os benefícios da colaboração em uma cadeia de suprimentos e 2) estabelecer uma política de reposição com métricas de desempenho colaborativas que motivam os membros a melhorar a cadeia de suprimentos como um todo.
Blackstone (2001)	Teórico- Conceitual	Fornece uma visão geral de como a TOC estava sendo aplicada nas áreas de operações, finanças e medidas, projetos, distribuição e cadeias de suprimentos, <i>marketing</i> , vendas, gestão de pessoas e estratégias e táticas. Sobre a aplicação em cadeias de suprimentos, o autor apresenta os fundamentos do sistema PRD.

Fonte: Autor (2023).

4 MÉTODO DE PESQUISA

Este capítulo apresenta o método de pesquisa selecionado para alcançar os objetivos desta tese. Primeiramente, a abordagem metodológica da pesquisa é apresentada. Em seguida, os passos seguidos para a sua condução são descritos. Por fim, as medidas utilizadas para avaliar o desempenho do sistema são definidas.

4.1 ABORDAGEM METODOLÓGICA

Esta pesquisa foi conduzida a partir de uma abordagem quantitativa, por meio de simulação computacional, que viabilizou o estudo de um ambiente real composto por dois estágios de uma cadeia de suprimentos.

Segundo Bertrand e Fransoo (2002), esta pesquisa pode ser caracterizada como uma pesquisa empírica normativa, pois seu principal interesse está relacionado com o desenvolvimento de políticas, estratégias e ações para melhorar uma situação atual.

A simulação com o uso de *softwares* computacionais é um dos métodos mais utilizados na avaliação de desempenho de sistemas, pois permite a aplicação e análise dos efeitos de diferentes políticas, sem influenciar no desempenho dos sistemas reais (GRIGORYEV, 2018; MORABITO; PUREZA, 2018; BANKS et al., 2014; ROBINSON, 2014; SINGH, 2013). Considerando as complexidades, dinâmicas e interações que ocorrem em um ambiente de cadeia de suprimentos, a simulação computacional pode ser uma ferramenta poderosa de apoio aos gestores em processos de tomada de decisão (OLIVEIRA; LIMA; MONTEVECHI, 2016).

De acordo com Cauchick-Miguel et al. (2017), a escolha desse método se justifica pela conexão que ele forma com a questão e os objetivos desta pesquisa, dado que os experimentos realizados podem ser inviáveis para testes práticos em um ambiente real. Além disso, conforme o subcapítulo 3.4.2 da revisão sistemática da literatura, o método de simulação tem sido o mais utilizado sobre esse objeto de estudo.

Por fim, o modelo de simulação desenvolvido é classificado como dinâmico, estocástico e discreto (BANKS et al., 2014). O modelo é dinâmico, pois o estado do sistema sofre variações em função do tempo. Ele é estocástico, pois as variáveis de entrada geradas com números aleatórios também fornecem distribuições de

resultados aleatórios que requerem o uso de métodos estatísticos para suas análises. A simulação é classificada como discreta, pois o estado do sistema modelado altera apenas em momentos discretos.

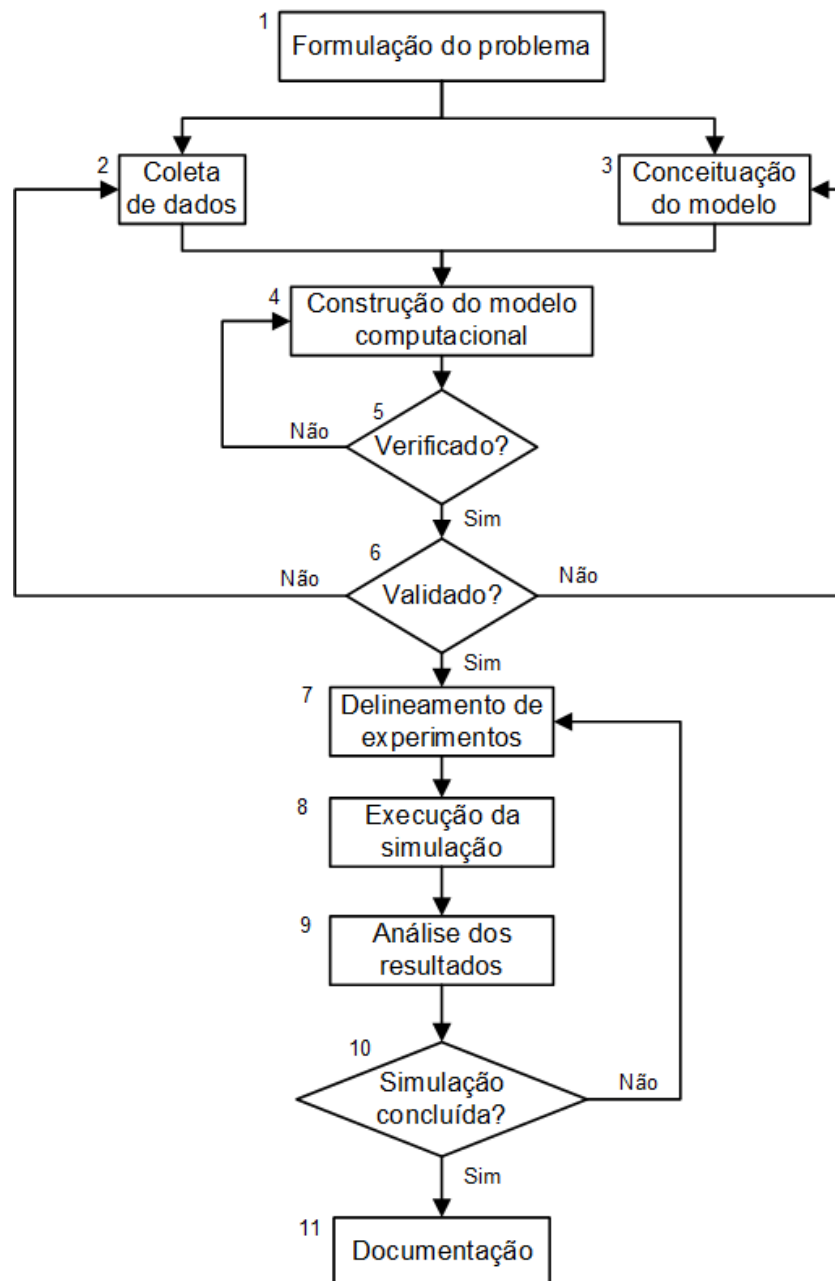
4.2 PASSOS DA PESQUISA EXPERIMENTAL

Winston (2004) recomenda uma sequência de passos para a condução de um estudo experimental baseado em simulação. A Figura 23 apresenta os passos recomendados pelo autor por meio de um fluxograma e cada um desses passos é brevemente apresentado a seguir, destacando como foram conduzidos ao longo desta pesquisa:

1. Formulação do problema: nesta fase é importante que o escopo do problema seja claramente compreendido. Esse passo foi desenvolvido no Capítulo 1 deste trabalho;
2. Coleta de dados: há uma interação constante entre a construção do modelo e a coleta dos dados de entrada necessários. Conforme a complexidade do modelo sofre mudanças, os dados necessários para a simulação também podem mudar. Os dados foram coletados junto às unidades de análise selecionadas para a presente pesquisa a partir de visitas técnicas, entrevistas (diretor industrial, coordenadores, analistas e operadores de produção) e relatórios gerados pelo sistema de gestão empresarial. Os procedimentos realizados durante esta etapa estão expostos nos subcapítulos 6.1 e 6.3;
3. Conceituação do modelo: nesta etapa o modelo conceitual deve ser elaborado a partir da captura de características essenciais presentes no sistema real. Após a seleção das unidades de análise, as fronteiras do sistema foram definidas e o modelo conceitual desenvolvido é apresentado no subcapítulo 6.1;
4. Construção do modelo computacional: o modelo conceitual foi traduzido e suas lógicas inerentes foram incorporadas em um modelo computacional desenvolvido no *software* AnyLogic® 8.8.1 (versão *University Researcher*), cuja licença foi obtida por meio de um projeto de Auxílio à Pesquisa Regular da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP),

com vigência de 01/06/2021 a 31/05/2023. O subcapítulo 6.2 apresenta o modelo computacional desenvolvido;

Figura 23 - Passos do projeto de simulação



Fonte: Adaptado de Winston (2004).

5. Verificação do modelo: durante esta etapa, o modelo computacional foi cuidadosamente analisado com o objetivo de verificar se as lógicas de seus processos estavam se comportando de forma adequada e livre de erros em relação à lógica do modelo conceitual (subcapítulo 6.3);

6. Validação do modelo: na etapa de validação, determinou-se que o modelo computacional representa o sistema real com precisão suficiente para o propósito desta pesquisa. O subcapítulo 6.3 detalha a estratégia adotada para a validação do modelo;
7. Delineamento de experimentos: os tratamentos e os cenários simulados foram planejados no início desta etapa. Depois, determinou-se o período de aquecimento (*warm-up period*), a quantidade de replicações e o tempo de duração das simulações (Capítulo 7);
8. Execução da simulação: executou-se os experimentos planejados na etapa anterior no *software* de simulação;
9. Análise dos resultados: os resultados foram analisados, por meio de testes estatísticos no *software* R, e apresentados nos subcapítulos 8.1 e 8.2 do capítulo de resultados;
10. Avaliação se mais execuções são necessárias: após a execução e análise dos resultados dos experimentos, foram identificados dois cenários em que algumas combinações de regras do Gerenciamento Dinâmico do Pulmão (*Dynamic Buffer Management – DBM*) apresentaram desempenhos inferiores em relação aos demais cenários simulados e o modelo computacional foi exportado do *software* AnyLogic® para uma plataforma da Microsoft Azure de desenvolvimento de inteligência artificial chamada Project Bonsai. Nessa plataforma, o modelo foi treinado nos dois cenários identificados por meio da técnica de aprendizado por reforço (*reinforcement learning – RL*) para, se possível, identificar parâmetros mais adequados para as regras do DBM em tais cenários. O modelo treinado foi importado para o *software* AnyLogic® e novas rodadas de simulações foram realizadas, seguidas de novas análises por meio de testes estatísticos no *software* R. O detalhamento desse processo é apresentado no subcapítulo 8.3 do capítulo de resultados;
11. Documentação: os dados e os resultados desta pesquisa, e todas as análises foram documentados de forma clara e concisa ao longo dos capítulos e, eventualmente, em apêndices para manter a organização do trabalho. Assim, entende-se que esta etapa se consolidou com a finalização da presente tese.

4.3 MEDIDAS DE DESEMPENHO DO SISTEMA

O desempenho de uma cadeia de suprimentos deve ser medido tanto pela redução de custos quanto pela análise do nível de serviço oferecido aos seus clientes (JANSSENS; RAMAEKERS, 2011; JAMMERNEGG; REINER, 2007).

Para esta pesquisa, quatro medidas de desempenho são propostas para avaliar a efetividade do DBM: *fill rate* ponderado (FRP) como um indicador de nível de serviço; estoque médio (EM) como indicativo de custo do modelo; *Throughput-Value-Days* (TVD) como uma medida de eficácia e confiabilidade da cadeia de suprimentos; e *Inventory-Value-Days* (IVD) como uma medida de eficiência da cadeia de suprimentos (GUPTA; ANDERSEN, 2018; COX III et al., 2012).

Tais medidas de desempenho estão alinhadas com as pesquisas identificadas na revisão sistemática da literatura sobre o DBM. Nível de serviço (*fill rate*) e estoque médio são os indicadores mais utilizados pelos autores presentes na revisão sistemática da literatura (CHANG et al., 2019; CHANG; CHANG; SUN, 2015; CHANG; CHANG; HUANG, 2014; CHANG; CHANG; LEI, 2014; YUAN; CHANG; LI, 2003). TVD e IVD são indicadores específicos introduzidos pela Teoria das Restrições (*Theory of Constraints – TOC*) e são frequentemente denominados na literatura de *Throughput-Dollar-Days* (TDD) e *Inventory-Dollar-Days* (IDD), respectivamente (MACHADO et al., 2021; MODI; LOWALEKAR; BHATTA, 2019; COX III et al., 2012; SOUZA; PIRES, 2010; GOLDRATT; SCHRAGENHEIM; PTAK, 2000; GOLDRATT, 1998). No entanto, Cox III et al. (2012) recomendam o uso dos termos TVD e IVD em países onde o dólar não é a moeda base.

O cálculo do EM foi feito a partir das médias dos estoques de produtos acabados em cada local (armazém da fábrica e distribuidor) durante o período simulado.

O *fill rate* corresponde à porcentagem da demanda de cada produto recebida e atendida no prazo imediatamente a partir dos estoques em cada local. Como esta pesquisa modelou um ambiente com mais de um produto, considerou-se a média de *fill rate* ponderada pela quantidade de demanda de cada produto. Dessa forma, produtos com níveis maiores de demanda possuem pesos maiores para essa medida de desempenho, impactando o cálculo do FRP.

O cálculo do TVD baseou-se no preço médio de venda de um item em um determinado local e na quantidade de dias que a entrega desse item permaneceu

atrasada. Por exemplo, se a entrega de 40 unidades de um determinado SKU, cujo preço unitário é \$180, estiver 1 dia atrasada no distribuidor, então o TVD do distribuidor para esse item é de \$7200 ($\$180 \times 40 \times 1$) (MACHADO et al., 2021; GUPTA; ANDERSEN, 2018, 2012; HOLT, 2013; COX III et al., 2012; HO; LI, 2008, 2004; GOLDRATT, 1998).

O IVD foi calculado a partir do valor de custo médio de um item e na quantidade de dias que ele permaneceu em estoque no local. Assim, se 40 unidades de um determinado SKU, cujo custo unitário é \$65, permanecerem estocadas no distribuidor por 3 dias para depois serem expedidas, então o IVD do distribuidor para esse item é de \$7800 ($\$65 \times 3 \times 40$) (MACHADO et al., 2021; GUPTA; ANDERSEN, 2018, 2012; HOLT, 2013; COX III et al., 2012; HO; LI, 2008, 2004; GOLDRATT, 1998).

Logo, o TVD aumenta quando ocorrem atrasos no atendimento da demanda e o IVD aumenta em função da quantidade de estoque e do período em que o item permaneceu armazenado (MACHADO et al., 2021; GUPTA; ANDERSEN, 2018; HO; LI, 2008; GOLDRATT, 1998). Cox III et al. (2012) destacam que as cadeias de suprimentos devem se esforçar para manter o mínimo necessário de IVD para que o TVD permaneça igual a zero.

5 UNIDADES DE ANÁLISE SELECIONADAS

Este capítulo visa apresentar as unidades de análise que compõem o modelo desenvolvido de parte de uma cadeia de suprimentos real. Conforme mencionado na introdução desta tese, uma fábrica e um distribuidor de produtos de vidros temperados foram selecionados e ambos estão localizados no estado de São Paulo.

De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (2001), o vidro temperado é composto por uma chapa cuja resistência a esforços mecânicos é ampliada por meio de tratamento térmico, caracterizando-o como um vidro de segurança que ao quebrar se desintegra em pequenos fragmentos.

Dessa forma, esses produtos são divididos pela fábrica em duas classes: vidro temperado para engenharia (customizado conforme a especificidade do projeto do cliente) produzido sob encomenda (*Make to Order* – MTO) e vidro temperado à pronta-entrega (projeto padronizado) produzido para estoque (*Make to Stock* – MTS).

Em relação aos vidros à pronta-entrega (MTS), as famílias de produtos comercializadas são box para banheiro, portas, janelas e tábuas de frios. Esses produtos possuem formas retangulares e seguem o mesmo roteiro de fabricação, havendo apenas uma divergência no fluxo das peças que necessitam de furos ou recortes (tábuas de frios e peças móveis de box, portas e janelas), pois essas são encaminhadas para a estação de furação. Depois, o fluxo converge e se mantém linear até o final do processo. A Figura 24 exibe um fluxograma com as etapas do processo de fabricação desses produtos.

Com a autorização da empresa fabricante, foi possível obter imagens da linha de produção para ilustrar e facilitar a compreensão de seu processo de fabricação. Cada etapa do processo é brevemente apresentada a seguir:

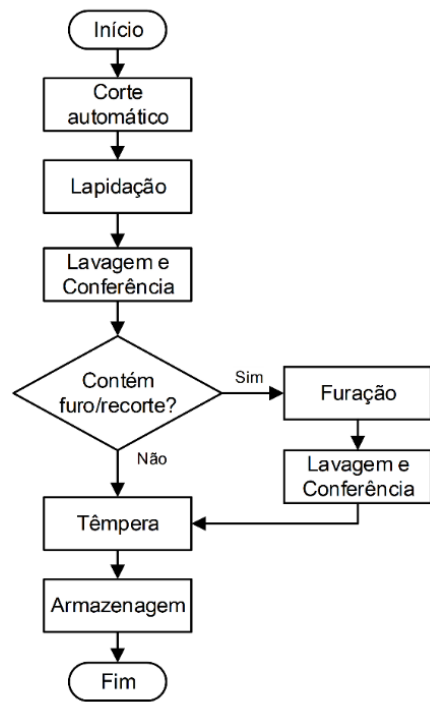
- **Corte automático**

O corte automático é feito em uma estação composta por três mesas: entrada de matéria-prima, processamento e destaque. As chapas de vidro (matéria-prima) são transferidas dos cavaletes de estoque até o cavalete de queda livre por meio de ponte rolante. Cada chapa é carregada na mesa de entrada, depois é transferida para a mesa de processamento de corte automático e, por último, as peças são destacadas e individualizadas, recebendo uma etiqueta para identificação no sistema da empresa.

A Figura 25 mostra as chapas de vidro armazenadas nos cavaletes de estoque de matéria-prima, a Figura 26 mostra o cavalete de queda livre ao lado da mesa de

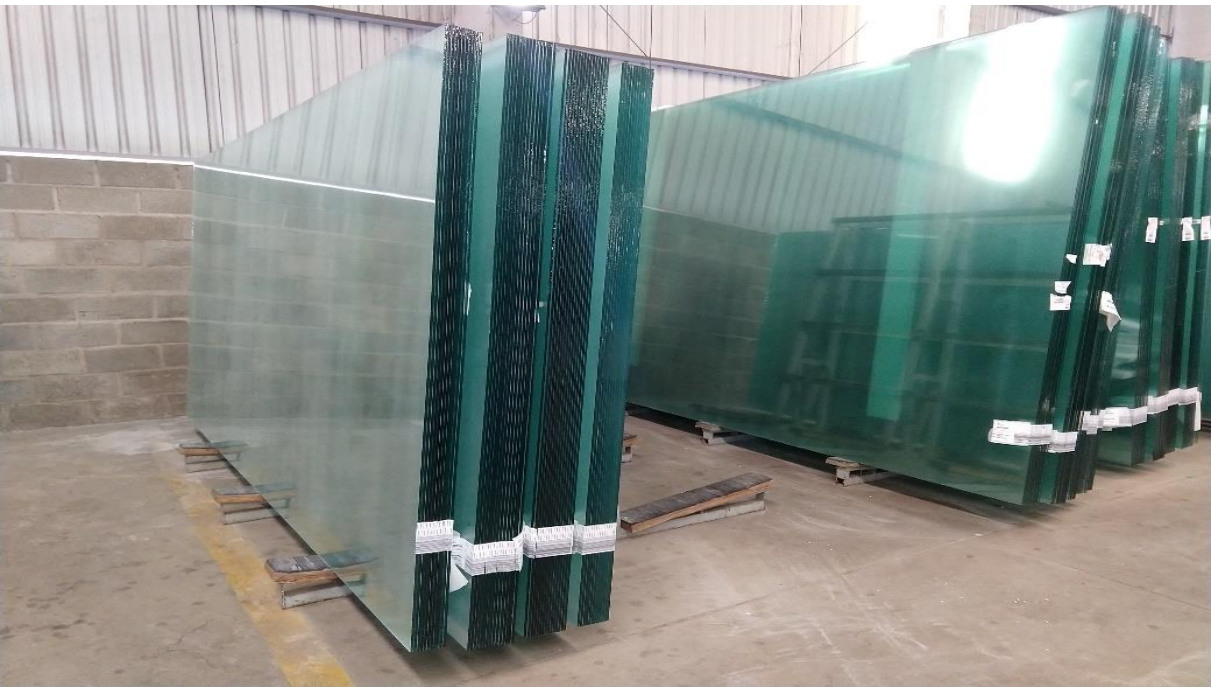
entrada, a Figura 27 mostra a mesa de processamento de corte automático e a Figura 28 mostra a mesa de destaque, onde as peças são individualizadas.

Figura 24 - Etapas do processo de fabricação do vidro temperado



Fonte: Autor (2023).

Figura 25 - Estoque de matéria-prima



Fonte: Autor (2023).

Figura 26 - Cavalete de queda livre e mesa de entrada de matéria-prima



Fonte: Autor (2023).

Figura 27 - Mesa de processamento de corte automático



Fonte: Autor (2023).

Figura 28 - Mesa de destaque de peças



Fonte: Autor (2023).

- **Lapidação**

Após o corte, as peças são encaminhadas para a estação de lapidação. Essa estação é composta por quatro máquinas lapidadoras verticais interligadas e cada máquina é responsável por lapidar, isto é, lixar e polir, uma das quatro bordas das peças para dar acabamento. Além disso, esse processo possui três robôs que fazem as rotações e as transferências das peças entre as esteiras das lapidadoras.

Cada ciclo de lapidação reduz a dimensão da peça em 1,5 milímetro e, ao final dessa etapa, a peça diminui 3 milímetros na largura e na altura. Dessa forma, ao ser cortada na etapa anterior, cada peça tem 3 milímetros a mais na horizontal e na vertical em relação às medidas finais que constam na etiqueta.

A Figura 29 mostra o início da estação de lapidação com o robô que faz a rotação e a transferência das peças da lapidadora 1 para a lapidadora 2, e a Figura 30 mostra o fim da estação de lapidação com destaque para o robô de seis eixos que rotaciona e transfere as peças da lapidadora 3 para a lapidadora 4.

- **Lavagem e conferência**

A lavagem tem o objetivo de remover os resíduos resultantes das etapas anteriores que podem afetar a qualidade da peça, por exemplo, na forma de manchas ou riscos. A limpeza das peças também evita que os resíduos do processo sejam

transferidos para o interior do forno de têmpera. Por padrão, a fábrica lava todas as peças após o processo de lapidação por meio de uma lavadora vertical conectada ao processo anterior por esteira. Todas as peças que possuem furos ou recortes são lavadas novamente após o processo de furação por meio de uma lavadora horizontal.

Figura 29 - Início da estação de lapidação



Fonte: Autor (2023).

A Figura 31 mostra a lavadora vertical utilizada após a etapa de lapidação e a Figura 32 mostra a lavadora horizontal utilizada após a etapa de furação.

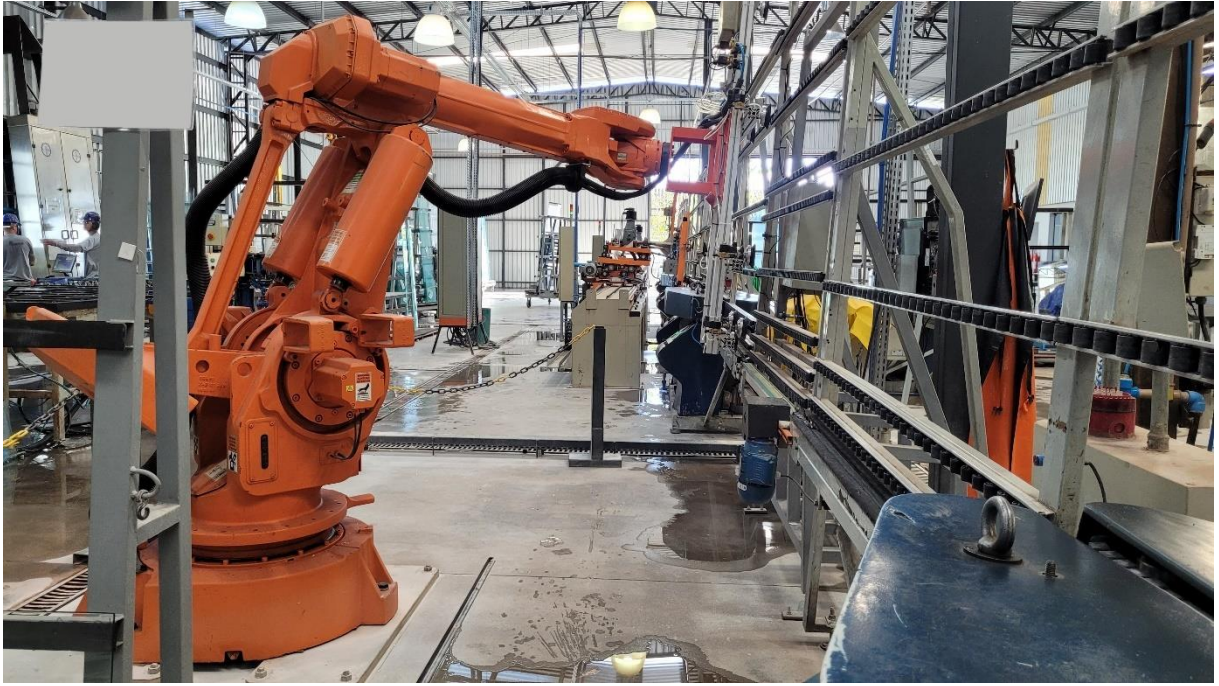
De acordo com a Figura 31, a esteira de saída da lavadora vertical possui iluminação que possibilita a identificação de defeitos na superfície e nas bordas do vidro, como manchas, riscos, bolhas ou lascas. Além disso, ao fazer a leitura do código de barras da etiqueta, um operador confere se a peça está de acordo com os detalhes do seu projeto, por exemplo, matéria-prima e dimensões. Na mesa de saída da lavadora horizontal, além do tipo de matéria-prima e dimensões, um operador confere se as medidas dos furos ou recortes das peças estão em conformidade com seus projetos.

- **Furação**

Após as primeiras etapas de lavagem e conferência, caso a peça necessite de furos ou recortes, ela é movimentada para a estação de furação, cujo processo é

realizado de forma automática por meio de jato d'água. Se a peça não tiver furos ou recortes em seu projeto, então ela é encaminhada para a etapa da têmpera.

Figura 30 - Fim da estação de lapidação



Fonte: Autor (2023).

Figura 31 - Lavadora vertical utilizada após o processo de lapidação



Fonte: Autor (2023).

Figura 32 - Lavadora horizontal utilizada após o processo de furação



Fonte: Autor (2023).

A Figura 33 mostra a máquina de recorte e furação e a Figura 34 apresenta o detalhe do processo de furação por jato d'água.

Figura 33 - Máquina de recorte e furação a jato d'água



Fonte: Autor (2023).

Figura 34 - Detalhe do processo de furação



Fonte: Autor (2023).

- **Têmpera**

A têmpera é a última etapa do processo de fabricação e é por meio desse tratamento térmico que o vidro se torna mais resistente e seguro (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2001). Assim, as peças são acondicionadas sobre a mesa de entrada do forno de modo que se faça um bom aproveitamento de sua área útil. Portanto, é fundamental a presença de um certo nível de estoque em processo em frente ao forno para que os operadores consigam executar as montagens das cargas. Depois, os rolos transportam as peças para o interior do forno cuja temperatura é de, aproximadamente, 650°C. Quando saem do forno, elas são submetidas a um resfriamento forçado por um ventilador que direciona ar à temperatura ambiente em suas superfícies. Vale ressaltar que os rolos realizam movimentos oscilatórios durante os processos de aquecimento e resfriamento para evitar o empenamento das peças.

No final do processo, as peças são transferidas para a mesa de saída do forno, onde recebem cantoneiras e separadores para evitar danos e acidentes. As Figuras 35 e 36 mostram as mesas de entrada e de saída do forno, respectivamente.

- **Armazenagem**

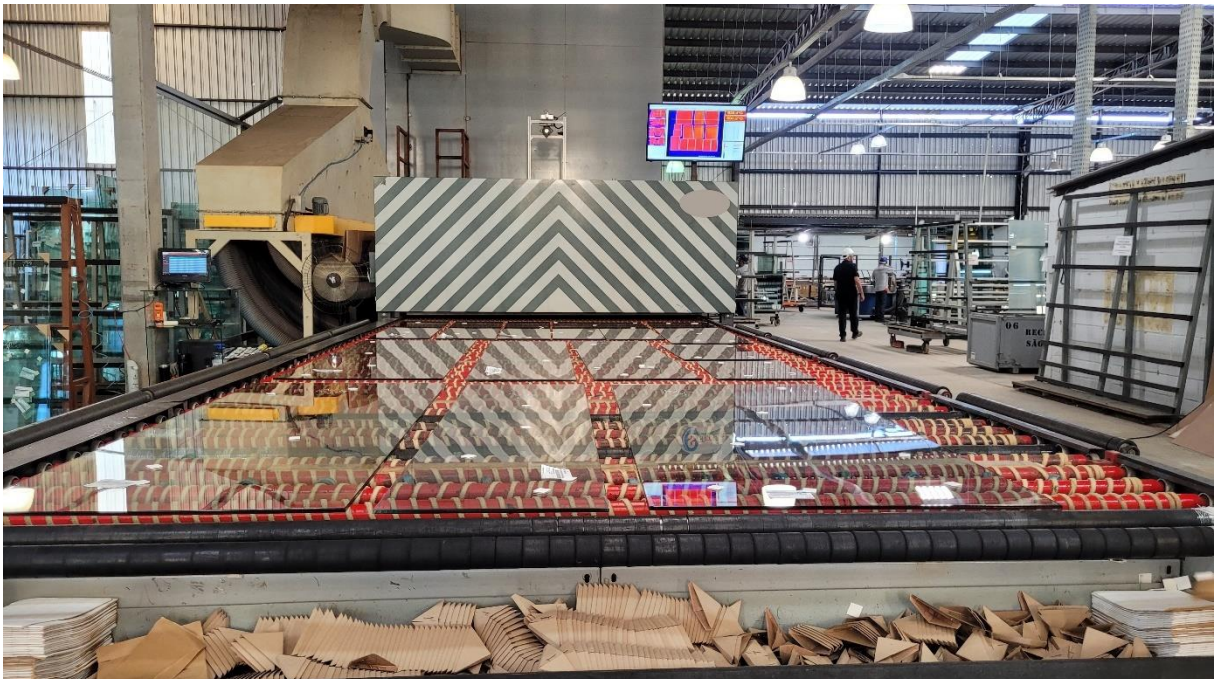
Após a têmpera, as peças são acondicionadas em um cavalete móvel ao lado do forno e, posteriormente, armazenadas em seus cavaletes de produtos acabados.

Figura 35 - Mesa de entrada do forno



Fonte: Autor (2023).

Figura 36 - Mesa de saída do forno



Fonte: Autor (2023).

Durante a armazenagem, é feita a entrada no estoque, tornando-as disponíveis no sistema de gestão empresarial. A Figura 37 mostra o estoque de produtos acabados de box incolor e a Figura 38 mostra alguns desses produtos retirados do estoque para serem carregados no veículo que realiza as entregas para o distribuidor.

Figura 37 - Estoque de box incolor para banheiros



Fonte: Autor (2023).

Figura 38 - Carregamento dos produtos para o distribuidor



Fonte: Autor (2023).

6 MODELAGEM DAS UNIDADES DE ANÁLISE

Neste capítulo são explicados os passos desenvolvidos para a modelagem das unidades de análise apresentadas no capítulo anterior. Em princípio, o modelo conceitual é apresentado, seguido do modelo computacional. Depois, são explicados os passos para verificação e validação do modelo computacional.

6.1 DEFINIÇÃO DO SISTEMA E CONSTRUÇÃO DO MODELO CONCEITUAL

Uma das principais dificuldades em pesquisas conduzidas pelo método de simulação é a definição do conteúdo do modelo a ser simulado. Dessa forma, a partir de visitas e entrevistas com representantes das empresas, um modelo conceitual foi desenvolvido como uma abstração do sistema real, declarando o seu conteúdo, pressupostos e simplificações (ROBINSON, 2014).

Como mencionado no capítulo anterior, o sistema estudado é composto por uma fábrica e um distribuidor de vidros temperados. A fábrica realiza as suas atividades em apenas uma linha para produtos fabricados sob encomenda (*Make to Order* – MTO) e produtos fabricados para estoque (*Make to Stock* – MTS). Por sua vez, o distribuidor selecionado é um dos principais clientes da fábrica e atende vidraçarias, vidraceiros e consumidores finais.

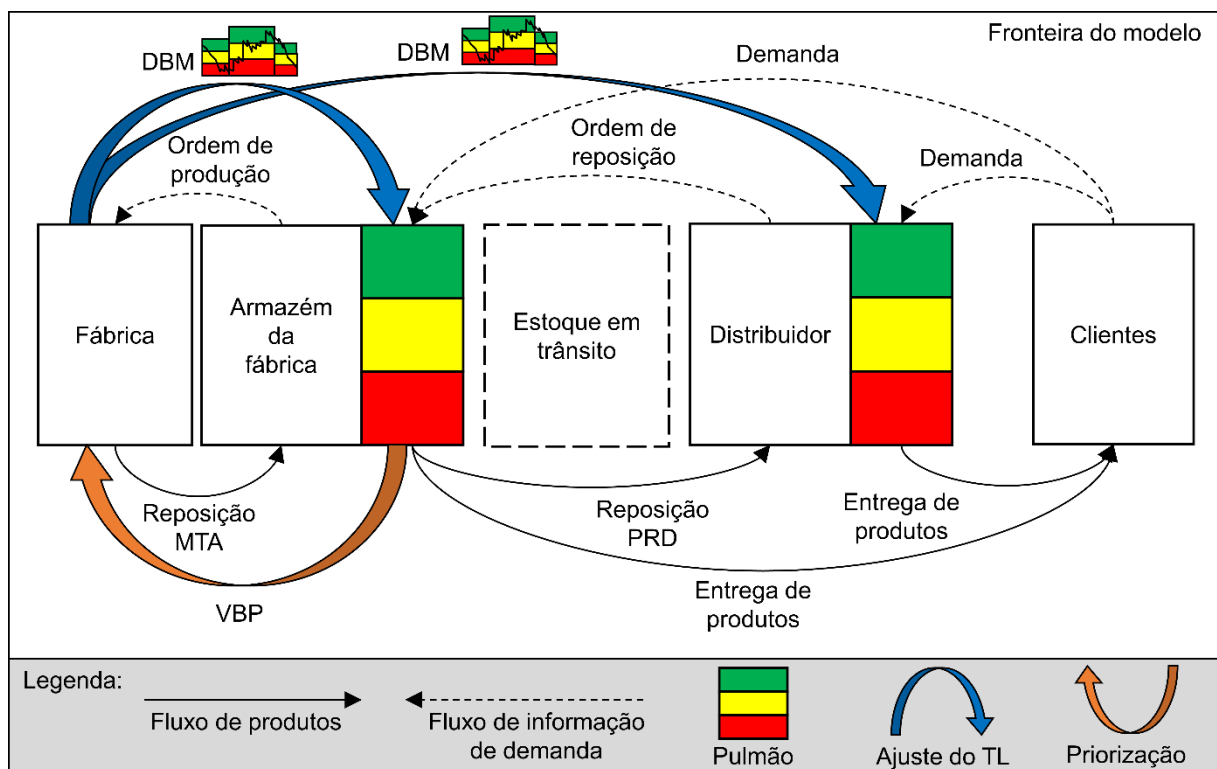
É importante destacar que a fábrica faz uso parcial do sistema *Make to Availability* (MTA) e o distribuidor não segue a lógica da Reposição e Distribuição Puxadas (*Pull Replenishment and Distribution* – PRD) em suas operações reais. No entanto, para atingir os objetivos desta pesquisa, a fábrica foi emulada com a lógica completa do sistema MTA e o relacionamento do distribuidor com o armazém da fábrica (AF) segue os passos do sistema PRD. Assim, a efetividade do método Gerenciamento Dinâmico do Pulmão (*Dynamic Buffer Management* – DBM) foi avaliada ao gerenciar os estoques desses dois estágios da cadeia de suprimentos.

O estudo englobou uma família de produtos MTS (vidros de box incolor para banheiros), selecionada a partir de sua representatividade no volume de vendas das duas empresas no período entre 01/01/2018 e 18/08/2021 (data de início da coleta de dados dos relatórios do sistema de gestão empresarial).

A Figura 39 ilustra o modelo conceitual que contém as fronteiras do sistema e os fluxos que foram emulados entre as unidades de análise. Esse modelo é

semelhante ao que foi proposto por Chang, Chang e Sun (2015), mas estende o conhecimento ao operacionalizar o DBM, simultaneamente, em uma fábrica MTA e em um sistema de distribuição PRD. As setas azuis mostram que o elo mais a montante desse modelo (fábrica) é responsável por gerenciar dinamicamente os níveis de estoques do AF e do distribuidor. A seta laranja indica o sentido das informações necessárias para o estabelecimento de prioridades no ambiente de produção, segundo o conceito da penetração do pulmão virtual (*Virtual Buffer Penetration – VBP*) (SCHRAGENHEIM, A., 2010, 2007). As setas tracejadas mostram os fluxos de informações de demanda e as setas pretas contínuas indicam os fluxos de produtos dentro do modelo. É importante destacar que o AF atende as demandas do distribuidor e de seus demais clientes.

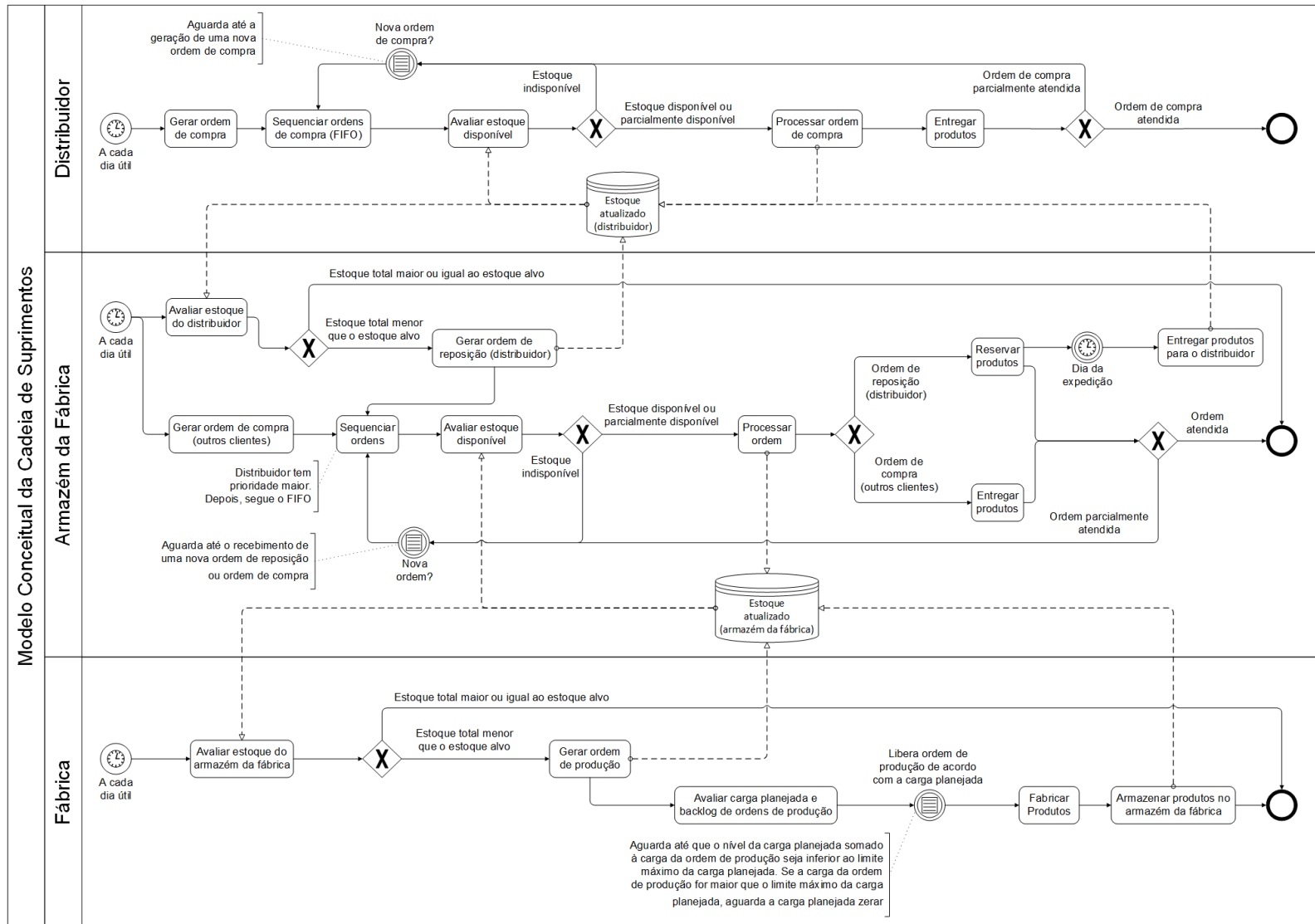
Figura 39 - Modelo conceitual e suas fronteiras



Fonte: Autor (2023).

A Figura 40 traz os detalhes dos processos e dos relacionamentos entre as atividades dos dois estágios da cadeia de suprimentos a partir da modelagem *Business Process Modeling Notation* (BPMN) do modelo conceitual presente na Figura 39.

Figura 40 - Modelagem BPMN do modelo conceitual



De acordo com a Figura 40, o distribuidor gera uma ordem de compra que representa a demanda de todos os seus clientes ao longo do dia e entrega os produtos a partir dos seus pulmões de estoque. Caso o estoque disponível não seja suficiente para atender a demanda de um determinado produto, a quantidade não atendida é registrada e a ordem de compra parcialmente atendida é encaminhada para o *backlog* do distribuidor para ser considerada junto com a ordem de compra gerada no dia seguinte. Vale destacar que a fila de ordens no *backlog* segue a disciplina *First In, First Out* (FIFO).

No início de cada dia, se o estoque total de cada produto do distribuidor, isto é, a soma entre o estoque de produtos acabados, estoque em trânsito e estoque que está aguardando carregamento no AF, for menor que o seu TL, então o AF gera uma ordem de reposição para o distribuidor com a diferença entre o TL e o estoque total do distribuidor para cada produto.

Em relação às atividades do AF, o fluxo de informação para emissão de uma nova ordem de produção para a fábrica e a avaliação da suficiência de estoque para atender os pedidos de reposição do distribuidor e de seus demais clientes são análogos às atividades do distribuidor. A diferença é que o AF não repõe os pedidos do distribuidor diariamente, pois apenas uma carga é expedida por semana (o tempo de reposição máximo do distribuidor é de seis dias úteis, pois, por exemplo, a reposição de uma ordem de compra gerada na terça-feira pelo distribuidor apenas chegará na quarta-feira da semana seguinte). Entretanto, a reserva diária dos produtos do AF para o distribuidor até o dia do carregamento da carga (terça-feira) os subtrai do estoque de produtos acabados do AF, possibilitando a geração de ordens de produção diárias para que a fábrica reponha esses itens.

A fábrica, por sua vez, identifica as necessidades de produção para repor o estoque do AF. Devido às especificidades do ambiente estudado, isto é, os produtos apresentam o mesmo roteiro de fabricação e compartilham os mesmos recursos sem a necessidade de novos *setups* a cada mudança de produtos na linha, o mecanismo do lote mínimo, sugerido por Souza e Pires (2014) para evitar a liberação de ordens de produção muito pequenas, não foi utilizado. Depois, as ordens de produção são inseridas no *backlog* da fábrica e liberadas respeitando o limite máximo de 80% da carga planejada sobre o recurso com restrição de capacidade (*Capacity Constrained Resource* – CCR), que é a estação de lapidação (segunda etapa do processo de fabricação do vidro temperado) (SOUZA; PIRES, 2014; SCHRAGENHEIM, E., 2010b;

SCHRAGENHEIM; DETTMER; PATTERSON, 2009). Caso uma ordem tenha carga superior a 80% da carga planejada, a liberação dessa ordem para o chão de fábrica ocorrerá apenas quando a carga planejada zerar.

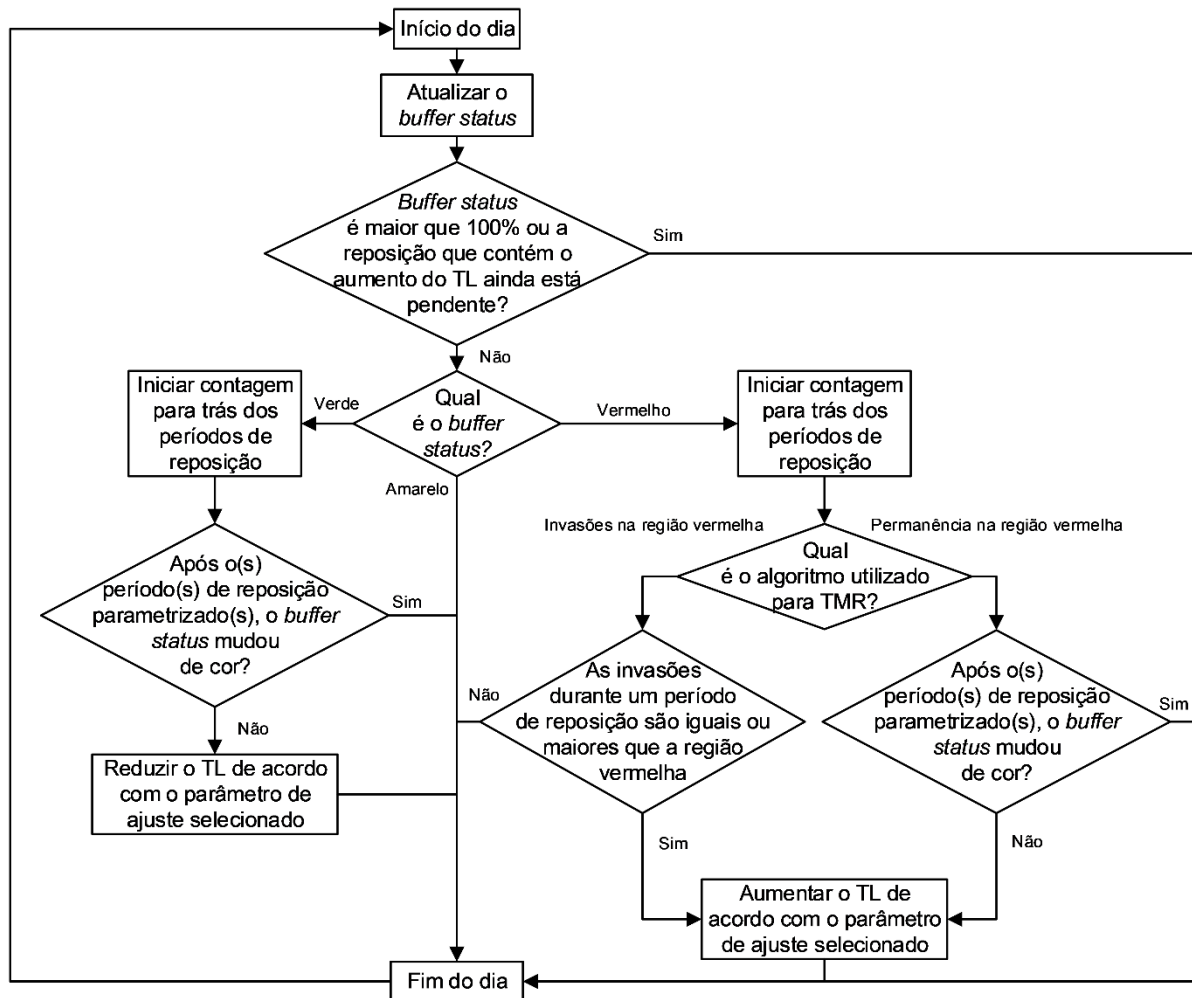
A atividade “Fabricar Produtos” presente na raia da fábrica da Figura 40 foi modelada de acordo com as etapas do processo de fabricação detalhadas no Capítulo 5 e apresentadas na Figura 24.

O DBM é executado no início de cada dia das simulações para realizar ajustes nos TLs do AF e do distribuidor sempre que for necessário. A Figura 41 mostra o fluxograma da rotina diária genérica do método DBM. As regras identificadas variam nos parâmetros de gatilho para registro de um *Too Much Green* (TMG) ou *Too Much Red* (TMR), parâmetros de ajuste do TL e nos algoritmos para reconhecimento de um TMR (contagem de invasões na região vermelha ou permanência na região vermelha). O DBM sempre executa a análise dos períodos de reposição do dia atual de simulação para trás, decidindo diariamente se o TL deve ou não ser ajustado.

6.2 CONSTRUÇÃO DO MODELO COMPUTACIONAL

O modelo computacional foi desenvolvido no *software AnyLogic® 8 University 8.8.1* e representa os processos e os relacionamentos entre os dois estágios da cadeia de suprimentos em questão, que foram evidenciados na Figura 40. Além disso, os fundamentos dos sistemas MTA (subcapítulo 2.2) e PRD (subcapítulo 2.3) foram emulados para a fábrica e para o relacionamento entre o distribuidor e o AF, respectivamente. Por fim, as lógicas presentes nas heurísticas do método DBM (subcapítulo 2.4) também foram implementadas, assim como as quatro medidas de desempenho apresentadas no subcapítulo 4.3: *fill rate ponderado (FRP)*, *estoque médio (EM)*, *Throughput-Value-Days (TVD)* e *Inventory-Value-Days (IVD)*.

Figura 41 - Rotina diária do método DBM



Fonte: Autor (2023).

A Figura 42 exibe parte do modelo computacional em uma corrida de simulação e a Figura 43 ilustra os gráficos implementados no *software* AnyLogic® que auxiliaram na verificação do modelo. Tais gráficos mostram, para o distribuidor e o AF, respectivamente, a atuação do DBM sobre os pulmões de estoque e as medidas de desempenho TVD e IVD para um determinado produto.

• • • • •

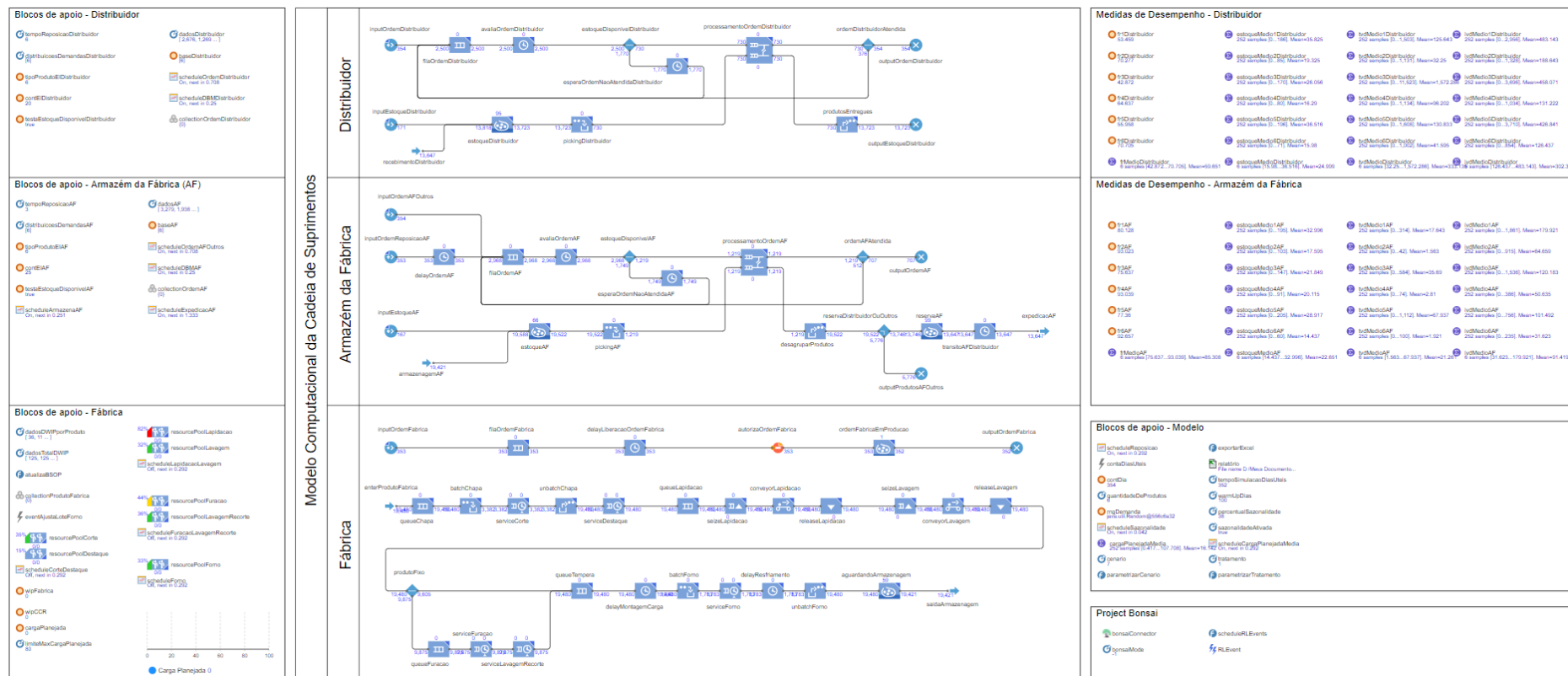
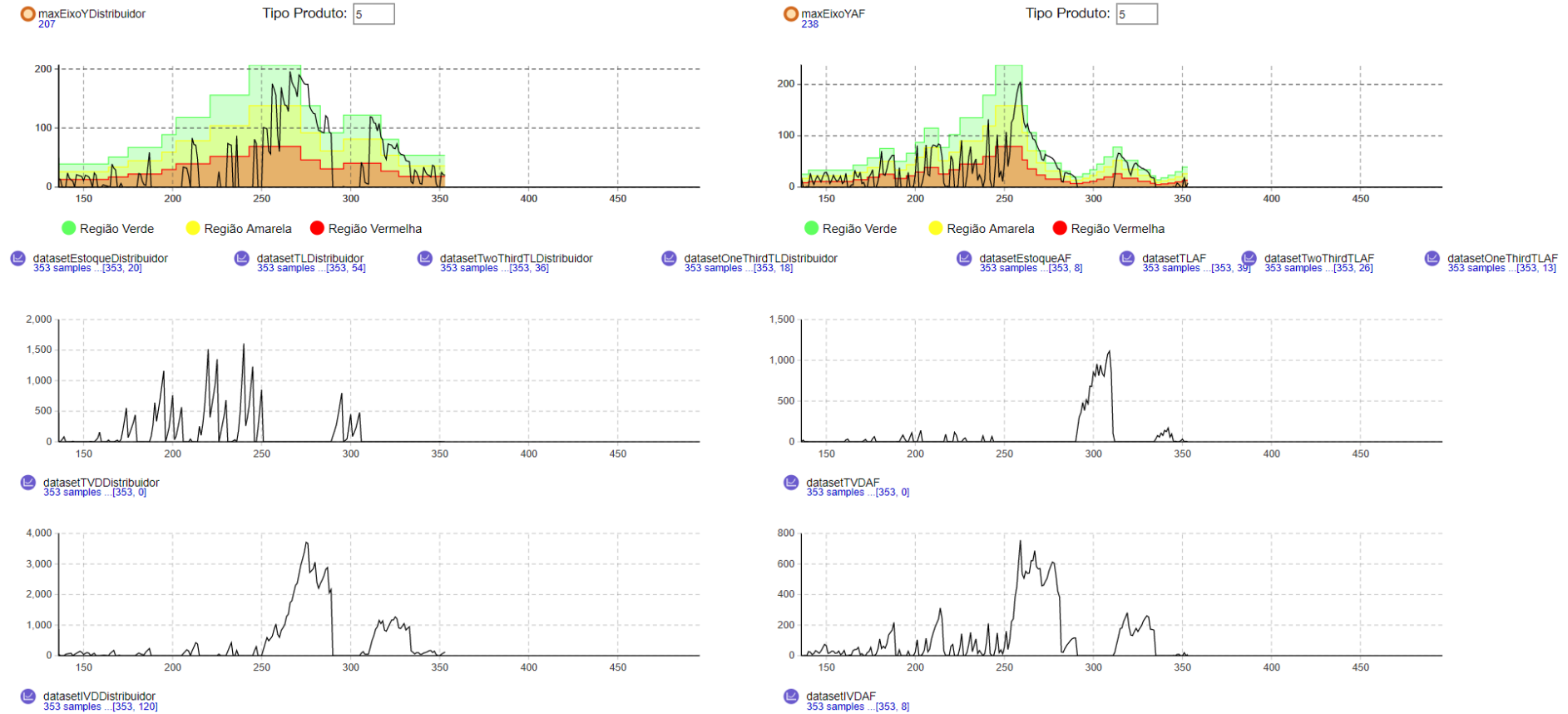


Figura 43 - Gráficos do DBM, TVD e IVD implementados no software AnyLogic



Fonte: Autor (2023).

6.3 VERIFICAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO COMPUTACIONAL

A verificação e a validação do modelo computacional, assim como a coleta de dados são passos da pesquisa experimental que acompanharam o início da construção do modelo conceitual até o fim da programação do modelo computacional no *software* AnyLogic®.

Assim, cada avanço do modelo computacional foi avaliado de modo a verificar se o seu comportamento apresentava concordância com os modelos conceituais representados nas Figuras 39 e 40, e se estava livre de erros de lógica e programação.

Por se tratar de um sistema de cadeia de suprimentos, adotou-se a implementação modular do modelo computacional, isto é, primeiro as atividades do distribuidor foram programadas e verificadas, em seguida, as atividades do AF e, por último, as atividades da fábrica. Além disso, gráficos, como os da Figura 43, uso de valores determinísticos em simulações de teste, impressões de textos para checagem de valores em determinados momentos da simulação no console do *software*, a visualização gradual das ocorrências dos eventos e a exportação de dados para conferência em planilhas foram fundamentais para a verificação do modelo.

A validação dos dados de entrada para as demandas do distribuidor e dos demais clientes do AF foi feita a partir de análises estatísticas dos dados coletados de relatórios do sistema de gestão empresarial do fabricante no período entre 01/01/2018 e 18/08/2021.

Para isso, o estudo foi delimitado pela principal família de produtos MTS da empresa, que é o box incolor para banheiros, composta por 23 produtos, sendo 12 fixos (peças sem furos) e 11 portas (peças com furos). É importante destacar que, dentro das classes fixo ou porta, os produtos se diferem apenas na largura.

Com a finalidade de simplificar a quantidade de produtos presentes no modelo, criaram-se três subclasses para cada classe de fixos e portas com base na classificação ABC. Assim, os 12 produtos da classe fixo foram agrupados em três subclasses, bem como os 11 produtos da classe porta, totalizando seis subclasses (Fixos A, B e C, e Portas A, B e C) que foram representadas como seis produtos no modelo computacional. O Quadro 7 mostra os resultados das classificações ABC.

Após o tratamento dos dados coletados pela classificação ABC, os testes de aderência a distribuições teóricas de probabilidade foram feitos por meio do *software* R com o uso dos pacotes “riskDistributions” e “fitdistrplus”.

Quadro 7 - Classificações ABC para os produtos das classes fixo e porta

Classe Fixo				
Produto	Valor individual (%)	Subclasse	Valor da subclasse (%)	Produtos na subclasse (%)
FI70	16.5%	Fixo A	46%	25.0%
FI75	16.0%			
FI60	13.2%			
FI65	12.7%	Fixo B	36%	33.3%
FI50	9.1%			
FI45	7.4%			
FI80	6.8%			
FI55	6.5%	Fixo C	18%	41.7%
FI40	4.0%			
FI85	3.6%			
FI90	2.5%			
FI100	1.8%			
Classe Porta				
Produto	Valor individual (%)	Subclasse	Valor da subclasse (%)	Produtos na subclasse (%)
PI75	18.1%	Porta A	46%	27.3%
PI70	15.6%			
PI65	11.9%			
PI80	10.7%	Porta B	30%	27.3%
PI60	10.1%			
PI50	9.5%			
PI55	7.5%	Porta C	24%	45.4%
PI45	6.3%			
PI85	5.4%			
PI90	3.2%			
PI40	1.7%			

Fonte: Autor (2023).

Ao todo, realizaram-se doze testes de aderência de Kolmogorov–Smirnov para os dados de demanda dos seis produtos do distribuidor e dos mesmos seis produtos para os demais clientes do AF. Os dados de todos os produtos se ajustaram a distribuições gama para um nível de significância de 5% (valores-p maiores que 0.050).

para todos os testes). Razmi, Baki e Sabbaghnia (2022) utilizaram a distribuição gama para modelar a demanda em um estudo sobre a dinâmica de pedidos em uma cadeia de suprimentos com três estágios, e Burgin (1975) desenvolveu uma pesquisa que justifica a aplicação da distribuição gama para os dados de demanda em problemas de controle de estoque. Assim, considerou-se adequado o uso da distribuição gama para a representação dos dados observados de demanda.

A Tabela 8 mostra um resumo dos ajustes dos dados, evidenciando os parâmetros α (forma) e β (escala) das distribuições gama para as demandas dos seis produtos e os respectivos valores-p dos testes de aderência de Kolmogorov–Smirnov para o distribuidor e o AF. Os parâmetros α e β são *inputs* necessários para a distribuição gama no *software* AnyLogic®, que dispõe de diversas distribuições de probabilidade teóricas.

Tabela 8 - Resumo dos ajustes dos dados de demanda para os seis produtos

Produto	Distribuição	Distribuidor			Demais clientes do AF		
		α	β	valor-p	α	β	valor-p
Fixo A	Gama	3.077949	1.133511	0.644	3.301491	0.517933	0.628
Fixo B	Gama	2.305990	0.597331	0.375	3.354015	0.628305	0.782
Fixo C	Gama	2.059011	1.092219	0.361	2.641376	1.007463	0.835
Porta A	Gama	2.097671	0.779493	0.853	3.771136	0.604237	0.549
Porta B	Gama	3.332412	1.131963	0.983	2.974060	0.697421	0.860
Porta C	Gama	2.045789	0.738424	0.588	2.878788	0.834279	0.670

Fonte: Autor (2023).

Os tempos de processamento das estações da fábrica foram coletados durante visitas à empresa e o processo de fabricação do vidro temperado apresentado na Figura 24 foi dividido entre os seguintes elementos: “serviceCorte”, “serviceDestaque”, “conveyorLapidacao”, “conveyorLavagem”, “serviceFuracao”, “serviceLavagemRecorte”, “delayMontagemCarga”, “serviceForno” e “delayResfriamento”.

Os elementos “conveyorLapidacao” e “conveyorLavagem” foram modelados como dois transportadores contínuos. Dessa forma, os seus tempos de processamento são determinísticos e dependem, exclusivamente, das velocidades parametrizadas para as esteiras e das velocidades dos robôs. Os tempos de processamento dos elementos “serviceForno” e “delayResfriamento” também são determinísticos, pois dependem da receita programada no forno para a têmpera dos

produtos. Segundo o coordenador de produção e manutenção da fábrica, os parâmetros das máquinas desses quatro elementos (“conveyorLapidacao”, “conveyorLavagem”, “serviceForno” e “delayResfriamento”) não sofrem alterações durante a rotina de trabalho e, portanto, seus tempos de processamento podem ser considerados constantes, conforme o Quadro 8.

Quadro 8 - Tempos de processamento, em segundos, de elementos com tempos determinísticos

conveyor Lapidacao	conveyor Lavagem	service Forno	delay Resfriamento
313	145	420	320

Fonte: Autor (2023).

Os elementos “serviceCorte”, “serviceDestaque”, “serviceFuracao”, “serviceLavagemRecorte” e “delayMontagemCarga” dependem da atuação dos operadores de produção ou das dimensões das peças. Sendo assim, seus tempos de processamento são estocásticos e eles foram modelados por meio de cinco distribuições de probabilidade. A Tabela 9 mostra 30 tomadas de tempo, em segundos, realizadas na fábrica, a média e o desvio padrão amostral, e o valor-p do teste de normalidade de Shapiro-Wilk, realizado no *software* R, para cada um dos cinco elementos. Vale destacar que nenhum teste foi significativo ao nível de 5% e, por isso, a distribuição dos tempos de processamento de cada elemento foi ajustada a uma distribuição normal.

O preço médio e o custo médio dos produtos são essenciais para o cálculo das medidas de desempenho TVD e IVD. De acordo com o diretor industrial da fábrica, tanto a fábrica, quanto os distribuidores adotam um índice de *markup* de, aproximadamente, 2,0. Assim, para simplificar o uso dessas medidas no modelo computacional, o preço médio e o custo médio de cada produto da fábrica foram considerados como \$2 e \$1, enquanto para o distribuidor foram considerados os valores \$3 e \$2, respectivamente.

Durante a última etapa de validação, a versão final do modelo computacional foi apresentada para o diretor industrial e o coordenador de produção e manutenção da fábrica. Eles avaliaram se os dados de saída do modelo estavam adequados com os resultados reais das unidades de análise e se as utilizações e os tempos de processamento dos recursos do modelo correspondiam às utilizações e os tempos de processamento dos recursos da fábrica. Por último, eles validaram que o CCR

identificado pelo modelo estava em conformidade com o processo mais restritivo do sistema real, que é a estação de lapidação.

Tabela 9 - Tomadas de tempo, em segundos, e testes de normalidade para os tempos de processamento

n	Elementos do processo de fabricação				
	service Corte	service Destaque	service Furacao	service Lavagem Recorte	delay Montagem Carga
1	114	16	99	80	19
2	123	15	96	79	28
3	125	13	97	79	26
4	107	13	103	80	29
5	121	16	100	83	23
6	120	22	97	82	19
7	104	18	98	76	31
8	106	19	102	79	29
9	106	19	100	80	29
10	113	15	97	79	37
11	111	16	93	80	25
12	100	14	97	83	42
13	127	21	99	82	42
14	102	16	99	80	22
15	122	16	98	81	29
16	114	22	100	87	27
17	124	14	101	79	32
18	127	17	97	85	23
19	115	19	97	78	36
20	122	17	100	77	39
21	111	13	97	84	35
22	111	16	95	81	24
23	126	20	98	80	29
24	142	17	101	82	20
25	114	12	96	81	26
26	105	19	100	78	30
27	120	21	94	80	32
28	123	17	102	75	18
29	132	14	97	79	33
30	139	21	95	79	24
$\bar{x}^a$	117.5333	16.9333	98.1667	80.2667	28.6000
s^b	10.5036	2.8640	2.4366	2.5316	6.5211
valor-p	0.456	0.212	0.626	0.291	0.451

^a $\bar{x}$ é a média amostral em segundos. ^bs é o desvio padrão amostral em segundos.

Fonte: Autor (2023).

7 DELINEAMENTO DE EXPERIMENTOS

Este capítulo evidencia o delineamento dos experimentos da presente pesquisa. Primeiro, os tratamentos são definidos e os cenários planejados são detalhados. Em seguida, os métodos para a determinação do período de aquecimento (*warm-up*), da quantidade de replicações e da duração das simulações são apresentados.

7.1 DEFINIÇÃO DOS TRATAMENTOS

Durante o desenvolvimento da fundamentação teórica sobre o Gerenciamento Dinâmico do Pulmão (*Dynamic Buffer Management* – DBM), foram identificadas cinco regras tradicionais na literatura que se diferem nos parâmetros de gatilho e de ajuste dos pulmões de estoque para *Too Much Green* (TMG) ou *Too Much Red* (TMR). O Quadro 3 do subcapítulo 2.4 sintetiza as cinco regras do DBM e traz a recomendação para a aplicação de cada regra, de acordo com o ambiente em questão, sendo uma aplicada exclusivamente em ambientes de produção (*Make to Availability* – MTA), três aplicadas exclusivamente em ambientes de distribuição (*Pull Replenishment and Distribution* – PRD) e uma que pode ser aplicada em ambos os ambientes.

Dessa forma, a quantidade de tratamentos desta pesquisa é resultado de um experimento fatorial completo, isto é, igual à combinação das duas regras recomendadas pela literatura para ambientes MTA com as quatro regras também recomendadas pela literatura para ambientes PRD, resultando em oito tratamentos distintos. Isso significa que, na simulação de cada tratamento, o distribuidor se relacionou com o armazém da fábrica (AF) em conformidade com os fundamentos do sistema PRD com uma das quatro regras do DBM sendo executada. Analogamente, a fábrica realizou as suas atividades de acordo com as lógicas do sistema MTA, executando uma das duas regras do DBM.

O Quadro 9 mostra a síntese dos tratamentos da pesquisa experimental. Vale lembrar que a codificação estabelecida para cada regra do DBM considera o parâmetro de gatilho para TMG (permanência na região verde durante um, dois ou três períodos completos de reposição), o parâmetro de gatilho para TMR (permanência na região vermelha durante um ou três períodos completos de reposição ou ter a soma das invasões na região vermelha durante um período de

reposição igual ou maior que a região vermelha), o parâmetro de ajuste para TMG (redução de 15% ou 33%) e, por último, o parâmetro de ajuste para TMR (aumento de 20% ou 33%).

Quadro 9 - Síntese dos tratamentos da pesquisa experimental

Tratamento	Códigos das regras do DBM	
	Distribuidor	Armazém da Fábrica
1	1-1-33-33	1-1-33-33
2	3-3-33-33	1-1-33-33
3	1-INV-33-33	1-1-33-33
4	2-INV-33-33	1-1-33-33
5	1-1-33-33	2-INV-15-20
6	3-3-33-33	2-INV-15-20
7	1-INV-33-33	2-INV-15-20
8	2-INV-33-33	2-INV-15-20

Fonte: Autor (2023).

7.2 PLANEJAMENTO DOS CENÁRIOS

A fim de avaliar a efetividade do método DBM, foram executadas rodadas de simulações dos oito tratamentos em sete cenários distintos (cenários A, B, C, D, E, F e G).

O cenário A foi planejado com base nos dados reais coletados do sistema de gestão empresarial do fabricante cujos parâmetros α e β das distribuições gama foram definidos na Tabela 8 do subcapítulo 6.3.

Os cenários restantes foram estabelecidos para avaliar o método DBM no distribuidor e no AF em casos teóricos com condições genéricas de interesse. Dessa forma, os sete cenários se diferem pelo nível de variabilidade da demanda, pelo nível de utilização média do recurso com restrição de capacidade (*Capacity Constrained Resource* – CCR) ou pelo comportamento da demanda, podendo esta possuir média constante durante todo o período simulado ou apresentar flutuações na média caracterizando-a como sazonal. Para tal propósito, novos parâmetros α e β foram definidos para as distribuições de demanda dos seis produtos do distribuidor, mantendo as mesmas proporções das médias das demandas do cenário A. Portanto, por mais que as demandas dos seis produtos sejam diferentes entre os cenários, as proporções entre as demandas dos produtos permaneceram inalteradas. Além disso,

vale dizer que os parâmetros α e β das distribuições gama das demandas dos demais clientes do AF permaneceram constantes em todos os cenários.

O cenário B foi planejado para apresentar demandas médias constantes com baixa variabilidade (coeficiente de variação de 0,5) (HOPP; SPEARMAN, 2011) para os seis produtos do distribuidor de forma que a utilização média do CCR da fábrica fosse de 80% durante o período simulado.

O cenário C é caracterizado por apresentar demandas médias constantes com alta variabilidade (coeficiente de variação de 1,5) (HOPP; SPEARMAN, 2011) para os seis produtos do distribuidor com utilização média do CCR da fábrica de 80% durante o tempo de simulação.

O cenário D possui características semelhantes às do cenário B, isto é, demandas médias constantes com baixa variabilidade (coeficiente de variação de 0,5) (HOPP; SPEARMAN, 2011) para os seis produtos do distribuidor, mas os parâmetros α e β foram definidos de forma que utilização média do CCR da fábrica fosse de 95% durante o período simulado.

Da mesma forma, o cenário E é caracterizado de forma semelhante ao cenário C, apresentando diferenças apenas para os parâmetros α e β , definidos para que a utilização média do CCR fosse de 95% durante o tempo de simulação.

Os cenários F e G foram planejados para apresentar flutuações nas médias das demandas em intervalos mensais caracterizando-as como sazonais. Dessa forma, as simulações nesses cenários iniciaram com as médias das demandas iguais às do cenário A, que sofreram seis aumentos consecutivos de 38% e seis reduções consecutivas de 27,53%, aproximadamente, de forma que as médias retornassem para seus valores iniciais. As flutuações das médias das demandas foram definidas para que a utilização média do CCR da fábrica fosse de 80% durante o período simulado. Isso significa que a utilização do CCR ficou abaixo de 80% nos períodos em que as médias das demandas foram parametrizadas com níveis baixos e acima de 80% nos períodos cujas médias das demandas flutuaram em níveis mais elevados. Tais cenários se diferenciam apenas em relação à variabilidade da demanda, sendo o cenário F caracterizado por apresentar baixa variabilidade (coeficiente de variação de 0,5) (HOPP; SPEARMAN, 2011) e o cenário G especificado pela alta variabilidade (coeficiente de variação de 1,5) (HOPP; SPEARMAN, 2011).

Os níveis-alvo (Target Levels – TLs) iniciais para cada Stock Keeping Unit (SKU) e em cada local foram calculados pela multiplicação da demanda média dentro do tempo de reposição por um fator de segurança de 2,0 (COX III et al., 2012; SCHRAGENHEIM E., 2010b; SOUZA; PIRES, 2010). O fator de segurança 2,0 foi escolhido em conformidade com a recomendação de Souza e Pires (2014) de que os TLs iniciais devem ser dimensionados de forma conservadora, permitindo poucas rupturas de estoque no início das implementações.

O Quadro 10 apresenta os parâmetros α e β das distribuições gama, a média, o desvio padrão e o coeficiente de variação para cada um dos seis produtos do distribuidor nos sete cenários simulados.

7.3 DETERMINAÇÃO DO PERÍODO DE WARM-UP

Em estudos de simulação, deve-se evitar o viés dos períodos iniciais das corridas de simulação e realizar a coleta de dados dos resultados apenas após a estabilização do modelo. O intervalo de tempo em que não são coletadas estatísticas do modelo é chamado de período de aquecimento ou tempo de *warm-up*. Assim, o período mínimo de *warm-up* foi determinado por meio da heurística *marginal standard error rule* (MSER) (IKEZIRI et al., 2023; WANG; GLYNN, 2016; LAW, 2015; ROBINSON, 2014; PASUPATHY; SCHMEISER, 2010).

O método MSER foi aplicado em todos os cenários para o tratamento 1, selecionado por conter a regra tradicional mais comum e citada do DBM aplicada no distribuidor e no armazém da fábrica, simultaneamente.

O somatório do estoque médio (EM) na cadeia de suprimentos, isto é, a soma entre os estoques do distribuidor e do armazém da fábrica, foi selecionado como medida de desempenho para análise de estabilização do modelo.

Para a aplicação do método MSER, foram executadas cinco replicações do tratamento 1 nos sete cenários por um tempo suficientemente longo (592 dias de trabalho). Durante esse tempo, os valores da MSER foram calculados diariamente para a medida de desempenho selecionada, exceto para os últimos cinco valores da série temporal, e o período de *warm-up* foi escolhido como o maior período de trabalho simulado que apresentou o menor valor da MSER entre os cenários.

Robinson (2014) alerta que, se o valor mínimo da MSER estiver na segunda metade da série temporal, deve-se rejeitar a conclusão sobre o período de *warm-up* e

novas simulações devem ser executadas por um tempo mais longo até que o período de *warm-up* encontrado esteja na primeira metade da série temporal.

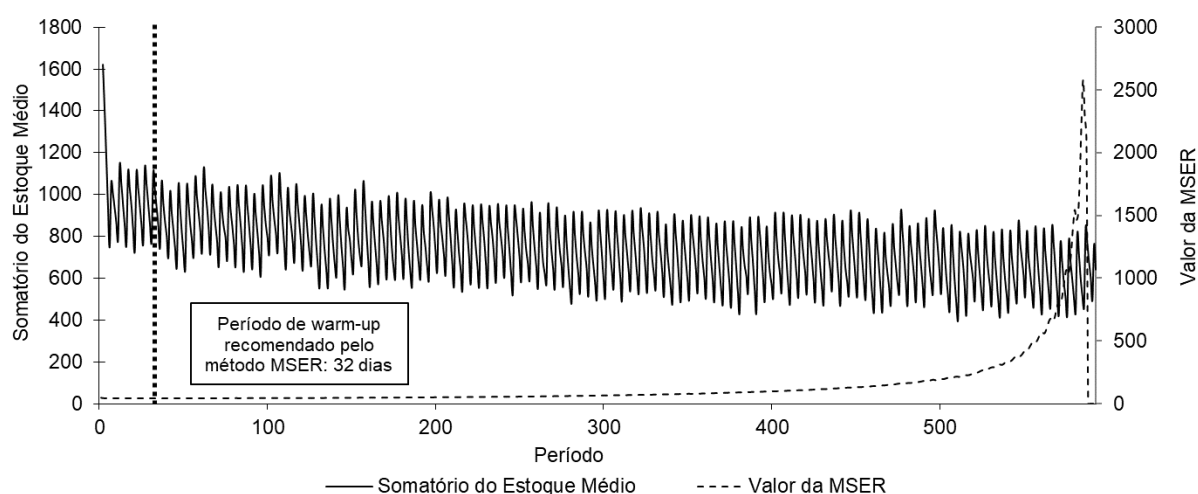
Quadro 10 - Parâmetros das demandas de cada produto no distribuidor

Cenário	Produto	alfa	beta	Média	Desvio padrão	Coefficiente de variação
A	Fixo A	3.077949	1.133511	3.49	1.99	0.57
	Fixo B	2.305990	0.597331	1.38	0.91	0.66
	Fixo C	2.059011	1.092219	2.25	1.57	0.70
	Porta A	2.097671	0.779493	1.64	1.13	0.69
	Porta B	3.332412	1.131963	3.77	2.07	0.55
	Porta C	2.045789	0.738424	1.51	1.06	0.70
B	Fixo A	4.000000	5.669445	22.68	11.34	0.50
	Fixo B	4.000000	2.238339	8.95	4.48	0.50
	Fixo C	4.000000	3.654448	14.62	7.31	0.50
	Porta A	4.000000	2.657070	10.63	5.31	0.50
	Porta B	4.000000	6.129772	24.52	12.26	0.50
	Porta C	4.000000	2.454822	9.82	4.91	0.50
C	Fixo A	0.444444	34.016668	15.12	22.68	1.50
	Fixo B	0.444444	13.430033	5.97	8.95	1.50
	Fixo C	0.444444	21.926687	9.75	14.62	1.50
	Porta A	0.444444	15.942419	7.09	10.63	1.50
	Porta B	0.444444	36.778629	16.35	24.52	1.50
	Porta C	0.444444	14.728932	6.55	9.82	1.50
D	Fixo A	4.000000	6.977778	27.91	13.96	0.50
	Fixo B	4.000000	2.754879	11.02	5.51	0.50
	Fixo C	4.000000	4.497782	17.99	9.00	0.50
	Porta A	4.000000	3.270240	13.08	6.54	0.50
	Porta B	4.000000	7.544334	30.18	15.09	0.50
	Porta C	4.000000	3.021319	12.09	6.04	0.50
E	Fixo A	0.444444	51.025002	22.68	34.02	1.50
	Fixo B	0.444444	20.145050	8.95	13.43	1.50
	Fixo C	0.444444	32.890030	14.62	21.93	1.50
	Porta A	0.444444	23.913628	10.63	15.94	1.50
	Porta B	0.444444	55.167944	24.52	36.78	1.50
	Porta C	0.444444	22.093398	9.82	14.73	1.50
F	Fixo A	4.000000	0.872222	3.49	1.74	0.50
	Fixo B	4.000000	0.344360	1.38	0.69	0.50
	Fixo C	4.000000	0.562223	2.25	1.12	0.50
	Porta A	4.000000	0.408780	1.64	0.82	0.50
	Porta B	4.000000	0.943042	3.77	1.89	0.50
	Porta C	4.000000	0.377665	1.51	0.76	0.50
G	Fixo A	0.444444	7.850008	3.49	5.23	1.50
	Fixo B	0.444444	3.099242	1.38	2.07	1.50
	Fixo C	0.444444	5.060010	2.25	3.37	1.50
	Porta A	0.444444	3.679023	1.64	2.45	1.50
	Porta B	0.444444	8.487384	3.77	5.66	1.50
	Porta C	0.444444	3.398988	1.51	2.27	1.50

Fonte: Autor (2023).

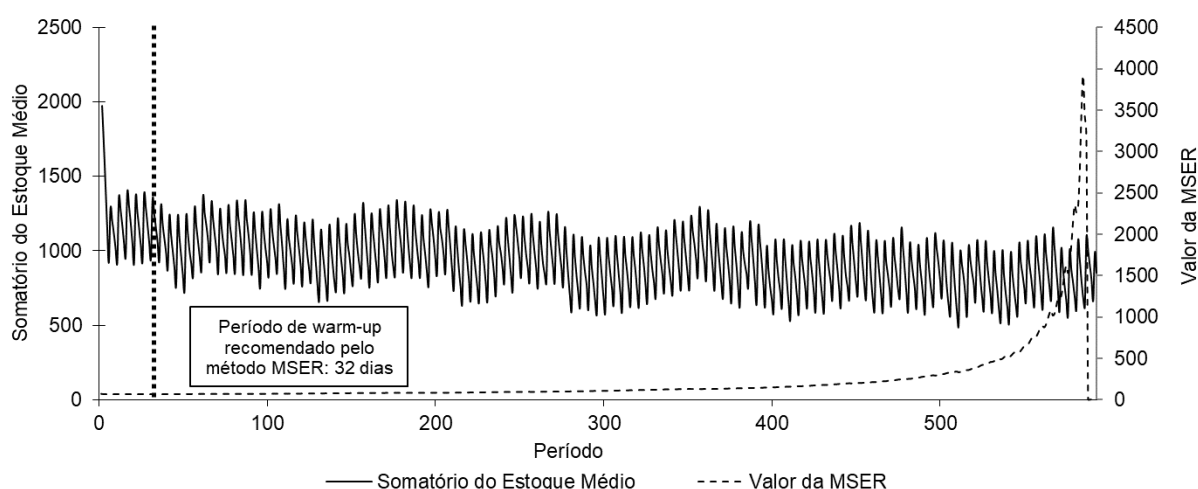
As Figuras 44 e 45 mostram os gráficos das aplicações do método MSER para os cenários B e D, pois estes foram os cenários que levaram mais tempo para apresentar o menor valor de MSER (ambos com 32 dias). As retas verticais pontilhadas das figuras indicam os períodos que resultaram nos menores valores da MSER. Logo, 32 dias de *warm-up* seriam suficientes para a execução dos experimentos nos sete cenários. No entanto, o período de *warm-up* de 100 dias foi estabelecido, visando uma garantia maior de que a coleta de dados da pesquisa ocorresse apenas em estado estacionário.

Figura 44 - Determinação do período mínimo de warm-up para o cenário B



Fonte: Autor (2023).

Figura 45 - Determinação do período mínimo de warm-up para o cenário D



Fonte: Autor (2023).

O Apêndice B apresenta os gráficos das aplicações do método MSER para os cenários A, C, E, F e G.

7.4 DETERMINAÇÃO DO NÚMERO DE REPLICAÇÕES

Os dados de entrada do modelo (demandas), por serem aleatórios e gerados a partir de distribuições de probabilidade, fazem com que os dados de saída de cada replicação também sejam aleatórios. Por consequência, apenas uma corrida de simulação não é suficiente para estimar os desempenhos dos tratamentos, sendo necessárias múltiplas replicações para obter uma melhor estimativa de suas performances (LAW, 2015; BANKS et al., 2014; ROBINSON, 2014).

O método do intervalo de confiança pode ser utilizado para definir o número mínimo de replicações, pois ele fornece uma medida de precisão, além de permitir a inspeção gráfica da média acumulada (LAW, 2015; BANKS et al., 2014; ROBINSON, 2014). Para aplicá-lo, foram executadas 100 replicações preliminares do tratamento 1 nos sete cenários e foram construídos os intervalos de 95% de confiança para as médias acumuladas das seguintes medidas de desempenho: “*fill rate* ponderado (distribuidor)”, “estoque médio (distribuidor)”, “*fill rate* ponderado (AF)”, “estoque médio (AF)”, “média do *fill rate* ponderado” e “somatório do estoque médio”. O número mínimo de replicações é selecionado pela medida de desempenho que precisa da maior quantidade de replicações para que o intervalo alcance e permaneça abaixo do nível de desvio desejado (5% nesta pesquisa) em um determinado cenário.

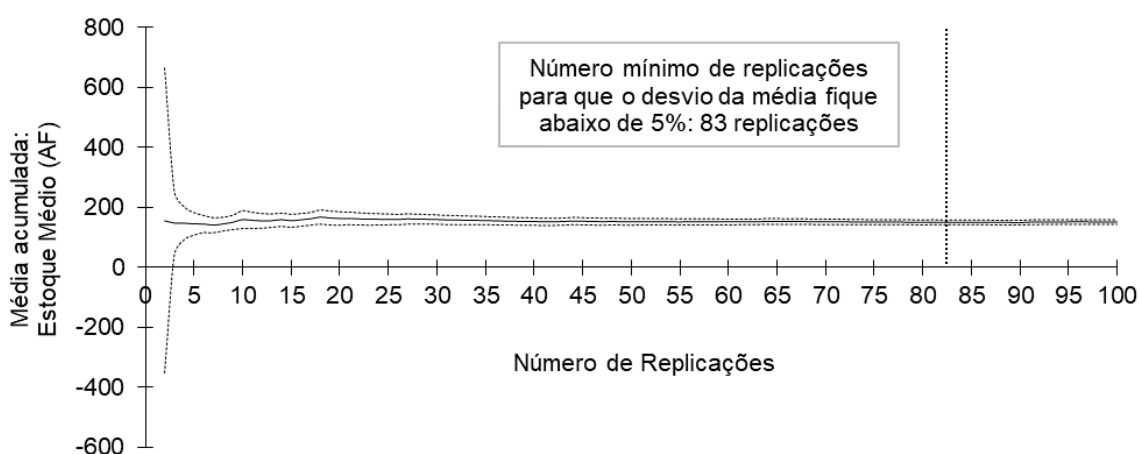
A Figura 46 mostra o gráfico da aplicação do método do intervalo de confiança para a medida de desempenho “estoque médio (AF)” para o cenário G, pois ela precisou da maior quantidade de replicações (a reta vertical pontilhada indica que 83 é o número mínimo de replicações) para que o desvio da média ficasse abaixo de 5%. Entretanto, para garantir a acuracidade dos resultados, as rodadas de simulações de todos os tratamentos em todos os cenários foram executadas com 200 replicações.

O Apêndice C mostra os gráficos gerados a partir dos intervalos de 95% de confiança para as medidas de desempenho mencionadas anteriormente dos sete cenários.

Por fim, vale dizer que cada replicação utilizou a mesma sequência de sementes geradoras de números aleatórios para as demandas do distribuidor. Isso

significa que os oito tratamentos receberam a mesma quantidade de demanda para uma mesma replicação e as amostras de cada tratamento em um determinado cenário podem ser classificadas como dependentes ou pareadas (IKEZIRI et al., 2023; LAW, 2015; BANKS et al., 2014; ROBINSON, 2014).

Figura 46 - Determinação do número mínimo de replicações, de acordo com a medida estoque médio (AF), para o cenário G



Fonte: Autor (2023).

7.5 DETERMINAÇÃO DO TEMPO DE DURAÇÃO DAS SIMULAÇÕES

Como o período de *warm-up* e o número de replicações foram superestimados de modo a oferecer uma margem de segurança para a coleta dos dados de saída, determinou-se que cada execução das simulações teria a duração de um ano em dias úteis, isto é, 252 dias. Portanto, considerando o período de *warm-up*, cada corrida de simulação teve 352 dias de trabalho de duração.

A escolha por este tempo de duração também se justifica para que os cenários F e G, que possuem demandas com comportamentos sazonais, pudessem ser simulados durante um ciclo completo de aumentos e reduções de suas médias, de acordo com as características planejadas no subcapítulo 7.2.

8 RESULTADOS

Este capítulo tem o propósito de apresentar os resultados das rodadas de simulação que foram planejadas no Capítulo 7. Primeiramente, algumas informações sobre as execuções dos experimentos e o procedimento para as análises dos resultados são comentadas. Depois, para cada cenário, são apresentadas algumas medidas descritivas e os resultados dos testes estatísticos realizados. Por fim, dois novos tratamentos, que integraram modelos de inteligência artificial (IA) baseados em aprendizado por reforço (*reinforcement learning* – RL) ao método Gerenciamento Dinâmico do Pulmão (Dynamic Buffer Management – DBM), foram propostos em dois cenários (um novo tratamento para cada cenário), demandando novas rodadas de simulações seguidas de novas análises estatísticas.

8.1 EXECUÇÃO DOS EXPERIMENTOS E O PROCEDIMENTO PARA AS ANÁLISES DOS RESULTADOS

Ao todo, foram realizadas 11.200 simulações (8 tratamentos em 7 cenários com rodadas de 200 replicações). Os tempos das rodadas variaram conforme o cenário simulado, sendo que cenários com baixa utilização média do recurso com restrição de capacidade (*Capacity Constrained Resource* – CCR) levaram entre 10 e 15 minutos para serem replicados 200 vezes, enquanto que os cenários que apresentaram níveis mais elevados de utilização média do CCR levaram de 40 a 55 minutos para serem replicados 200 vezes.

O tempo total para a execução dos experimentos no *software* AnyLogic® 8.8.1 (versão *University Researcher*) foi de, aproximadamente, 33 horas. Os experimentos foram executados em um *notebook* com processador Intel Core i7-9750H com 16GB de memória RAM.

Após a coleta de todos os dados de saída, para cada cenário, primeiramente, foi desenvolvida uma tabela com a média ($\bar{x}$), mediana (md) e desvio padrão (s) de cada tratamento para cada medida de desempenho de forma individual (Distribuidor ou Armazém da Fábrica [AF]) e considerando o desempenho dos dois estágios da cadeia de suprimentos, simultaneamente.

Depois, no *software* R, foram aplicados testes de normalidade de Shapiro-Wilk e testes de homogeneidade de variâncias de Levene para definir se as análises subsequentes seriam baseadas em testes paramétricos ou não-paramétricos.

Como, para todos os cenários e medidas de desempenho, ao menos um tratamento foi significativo para o teste de normalidade de Shapiro-Wilk ou os testes de homogeneidade de variâncias foram significantes (valores-p menores que 0.050), optou-se por utilizar um teste não-paramétrico para medidas repetidas, visto que as amostras obtidas das execuções dos experimentos são dependentes (foi utilizada a mesma sequência de sementes geradoras de números aleatórios para as demandas do distribuidor nas replicações de todos os tratamentos). As Tabelas 11, 14, 17, 20, 23, 26 e 29 mostram os valores-p dos testes de normalidade e de homogeneidade de variâncias realizados para todos os cenários. Vale dizer que as tabelas foram inseridas nos subcapítulos correspondentes aos resultados de cada cenário para manter a organização da estrutura deste trabalho, mas elas não são mencionadas novamente para evitar repetições no texto.

O teste de Friedman foi utilizado em todas as análises seguido de testes post-hoc de Nemenyi com correção de Bonferroni para a comparação entre pares de tratamentos (RIBEIRO et al., 2021; DEMŠAR, 2006; NEMENYI, 1963). Esses testes são indicados quando as suposições de normalidade dos dados e de homogeneidade de variâncias entre os tratamentos não são atendidas, além de serem menos suscetíveis a valores atípicos (*outliers*) (XU et al., 2019). O pacote “PMCMRplus” do *software* R foi utilizado para conduzir esses testes.

As Tabelas 12, 15, 18, 21, 24, 27 e 30 mostram os valores-p dos testes de Friedman realizados em todos os cenários, sendo todos significativos para um nível de significância de 5%. Da mesma forma que as tabelas dos testes de normalidade e homogeneidade de variâncias, as tabelas dos testes de Friedman foram inseridas nos subcapítulos correspondentes aos resultados de cada cenário para manter a organização do trabalho, mas elas não são mencionadas novamente para evitar repetições no texto.

Por fim, os resultados dos testes post-hoc são apresentados em gráficos *boxplots*, que evidenciam as diferenças significativas entre os tratamentos por meio de letras distintas localizadas acima do terceiro quartil de cada caixa do diagrama. Vale ressaltar que tratamentos com os maiores valores para uma determinada medida de desempenho recebem a letra “a” e os demais tratamentos com valores inferiores

recebem letras subsequentes do alfabeto, de acordo com as diferenças estatísticas significantes identificadas.

O Apêndice D traz os valores-p dos testes post-hoc de Nemenyi de cada par de tratamentos para cada medida de desempenho de forma individual (Distribuidor ou AF) ou considerando o desempenho dos dois estágios da cadeia de suprimentos, simultaneamente, em todos os cenários. O Apêndice E mostra os diagramas de diferenças críticas (ou distâncias críticas) que estabelecem as classificações dos tratamentos para cada medida de desempenho com base nas diferenças significativas observadas pelo teste de Nemenyi (KOURENTZES, 2013; DEMŠAR, 2006). Esses diagramas reordenam os tratamentos, de acordo com suas classificações médias para as medidas de desempenho, e conectam os tratamentos que não apresentam diferenças significativas.

Portanto, os Apêndices D e E foram fundamentais para a elaboração dos gráficos *boxplots* com o ranqueamento dos tratamentos apresentados nos subcapítulos a seguir.

8.2 RESULTADOS E ANÁLISES ESTATÍSTICAS POR CENÁRIO

Em virtude das quantidades de cenários (7), tratamentos (8), medidas de desempenho (4) e perspectivas de análise de desempenho da cadeia de suprimentos estudada (3, sendo a análise individual do distribuidor, a análise individual do AF e a análise simultânea dos dois estágios da cadeia de suprimentos), as discussões sobre as análises estatísticas dos resultados foram feitas, principalmente, à luz do distribuidor para as medidas *fill rate* ponderado (FRP) e *Throughput-Value-Days* (TVD) médio com eventuais considerações para o desempenho do AF. Já para as medidas estoque médio (EM) e *Inventory-Value-Days* (IVD) médio, as discussões das análises estatísticas foram feitas com ênfase sobre o desempenho conjunto dos dois estágios da cadeia de suprimentos. Esta delimitação se justifica, pois, de acordo com Goldratt e Goldratt (2003), as transações internas de estoque na cadeia de suprimentos não podem ser consideradas como vendas, dado que, enquanto o cliente final não comprar, nenhum estágio da cadeia de suprimentos realiza, de fato, uma venda. Dessa forma, análises distorcidas de desempenho puderam ser evitadas, por exemplo, para o caso de o distribuidor enfrentar diversas rupturas de estoque, ao passo que o AF atende, com elevado nível de serviço, as necessidades do distribuidor.

Apesar do delineamento feito sobre as discussões das análises estatísticas, todas as medidas de desempenho coletadas das simulações são apresentadas neste trabalho. No entanto, por não fazerem parte do enfoque das discussões realizadas neste capítulo, os *boxplots* de todos os cenários das medidas EM e IVD Médio, separados por estágio da cadeia de suprimentos, foram inseridos no Apêndice F para eventuais consultas.

8.2.1 Resultados e análises estatísticas do cenário A

O cenário A é caracterizado por apresentar distribuições de demandas baseadas nos dados reais coletados das empresas. Em relação às medidas relacionadas a nível de serviço (FRP do distribuidor) e eficácia da cadeia de suprimentos (TVD Médio do distribuidor), observou-se, por meio da Tabela 10, que as médias e as medianas ficaram próximas do nível ótimo (100% para FRP e zero para TVD Médio) e próximas entre todos os tratamentos. No entanto, para as medidas relacionadas a estoque (somatório do EM) e eficiência (somatório do IVD Médio) da cadeia de suprimentos, verificou-se que houve um distanciamento entre os desempenhos dos tratamentos.

Por mais que os testes estatísticos de Friedman e de Nemenyi tenham identificado diferenças significativas para as medidas FRP (distribuidor) e TVD Médio (distribuidor) entre alguns tratamentos (ver Figuras 47 e 48), essas diferenças não apresentam significância prática, dado que todas as médias e medianas de FRP ficaram próximas ou acima de 99% e as médias e medianas de TVD Médio se aproximaram de zero. Por outro lado, a Figura 49 mostra que as medidas somatório do EM e somatório do IVD Médio apresentaram diferenças significantes entre alguns tratamentos que podem impactar em estoques maiores ou menores para as cadeias de suprimentos, dependendo das regras do DBM parametrizadas. Por exemplo, o tratamento 4, de acordo com a Figura 47, apresenta o maior FRP (distribuidor), junto com o tratamento 8, mas proporciona EM e IVD Médio relativamente menores para a cadeia de suprimentos. Além disso, o tratamento 1 foi capaz de manter um elevado nível de serviço (média de 98,9% e mediana de 99%) com os menores níveis de EM e IVD Médio da cadeia de suprimentos.

Tabela 10 - Resumo dos resultados do cenário A

		Tratamento							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Fill Rate Ponderado (Distribuidor)	$\bar{x}$	98.9	99.9	99.8	100.0	98.9	99.9	99.8	100.0
	md	99.0	100.0	99.9	100.0	99.0	100.0	99.9	100.0
	s	0.9	0.1	0.1	0.0	0.9	0.1	0.1	0.0
Fill Rate Ponderado (AF)	$\bar{x}$	99.8	99.9	99.5	99.7	100.0	100.0	99.9	100.0
	md	99.8	99.9	99.5	99.8	100.0	100.0	100.0	100.0
	s	0.1	0.1	0.3	0.2	0.0	0.0	0.1	0.0
TVD Médio (Distribuidor)	$\bar{x}$	0.9	0.0	0.1	0.0	0.9	0.0	0.1	0.0
	md	0.7	0.0	0.1	0.0	0.7	0.0	0.1	0.0
	s	0.8	0.0	0.1	0.0	0.8	0.0	0.1	0.0
TVD Médio (AF)	$\bar{x}$	0.2	0.1	0.5	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0
	md	0.1	0.1	0.4	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0
	s	0.2	0.1	0.6	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0
Estoque Médio (Distribuidor)	$\bar{x}$	89.4	102.9	114.5	128.9	89.3	102.9	114.5	128.8
	md	89.7	102.9	114.6	128.0	89.7	102.9	114.6	128.0
	s	9.7	1.0	4.3	6.5	9.7	1.0	4.3	6.5
Estoque Médio (AF)	$\bar{x}$	69.5	69.9	68.1	69.4	92.3	93.1	93.1	94.0
	md	69.4	69.8	67.9	69.4	92.8	93.4	93.3	94.3
	s	2.9	2.8	2.9	2.8	4.4	3.9	3.9	3.8
IVD Médio (Distribuidor)	$\bar{x}$	668.6	813.3	1002.8	1221.0	668.5	813.4	1002.4	1220.0
	md	671.8	811.4	1002.3	1210.6	671.8	811.9	1001.9	1208.4
	s	104.7	21.5	62.0	110.3	104.9	21.5	61.1	110.7
IVD Médio (AF)	$\bar{x}$	123.5	124.1	122.8	123.9	190.1	192.1	196.5	196.1
	md	122.8	123.8	122.0	123.8	191.8	192.5	196.4	196.8
	s	7.7	7.3	7.5	7.3	14.1	12.8	13.0	12.7
Média do Fill Rate Ponderado	$\bar{x}$	99.4	99.9	99.7	99.9	99.4	100.0	99.9	100.0
	md	99.4	99.9	99.7	99.9	99.5	100.0	99.9	100.0
	s	0.4	0.1	0.2	0.1	0.4	0.0	0.1	0.0
Somatório do TVD Médio	$\bar{x}$	1.1	0.2	0.7	0.3	0.9	0.0	0.2	0.0
	md	0.9	0.1	0.5	0.2	0.7	0.0	0.1	0.0
	s	0.9	0.1	0.6	0.3	0.8	0.0	0.2	0.1
Somatório do Estoque Médio	$\bar{x}$	158.9	172.8	182.5	198.3	181.7	196.0	207.6	222.8
	md	159.1	172.8	182.0	197.9	182.6	196.3	207.2	221.9
	s	10.1	2.8	5.6	7.3	11.5	3.9	6.2	8.1
Somatório do IVD Médio	$\bar{x}$	792.1	937.4	1125.6	1345.0	858.6	1005.5	1198.9	1416.1
	md	792.1	937.4	1122.3	1331.3	866.1	1004.5	1196.6	1402.1
	s	104.8	21.8	63.0	111.2	108.9	24.5	63.6	113.2

$\bar{x}$ é a média. md é a mediana. s é o desvio padrão.

Fonte: Autor (2023).

Tabela 11 - Testes de normalidade e homogeneidade de variâncias para os tratamentos no cenário A

	Teste de Shapiro-Wilk por tratamento								Teste de Levene
	1	2	3	4	5	6	7	8	
Fill Rate Ponderado - Distribuidor	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*
Fill Rate Ponderado - AF	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*
TVD Médio - Distribuidor	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*
TVD Médio - AF	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*
Estoque Médio - Distribuidor	<0.001*	0.470	0.259	0.002*	<0.001*	0.480	0.165	0.001*	<0.001*
Estoque Médio - AF	0.351	0.446	0.024*	0.989	0.153	0.026*	0.554	0.023*	<0.001*
IVD Médio - Distribuidor	<0.001*	0.124	0.264	0.001*	<0.001*	0.127	0.090	<0.001*	<0.001*
IVD Médio - AF	0.053	0.304	0.099	0.985	0.369	0.138	0.611	0.168	<0.001*
Média do Fill Rate Ponderado	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*
Somatório do TVD Médio	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*
Somatório do Estoque Médio	0.058	0.394	0.293	0.005*	0.019*	0.151	0.784	0.302	<0.001*
Somatório do IVD Médio	<0.001*	0.038*	0.385	0.001*	0.001*	0.901	0.235	0.001*	<0.001*

*Estatisticamente significativa ao nível de 5%

Fonte: Autor (2023).

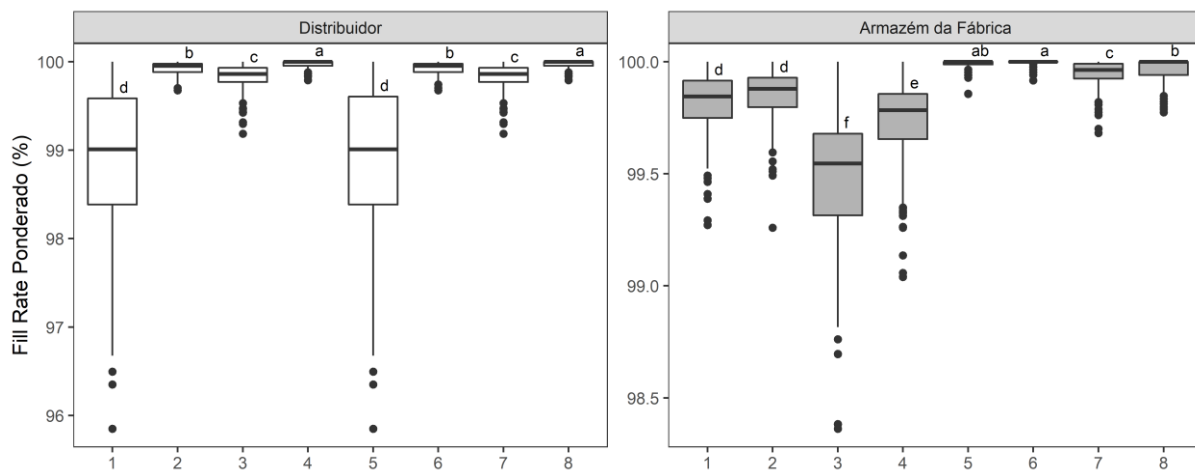
Tabela 12 - Testes de Friedman para o cenário A

	Fill Rate Ponderado	TVD Médio	Estoque Médio	IVD Médio
Distribuidor	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*
Armazém da Fábrica	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*
	Média do Fill Rate Ponderado	Somatório do TVD Médio	Somatório do Estoque Médio	Somatório do IVD Médio
Dois estágios da Cadeia de Suprimentos	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*

*Estatisticamente significativa ao nível de 5%

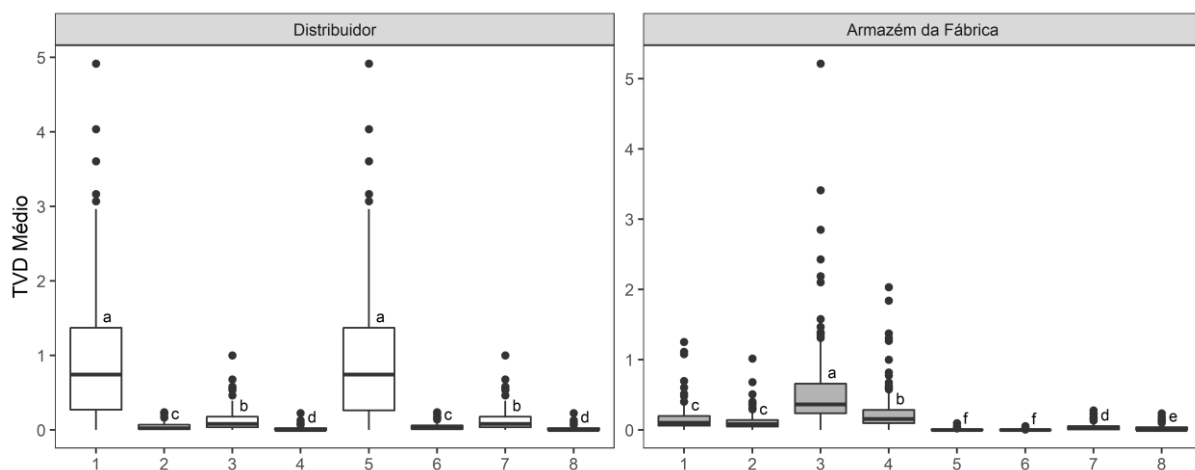
Fonte: Autor (2023).

Figura 47 - Desempenho do distribuidor e do AF para FRP no cenário A



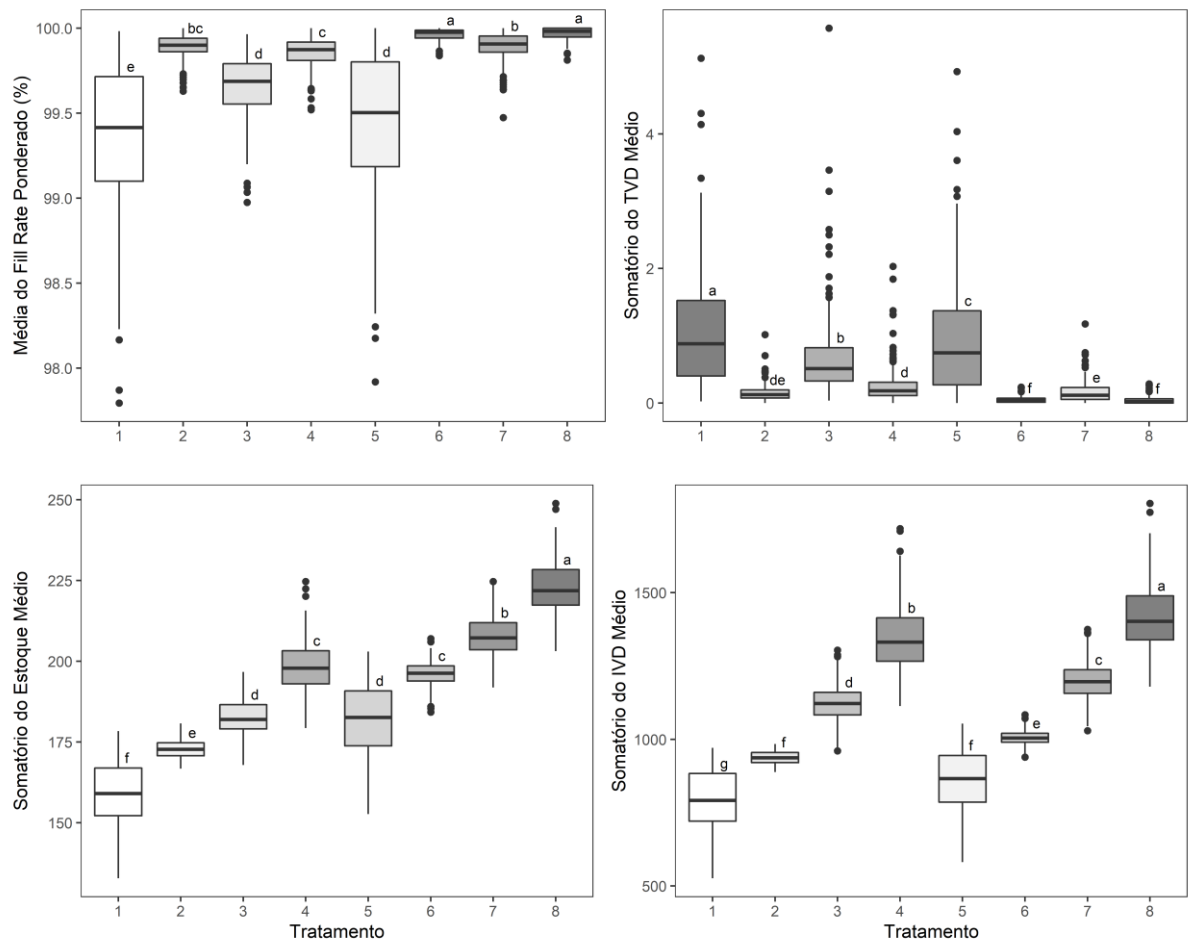
Fonte: Autor (2023).

Figura 48 - Desempenho do distribuidor e do AF para TVD Médio no cenário A



Fonte: Autor (2023).

Figura 49 - Desempenho dos dois estágios da cadeia de suprimentos no cenário A



Fonte: Autor (2023).

8.2.2 Resultados e análises estatísticas do cenário B

O cenário B foi planejado para apresentar demandas médias constantes com baixa variabilidade de forma que a utilização média do CCR da fábrica fosse de 80% durante o período simulado.

De modo semelhante ao cenário A, a Tabela 13 mostra que as médias e medianas das medidas FRP (distribuidor) e TVD Médio (distribuidor) também se aproximaram do nível ótimo (100% para FRP e zero para TVD Médio). Além disso, também houve um distanciamento entre as médias e medianas do somatório do EM e somatório do IVD Médio entre alguns tratamentos, sendo os extremos representados pelos tratamentos 1 e 8.

Tabela 13 - Resumo dos resultados do cenário B

		Tratamento							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Fill Rate Ponderado (Distribuidor)	$\bar{x}$	99.2	100.0	99.9	100.0	99.3	100.0	99.9	100.0
	md	99.3	100.0	99.9	100.0	99.4	100.0	99.9	100.0
	s	0.5	0.0	0.2	0.0	0.5	0.0	0.1	0.0
Fill Rate Ponderado (AF)	$\bar{x}$	99.3	99.5	98.2	99.3	100.0	100.0	99.6	99.9
	md	99.4	99.5	98.3	99.4	100.0	100.0	99.7	100.0
	s	0.4	0.3	0.9	0.5	0.1	0.0	0.3	0.1
TVD Médio (Distribuidor)	$\bar{x}$	3.2	0.0	0.5	0.0	3.0	0.0	0.3	0.0
	md	2.3	0.0	0.2	0.0	2.3	0.0	0.2	0.0
	s	3.5	0.1	1.3	0.3	2.8	0.1	0.5	0.1
TVD Médio (AF)	$\bar{x}$	2.6	1.5	9.6	3.0	0.1	0.1	1.1	0.3
	md	1.8	1.3	6.3	1.8	0.0	0.0	0.9	0.1
	s	2.9	1.1	12.5	5.0	0.2	0.1	0.8	0.5
Estoque Médio (Distribuidor)	$\bar{x}$	497.6	720.4	645.2	721.9	496.3	720.7	645.3	721.4
	md	491.9	720.9	642.8	721.2	489.4	721.3	642.3	721.3
	s	66.3	7.2	28.3	17.4	65.5	7.2	28.7	16.4
Estoque Médio (AF)	$\bar{x}$	231.1	232.3	232.8	232.1	304.2	308.6	321.2	310.2
	md	230.6	232.3	233.0	231.9	304.1	307.3	321.1	308.4
	s	8.7	7.8	8.1	8.0	12.0	12.0	13.5	12.5
IVD Médio (Distribuidor)	$\bar{x}$	3877.4	6686.8	5661.2	6752.4	3860.6	6692.8	5656.2	6740.5
	md	3799.8	6691.8	5642.8	6709.4	3785.5	6695.1	5644.6	6704.6
	s	832.2	181.5	414.1	331.8	824.3	181.9	421.1	314.3
IVD Médio (AF)	$\bar{x}$	436.7	433.2	457.8	435.3	649.2	652.5	728.1	662.1
	md	434.1	433.7	456.2	433.3	645.9	647.4	727.6	655.4
	s	23.1	21.5	26.9	22.6	40.9	41.2	55.3	45.2
Média do Fill Rate Ponderado	$\bar{x}$	99.3	99.7	99.1	99.6	99.6	100.0	99.8	99.9
	md	99.3	99.8	99.1	99.7	99.7	100.0	99.8	100.0
	s	0.4	0.1	0.5	0.3	0.3	0.0	0.2	0.1
Somatório do TVD Médio	$\bar{x}$	5.8	1.5	10.1	3.0	3.1	0.1	1.4	0.3
	md	4.4	1.3	6.4	1.8	2.3	0.0	1.2	0.1
	s	5.2	1.1	13.5	5.2	3.0	0.1	1.1	0.5
Somatório do Estoque Médio	$\bar{x}$	728.8	952.7	878.0	953.9	800.5	1029.4	966.6	1031.6
	md	726.3	953.0	877.3	952.3	794.5	1027.6	963.1	1030.2
	s	66.9	9.9	30.9	19.0	69.1	12.9	31.2	22.0
Somatório do IVD Médio	$\bar{x}$	4314.1	7120.0	6119.0	7187.7	4509.8	7345.3	6384.3	7402.6
	md	4260.5	7129.6	6104.6	7143.9	4429.7	7342.4	6363.0	7356.4
	s	832.3	180.0	416.8	332.8	834.3	184.5	422.7	327.4

$\bar{x}$ é a média. md é a mediana. s é o desvio padrão.

Fonte: Autor (2023).

Tabela 14 - Testes de normalidade e homogeneidade de variâncias para os tratamentos no cenário B

	Teste de Shapiro-Wilk por tratamento								Teste de Levene
	1	2	3	4	5	6	7	8	
Fill Rate Ponderado - Distribuidor	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*
Fill Rate Ponderado - AF	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*
TVD Médio - Distribuidor	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*
TVD Médio - AF	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*
Estoque Médio - Distribuidor	0.006*	<0.001*	0.231	<0.001*	0.003*	<0.001*	0.154	<0.001*	<0.001*
Estoque Médio - AF	0.163	0.849	0.490	0.905	0.569	0.153	0.663	0.293	<0.001*
IVD Médio - Distribuidor	0.005*	0.895	0.301	<0.001*	0.002*	0.890	0.101	<0.001*	<0.001*
IVD Médio - AF	0.028*	0.775	<0.001*	0.116	0.330	0.079	0.173	0.102	<0.001*
Média do Fill Rate Ponderado	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*
Somatório do TVD Médio	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*
Somatório do Estoque Médio	0.008*	<0.001*	0.142	<0.001*	0.001*	0.005*	0.005*	0.015*	<0.001*
Somatório do IVD Médio	0.006*	0.958	0.302	<0.001*	0.002*	0.896	0.057	<0.001*	<0.001*

*Estatisticamente significativo ao nível de 5%

Fonte: Autor (2023).

Tabela 15 - Testes de Friedman para o cenário B

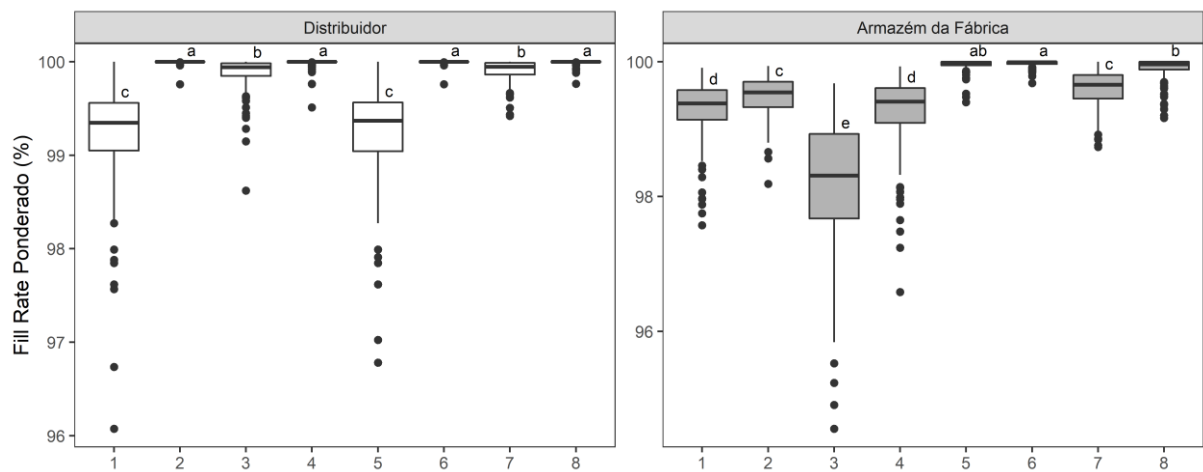
	Fill Rate Ponderado	TVD Médio	Estoque Médio	IVD Médio
Distribuidor	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*
Armazém da Fábrica	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*
	Média do Fill Rate Ponderado	Somatório do TVD Médio	Somatório do Estoque Médio	Somatório do IVD Médio
Dois estágios da Cadeia de Suprimentos	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*

*Estatisticamente significativo ao nível de 5%

Fonte: Autor (2023).

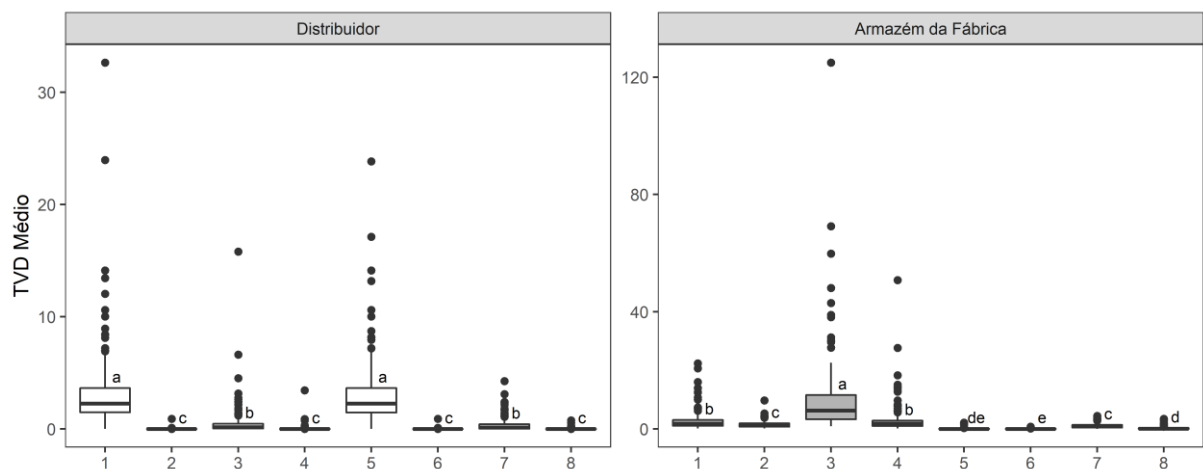
Novamente, de acordo com a Figura 50 e a Figura 51, os testes estatísticos de Friedman e de Nemenyi identificaram diferenças significativas para as medidas FRP (distribuidor) e TVD Médio (distribuidor) que não apresentam relevância prática, pois todos os tratamentos apresentaram nível de serviço superior a 99% e mantiveram baixos níveis de TVD Médio. A Figura 52 mostra que, do mesmo modo que no cenário A, o tratamento 1 foi capaz de manter o menor nível de estoque médio na cadeia de suprimentos, por exemplo, aproximadamente, 30% a menos que o tratamento 8, garantindo um elevado nível de serviço.

Figura 50 - Desempenho do distribuidor e do AF para FRP no cenário B



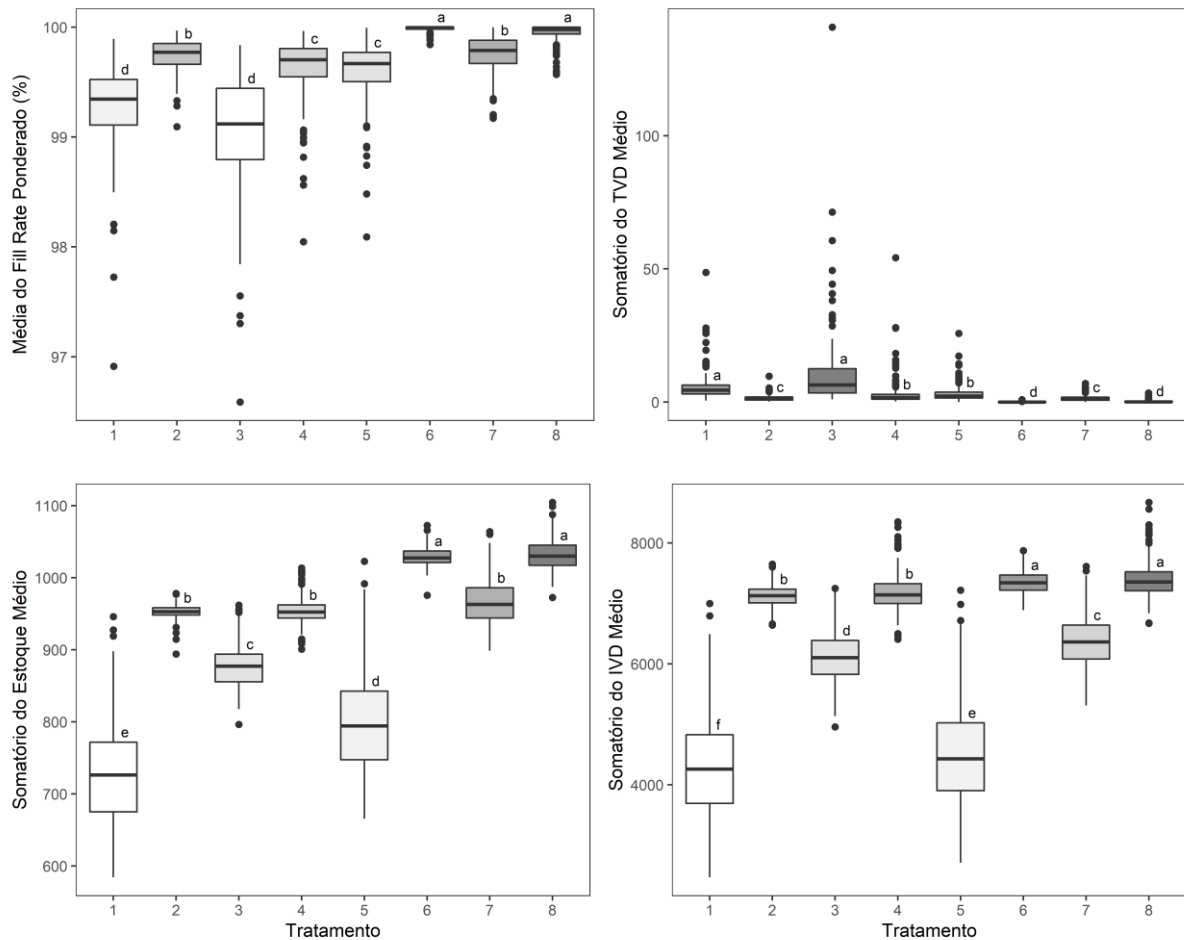
Fonte: Autor (2023).

Figura 51 - Desempenho do distribuidor e do AF para TVD Médio no cenário B



Fonte: Autor (2023).

Figura 52 - Desempenho dos dois estágios da cadeia de suprimentos no cenário B



Fonte: Autor (2023).

8.2.3 Resultados e análises estatísticas do cenário C

O cenário C é semelhante ao cenário B, exceto pela alta variabilidade nas distribuições de demanda.

A Tabela 16 mostra que as médias e as medianas das medidas relacionadas a nível de serviço (FRP do distribuidor) e eficácia da cadeia de suprimentos (TVD Médio do distribuidor) apresentam maior variabilidade, se comparadas às mesmas medidas nos cenários A e B. Além disso, notou-se que apenas os tratamentos 4 e 8 obtiveram FRP maior que 90% no distribuidor. Do ponto de vista das medidas relacionadas a estoque (somatório do EM) e eficiência (somatório do IVD Médio) da cadeia de suprimentos, o tratamento 1 apresentou os menores valores, mas foi um dos tratamentos com os menores valores para FRP (distribuidor) e maiores valores para TVD Médio.

Tabela 16 - Resumo dos resultados do cenário C

		Tratamento							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Fill Rate Ponderado (Distribuidor)	$\bar{x}$	72.9	86.9	84.2	92.6	73.1	87.8	87.7	94.8
	md	73.3	86.9	84.5	92.9	73.2	88.0	88.3	95.0
	s	3.8	4.1	3.2	2.6	3.6	3.9	2.5	1.7
Fill Rate Ponderado (AF)	$\bar{x}$	77.7	76.9	66.6	65.6	97.7	96.3	91.7	90.7
	md	78.0	77.1	66.7	65.9	97.8	96.4	91.8	91.0
	s	2.3	2.2	2.7	2.8	0.8	0.9	1.6	1.8
TVD Médio (Distribuidor)	$\bar{x}$	687.3	209.2	306.9	120.1	648.3	169.7	152.6	47.1
	md	583.6	174.5	236.8	88.5	566.8	140.2	127.1	41.2
	s	382.7	155.8	201.0	104.7	337.1	126.5	89.8	27.1
TVD Médio (AF)	$\bar{x}$	136.7	155.1	352.8	502.1	6.2	10.1	27.0	33.9
	md	128.3	144.3	337.9	479.8	5.7	9.7	24.9	30.3
	s	47.5	49.1	113.5	167.7	2.7	3.2	11.4	18.6
Estoque Médio (Distribuidor)	$\bar{x}$	246.3	369.8	387.6	566.6	241.9	370.8	403.5	565.4
	md	245.0	366.2	388.0	565.9	242.3	370.2	404.3	566.6
	s	18.5	42.0	23.7	31.5	17.8	42.9	21.4	30.9
Estoque Médio (AF)	$\bar{x}$	154.1	137.2	152.2	141.3	362.0	315.5	340.0	322.3
	md	153.2	137.2	149.9	139.1	361.6	314.7	338.2	322.2
	s	12.3	8.5	12.9	12.9	21.8	16.3	20.0	17.0
IVD Médio (Distribuidor)	$\bar{x}$	2364.3	3974.5	4670.5	8201.3	2288.0	3943.1	4804.3	7876.1
	md	2339.7	3922.5	4641.4	8096.1	2285.6	3928.0	4805.8	7826.2
	s	279.3	599.2	467.2	775.7	256.7	589.4	428.4	680.0
IVD Médio (AF)	$\bar{x}$	502.3	353.2	614.2	485.7	1535.9	1097.3	1622.0	1371.4
	md	482.9	348.8	589.4	451.5	1512.8	1089.3	1589.7	1350.5
	s	95.9	35.3	119.6	128.1	203.7	94.0	200.4	164.5
Média do Fill Rate Ponderado	$\bar{x}$	75.3	81.9	75.4	79.1	85.4	92.1	89.7	92.8
	md	75.4	82.0	75.5	79.1	85.4	92.1	89.9	92.9
	s	2.3	2.2	2.5	2.3	1.9	1.9	1.8	1.5
Somatório do TVD Médio	$\bar{x}$	824.0	364.3	659.7	622.2	654.5	179.8	179.6	81.0
	md	730.1	317.4	608.1	593.7	573.4	150.3	155.8	74.1
	s	390.4	171.3	258.9	238.5	337.2	126.4	95.9	38.5
Somatório do Estoque Médio	$\bar{x}$	400.4	507.0	539.8	707.9	604.0	686.3	743.6	887.7
	md	398.4	507.4	537.9	708.3	604.1	688.4	742.5	887.7
	s	23.5	42.7	31.2	38.7	31.6	45.4	37.0	43.1
Somatório do IVD Médio	$\bar{x}$	2866.6	4327.7	5284.7	8687.0	3823.9	5040.4	6426.3	9247.5
	md	2839.5	4270.7	5257.2	8581.0	3803.2	5044.2	6414.4	9123.1
	s	325.1	603.8	530.8	840.0	395.5	596.9	583.2	787.4

$\bar{x}$ é a média. md é a mediana. s é o desvio padrão.

Fonte: Autor (2023).

Tabela 17 - Testes de normalidade e homogeneidade de variâncias para os tratamentos no cenário C

	Teste de Shapiro-Wilk por tratamento								Teste de Levene
	1	2	3	4	5	6	7	8	
Fill Rate Ponderado - Distribuidor	0.006*	0.053	0.093	0.005*	0.016*	0.354	<0.001*	<0.001*	<0.001*
Fill Rate Ponderado - AF	0.028*	0.058	0.085	0.662	<0.001*	0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*
TVD Médio - Distribuidor	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*
TVD Médio - AF	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*
Estoque Médio - Distribuidor	0.904	0.397	0.925	0.212	0.313	0.329	0.237	0.350	<0.001*
Estoque Médio - AF	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	0.032*	0.307	<0.001*	0.913	<0.001*
IVD Médio - Distribuidor	0.296	0.193	0.037*	<0.001*	0.484	0.351	0.184	0.012*	<0.001*
IVD Médio - AF	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	0.004*	<0.001*	<0.001*	<0.001*
Média do Fill Rate Ponderado	0.012*	0.213	0.497	0.482	0.006*	0.741	<0.001*	<0.001*	<0.001*
Somatório do TVD Médio	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*
Somatório do Estoque Médio	0.210	0.679	0.361	0.007*	0.396	0.524	0.136	0.864	<0.001*
Somatório do IVD Médio	0.109	0.180	0.012*	<0.001*	0.066	0.519	0.020*	0.008*	<0.001*

*Estatisticamente significativa ao nível de 5%

Fonte: Autor (2023).

Tabela 18 - Testes de Friedman para o cenário C

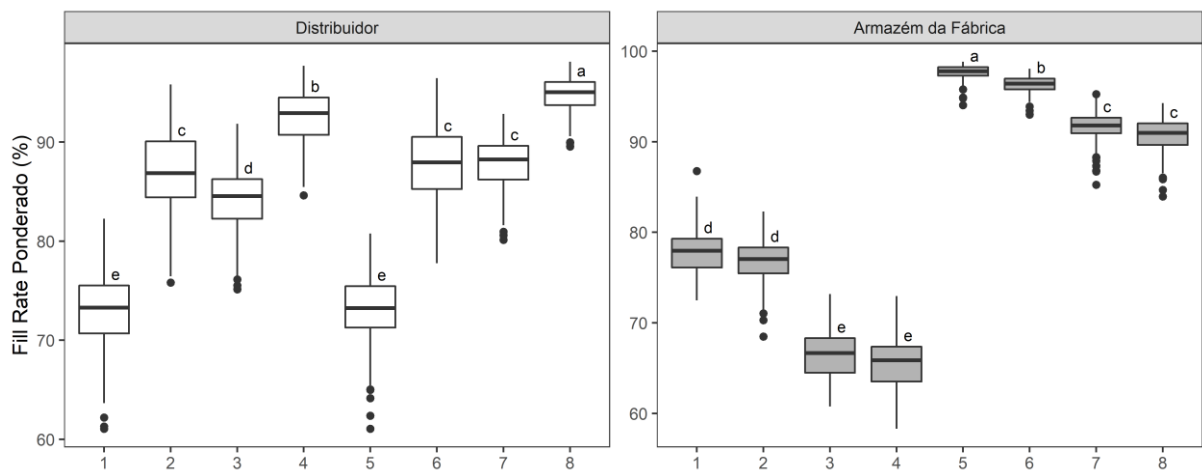
	Fill Rate Ponderado	TVD Médio	Estoque Médio	IVD Médio
Distribuidor	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*
Armazém da Fábrica	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*
	Média do Fill Rate Ponderado	Somatório do TVD Médio	Somatório do Estoque Médio	Somatório do IVD Médio
Dois estágios da Cadeia de Suprimentos	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*

*Estatisticamente significativa ao nível de 5%

Fonte: Autor (2023).

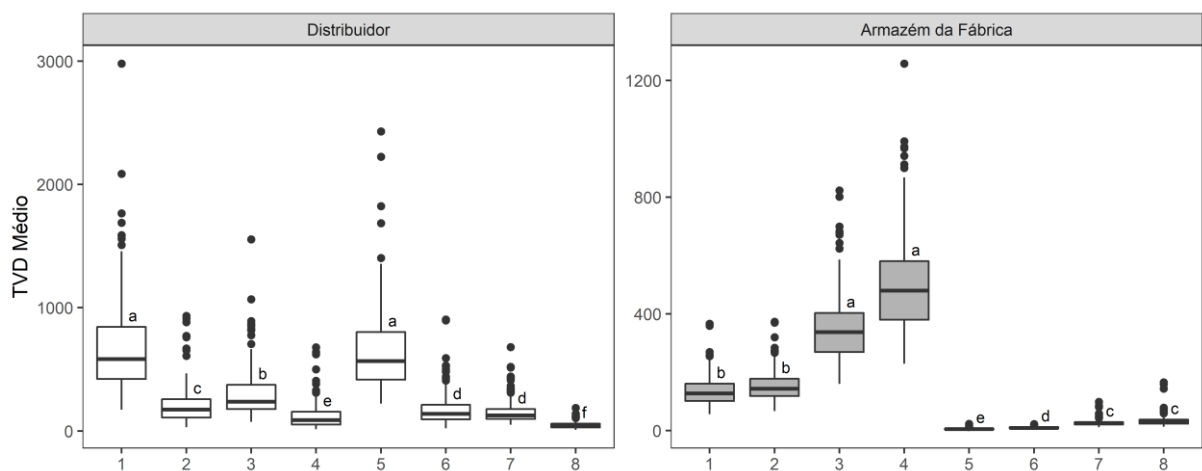
As Figuras 53 e 54 mostram que o tratamento 8 obteve o maior nível de FRP e o menor valor de TVD Médio no distribuidor acompanhado do tratamento 4. No entanto, de acordo com a Figura 55, o tratamento 8 também registrou os maiores índices de estoque médio. Vale ressaltar que, por mais que o tratamento 4 tenha recebido a segunda classificação para FRP (letra b), ele recebeu a terceira classificação para somatório do EM (letra c). Isso significa que ele foi capaz de obter uma média de nível de serviço superior a 90% com nível de estoque médio menor que o do tratamento 7, que teve desempenho inferior a 90% para FRP.

Figura 53 - Desempenho do distribuidor e do AF para FRP no cenário C



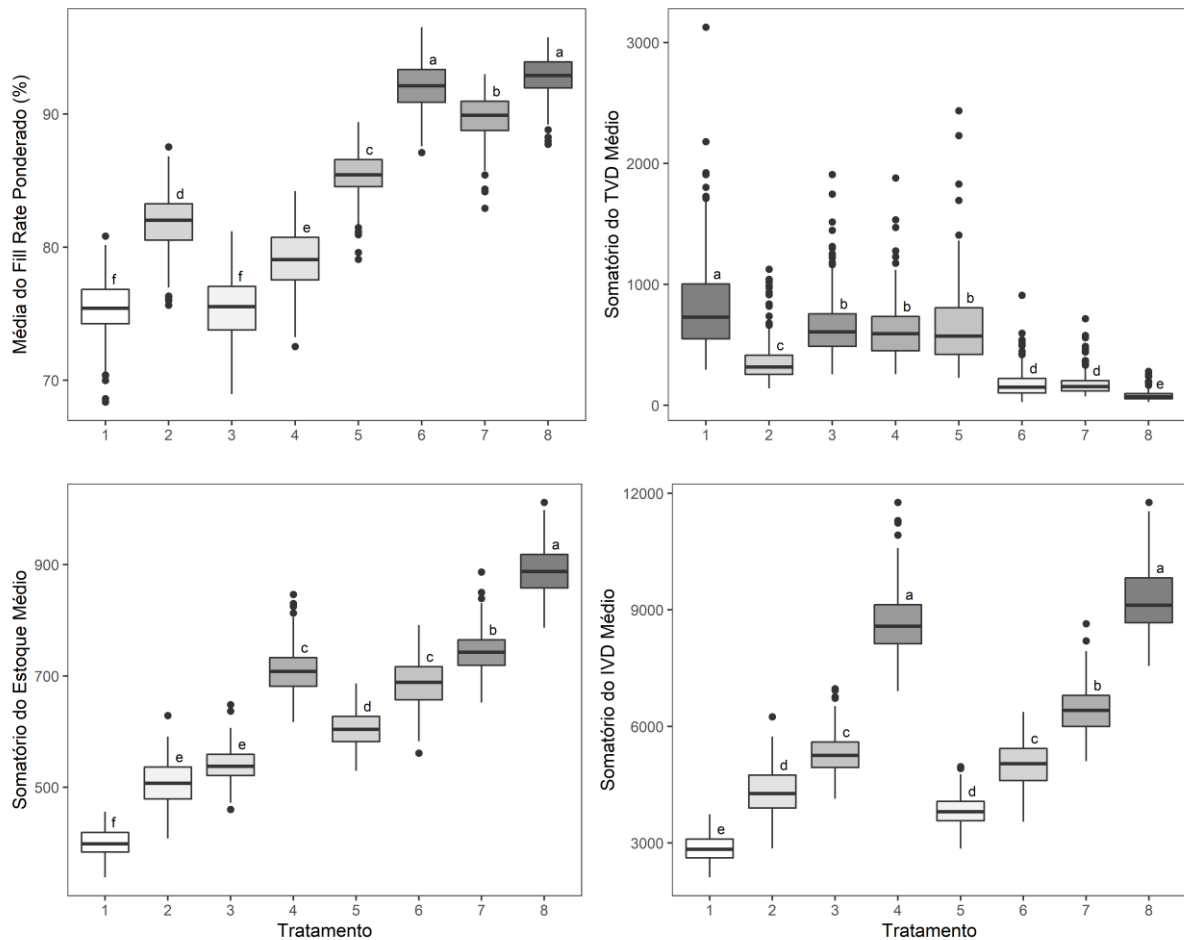
Fonte: Autor (2023).

Figura 54 - Desempenho do distribuidor e do AF para TVD Médio no cenário C



Fonte: Autor (2023).

Figura 55 - Desempenho dos dois estágios da cadeia de suprimentos no cenário C



Fonte: Autor (2023).

8.2.4 Resultados e análises estatísticas do cenário D

O cenário D é composto por demandas médias constantes com baixa variabilidade que causaram uma utilização média do CCR da fábrica de 95% durante o período simulado. Assim, o cenário D se diferencia do cenário B apenas pela carga sobre o CCR.

A Tabela 19 mostra que as médias e medianas das medidas FRP (distribuidor) e TVD Médio (distribuidor) se aproximaram do nível ótimo (100% para FRP e zero para TVD Médio). Vale dizer que as médias do TVD Médio do distribuidor para os tratamentos 3 e 4 foram influenciadas por *outliers*, conforme pode ser visto na Figura 57.

Apesar dos níveis de serviço próximos entre os tratamentos, houve um distanciamento entre as médias e medianas do somatório do EM e somatório do IVD

Médio entre alguns tratamentos, além da presença de muitos *outliers* para essas medidas em relação aos tratamentos 1, 2, 3 e 4.

Tabela 19 - Resumo dos resultados do cenário D

		Tratamento							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Fill Rate Ponderado (Distribuidor)	$\bar{x}$	99.3	100.0	99.8	99.8	99.3	100.0	99.9	100.0
	md	99.4	100.0	99.9	100.0	99.4	100.0	99.9	100.0
	s	0.5	0.0	1.1	3.1	0.5	0.0	0.1	0.0
Fill Rate Ponderado (AF)	$\bar{x}$	99.2	99.4	97.9	98.8	99.9	100.0	99.4	99.8
	md	99.4	99.5	98.3	99.3	100.0	100.0	99.6	99.9
	s	0.5	0.5	1.9	4.1	0.2	0.1	0.6	0.4
TVD Médio (Distribuidor)	$\bar{x}$	3.7	0.0	50.0	909.2	3.6	0.0	0.5	0.0
	md	2.7	0.0	0.3	0.0	2.8	0.0	0.2	0.0
	s	3.5	0.1	697.9	12857.5	3.3	0.1	0.7	0.1
TVD Médio (AF)	$\bar{x}$	4.1	3.0	105.1	670.1	0.3	0.1	2.9	1.0
	md	2.3	1.8	8.3	2.6	0.1	0.0	1.3	0.1
	s	12.4	7.6	1208.7	9373.4	0.9	0.4	6.5	4.4
Estoque Médio (Distribuidor)	$\bar{x}$	604.9	887.6	790.2	885.0	603.0	888.2	789.8	887.6
	md	596.3	888.6	788.4	886.6	592.8	889.2	786.8	886.9
	s	79.8	9.3	34.9	37.0	79.3	9.2	33.7	21.3
Estoque Médio (AF)	$\bar{x}$	386.1	374.0	447.0	392.7	380.2	384.8	411.9	390.0
	md	318.4	313.7	345.6	317.9	379.2	382.1	410.5	386.7
	s	202.6	193.3	253.1	224.8	20.6	19.4	34.5	24.1
IVD Médio (Distribuidor)	$\bar{x}$	4698.7	8289.0	6952.7	8309.5	4675.2	8298.9	6932.3	8334.5
	md	4600.6	8301.3	6889.3	8283.1	4571.5	8303.6	6890.7	8286.8
	s	1013.6	229.0	505.2	486.1	1007.8	228.0	500.2	403.4
IVD Médio (AF)	$\bar{x}$	1478.5	1332.3	2105.5	1551.7	852.8	851.3	1027.4	886.3
	md	693.3	660.5	889.2	677.4	842.2	838.4	994.0	856.7
	s	2542.4	2433.5	3185.7	2806.0	88.0	78.7	263.5	136.4
Média do Fill Rate Ponderado	$\bar{x}$	99.3	99.7	98.9	99.3	99.6	100.0	99.7	99.9
	md	99.4	99.7	99.1	99.7	99.7	100.0	99.8	100.0
	s	0.4	0.2	1.4	3.6	0.3	0.0	0.3	0.2
Somatório do TVD Médio	$\bar{x}$	7.8	3.1	155.1	1579.3	3.9	0.2	3.4	1.0
	md	5.0	1.8	9.0	2.6	2.8	0.0	1.7	0.2
	s	13.0	7.6	1906.3	22230.9	3.7	0.4	6.7	4.4
Somatório do Estoque Médio	$\bar{x}$	990.9	1261.6	1237.2	1277.8	983.3	1273.1	1201.7	1277.6
	md	929.5	1201.0	1150.4	1204.4	978.4	1271.1	1196.5	1273.7
	s	223.0	193.2	255.4	228.9	84.7	20.1	48.9	35.2
Somatório do IVD Médio	$\bar{x}$	6177.2	9621.3	9058.2	9861.2	5528.0	9150.2	7959.7	9220.8
	md	5489.2	9029.3	8113.0	9030.9	5390.6	9150.8	7877.7	9144.6
	s	2819.2	2445.0	3208.3	2825.9	1019.9	234.5	577.7	465.6

$\bar{x}$ é a média. md é a mediana. s é o desvio padrão.

Fonte: Autor (2023).

Tabela 20 - Testes de normalidade e homogeneidade de variâncias para os tratamentos no cenário D

	Teste de Shapiro-Wilk por tratamento								Teste de Levene
	1	2	3	4	5	6	7	8	
Fill Rate Ponderado - Distribuidor	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	0.003*
Fill Rate Ponderado - AF	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*
TVD Médio - Distribuidor	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	0.442
TVD Médio - AF	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	0.446
Estoque Médio - Distribuidor	<0.001*	<0.001*	0.725	<0.001*	<0.001*	<0.001*	0.441	<0.001*	<0.001*
Estoque Médio - AF	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	0.039*	0.009*	<0.001*	<0.001*	<0.001*
IVD Médio - Distribuidor	<0.001*	0.861	0.283	<0.001*	<0.001*	0.884	0.168	<0.001*	<0.001*
IVD Médio - AF	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*
Média do Fill Rate Ponderado	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*
Somatório do TVD Médio	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	0.444
Somatório do Estoque Médio	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	0.156	<0.001*	<0.001*	<0.001*
Somatório do IVD Médio	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	0.619	<0.001*	<0.001*	<0.001*

*Estatisticamente significativo ao nível de 5%

Fonte: Autor (2023).

Tabela 21 - Testes de Friedman para o cenário D

	Fill Rate Ponderado	TVD Médio	Estoque Médio	IVD Médio
Distribuidor	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*
Armazém da Fábrica	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*
	Média do Fill Rate Ponderado	Somatório do TVD Médio	Somatório do Estoque Médio	Somatório do IVD Médio
Dois estágios da Cadeia de Suprimentos	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*

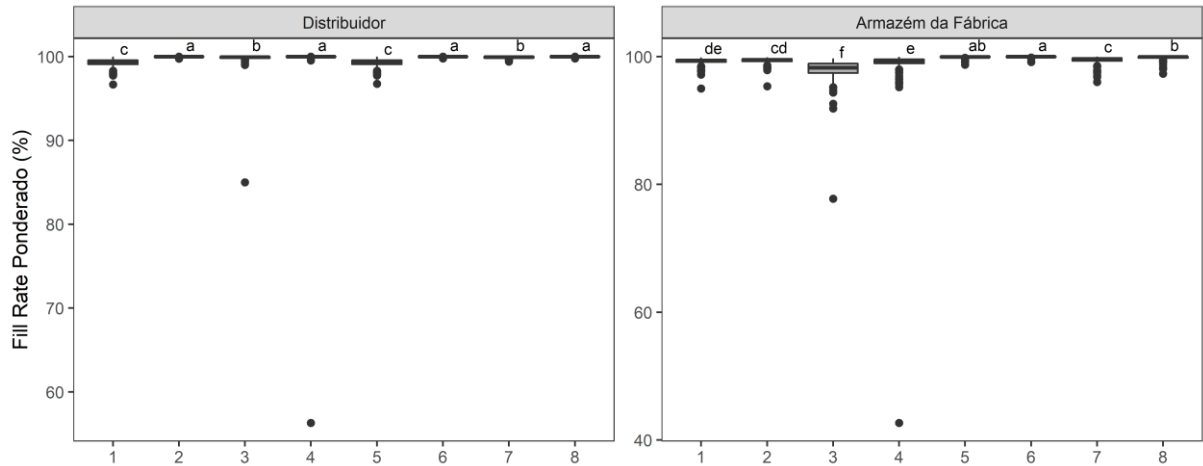
*Estatisticamente significativo ao nível de 5%

Fonte: Autor (2023).

As Figuras 56 e 57 apontam que os testes estatísticos de Friedman e de Nemenyi identificaram diferenças significantes para as medidas FRP (distribuidor) e TVD Médio (distribuidor) que não apresentam significância prática, pois todos os tratamentos apresentaram nível de serviço maior que 99% e alcançaram baixos níveis de TVD Médio (exceto pelas médias dos tratamentos 3 e 4, que foram influenciadas por valores atípicos).

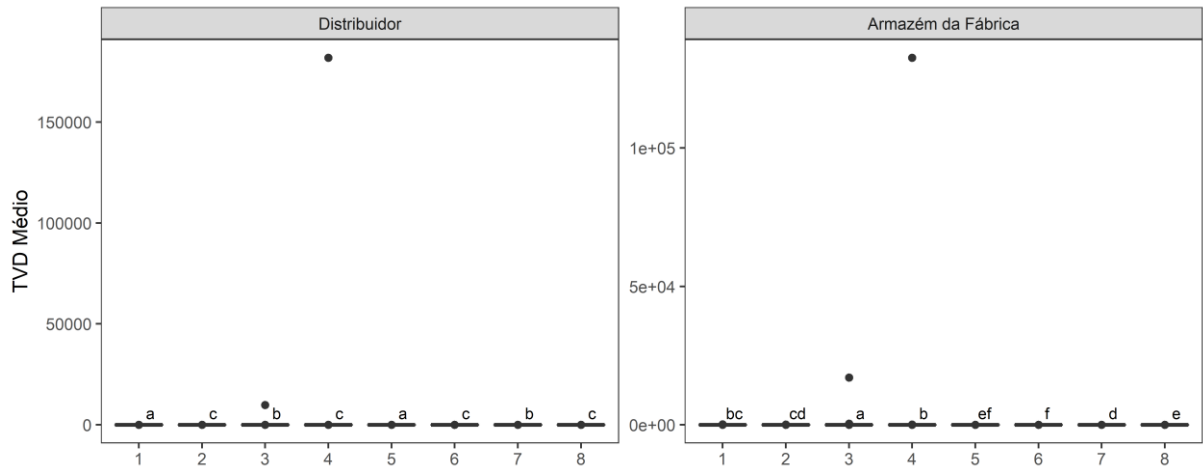
A Figura 58 mostra que os tratamentos 1 e 5 mantiveram os menores níveis de EM e IVD Médio na cadeia de suprimentos ao passo que asseguraram elevados níveis de serviço. Ademais, notou-se a presença de muitos *outliers* para os tratamentos de 1 a 4.

Figura 56 - Desempenho do distribuidor e do AF para FRP no cenário D



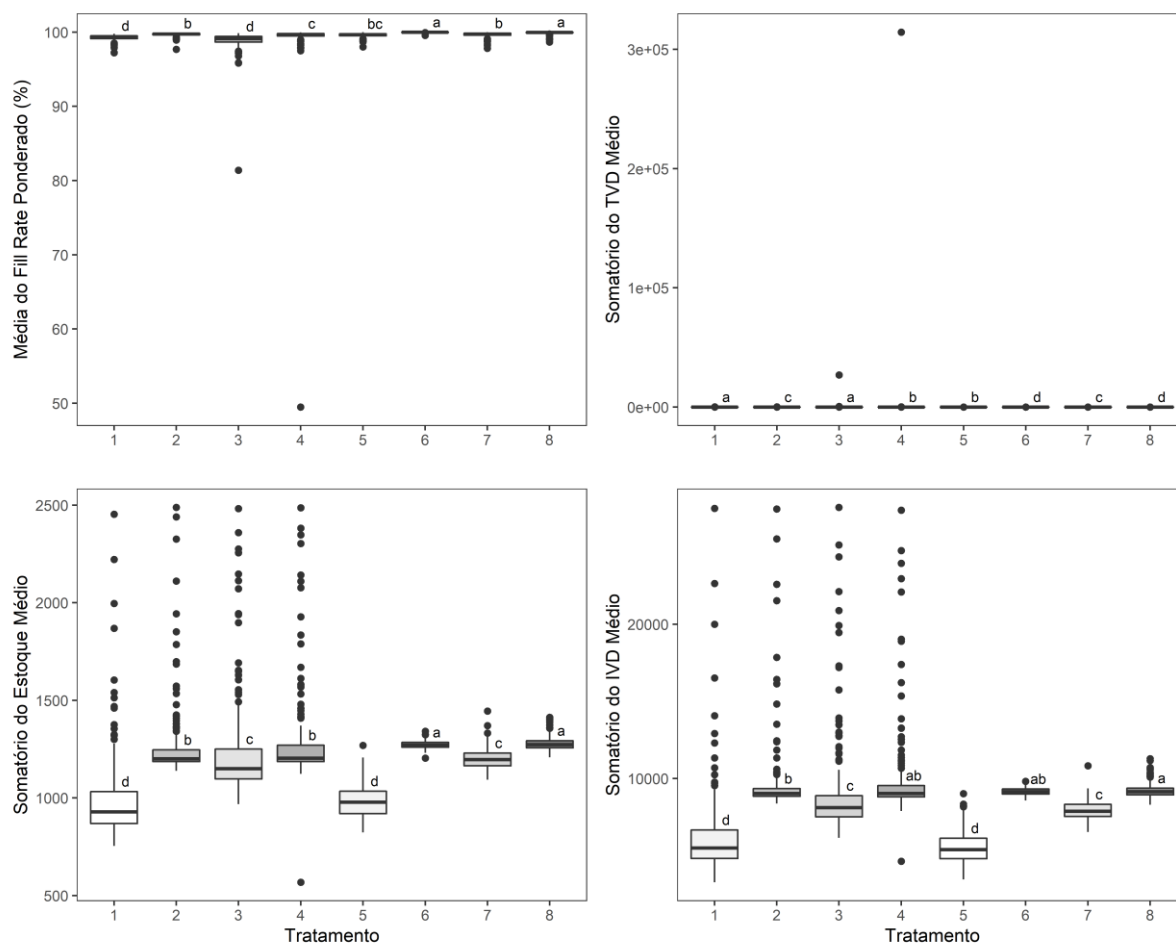
Fonte: Autor (2023).

Figura 57 - Desempenho do distribuidor e do AF para TVD Médio no cenário D



Fonte: Autor (2023).

Figura 58 - Desempenho dos dois estágios da cadeia de suprimentos no cenário D



Fonte: Autor (2023).

8.2.5 Resultados e análises estatísticas do cenário E

O cenário E é diferente do cenário D apenas por causa da alta variabilidade da demanda e se difere do cenário C apenas pela utilização média do CCR de 95%.

Entretanto, A Tabela 22 mostra que, de forma semelhante ao cenário C, as médias e as medianas das medidas relacionadas a nível de serviço (FRP do distribuidor) e eficácia da cadeia de suprimentos (TVD Médio do distribuidor) apresentam alta variabilidade entre os tratamentos. Novamente, apenas os tratamentos 4 e 8 obtiveram FRP maior que 90% no distribuidor e, sob a perspectiva das medidas relacionadas a estoque (somatório do EM) e eficiência (somatório do IVD Médio) da cadeia de suprimentos, o tratamento 1 apresentou os menores valores, mas também foi um dos tratamentos que registraram os menores valores para FRP (distribuidor) e maiores valores para TVD Médio.

Tabela 22 - Resumo dos resultados do cenário E

		Tratamento							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Fill Rate Ponderado (Distribuidor)	$\bar{x}$	71.6	86.4	83.8	91.8	71.5	86.2	86.1	93.4
	md	71.7	86.4	84.0	92.1	72.5	87.3	87.6	94.7
	s	4.4	4.3	3.4	3.2	7.8	9.7	8.9	9.6
Fill Rate Ponderado (AF)	$\bar{x}$	75.8	74.6	65.4	63.7	93.7	93.8	87.9	86.8
	md	76.6	74.7	65.6	63.9	96.2	95.7	90.1	88.8
	s	4.5	3.0	4.1	4.4	10.8	10.8	10.4	10.4
TVD Médio (Distribuidor)	$\bar{x}$	1598.4	342.9	525.5	324.2	7074.5	3904.1	4842.3	6447.7
	md	982.0	281.5	411.2	165.9	890.4	227.7	197.9	60.6
	s	5759.5	253.9	456.1	1271.5	55359.6	31594.0	45574.8	58992.4
TVD Médio (AF)	$\bar{x}$	776.1	339.5	999.3	1482.4	5852.1	6023.0	6041.6	7827.4
	md	239.2	272.7	683.2	899.2	16.2	18.1	59.7	78.9
	s	4462.9	249.3	1215.5	2925.4	52708.0	53981.9	51963.4	71284.2
Estoque Médio (Distribuidor)	$\bar{x}$	363.4	553.9	587.5	853.0	353.1	542.2	594.5	835.5
	md	364.0	554.4	587.5	850.2	357.8	550.6	597.9	840.4
	s	28.8	66.2	43.2	53.3	40.7	86.3	72.5	102.4
Estoque Médio (AF)	$\bar{x}$	292.9	248.8	317.6	299.9	542.8	479.6	553.5	527.8
	md	276.2	228.7	298.6	278.1	544.2	480.0	549.7	520.9
	s	76.4	76.9	97.1	110.1	82.8	72.3	89.3	91.1
IVD Médio (Distribuidor)	$\bar{x}$	3589.5	6107.6	7397.7	12815.6	3411.2	5878.8	7265.7	11984.6
	md	3575.3	6093.5	7292.5	12517.8	3423.8	5966.0	7219.2	11808.7
	s	450.4	997.9	1016.1	1620.1	480.9	1103.4	1141.2	1954.9
IVD Médio (AF)	$\bar{x}$	1480.5	1032.5	2034.0	1860.8	2728.9	1973.1	3279.3	2935.3
	md	1216.2	739.4	1654.5	1381.9	2615.8	1892.3	3173.5	2747.7
	s	1299.4	1446.7	1671.7	1998.0	784.8	696.4	924.4	1208.8
Média do Fill Rate Ponderado	$\bar{x}$	73.7	80.5	74.6	77.8	82.6	90.0	87.0	90.1
	md	74.5	80.7	75.0	77.9	84.4	91.2	88.9	91.9
	s	3.9	2.7	3.3	3.5	9.1	10.0	9.5	9.8
Somatório do TVD Médio	$\bar{x}$	2374.5	682.4	1524.8	1806.6	12926.6	9927.1	10884.0	14275.2
	md	1242.8	558.6	1140.0	1136.1	927.9	252.4	288.3	148.3
	s	10172.6	418.6	1554.3	4114.8	108042.7	85494.0	97153.7	129624.8
Somatório do Estoque Médio	$\bar{x}$	656.2	802.7	905.1	1153.0	895.9	1021.8	1148.0	1363.4
	md	641.4	788.5	888.3	1135.7	905.8	1034.3	1152.3	1364.1
	s	91.0	107.3	125.0	144.2	116.2	141.2	153.5	183.9
Somatório do IVD Médio	$\bar{x}$	5070.1	7140.1	9431.7	14676.3	6140.1	7851.9	10545.0	14919.9
	md	4808.0	6900.7	9062.2	14280.3	6109.8	7854.8	10404.4	14727.6
	s	1503.2	1838.8	2292.3	3243.9	1105.4	1470.8	1894.8	2938.7

$\bar{x}$ é a média. md é a mediana. s é o desvio padrão.

Fonte: Autor (2023).

Tabela 23 - Testes de normalidade e homogeneidade de variâncias para os tratamentos no cenário E

	Teste de Shapiro-Wilk por tratamento								Teste de Levene
	1	2	3	4	5	6	7	8	
Fill Rate Ponderado - Distribuidor	<0.001*	0.031*	0.010*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	0.059
Fill Rate Ponderado - AF	<0.001*	0.220	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	0.320
TVD Médio - Distribuidor	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	0.254
TVD Médio - AF	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	0.285
Estoque Médio - Distribuidor	0.066	0.988	0.840	0.032*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*
Estoque Médio - AF	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	0.003*
IVD Médio - Distribuidor	0.037*	0.115	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*
IVD Médio - AF	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*
Média do Fill Rate Ponderado	<0.001*	0.010*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	0.623
Somatório do TVD Médio	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	0.271
Somatório do Estoque Médio	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	0.006*
Somatório do IVD Médio	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*

*Estatisticamente significativo ao nível de 5%

Fonte: Autor (2023).

Tabela 24 - Testes de Friedman para o cenário E

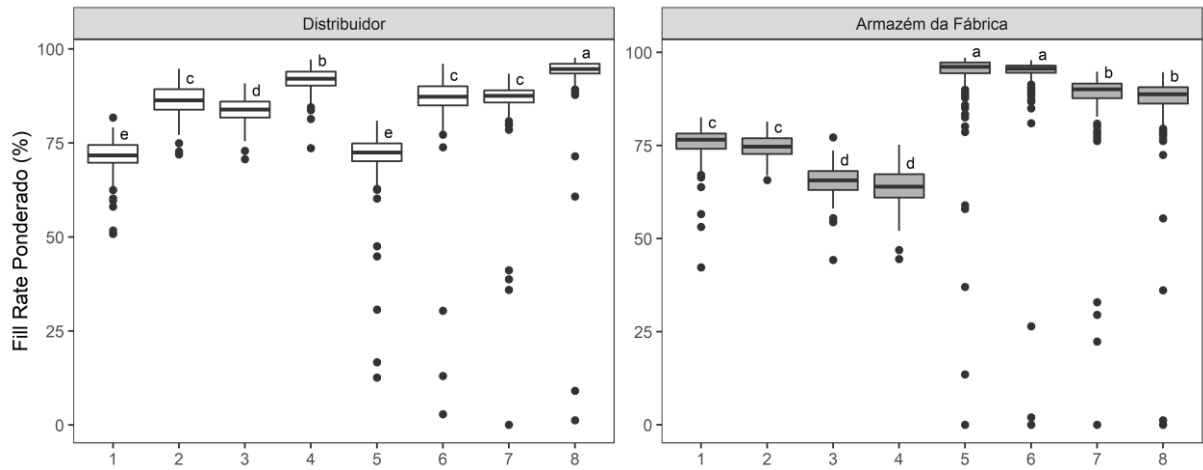
	Fill Rate Ponderado	TVD Médio	Estoque Médio	IVD Médio
Distribuidor	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*
Armazém da Fábrica	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*
	Média do Fill Rate Ponderado	Somatório do TVD Médio	Somatório do Estoque Médio	Somatório do IVD Médio
Dois estágios da Cadeia de Suprimentos	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*

*Estatisticamente significativo ao nível de 5%

Fonte: Autor (2023).

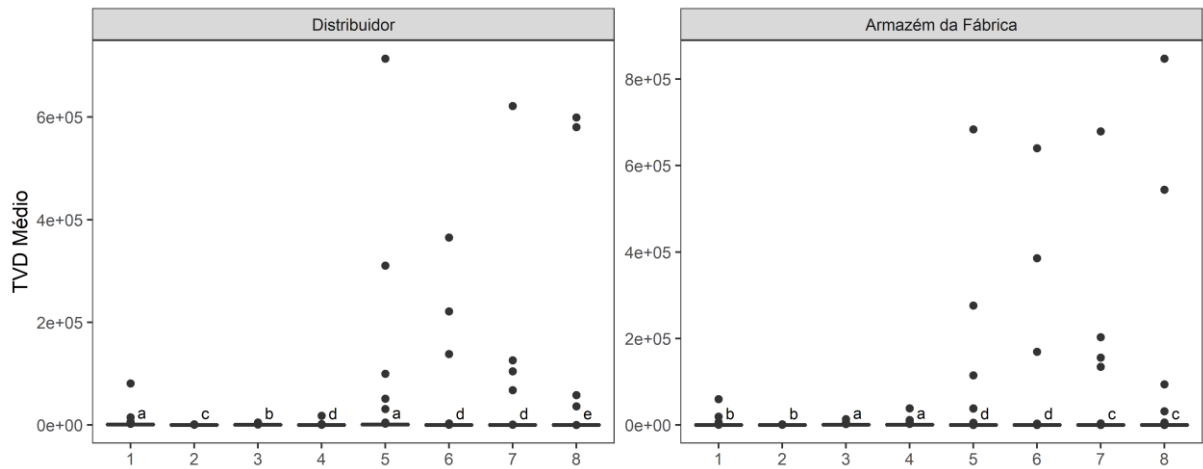
O tratamento 8 obteve o maior nível de FRP e o menor valor de TVD Médio no distribuidor seguido do tratamento 4 (ver Figuras 59 e 60), mesmo com níveis de serviço do AF inferiores a 90% em ambos os tratamentos. Contudo, a Figura 61 mostra que o tratamento 8 também alcançou os maiores índices de estoque médio na cadeia de suprimentos. Ao comparar os comportamentos dos tratamentos nos gráficos de FRP (distribuidor) da Figura 59 e somatório do EM da Figura 61, constatou-se que, para este cenário, níveis de serviço elevados são obtidos apenas com níveis maiores de estoque na cadeia de suprimentos.

Figura 59 - Desempenho do distribuidor e do AF para FRP no cenário E



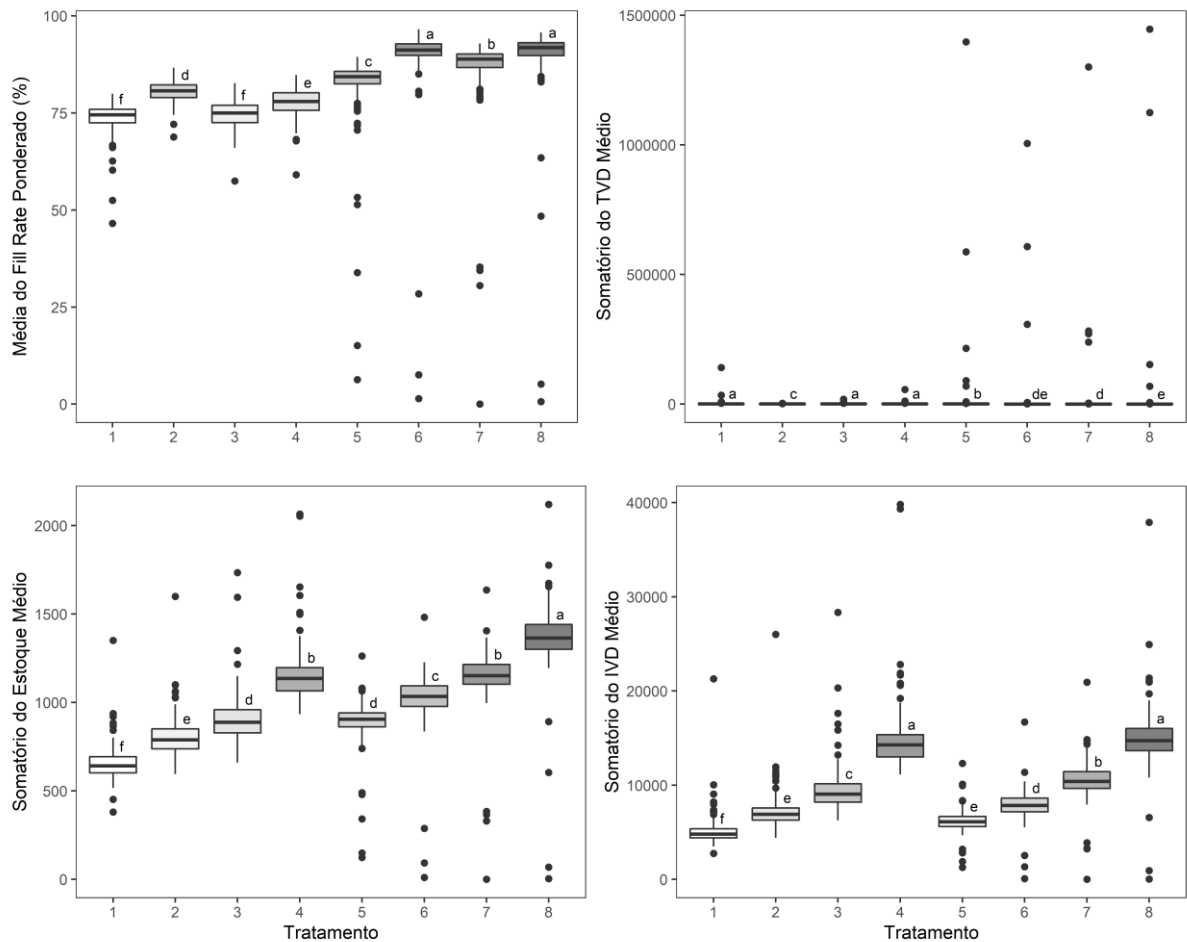
Fonte: Autor (2023).

Figura 60 - Desempenho do distribuidor e do AF para TVD Médio no cenário E



Fonte: Autor (2023).

Figura 61 - Desempenho dos dois estágios da cadeia de suprimentos no cenário E



Fonte: Autor (2023).

8.2.6 Resultados e análises estatísticas do cenário F

O cenário F é caracterizado por variações nas médias das demandas em intervalos mensais, apresentando comportamentos sazonais com baixa variabilidade.

De acordo com a Tabela 25, os tratamentos 3, 4, 7 e 8 apresentaram médias e medianas próximas de 98% para a medida FRP (distribuidor) e os menores valores de TVD Médio (distribuidor). Em contrapartida, os tratamentos 2 e 6 apresentaram os piores desempenhos em relação aos demais tratamentos para essas medidas, e os tratamentos 1 e 5 alcançaram performances intermediárias entre os tratamentos 2 e 6 e os tratamentos 3, 4, 7 e 8.

Tabela 25 - Resumo dos resultados do cenário F

		Tratamento							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Fill Rate Ponderado (Distribuidor)	$\bar{x}$	75.4	38.7	98.1	98.1	75.5	39.0	98.2	98.2
	md	75.5	38.8	98.2	98.3	75.5	39.1	98.2	98.3
	s	3.3	2.3	0.7	0.6	2.6	2.3	0.6	0.6
Fill Rate Ponderado (AF)	$\bar{x}$	94.7	96.9	96.0	96.2	97.7	99.6	97.3	97.3
	md	95.3	97.0	96.2	96.4	97.9	99.6	97.4	97.4
	s	4.0	0.6	1.2	1.1	0.7	0.2	0.9	0.9
TVD Médio (Distribuidor)	$\bar{x}$	193.8	5034.9	4.2	4.1	179.4	4819.6	4.0	3.9
	md	164.7	4701.0	3.8	3.7	164.7	4548.0	3.6	3.5
	s	176.6	1702.6	2.2	2.1	70.4	1616.5	1.9	1.9
TVD Médio (AF)	$\bar{x}$	197.9	7.3	9.3	8.4	4.4	0.7	5.1	5.3
	md	10.8	7.0	7.7	7.0	3.9	0.6	4.2	4.2
	s	1791.4	1.9	6.2	5.7	1.9	0.3	3.3	4.2
Estoque Médio (Distribuidor)	$\bar{x}$	177.8	160.8	283.4	329.3	178.1	161.8	283.8	329.7
	md	178.2	160.7	283.3	329.4	178.4	162.0	284.2	330.0
	s	9.4	7.9	9.5	11.5	9.2	8.0	9.4	11.8
Estoque Médio (AF)	$\bar{x}$	139.7	155.3	125.2	125.9	214.3	233.0	177.4	177.8
	md	139.9	154.6	125.0	125.4	214.4	232.7	176.8	177.0
	s	9.8	8.1	4.8	4.7	9.0	8.5	5.9	6.1
IVD Médio (Distribuidor)	$\bar{x}$	1790.9	2428.0	2913.2	4139.1	1786.1	2438.2	2911.3	4137.5
	md	1773.7	2430.6	2904.3	4138.3	1778.5	2440.7	2907.8	4123.9
	s	190.3	173.4	189.3	314.7	180.4	175.9	187.6	321.5
IVD Médio (AF)	$\bar{x}$	325.0	435.8	285.2	276.3	670.5	894.6	524.0	507.7
	md	313.6	419.1	278.9	272.4	654.2	880.3	516.7	500.5
	s	57.7	75.1	32.6	24.5	88.3	120.8	44.9	44.3
Média do Fill Rate Ponderado	$\bar{x}$	85.1	67.8	97.0	97.2	86.6	69.3	97.7	97.7
	md	85.4	67.8	97.2	97.3	86.7	69.3	97.8	97.8
	s	3.3	1.2	0.8	0.8	1.5	1.2	0.6	0.6
Somatório do TVD Médio	$\bar{x}$	391.7	5042.2	13.5	12.5	183.8	4820.2	9.0	9.2
	md	176.5	4708.5	11.8	11.0	168.6	4548.5	8.0	7.7
	s	1954.0	1702.9	7.5	6.8	71.0	1616.5	4.5	5.1
Somatório do Estoque Médio	$\bar{x}$	317.5	316.1	408.7	455.2	392.4	394.9	461.2	507.5
	md	317.3	315.2	409.0	454.6	391.6	394.2	461.3	506.7
	s	15.6	11.4	11.9	13.7	14.6	10.3	12.9	15.9
Somatório do IVD Médio	$\bar{x}$	2115.9	2863.8	3198.4	4415.5	2456.7	3332.8	3435.3	4645.2
	md	2099.5	2872.9	3187.0	4419.2	2446.7	3360.5	3437.5	4634.7
	s	212.4	198.4	202.0	325.7	230.0	207.4	209.2	347.3

$\bar{x}$ é a média. md é a mediana. s é o desvio padrão.

Fonte: Autor (2023).

Tabela 26 - Testes de normalidade e homogeneidade de variâncias para os tratamentos no cenário F

	Teste de Shapiro-Wilk por tratamento								Teste de Levene
	1	2	3	4	5	6	7	8	
Fill Rate Ponderado - Distribuidor	<0.001*	0.050*	<0.001*	<0.001*	0.601	0.019*	<0.001*	<0.001*	<0.001*
Fill Rate Ponderado - AF	<0.001*	0.205	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*
TVD Médio - Distribuidor	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*
TVD Médio - AF	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	0.033*
Estoque Médio - Distribuidor	0.805	0.525	0.515	0.536	0.779	0.223	0.553	0.369	<0.001*
Estoque Médio - AF	<0.001*	0.002*	0.053	0.016*	0.217	<0.001*	0.242	0.241	<0.001*
IVD Médio - Distribuidor	0.049*	0.828	0.449	0.120	0.078	0.645	0.132	0.073	<0.001*
IVD Médio - AF	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*
Média do Fill Rate Ponderado	<0.001*	0.045*	<0.001*	<0.001*	0.458	0.013*	<0.001*	<0.001*	<0.001*
Somatório do TVD Médio	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*
Somatório do Estoque Médio	<0.001*	0.137	0.930	0.493	0.148	0.001*	0.942	0.353	<0.001*
Somatório do IVD Médio	0.013*	0.435	0.441	0.117	0.151	0.011*	0.342	0.059	<0.001*

*Estatisticamente significativa ao nível de 5%

Fonte: Autor (2023).

Tabela 27 - Testes de Friedman para o cenário F

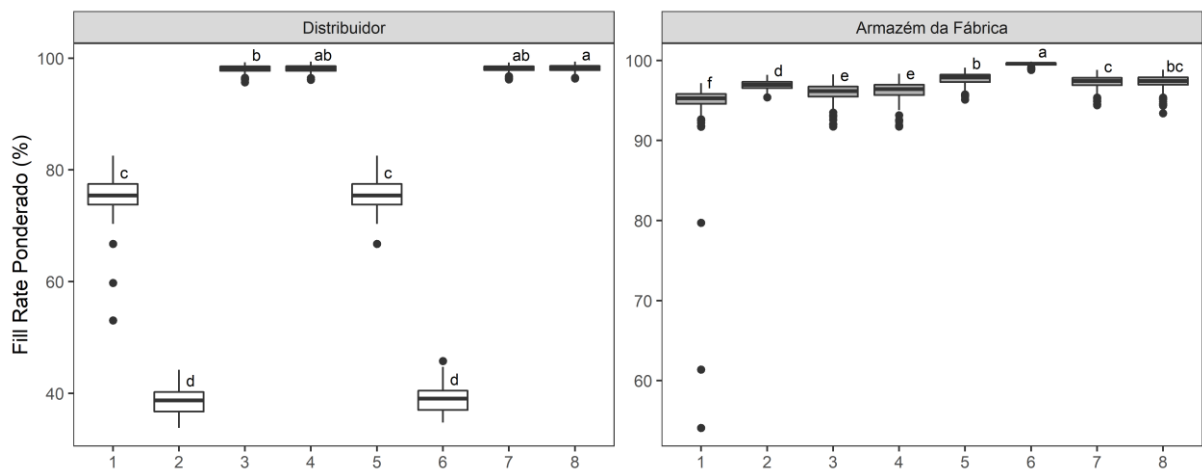
	Fill Rate Ponderado	TVD Médio	Estoque Médio	IVD Médio
Distribuidor	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*
Armazém da Fábrica	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*
	Média do Fill Rate Ponderado	Somatório do TVD Médio	Somatório do Estoque Médio	Somatório do IVD Médio
Dois estágios da Cadeia de Suprimentos	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*

*Estatisticamente significativa ao nível de 5%

Fonte: Autor (2023).

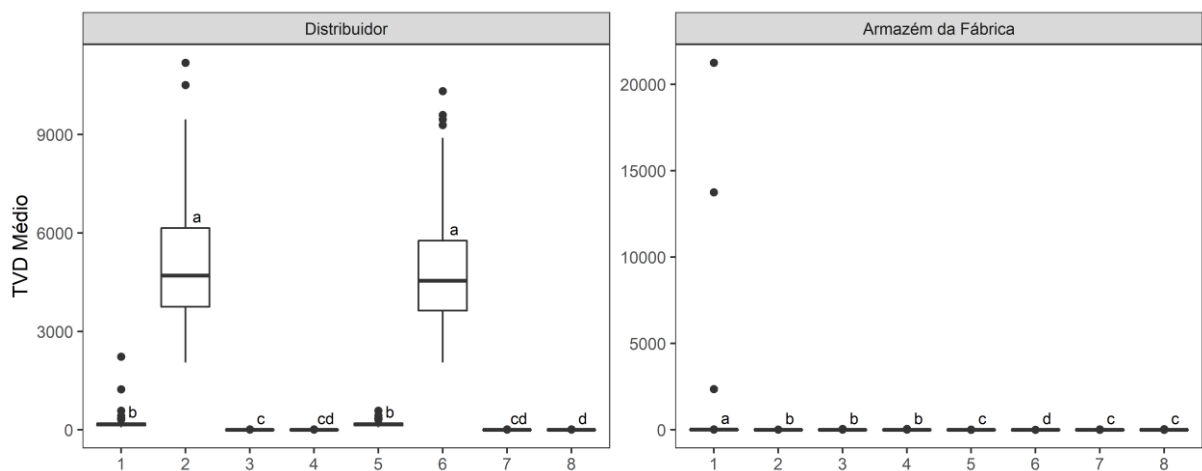
Por mais que os testes estatísticos post-hoc de Nemenyi tenham identificado diferenças significativas para as medidas FRP (distribuidor) e TVD Médio (distribuidor) entre os tratamentos 3 e 8 (ver Figuras 62 e 63), essas diferenças não apresentam relevância para a operação, dado que suas médias e medianas são similares. Por outro lado, a Figura 64 mostra que o valor do tratamento 3 para a medida somatório do EM é significativamente menor que o desempenho do tratamento 8. Isso significa que o tratamento 3 foi capaz de obter uma média de 98,1% de nível de serviço com cerca de 20% a menos de estoque na cadeia de suprimentos em relação ao tratamento 8.

Figura 62 - Desempenho do distribuidor e do AF para FRP no cenário F



Fonte: Autor (2023).

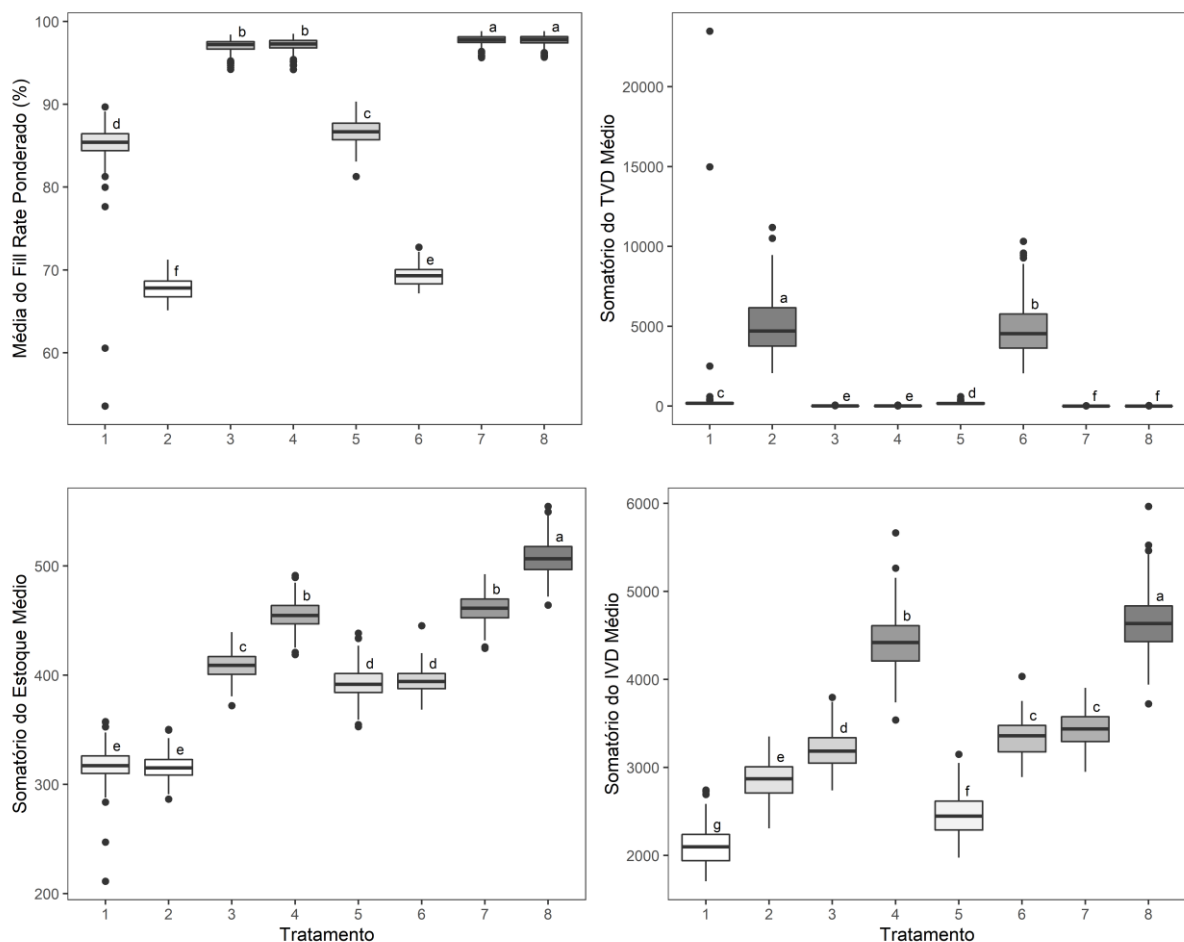
Figura 63 - Desempenho do distribuidor e do AF para TVD Médio no cenário F



Fonte: Autor (2023).

Os tratamentos 2 e 6 receberam as piores classificações para FRP (letra d, segundo a Figura 62) e TVD Médio (letra a, segundo a Figura 63). Ambos apresentam a mesma regra do DBM no distribuidor (código: 3-3-33-33) e esses resultados inferiores estão relacionados ao tempo necessário para o DBM reagir frente às mudanças no comportamento da demanda. Vale lembrar que o gatilho dessa regra para *Too Much Green* (TMG) consiste na permanência do *buffer status* durante três períodos completos de reposição na região verde do pulmão e o gatilho para *Too Much Red* (TMR) resulta da permanência do *buffer status* durante três períodos completos de reposição na região vermelha do pulmão. Logo, essa regra não deve ser utilizada em ambientes com mudanças rápidas e frequentes.

Figura 64 - Desempenho dos dois estágios da cadeia de suprimentos no cenário F



Fonte: Autor (2023).

8.2.7 Resultados e análises estatísticas do cenário G

O cenário G é semelhante ao cenário F, com exceção apenas do alto nível de variabilidade das demandas planejado para ele. A Tabela 28 mostra as medidas descritivas dos resultados das simulações do cenário G.

Tabela 28 - Resumo dos resultados do cenário G

		Tratamento							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Fill Rate Ponderado (Distribuidor)	$\bar{x}$	60.9	35.3	79.7	86.3	61.3	35.4	83.2	89.4
	md	60.5	35.0	80.2	86.8	61.1	34.9	83.3	89.7
	s	4.5	4.6	4.2	3.9	4.5	4.6	4.0	3.1
Fill Rate Ponderado (AF)	$\bar{x}$	83.0	92.6	72.0	71.6	96.4	99.3	87.8	87.9
	md	83.7	92.7	72.2	71.8	97.2	99.4	88.7	88.5
	s	3.6	1.5	3.2	3.4	4.2	0.6	4.7	3.7
TVD Médio (Distribuidor)	$\bar{x}$	1340.7	10493.1	331.5	177.8	1266.0	10520.7	261.8	96.0
	md	1006.3	9328.9	263.4	128.0	973.1	9574.7	163.8	77.5
	s	1060.5	5120.4	248.3	169.2	929.7	5137.8	973.0	70.7
TVD Médio (AF)	$\bar{x}$	185.1	23.0	221.3	269.4	176.4	1.3	264.0	62.5
	md	57.6	20.4	175.8	216.8	6.0	0.9	32.5	33.0
	s	1172.6	10.4	174.8	234.1	1998.0	2.4	2940.3	157.0
Estoque Médio (Distribuidor)	$\bar{x}$	171.0	151.8	281.9	394.0	171.5	152.8	291.6	400.1
	md	170.3	152.5	279.4	391.6	171.7	153.8	289.1	399.3
	s	13.0	11.6	23.2	28.4	13.9	11.6	20.1	29.7
Estoque Médio (AF)	$\bar{x}$	149.3	160.5	139.9	131.9	296.9	263.9	258.9	253.0
	md	142.5	155.9	129.5	122.7	294.3	262.9	254.9	247.4
	s	34.2	24.3	35.1	32.1	31.4	15.3	28.4	26.4
IVD Médio (Distribuidor)	$\bar{x}$	2074.8	2519.7	4037.3	7054.6	2070.2	2542.1	4055.0	6859.0
	md	2006.0	2497.9	3803.8	6854.6	1990.3	2516.5	3913.3	6652.3
	s	438.2	386.4	928.2	1381.0	456.6	383.0	786.3	1321.3
IVD Médio (AF)	$\bar{x}$	774.7	628.4	842.5	701.4	1745.5	1261.3	1572.7	1424.2
	md	558.6	516.0	574.9	463.6	1568.9	1201.4	1397.4	1222.8
	s	769.5	373.3	852.4	728.2	632.1	280.7	647.7	663.9
Média do Fill Rate Ponderado	$\bar{x}$	72.0	63.9	75.8	78.9	78.9	67.4	85.5	88.6
	md	72.3	63.9	76.2	79.2	79.0	67.2	85.9	89.0
	s	3.3	2.0	3.2	3.1	3.7	2.4	4.0	3.0
Somatório do TVD Médio	$\bar{x}$	1525.9	10516.0	552.8	447.2	1442.4	10522.0	525.8	158.5
	md	1072.8	9360.2	456.5	357.7	981.8	9575.5	211.9	115.9
	s	1899.5	5118.1	361.5	343.1	2382.9	5138.2	3908.4	198.5
Somatório do Estoque Médio	$\bar{x}$	320.3	312.3	421.8	525.9	468.4	416.7	550.5	653.1
	md	313.5	309.7	410.5	518.4	466.2	415.6	547.9	647.5
	s	41.0	30.3	52.0	54.0	39.4	22.6	42.7	51.2
Somatório do IVD Médio	$\bar{x}$	2849.5	3148.1	4879.8	7756.0	3815.7	3803.4	5627.7	8283.2
	md	2592.6	3023.6	4456.5	7374.8	3628.5	3712.3	5357.0	7968.8
	s	1074.8	666.0	1653.5	1969.4	992.6	605.1	1308.0	1867.0

$\bar{x}$ é a média. md é a mediana. s é o desvio padrão.

Fonte: Autor (2023).

Tabela 29 - Testes de normalidade e homogeneidade de variâncias para os tratamentos no cenário G

	Teste de Shapiro-Wilk por tratamento								Teste de Levene
	1	2	3	4	5	6	7	8	
Fill Rate Ponderado - Distribuidor	0.499	0.230	0.041*	0.004*	0.067	0.299	<0.001*	<0.001*	<0.001*
Fill Rate Ponderado - AF	<0.001*	0.586	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*
TVD Médio - Distribuidor	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*
TVD Médio - AF	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	0.592
Estoque Médio - Distribuidor	0.839	0.194	0.006*	0.056	0.121	0.614	0.006*	<0.001*	<0.001*
Estoque Médio - AF	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*
IVD Médio - Distribuidor	<0.001*	0.810	<0.001*	<0.001*	<0.001*	0.813	<0.001*	<0.001*	<0.001*
IVD Médio - AF	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*
Média do Fill Rate Ponderado	<0.001*	0.915	<0.001*	<0.001*	<0.001*	0.549	<0.001*	<0.001*	<0.001*
Somatório do TVD Médio	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*
Somatório do Estoque Médio	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*
Somatório do IVD Médio	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	0.002*	<0.001*	<0.001*	<0.001*

*Estatisticamente significativa ao nível de 5%

Fonte: Autor (2023).

Tabela 30 - Testes de Friedman para o cenário G

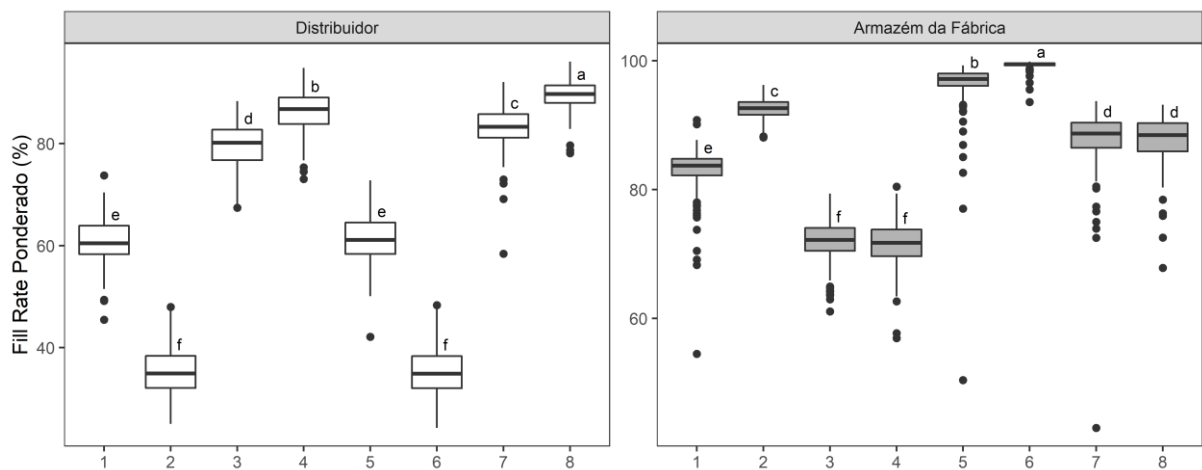
	Fill Rate Ponderado	TVD Médio	Estoque Médio	IVD Médio
Distribuidor	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*
Armazém da Fábrica	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*
	Média do Fill Rate Ponderado	Somatório do TVD Médio	Somatório do Estoque Médio	Somatório do IVD Médio
Dois estágios da Cadeia de Suprimentos	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*

*Estatisticamente significativa ao nível de 5%

Fonte: Autor (2023).

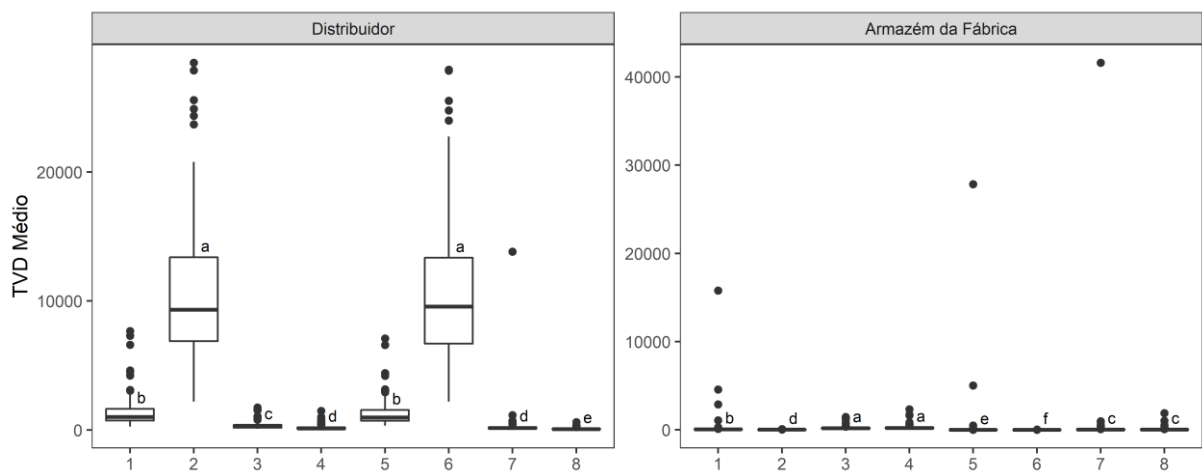
Diferentemente do cenário F, a Figura 65 mostra que o teste post-hoc de Nemenyi apontou que os tratamentos 3, 4, 7 e 8 apresentam diferenças significativas a um nível de 5% para FRP (distribuidor). Além disso, percebeu-se que o AF obteve os melhores desempenhos de FRP e TVD Médio (ver Figura 66) no tratamento 6 que, em compensação, foi o tratamento com o pior desempenho para o distribuidor, junto ao tratamento 2. Por isso foi mencionado no subcapítulo 8.2 que as análises foram feitas, principalmente, à luz do distribuidor, pois o melhor desempenho do AF não justifica o pior desempenho do distribuidor e distorce o foco para o atendimento do cliente final da cadeia.

Figura 65 - Desempenho do distribuidor e do AF para FRP no cenário G



Fonte: Autor (2023).

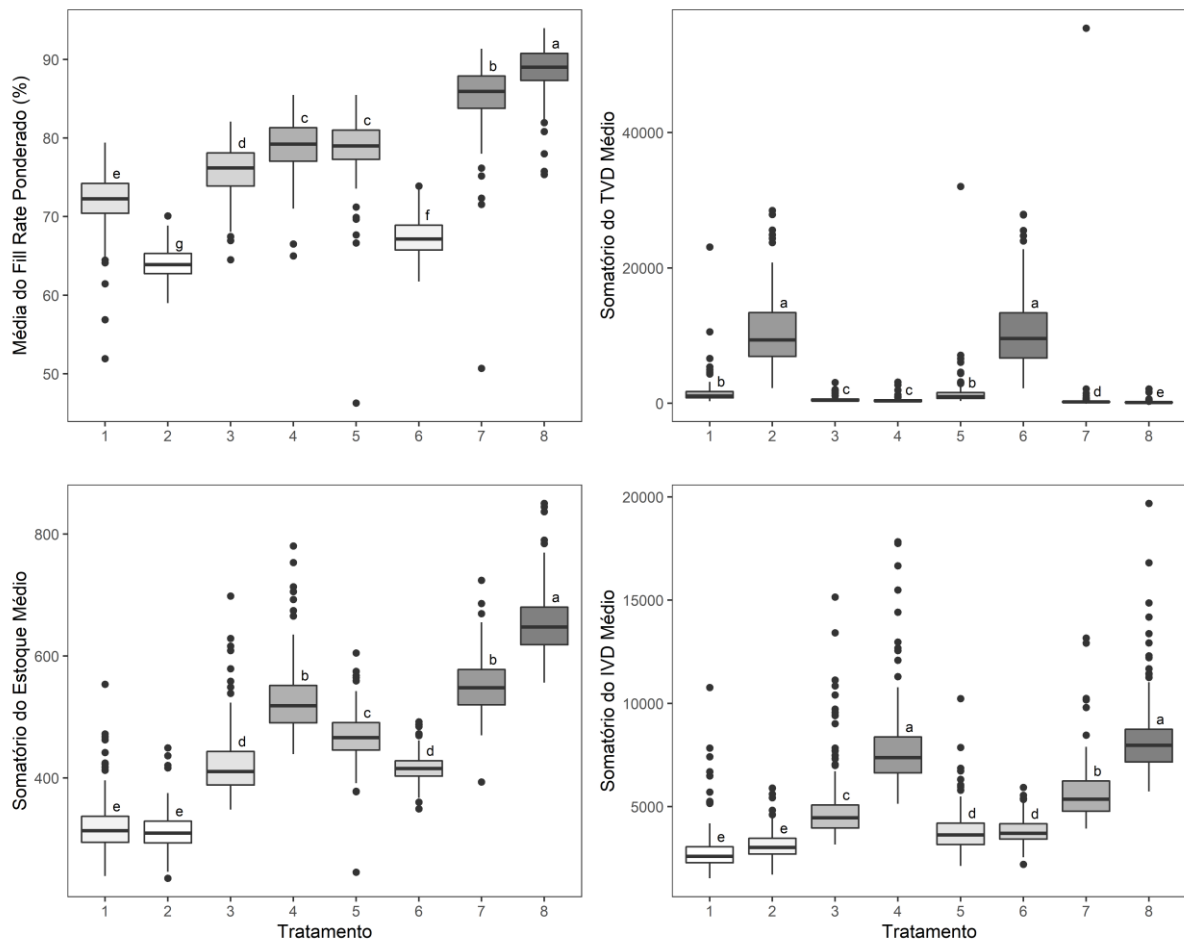
Figura 66 - Desempenho do distribuidor e do AF para TVD Médio no cenário G



Fonte: Autor (2023).

A Figura 67 mostra que, via de regra, tratamentos que proporcionam níveis de serviço elevados demandam maiores níveis de estoque na cadeia de suprimentos. Assim, vale destacar que a diferença de 3%, aproximadamente, entre as médias de FRP (distribuidor) dos tratamentos 8 e 4 implica em um aumento de, aproximadamente, 24% no nível de estoque médio mantido na cadeia de suprimentos para o tratamento 8.

Figura 67 - Desempenho dos dois estágios da cadeia de suprimentos no cenário G



Fonte: Autor (2023).

8.3 PROPOSTA DE INTEGRAÇÃO DE IA AO DBM

Após a análise estatística dos resultados, identificou-se que alguns tratamentos apresentaram desempenhos inferiores em relação aos demais, principalmente, nos cenários com alta variabilidade de demanda (cenários C, E e G) ou nos cenários que apresentam variações no comportamento médio da demanda (cenários F e G).

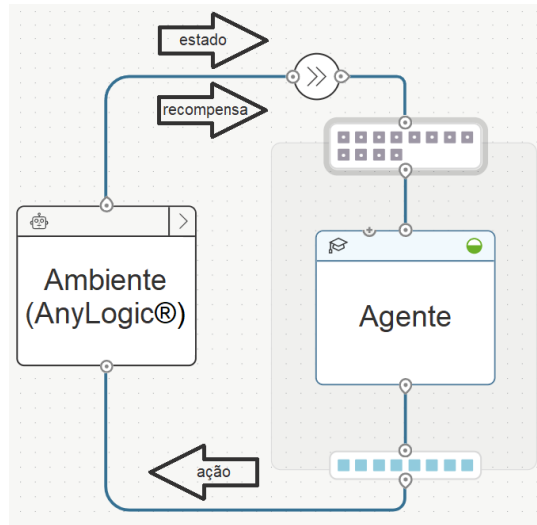
Os cenários C e G foram selecionados para receber um novo tratamento, cada um, que integra um modelo de IA ao método DBM. Esses cenários foram selecionados por apresentarem alta variabilidade e utilização média do CCR de acordo com o limite máximo de 80% da carga planejada recomendado pela literatura da Teoria das Restrições (*Theory of Constraints – TOC*) (SOUZA; PIRES, 2014; SCHRAGENHEIM, E., 2010b; SCHRAGENHEIM; DETTMER; PATTERSON, 2009). Ambos se diferem apenas em relação ao comportamento da demanda, sendo o cenário C caracterizado por manter as médias das demandas constantes durante as simulações e o cenário G representado por demandas com comportamentos sazonais.

Assim, o modelo computacional desenvolvido no *software* AnyLogic® foi exportado para uma plataforma da Microsoft Azure de desenvolvimento de IA denominada Project Bonsai. Essa plataforma foi escolhida por ser uma das únicas capazes de gerar um ambiente de treinamento por aprendizado por reforço (*reinforcement learning – RL*) para modelos de simulação desenvolvidos no AnyLogic® (MICROSOFT, 2022).

A técnica de RL visa ensinar ou treinar um agente de IA a como se comportar em um ambiente específico com objetivos definidos e que tenha um conjunto determinado de restrições (LI et al., 2023; OROOJLOOY; HAJINEZHAD, 2023; KANSO; PATRA, 2022; MICROSOFT, 2022). Sendo assim, foi necessário treinar um modelo de IA (denominado *brain* pela plataforma Project Bonsai) para cada cenário por conta de suas especificidades.

Durante os treinamentos, os agentes de IA interagiram com o ambiente de simulação do AnyLogic® por mais de 160.000 iterações, recebendo um estado no início de cada corrida de simulação (os seis parâmetros α e os seis parâmetros β das distribuições das demandas do distribuidor) e devolvendo uma ação para o ambiente do AnyLogic® (os quatro parâmetros do DBM para o distribuidor e os quatro parâmetros do DBM para o AF). Para cada ação executada pelos agentes, eles receberam uma recompensa. Assim, a técnica de RL tem como objetivo encontrar uma política (combinação de parâmetros do DBM, no caso desta pesquisa) que maximize as recompensas acumuladas por suas ações (LI et al., 2023). Ou seja, o modelo computacional foi treinado para, se possível, identificar parâmetros mais adequados para o método DBM nos cenários C e G. A Figura 68 mostra o *framework* de aprendizagem da técnica de RL com os sentidos dos fluxos de estado, ação e recompensa do algoritmo (MICROSOFT, 2022).

Figura 68 - Estrutura de aprendizagem da técnica de RL



Fonte: Autor (2023).

As recompensas dos agentes foram definidas como valores negativos em função da média do *fill rate* ponderado e do somatório do estoque médio, tendo a média do *fill rate* ponderado uma importância relativa quatro vezes maior que a do somatório do estoque médio para o cálculo das recompensas. Foram adotados valores negativos para que a recompensa máxima fosse zero, mas, na prática, uma recompensa igual a zero seria impossível de ser alcançada, pois significaria que as demandas de cada um dos seis produtos nos dois estágios da cadeia de suprimentos seriam atendidas imediatamente com estoques médios iguais a zero. No entanto, os agentes foram treinados para encontrar parâmetros do DBM para o distribuidor e para o AF que tenham recompensas próximas de zero.

Ao executar as ações, os agentes poderiam escolher valores para os quatro parâmetros do DBM do distribuidor e do AF dentro de intervalos predefinidos, conforme o Quadro 11.

Quadro 11 - Intervalos de parâmetros do DBM para os treinamentos da IA

Estágio	Parâmetro	Mínimo	Máximo	Passo
Distribuidor	Gatilho TMG	0.5	3.0	0.5
	Gatilho TMR	0 (INV)	3.0	0.5
	Ajuste TMG	5	50	5
	Ajuste TMR	5	50	5
Armazém da Fábrica	Gatilho TMG	0.5	3.0	0.5
	Gatilho TMR	0 (INV)	3.0	0.5
	Ajuste TMG	5	50	5
	Ajuste TMR	5	50	5

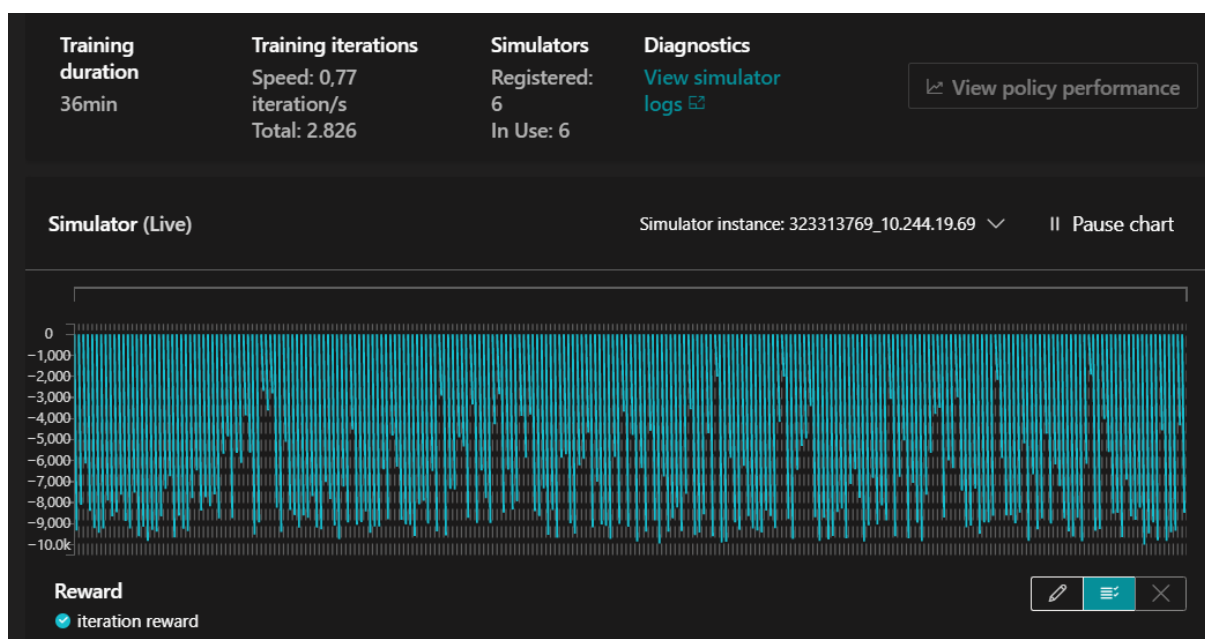
Fonte: Autor (2023).

O gatilho para TMG poderia ser parametrizado de 0,5 período de reposição até 3 períodos de reposição completos dentro da região verde do pulmão, com passo de 0,5 período de reposição. Além de poder ser parametrizado da mesma forma que o gatilho para TMG, o gatilho para TMR poderia receber o parâmetro “0” que, nesse caso, indicaria que os gatilhos do DBM para TMR aconteceriam pela soma das invasões na região vermelha do pulmão durante um período de reposição.

Em relação aos parâmetros de ajuste para TMG e TMR, os agentes poderiam selecionar valores de 5% a 50% com intervalos de 5%. Vale dizer que, uma vez executada uma ação por um agente, os seis produtos do distribuidor recebiam os mesmos parâmetros do DBM, bem como os seis produtos do AF.

As Figuras 69 e 70 mostram os gráficos com as recompensas do agente após 36 minutos de treinamento e após 4 dias e 6 horas, respectivamente, no cenário C. Notou-se que as recompensas das iterações aumentaram (se aproximaram de zero) depois de um período maior de treinamento.

Figura 69 - Recompensas do agente do cenário C após 36 minutos de treinamento

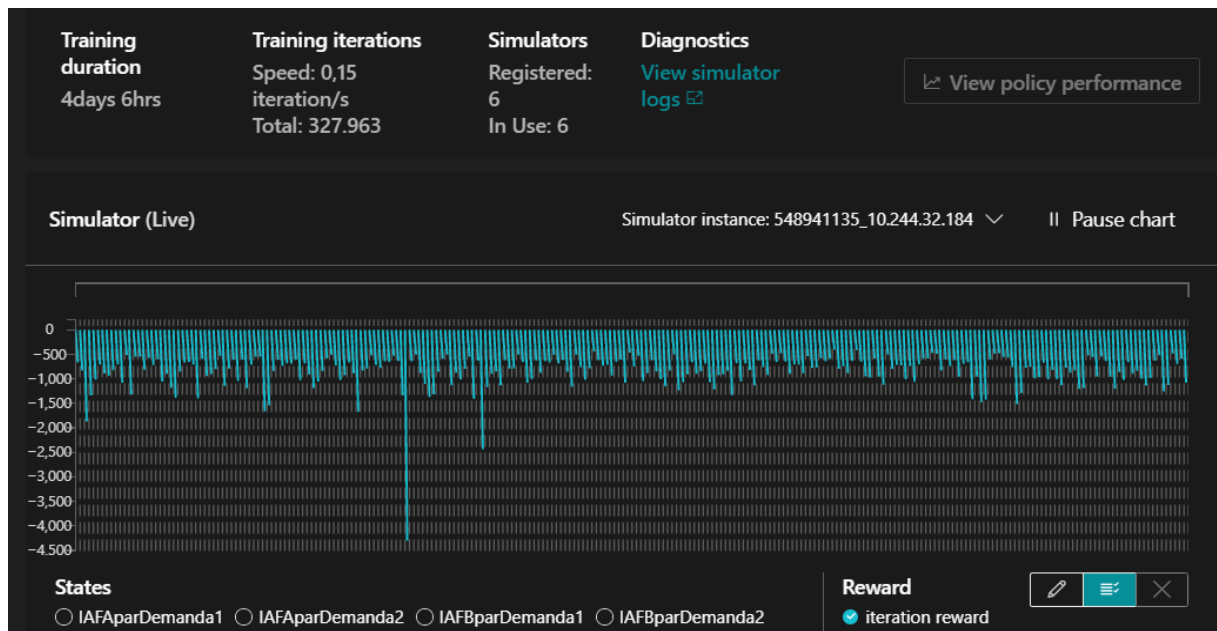


Fonte: Autor (2023).

A Figura 71 mostra a curva de aprendizagem do agente do cenário C após 168.000 iterações e a Figura 72 mostra a curva de aprendizagem do agente do cenário G após 162.000 iterações. Os treinamentos foram realizados com essas quantidades de iterações por causa de limitações relacionadas a custos de uso de instâncias por

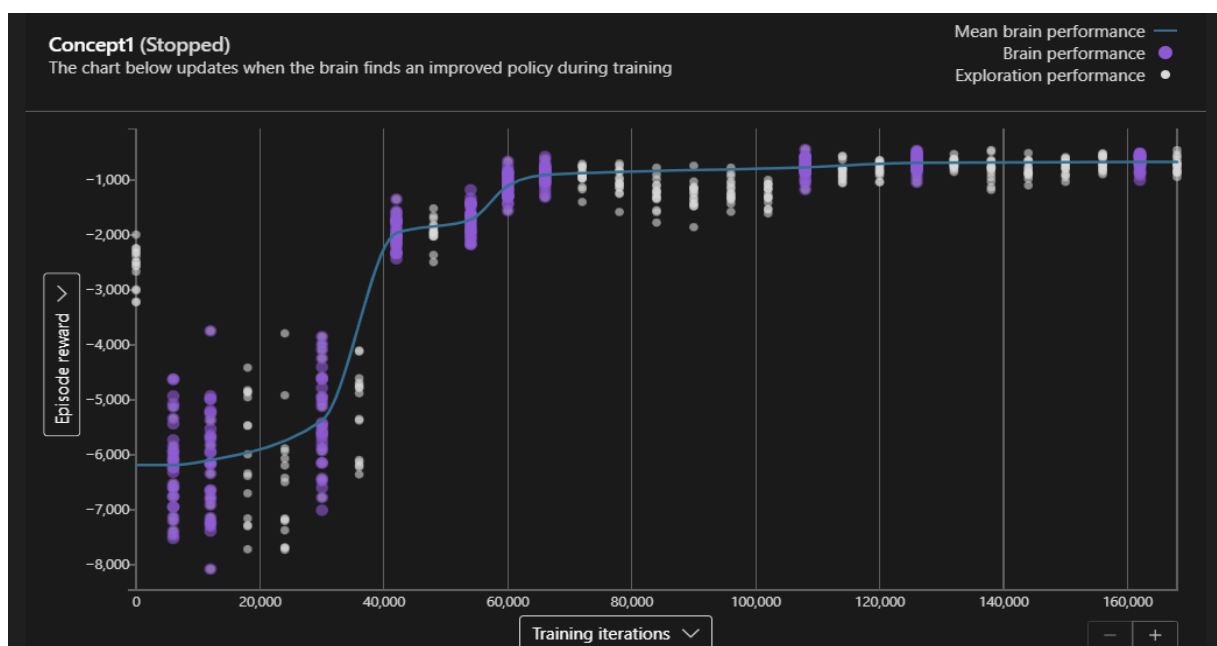
hora e da quantidade máxima de instâncias (6) que poderiam ser utilizadas, simultaneamente, para uma conta de estudante na plataforma Microsoft Azure. Contudo, verificou-se pelos comportamentos das curvas que os aprendizados já haviam alcançado estados estacionários e que demandariam um número grande de iterações para identificarem políticas com maiores recompensas.

Figura 70 - Recompensas do agente do cenário C após 4 dias e 6 horas de treinamento



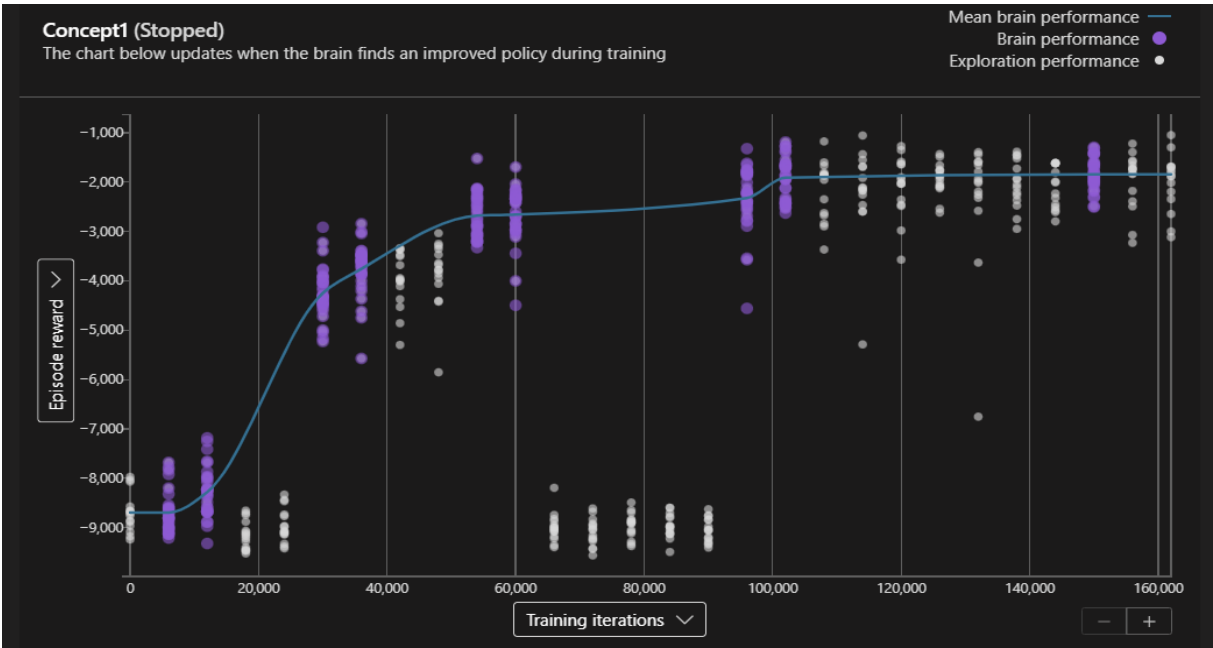
Fonte: Autor (2023).

Figura 71 - Curva de aprendizagem do agente do cenário C após 168.000 iterações



Fonte: Autor (2023).

Figura 72 - Curva de aprendizagem do agente do cenário G após 162.000 iterações



Fonte: Autor (2023).

Após as paradas dos treinamentos, os agentes treinados deram origem a modelos de IA (*brains*), que foram importados no *software* AnyLogic® como novos tratamentos para os cenários C e G, denominados DBM+RL. Justifica-se a escolha desse nome, pois esses tratamentos utilizam os algoritmos do DBM com parâmetros calibrados por uma IA que aprendeu a lidar com esses dois cenários. O Quadro 12 apresenta os parâmetros do DBM do distribuidor e do AF selecionados pelos modelos de IA para os tratamentos DBM+RL nos cenários C e G.

Quadro 12 - Parâmetros do DBM para os tratamentos DBM+RL

Estágio	Parâmetro	Cenário C	Cenário G
Distribuidor	Gatilho TMG	2.5	2.0
	Gatilho TMR	1.0	0.5
	Ajuste TMG	10	25
	Ajuste TMR	30	35
Armazém da Fábrica	Gatilho TMG	2.5	2.0
	Gatilho TMR	0 (INV)	0 (INV)
	Ajuste TMG	5	25
	Ajuste TMR	35	35

Fonte: Autor (2023).

Duas novas rodadas de simulação foram realizadas para os tratamentos DBM+RL nos cenários C e G e, portanto, foram necessárias novas análises

estatísticas. Novamente, para todas as medidas de desempenho, pelo menos um tratamento foi significativo para o teste de normalidade de Shapiro-Wilk ou os testes de homogeneidade de variâncias foram significantes (ver Tabela 32 para o cenário C e Tabela 36 para o cenário G). Logo, o teste de Friedman foi utilizado em todas as análises seguido de testes post-hoc (ver Tabela 33 para o cenário C e Tabela 37 para o cenário G). A diferença em relação às análises desenvolvidas no subcapítulo 8.2 é que os testes post-hoc de Nemenyi com correção de Bonferroni não foram mais realizados para comparar pares de tratamentos, mas, sim, comparar os oito tratamentos do DBM tradicional com os tratamentos DBM+RL nos cenários C e G.

As Tabelas 34 e 38 mostram os valores-p dos testes post-hoc de Nemenyi para os cenários C e G, respectivamente, e os *boxplots* dos subcapítulos 8.3.1 e 8.3.2 destacam as diferenças significativas entre os tratamentos do DBM tradicional e o tratamento DBM+RL com uma letra “s” localizada acima do terceiro quartil de cada caixa do diagrama. Vale ressaltar que as tabelas mencionadas neste parágrafo e no anterior foram inseridas nos subcapítulos correspondentes aos resultados de cada cenário para manter a organização estrutural deste trabalho, mas elas não são mencionadas novamente para evitar repetições ao longo do texto.

8.3.1 Resultados e análises estatísticas do cenário C com o tratamento DBM+RL

A Tabela 31 traz as medidas descritivas do cenário C com a inclusão do tratamento DBM+RL. Observou-se que a média e mediana de FRP (distribuidor) do tratamento DBM+RL são ligeiramente superiores que as do tratamento 8, e que a média e mediana de TVD Médio (distribuidor) são menores. No entanto, as Figuras 73 e 74 apontam que não há uma diferença significativa entre esses dois tratamentos para essas medidas. Logo, não há evidências suficientes de que o tratamento que contém o modelo treinado por IA tenha melhorado o nível de serviço para o cliente final em relação a um tratamento com combinações de regras tradicionais do DBM.

Sob o ponto de vista do AF, constatou-se pelas Figuras 73 e 74, que o tratamento DBM+RL superou, significativamente, os demais. Portanto, com base na Figura 75, infere-se que a IA buscou formas de elevar o desempenho médio da cadeia de suprimentos para essas duas medidas.

Em relação às medidas somatório de EM e somatório de IVD, notou-se aumentos das médias e medianas de, aproximadamente, 41% e 20%, respectivamente, ao comparar o tratamento DBM+RL com o tratamento 8. Contudo, ao analisar, individualmente, o distribuidor, observa-se que os níveis de EM e IVD Médio são inferiores para o tratamento DBM+RL, se comparado com o tratamento 8.

Tabela 31 - Resumo dos resultados do cenário C com o tratamento DBM+RL

		Tratamento								DBM+RL
		1	2	3	4	5	6	7	8	
Fill Rate Ponderado (Distribuidor)	$\bar{x}$	72.9	86.9	84.2	92.6	73.1	87.8	87.7	94.8	95.8
	md	73.3	86.9	84.5	92.9	73.2	88.0	88.3	95.0	96.1
	s	3.8	4.1	3.2	2.6	3.6	3.9	2.5	1.7	1.5
Fill Rate Ponderado (AF)	$\bar{x}$	77.7	76.9	66.6	65.6	97.7	96.3	91.7	90.7	99.8
	md	78.0	77.1	66.7	65.9	97.8	96.4	91.8	91.0	99.9
	s	2.3	2.2	2.7	2.8	0.8	0.9	1.6	1.8	0.2
TVD Médio (Distribuidor)	$\bar{x}$	687.3	209.2	306.9	120.1	648.3	169.7	152.6	47.1	33.9
	md	583.6	174.5	236.8	88.5	566.8	140.2	127.1	41.2	27.7
	s	382.7	155.8	201.0	104.7	337.1	126.5	89.8	27.1	23.3
TVD Médio (AF)	$\bar{x}$	136.7	155.1	352.8	502.1	6.2	10.1	27.0	33.9	0.4
	md	128.3	144.3	337.9	479.8	5.7	9.7	24.9	30.3	0.2
	s	47.5	49.1	113.5	167.7	2.7	3.2	11.4	18.6	0.6
Estoque Médio (Distribuidor)	$\bar{x}$	246.3	369.8	387.6	566.6	241.9	370.8	403.5	565.4	529.8
	md	245.0	366.2	388.0	565.9	242.3	370.2	404.3	566.6	528.8
	s	18.5	42.0	23.7	31.5	17.8	42.9	21.4	30.9	37.2
Estoque Médio (AF)	$\bar{x}$	154.1	137.2	152.2	141.3	362.0	315.5	340.0	322.3	721.4
	md	153.2	137.2	149.9	139.1	361.6	314.7	338.2	322.2	719.9
	s	12.3	8.5	12.9	12.9	21.8	16.3	20.0	17.0	65.4
IVD Médio (Distribuidor)	$\bar{x}$	2364.3	3974.5	4670.5	8201.3	2288.0	3943.1	4804.3	7876.1	6693.8
	md	2339.7	3922.5	4641.4	8096.1	2285.6	3928.0	4805.8	7826.2	6609.7
	s	279.3	599.2	467.2	775.7	256.7	589.4	428.4	680.0	805.4
IVD Médio (AF)	$\bar{x}$	502.3	353.2	614.2	485.7	1535.9	1097.3	1622.0	1371.4	4397.4
	md	482.9	348.8	589.4	451.5	1512.8	1089.3	1589.7	1350.5	4332.3
	s	95.9	35.3	119.6	128.1	203.7	94.0	200.4	164.5	840.1
Média do Fill Rate Ponderado	$\bar{x}$	75.3	81.9	75.4	79.1	85.4	92.1	89.7	92.8	97.8
	md	75.4	82.0	75.5	79.1	85.4	92.1	89.9	92.9	98.0
	s	2.3	2.2	2.5	2.3	1.9	1.9	1.8	1.5	0.8
Somatório do TVD Médio	$\bar{x}$	824.0	364.3	659.7	622.2	654.5	179.8	179.6	81.0	34.3
	md	730.1	317.4	608.1	593.7	573.4	150.3	155.8	74.1	28.2
	s	390.4	171.3	258.9	238.5	337.2	126.4	95.9	38.5	23.6
Somatório do Estoque Médio	$\bar{x}$	400.4	507.0	539.8	707.9	604.0	686.3	743.6	887.7	1251.2
	md	398.4	507.4	537.9	708.3	604.1	688.4	742.5	887.7	1248.2
	s	23.5	42.7	31.2	38.7	31.6	45.4	37.0	43.1	89.9
Somatório do IVD Médio	$\bar{x}$	2866.6	4327.7	5284.7	8687.0	3823.9	5040.4	6426.3	9247.5	11091.2
	md	2839.5	4270.7	5257.2	8581.0	3803.2	5044.2	6414.4	9123.1	10843.9
	s	325.1	603.8	530.8	840.0	395.5	596.9	583.2	787.4	1431.5

$\bar{x}$ é a média. md é a mediana. s é o desvio padrão.

Fonte: Autor (2023).

Tabela 32 - Testes de normalidade e homogeneidade de variâncias para o cenário C com o tratamento DBM+RL

	Teste de Shapiro-Wilk por tratamento								DBM+RL	Teste de Levene
	1	2	3	4	5	6	7	8		
Fill Rate Ponderado - Distribuidor	0.006*	0.053	0.093	0.005*	0.016*	0.354	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*
Fill Rate Ponderado - AF	0.028*	0.058	0.085	0.662	<0.001*	0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*
TVD Médio - Distribuidor	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*
TVD Médio - AF	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*
Estoque Médio - Distribuidor	0.904	0.397	0.925	0.212	0.313	0.329	0.237	0.350	0.599	<0.001*
Estoque Médio - AF	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	0.032*	0.307	<0.001*	0.913	<0.001*	<0.001*
IVD Médio - Distribuidor	0.296	0.193	0.037*	<0.001*	0.484	0.351	0.184	0.012*	0.036*	<0.001*
IVD Médio - AF	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	0.004*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*
Média do Fill Rate Ponderado	0.012*	0.213	0.497	0.482	0.006*	0.741	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*
Somatório do TVD Médio	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*
Somatório do Estoque Médio	0.210	0.679	0.361	0.007*	0.396	0.524	0.136	0.864	<0.001*	<0.001*
Somatório do IVD Médio	0.109	0.180	0.012*	<0.001*	0.066	0.519	0.020*	0.008*	<0.001*	<0.001*

*Estatisticamente significativo ao nível de 5%

Fonte: Autor (2023).

Tabela 33 - Testes de Friedman para o cenário C com o tratamento DBM+RL

	Fill Rate Ponderado	TVD Médio	Estoque Médio	IVD Médio
Distribuidor	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*
Armazém da Fábrica	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*
	Média do Fill Rate Ponderado	Somatório do TVD Médio	Somatório do Estoque Médio	Somatório do IVD Médio
Dois estágios da Cadeia de Suprimentos	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*

*Estatisticamente significativo ao nível de 5%

Fonte: Autor (2023).

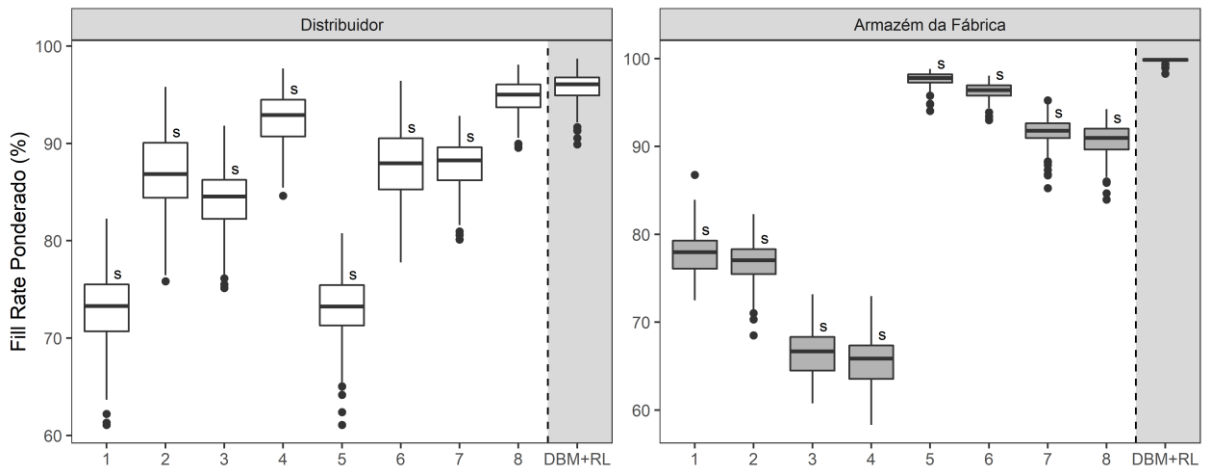
Tabela 34 - Testes post-hoc de Nemenyi para o cenário C com o tratamento DBM+RL

		Fill Rate Ponderado	TVD Médio	Estoque Médio	IVD Médio
Distribuidor	1 - DBM+RL	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*
	2 - DBM+RL	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*
	3 - DBM+RL	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*
	4 - DBM+RL	<0.001*	<0.001*	0.013*	<0.001*
	5 - DBM+RL	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*
	6 - DBM+RL	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*
	7 - DBM+RL	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*
	8 - DBM+RL	0.250	0.420	0.012*	<0.001*
		Fill Rate Ponderado	TVD Médio	Estoque Médio	IVD Médio
Armazém da Fábrica	1 - DBM+RL	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*
	2 - DBM+RL	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*
	3 - DBM+RL	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*
	4 - DBM+RL	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*
	5 - DBM+RL	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*
	6 - DBM+RL	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*
	7 - DBM+RL	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*
	8 - DBM+RL	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*
		Média do Fill Rate Ponderado	Somatório do TVD Médio	Somatório do Estoque Médio	Somatório do IVD Médio
Dois estágios da Cadeia de Suprimentos	1 - DBM+RL	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*
	2 - DBM+RL	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*
	3 - DBM+RL	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*
	4 - DBM+RL	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*
	5 - DBM+RL	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*
	6 - DBM+RL	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*
	7 - DBM+RL	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*
	8 - DBM+RL	<0.001*	<0.001*	0.002*	0.003*

*Estatisticamente significativa ao nível de 5%

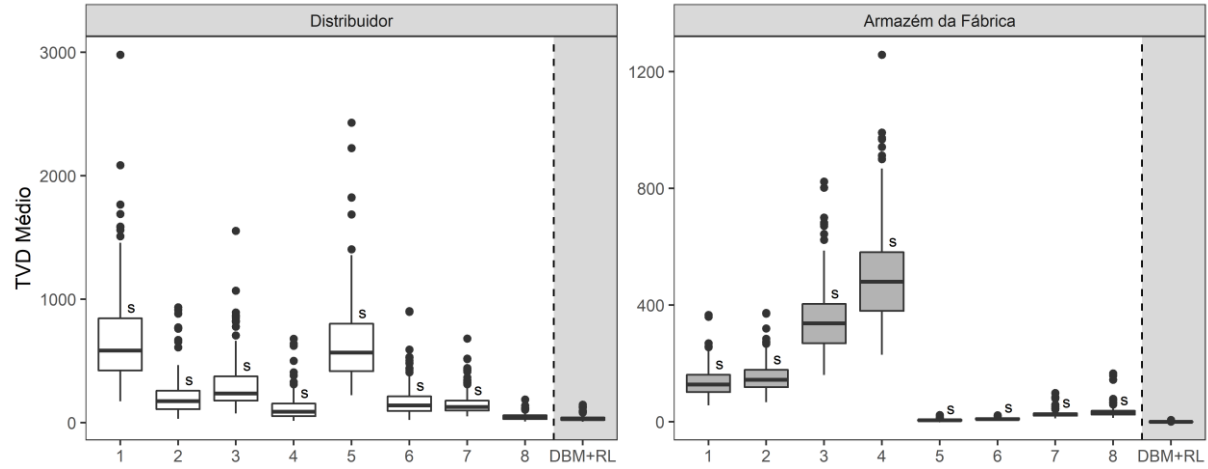
Fonte: Autor (2023).

Figura 73 - Desempenho do distribuidor e do AF para FRP no cenário C com o tratamento DBM+RL



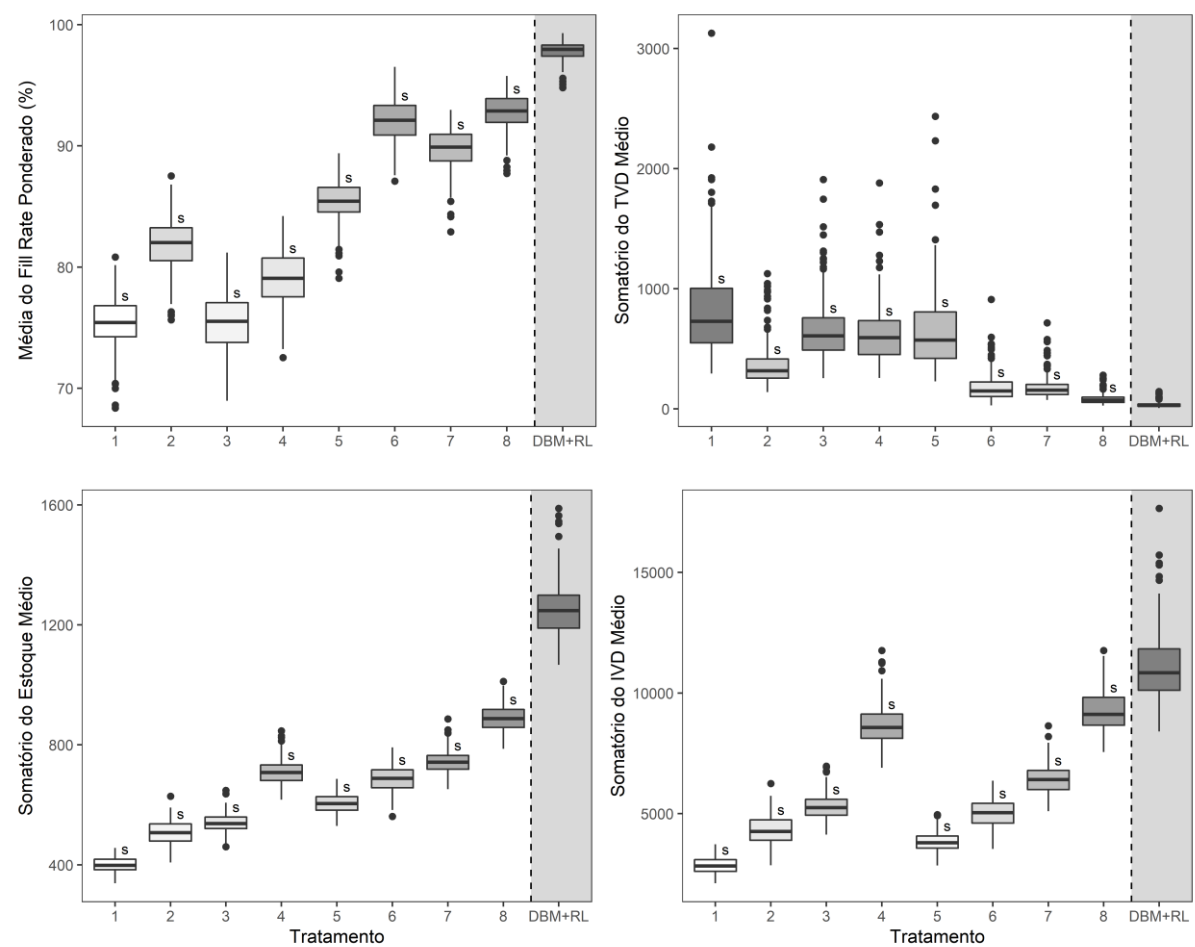
Fonte: Autor (2023).

Figura 74 - Desempenho do distribuidor e do AF para TVD Médio no cenário C com o tratamento DBM+RL



Fonte: Autor (2023).

Figura 75 - Desempenho dos dois estágios da cadeia de suprimentos no cenário C com o tratamento DBM+RL



Fonte: Autor (2023).

8.3.2 Resultados e análises estatísticas do cenário G com o tratamento DBM+RL

A Tabela 35 mostra as medidas descritivas do cenário G com a inclusão do tratamento DBM+RL

Tabela 35 - Resumo dos resultados do cenário G com o tratamento DBM+RL

		Tratamento								DBM+RL
		1	2	3	4	5	6	7	8	
Fill Rate Ponderado (Distribuidor)	$\bar{x}$	60.9	35.3	79.7	86.3	61.3	35.4	83.2	89.4	89.3
	md	60.5	35.0	80.2	86.8	61.1	34.9	83.3	89.7	89.8
	s	4.5	4.6	4.2	3.9	4.5	4.6	4.0	3.1	3.2
Fill Rate Ponderado (AF)	$\bar{x}$	83.0	92.6	72.0	71.6	96.4	99.3	87.8	87.9	92.3
	md	83.7	92.7	72.2	71.8	97.2	99.4	88.7	88.5	93.4
	s	3.6	1.5	3.2	3.4	4.2	0.6	4.7	3.7	4.4
TVD Médio (Distribuidor)	$\bar{x}$	1340.7	10493.1	331.5	177.8	1266.0	10520.7	261.8	96.0	106.1
	md	1006.3	9328.9	263.4	128.0	973.1	9574.7	163.8	77.5	80.4
	s	1060.5	5120.4	248.3	169.2	929.7	5137.8	973.0	70.7	136.8
TVD Médio (AF)	$\bar{x}$	185.1	23.0	221.3	269.4	176.4	1.3	264.0	62.5	147.7
	md	57.6	20.4	175.8	216.8	6.0	0.9	32.5	33.0	17.0
	s	1172.6	10.4	174.8	234.1	1998.0	2.4	2940.3	157.0	1054.6
Estoque Médio (Distribuidor)	$\bar{x}$	171.0	151.8	281.9	394.0	171.5	152.8	291.6	400.1	421.6
	md	170.3	152.5	279.4	391.6	171.7	153.8	289.1	399.3	418.1
	s	13.0	11.6	23.2	28.4	13.9	11.6	20.1	29.7	31.7
Estoque Médio (AF)	$\bar{x}$	149.3	160.5	139.9	131.9	296.9	263.9	258.9	253.0	287.3
	md	142.5	155.9	129.5	122.7	294.3	262.9	254.9	247.4	272.6
	s	34.2	24.3	35.1	32.1	31.4	15.3	28.4	26.4	52.6
IVD Médio (Distribuidor)	$\bar{x}$	2074.8	2519.7	4037.3	7054.6	2070.2	2542.1	4055.0	6859.0	7626.1
	md	2006.0	2497.9	3803.8	6854.6	1990.3	2516.5	3913.3	6652.3	7295.7
	s	438.2	386.4	928.2	1381.0	456.6	383.0	786.3	1321.3	1563.6
IVD Médio (AF)	$\bar{x}$	774.7	628.4	842.5	701.4	1745.5	1261.3	1572.7	1424.2	1922.8
	md	558.6	516.0	574.9	463.6	1568.9	1201.4	1397.4	1222.8	1413.9
	s	769.5	373.3	852.4	728.2	632.1	280.7	647.7	663.9	1365.3
Média do Fill Rate Ponderado	$\bar{x}$	72.0	63.9	75.8	78.9	78.9	67.4	85.5	88.6	90.8
	md	72.3	63.9	76.2	79.2	79.0	67.2	85.9	89.0	91.6
	s	3.3	2.0	3.2	3.1	3.7	2.4	4.0	3.0	3.5
Somatório do TVD Médio	$\bar{x}$	1525.9	10516.0	552.8	447.2	1442.4	10522.0	525.8	158.5	253.8
	md	1072.8	9360.2	456.5	357.7	981.8	9575.5	211.9	115.9	98.9
	s	1899.5	5118.1	361.5	343.1	2382.9	5138.2	3908.4	198.5	1171.9
Somatório do Estoque Médio	$\bar{x}$	320.3	312.3	421.8	525.9	468.4	416.7	550.5	653.1	708.9
	md	313.5	309.7	410.5	518.4	466.2	415.6	547.9	647.5	697.9
	s	41.0	30.3	52.0	54.0	39.4	22.6	42.7	51.2	76.3
Somatório do IVD Médio	$\bar{x}$	2849.5	3148.1	4879.8	7756.0	3815.7	3803.4	5627.7	8283.2	9548.9
	md	2592.6	3023.6	4456.5	7374.8	3628.5	3712.3	5357.0	7968.8	8873.9
	s	1074.8	666.0	1653.5	1969.4	992.6	605.1	1308.0	1867.0	2732.5

$\bar{x}$ é a média. md é a mediana. s é o desvio padrão.

Fonte: Autor (2023).

Da mesma forma que no subcapítulo anterior, o tratamento DBM+RL não apresentou diferenças significantes em relação ao tratamento 8 para o atendimento da demanda pelo distribuidor (ver Tabela 35, Figura 76 e Figura 77).

Ainda, verificou-se por meio da Figura 78 que, novamente, a IA identificou uma política para elevar o desempenho médio da cadeia de suprimentos para essas duas medidas e que isso foi feito a partir de um aumento no nível de serviço do AF. Por outro lado, percebeu-se que esse aumento no nível de serviço médio da cadeia de suprimentos foi sustentado por valores maiores de EM e IVD Médio no distribuidor e no AF. Sendo assim, o tratamento 8, com regras tradicionais do DBM, foi capaz de garantir o mesmo nível de serviço que o tratamento treinado por uma IA mantendo níveis de estoques inferiores.

Tabela 36 - Testes de normalidade e homogeneidade de variâncias para o cenário G com o tratamento DBM+RL

	Teste de Shapiro-Wilk por tratamento								DBM+RL	Teste de Levene
	1	2	3	4	5	6	7	8		
Fill Rate Ponderado - Distribuidor	0.499	0.230	0.041*	0.004*	0.067	0.299	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*
Fill Rate Ponderado - AF	<0.001*	0.586	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*
TVD Médio - Distribuidor	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*
TVD Médio - AF	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	0.652
Estoque Médio - Distribuidor	0.839	0.194	0.006*	0.056	0.121	0.614	0.006*	<0.001*	0.044*	<0.001*
Estoque Médio - AF	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*
IVD Médio - Distribuidor	<0.001*	0.810	<0.001*	<0.001*	<0.001*	0.813	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*
IVD Médio - AF	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*
Média do Fill Rate Ponderado	<0.001*	0.915	<0.001*	<0.001*	<0.001*	0.549	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*
Somatório do TVD Médio	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*
Somatório do Estoque Médio	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*
Somatório do IVD Médio	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	0.002*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*

*Estatisticamente significativa ao nível de 5%

Fonte: Autor (2023).

Tabela 37 - Testes de Friedman para o cenário G com o tratamento DBM+RL

	Fill Rate Ponderado	TVD Médio	Estoque Médio	IVD Médio
Distribuidor	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*
Armazém da Fábrica	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*
	Média do Fill Rate Ponderado	Somatório do TVD Médio	Somatório do Estoque Médio	Somatório do IVD Médio
Dois estágios da Cadeia de Suprimentos	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*

*Estatisticamente significativa ao nível de 5%

Fonte: Autor (2023).

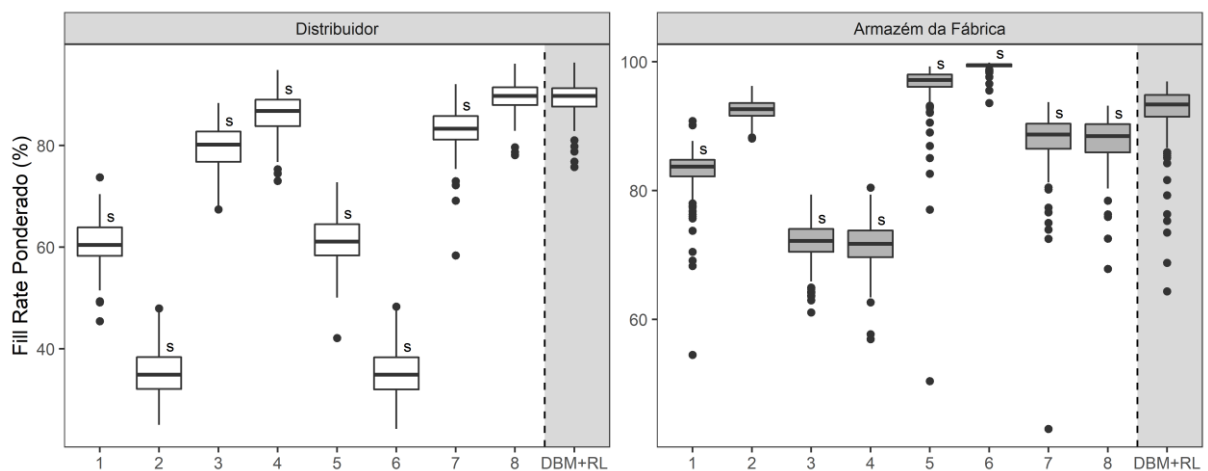
Tabela 38 - Testes post-hoc de Nemenyi para o cenário G com o tratamento DBM+RL

		Fill Rate Ponderado	TVD Médio	Estoque Médio	IVD Médio
Distribuidor	1 - DBM+RL	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*
	2 - DBM+RL	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*
	3 - DBM+RL	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*
	4 - DBM+RL	<0.001*	<0.001*	<0.001*	0.137
	5 - DBM+RL	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*
	6 - DBM+RL	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*
	7 - DBM+RL	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*
	8 - DBM+RL	1.000	1.000	0.020*	0.037*
		Fill Rate Ponderado	TVD Médio	Estoque Médio	IVD Médio
Armazém da Fábrica	1 - DBM+RL	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*
	2 - DBM+RL	0.960	0.930	<0.001*	<0.001*
	3 - DBM+RL	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*
	4 - DBM+RL	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*
	5 - DBM+RL	<0.001*	<0.001*	0.008*	0.920
	6 - DBM+RL	<0.001*	<0.001*	0.010*	<0.001*
	7 - DBM+RL	<0.001*	<0.001*	<0.001*	0.820
	8 - DBM+RL	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*
		Média do Fill Rate Ponderado	Somatório do TVD Médio	Somatório do Estoque Médio	Somatório do IVD Médio
Dois estágios da Cadeia de Suprimentos	1 - DBM+RL	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*
	2 - DBM+RL	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*
	3 - DBM+RL	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*
	4 - DBM+RL	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*
	5 - DBM+RL	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*
	6 - DBM+RL	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*
	7 - DBM+RL	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*
	8 - DBM+RL	0.005*	0.390	0.013*	0.010*

*Estatisticamente significativa ao nível de 5%

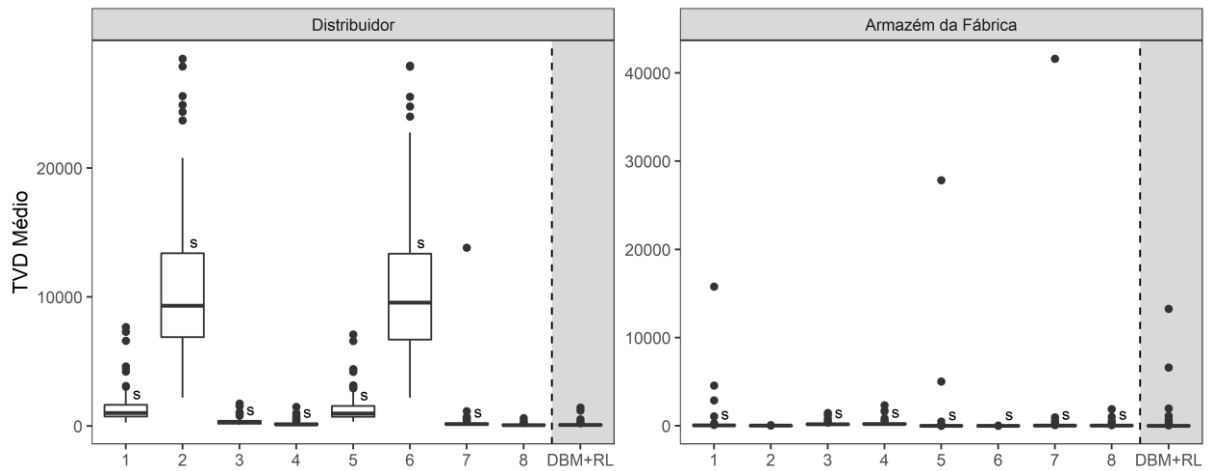
Fonte: Autor (2023).

Figura 76 - Desempenho do distribuidor e do AF para FRP no cenário G com o tratamento DBM+RL



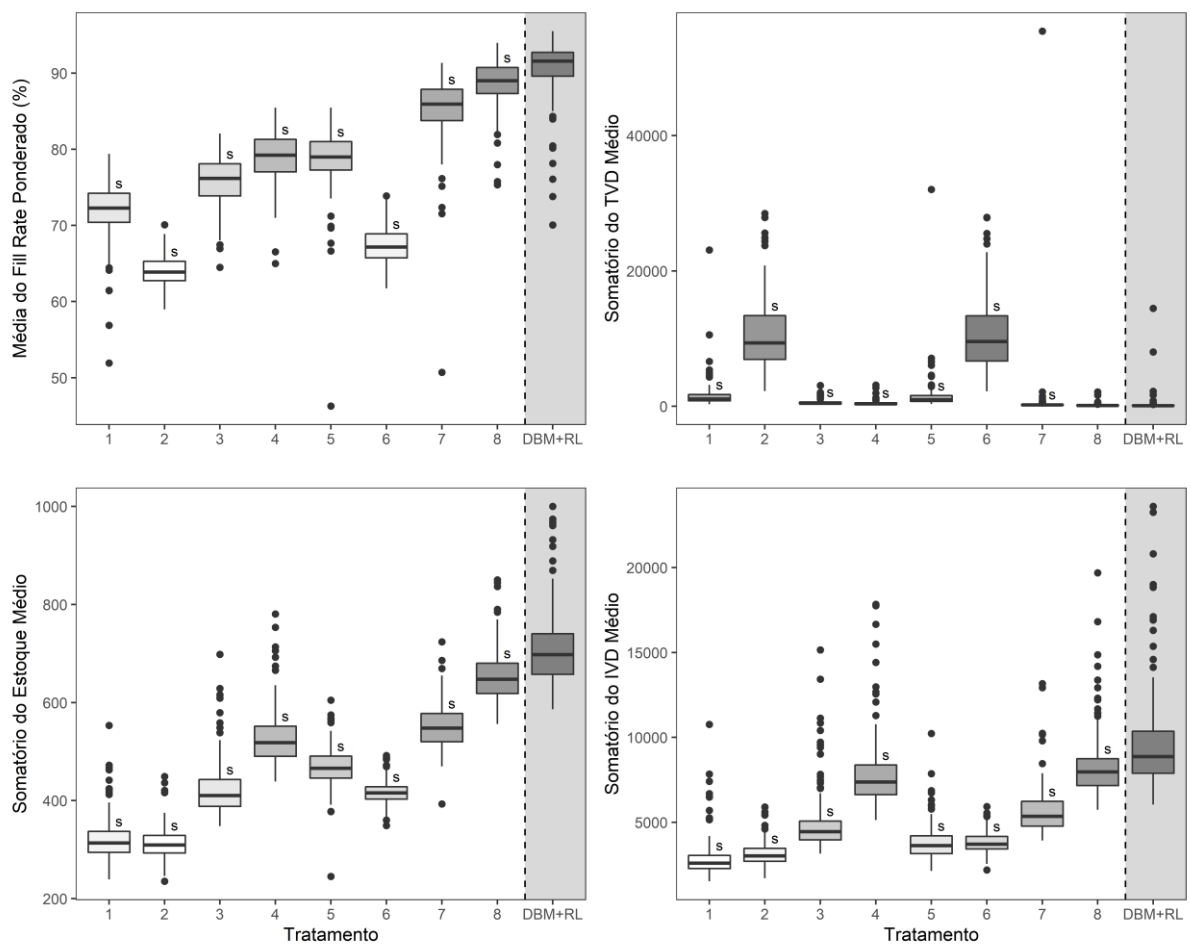
Fonte: Autor (2023).

Figura 77 - Desempenho do distribuidor e do AF para TVD Médio no cenário G com o tratamento DBM+RL



Fonte: Autor (2023).

Figura 78 - Desempenho dos dois estágios da cadeia de suprimentos no cenário G com o tratamento DBM+RL



Fonte: Autor (2023).

9 DISCUSSÕES

Neste capítulo, os resultados apresentados anteriormente são discutidos à luz dos três objetivos específicos propostos para esta pesquisa.

Assim, a partir das análises realizadas, pôde-se: (i) identificar qual ou quais combinações de parâmetros do método Gerenciamento Dinâmico do Pulmão (*Dynamic Buffer Management* – DBM) oferecem oportunidades e ameaças para a disponibilidade de produtos em parte de uma cadeia de suprimentos real em cenários específicos; (ii) compreender os motivos pelos quais determinadas combinações de parâmetros do DBM, eventualmente, possam ter apresentado baixas performances, segundo medidas de desempenho voltadas a níveis de serviço e estoque; (iii) identificar parâmetros mais adequados que os parâmetros tradicionais do DBM em cenários específicos para a realização dos ajustes dos níveis de estoques a partir da integração da técnica de aprendizado por reforço (*reinforcement learning* – RL).

Os resultados mostraram que, em cenários caracterizados por demandas médias constantes e baixa variabilidade, como os cenários A, B e D, todos os tratamentos alcançaram desempenhos próximos com elevados níveis de *fill rate* ponderado (FRP) e baixos valores de *Throughput-Value-Days* (TVD) médio, não importando se a utilização média do recurso com restrição de capacidade (*Capacity Constrained Resource* – CCR) era de 80% (cenário B) ou de 95% (cenário D). Entretanto, verificou-se variações maiores entre os desempenhos dos tratamentos para as medidas estoque médio (EM) e, consequentemente, *Inventory-Value-Days* (IVD) médio. Nesse caso, por se tratarem de cenários estáveis, uma combinação de regras do DBM que assegura uma boa taxa de atendimento do cliente final com níveis menores de estoque traz oportunidades para as empresas, por exemplo, pela diminuição de investimentos em estoques, liberando espaço e melhorando o fluxo de caixa para que elas possam ofertar uma variedade maior de produtos que representam mais oportunidades de vendas (SCHRAGENHEIM, A., 2010; SOUZA; PIRES, 2010; SCHRAGENHEIM; DETTMER; PATTERSON, 2009; GOLDRATT; GOLDRATT, 2003). O tratamento 1, composto pela aplicação da regra do DBM tradicional mais comum e citada (1-1-33-33) no distribuidor e no armazém da fábrica (AF), se destacou nesses cenários (GOLDRATT, 2008a).

Durante as análises sobre o cenário D, notou-se a presença de muitos *outliers* nas medidas somatório do EM e somatório do IVD Médio para os tratamentos 1, 2, 3

e 4, se comparados aos tratamentos 5, 6, 7 e 8 (ver Figura 58). Com base em uma análise mais detalhada, por meio das Figuras 132 e 133 do Apêndice F, identificou-se que esses valores atípicos foram gerados pelo AF. Como os tratamentos 1, 2, 3 e 4 se assemelham por possuírem a mesma regra do DBM para o AF (1-1-33-33), bem como os tratamentos 5, 6, 7 e 8 (2-INV-15-20), infere-se que a escolha de uma determinada regra para o AF pode impactar a estabilidade dos níveis de estoque da cadeia de suprimentos. Essa constatação corrobora com Schragenheim, E. (2010b) e Souza e Pires (2014), que apontam que reduções e aumentos mais modestos nos níveis-alvo (*Target Levels* – TLs) de estoques sejam mais apropriados no nível da fábrica, isto é, reduzir em 15% ou aumentar em 20% os TLs ao invés de reduzir ou aumentar os TLs em 33%. De acordo com esses autores, se a carga do CCR já estiver alta, aumentos dos TLs exigirão que ordens de produção maiores sejam geradas, elevando o tempo de reposição e ocasionando novas necessidades de aumentos dos TLs. De fato, isso foi percebido no cenário D, pois ele foi especificado com cargas que demandaram uma utilização média de 95% do CCR.

Assim, sob o ponto de vista da estabilidade dos sistemas de produção, recomenda-se o uso de regras e parâmetros que façam ajustes graduais nos TLs, principalmente em períodos de alta utilização do CCR, que pode vir a tornar-se ativo, despertando como um gargalo, caso tenha toda a sua capacidade protetiva consumida (SOUZA; PIRES, 2010).

Os pares de tratamentos 1 e 5, 2 e 6, 3 e 7, e 4 e 8 apresentam as mesmas regras do DBM para o distribuidor (ver Quadro 9). Verificou-se que todos os testes realizados para as medidas FRP e TVD Médio do distribuidor nos cenários A, B e D não foram significativos entre esses pares de tratamentos. Logo, deduz-se que, em cenários com baixa variabilidade na demanda, os desempenhos para o atendimento do cliente final da cadeia de suprimentos não são influenciados pelas regras do DBM do AF, desde que o CCR ainda tenha um certo nível de capacidade protetiva.

Por outro lado, os cenários que apresentam médias constantes de demanda e alta variabilidade (cenários C e E), evidenciaram mudanças nos padrões de desempenho entre alguns tratamentos. Por exemplo, os tratamentos 8 e 4 possuem a mesma regra parametrizada no distribuidor (2-INV-33-33), mas ambos ocupam a primeira e a segunda classificação, respectivamente, para FRP e TVD Médio do distribuidor nos cenários C e E. Diferenças entre as classificações também aconteceram para o par de tratamentos 3 e 7, que compartilham a regra 1-INV-33-33

no distribuidor. Como os tratamentos 3, 4, 7 e 8 são parametrizados pelo algoritmo que realiza a contagem de invasões na região vermelha do pulmão de estoque do distribuidor, eles reagem mais rapidamente para aumentar os TLs. Contudo, percebe-se pelas Figuras 53 e 54, do cenário C, e Figuras 59 e 60, do cenário E, que o AF apresenta desempenhos que se diferem de quando ele está parametrizado com a regra 1-1-33-33 (tratamentos 1, 2, 3 e 4) em relação a quando ele está parametrizado com a regra 2-INV-15-20 (tratamentos 5, 6, 7 e 8). Assim, o baixo atendimento das necessidades do distribuidor pelo AF nos tratamentos 3 e 4 provocou as diferenças significativas de FRP e TVD Médio do distribuidor entre os pares de tratamentos 3 e 7, e 4 e 8.

Vale dizer que o tratamento 1, que se destacou nos cenários com baixa variabilidade, apresentou os piores desempenhos de FRP do distribuidor nos cenários C e E com médias e medianas próximas de 70% (SOUZA; PIRES, 2010; GOLDRATT, 2008a; GOLDRATT; GOLDRATT, 2003). Portanto, esta pesquisa traz evidências de que a regra mais comum mencionada na literatura da Teoria das Restrições (*Theory of Constraints* – TOC) apenas demonstra boa performance em ambientes com demandas regulares.

No que concerne aos cenários F e G, planejados para terem comportamentos sazonais, os tratamentos 2 e 6 foram os que apresentaram os piores desempenhos com médias e medianas de FRP no distribuidor inferiores a 40%. Tais tratamentos possuem a regra (3-3-33-33) parametrizada no distribuidor, que é a regra que leva a maior quantidade de tempo para reagir frente a uma necessidade de ajustar os TLs do distribuidor. Sendo assim, recomenda-se que elas sejam utilizadas em um ambiente cujo comportamento da demanda não sofra variações ao longo do tempo, como nos cenários A, B, C, D e E, caso contrário, o sistema estará propenso a sofrer rupturas após aumentos repentinos da demanda ou manter muitos estoques, caso haja uma clara tendência de queda nas vendas (COX III et al., 2012).

Os tratamentos 3, 4, 7 e 8 tiveram os melhores comportamentos nos cenários F e G sob a perspectiva do nível de serviço para o cliente final (FRP do distribuidor) e da eficácia da cadeia de suprimentos (TVD Médio). Como mencionado anteriormente, esses quatro tratamentos possuem o algoritmo que considera a quantidade total de invasões na região vermelha do pulmão de estoque do distribuidor durante um período de reposição como gatilho para *Too Much Red* (TMR). Diante disso, infere-se que esse parâmetro de gatilho para TMR é altamente recomendado para ambientes que

apresentam maiores incertezas, seja pela alta variabilidade das demandas, como nos cenários C, E e G, ou pelas demandas que apresentam tendências de crescimento que não podem ser previstas, como ocorreu durante a metade do período de simulação dos cenários F e G.

Para mudanças acentuadas na demanda (*sharp demand changes*) que podem ser identificadas com antecedência, Schragenheim, A. (2010) mostra um procedimento que envolve desabilitar o DBM por um período para que ajustes manuais dos níveis de estoque sejam realizados para lidar com a demanda futura atípica prevista.

O último objetivo específico desta pesquisa consiste em, a partir da integração entre o DBM e a técnica de RL, identificar parâmetros mais adequados que os parâmetros tradicionais do DBM em cenários específicos para a realização dos ajustes dos níveis de estoques. Assim, este objetivo corrobora com o conceito de responsividade do pulmão (*buffer responsiveness*) que, segundo Cox III et al. (2012), é uma característica dos pulmões de estoque que descreve a rapidez com que os TIs e, em alguns casos, as próprias fronteiras entre as regiões dos pulmões são ajustadas em função da variabilidade das demandas dos produtos.

A partir das análises realizadas para comparar os tratamentos que combinam as regras do DBM tradicional com o tratamento que fez a integração entre o DBM e o RL (DBM+RL), identificou-se que o modelo treinado por inteligência artificial (IA) não apresentou melhoras, sob o ponto de vista do atendimento da demanda da cadeia de suprimentos, que nesta tese foi representada pela demanda do distribuidor, pois seus resultados não foram significativos em relação ao tratamento 8 nos cenários com e sem demanda sazonal (cenários G e C, respectivamente).

Por outro lado, verificou-se que o nível de serviço médio da cadeia de suprimentos foi significativamente melhorado nos dois cenários, ou seja, a IA optou por parâmetros que melhoraram o atendimento das necessidades do distribuidor pelo AF como uma forma de elevar o desempenho e melhorar a confiabilidade entre esses dois estágios, mas, conseqüentemente, também aumentou de forma significativa a quantidade de estoque na cadeia de suprimentos, principalmente no AF.

Ainda que o tratamento DBM+RL não tenha apresentado níveis de serviço diferentes e melhores para a demanda da cadeia de suprimentos, tem-se aqui duas descobertas: i) A TOC, por si só, possui regras tradicionais do DBM nas quais a combinação de algumas delas entre os estágios de uma cadeia de suprimentos pode

fornecer uma solução robusta que assegura um nível de serviço adequado ao passo que controla os níveis de estoques; ii) o tratamento DBM+RL propôs regras diferentes das tradicionais, alcançou o mesmo desempenho que um tratamento com regras tradicionais, sob a ótica do cliente final, mas melhorou o nível de serviço médio da cadeia de suprimentos como um todo. Portanto, essa descoberta corrobora com Schragenheim e Schragenheim (2022), que dizem que a IA deve ser capaz de apontar as necessidades de ajustes dos TLs e de recomendar o quanto aumentá-los ou reduzi-los de forma segura.

Com base no conceito da responsividade do pulmão mencionado anteriormente, a rapidez com que os TLs são ajustados depende dos quatro parâmetros do DBM (gatilho para *Too Much Green* [TMG], gatilho para TMR, ajuste para TMG e ajuste para TMR). Logo, por não existir apenas uma combinação de parâmetros disponível na literatura e também não haver uma recomendação formal de quais parâmetros devem ser utilizados em função das especificidades de cada ambiente, o uso de IA pode apoiar os gestores com a recomendação de parâmetros adequados do DBM para cada produto em ambientes específicos, dado que uma escolha indevida pode impactar negativamente a disponibilidade dos produtos e, conseqüentemente, prejudicar o atendimento da demanda.

Por fim, vale lembrar que, de acordo com Souza e Pires (2010), o objetivo final das aplicações da TOC em ambientes de produção (*Make to Availability* [MTA]) e cadeias de suprimentos (*Pull Replenishment and Distribution* [PRD]) exploradas nesta pesquisa consistem em proteger as vendas por meio de duas ações: i) redução do tempo de reposição; ii) aumento da confiabilidade do reabastecimento. No entanto, ao permitir que uma IA decida apenas por quais parâmetros o DBM deve ser executado, ela buscará formas de elevar a confiabilidade do sistema que, para uma mesma frequência de reposição, implicará em manter quantidades maiores de estoques. Sendo assim, ações voltadas para a diminuição do tempo de reposição, por exemplo, realizando duas entregas por semana para o distribuidor em vez de uma, poderiam causar efeitos mais expressivos nos níveis de serviço e de estoques. Nesse caso, outras análises também devem ser realizadas, como a avaliação do impacto do aumento do custo de transporte em decorrência da maior disponibilidade de produtos no ponto de venda.

10 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo apresenta os comentários finais, destacando os principais resultados, assim como as contribuições e implicações desta pesquisa para a teoria e a prática. Ao final, são também apresentadas as limitações inerentes a este estudo e são feitas as recomendações para trabalhos futuros que possam dar continuidade às discussões desenvolvidas nesta tese.

10.1 PRINCIPAIS RESULTADOS

O presente estudo se propôs a avaliar se a integração da técnica de inteligência artificial (IA), especificamente aprendizado por reforço (*reinforcement learning* – RL), ao Gerenciamento Dinâmico do Pulmão (*Dynamic Buffer Management* – DBM) para calibrá-lo resulta em um método mais efetivo para o dimensionamento de estoques em dois estágios de uma cadeia de suprimentos, sendo uma fábrica e um distribuidor de produtos de vidros temperados localizados no estado de São Paulo. Para tanto, desenvolveu-se um modelo do ambiente em questão que incorporou as lógicas dos sistemas *Make to Availability* (MTA) e *Pull Replenishment and Distribution* (PRD), ambas pertencentes ao portfólio de aplicações da Teoria das Restrições (Theory of Constraints – TOC) em ambientes de produção para estoque (*Make to Stock* – MTS) e de distribuição em cadeias de suprimentos, respectivamente.

Assim, os principais resultados desta pesquisa são:

1. Em cenários caracterizados por demandas com baixa variabilidade, sem tendências e que não apresentam comportamento sazonal, o DBM tradicional é recomendado, pois garante níveis elevados de atendimento ao passo que dimensiona os estoques dos produtos, de acordo com suas combinações entre demandas e tempos de reposição.
2. A escolha de parâmetros do DBM para o armazém da fábrica (AF) pode impactar a estabilidade dos níveis de estoque da cadeia de suprimentos em cenários que apresentam carga elevada sobre o recurso com restrição de capacidade (*Capacity Constrained Resource* – CCR). Sendo assim, parâmetros que fazem ajustes graduais nos níveis-alvo (*Target Levels* – TLs) de estoques são mais apropriados no nível da fábrica para evitar o surgimento de gargalos.

3. Em cenários com médias constantes e baixa variabilidade da demanda, o desempenho do distribuidor para o atendimento do cliente final da cadeia de suprimentos não é influenciado pela regra do DBM do AF, desde que o CCR ainda tenha um certo nível de capacidade protetiva.
4. Quando a capacidade protetiva do CCR começa a ficar comprometida, o modo como o DBM é executado no AF também começa a impactar o desempenho global da cadeia de suprimentos.
5. A regra mais comum do DBM (1-1-33-33) mencionada na literatura da TOC apenas apresentou bons desempenhos em cenários com demandas regulares.
6. Sob o ponto de vista do gatilho para o ajuste dos níveis de estoque, a regra mais conservadora (3-3-33-33) parametrizada no distribuidor alcançou bons resultados apenas em cenários cujas demandas não apresentam comportamentos sazonais.
7. O algoritmo que considera a quantidade total de invasões na região vermelha do pulmão foi o parâmetro de gatilho para *Too Much Red* (TMR) que contribuiu para as regras do DBM que apresentaram os melhores desempenhos no atendimento da demanda em cenários com maiores incertezas, seja pela alta variabilidade das demandas ou por apresentarem demandas com comportamentos sazonais.
8. O modelo treinado por IA não apresentou melhoras, sob o ponto de vista do atendimento da demanda da cadeia de suprimentos, em relação a uma combinação de regras do DBM tradicional. Além disso, verificou-se que a quantidade de estoque na cadeia de suprimentos aumentou, principalmente no AF. Por outro lado, o nível de serviço médio ao longo da cadeia de suprimentos foi significativamente maior, uma vez que melhorou a confiabilidade entre o AF e o distribuidor.
9. A TOC, por si só, possui regras tradicionais para o DBM que, se combinadas adequadamente, podem fornecer uma solução robusta que assegura um nível de serviço adequado ao passo que controla os níveis de estoques.
10. O uso de IA pode apoiar os gestores com a recomendação de parâmetros adequados do DBM, conforme as suas necessidades, dado que não existe uma regra geral de quais parâmetros devem ser utilizados em função das especificidades de cada ambiente e que uma escolha indevida pode

impactar negativamente a disponibilidade dos produtos, prejudicando o atendimento da demanda.

10.2 CONTRIBUIÇÕES E IMPLICAÇÕES PARA A TEORIA E A PRÁTICA

Esta pesquisa faz importantes contribuições para a comunidade acadêmica e para a comunidade específica da TOC. Primeiramente, este estudo preenche uma lacuna identificada na literatura por verificar a efetividade do uso do método DBM para gerenciar os estoques e preservar a disponibilidade de produtos em mais de um estágio de uma cadeia de suprimentos real (IKEZIRI et al., 2023; CHANG; CHANG; LEI, 2014; KAIJUN; YUXIA, 2010). Além disso, os princípios do DBM foram explorados na forma como foram propostos na literatura clássica da TOC (COX III et al., 2012; SCHRAGENHEIM; DETTMER; PATTERSON, 2009) e mais de um conjunto de parâmetros identificados na literatura foram utilizados de forma combinada (NARITA; IKEZIRI; SOUZA, 2021; MODI; LOWALEKAR; BHATTA, 2019; CHANG; CHANG; CHANG, 2017; CHANG; CHANG; SUN, 2015; CHANG; CHANG; HUANG, 2014; WATSON; POLITO, 2003; YUAN; CHANG; LI, 2003). Por fim, este estudo é pioneiro por propor a integração de IA a uma aplicação da TOC que, segundo Eli Schragenheim, um dos autores do livro que introduziu os fundamentos dos sistemas MTA e PRD com o uso do método DBM, essa colaboração entre a filosofia da TOC e IA não deve ser de apenas uma via e que juntas podem ser significativamente melhoradas (SCHRAGENHEIM; SCHRAGENHEIM, 2022).

Sob o ponto de vista prático, por ter sido realizada com base em um ambiente real, esta pesquisa pode fornecer *insights* para o desenvolvimento de melhorias aos processos de empresas fabricantes ou distribuidoras por meio de aplicações de tecnologias emergentes, como IA, e de conceitos baseados na TOC ou até mesmo de sistemas completos da TOC, como MTA e PRD com o uso do DBM. Como os sistemas MTA e PRD sincronizam as cadeias de suprimentos, o maior compartilhamento de informações entre uma fábrica e um distribuidor fortalece esse elo de modo que planos para enfrentar eventos atípicos, como uma demanda inesperada ou uma interrupção no abastecimento, possam ser elaborados conjuntamente, minimizando os riscos de rupturas e do efeito chicote. Além disso, em ambientes nos quais os clientes e consumidores são sensíveis ao atendimento de suas necessidades e buscam outros fornecedores quando há rupturas de estoque, como na cadeia de suprimentos

estudada, ter um sistema que garanta a disponibilidade de produtos com níveis adequados de estoque é fundamental. Enfim, em situações em que não é possível ter os dados precisos de demanda ou prever o seu comportamento, o uso do DBM pode contribuir para a gestão dos estoques.

10.3 LIMITAÇÕES DA PESQUISA E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Por mais que as discussões dos resultados deste estudo tenham gerado algumas recomendações, tais resultados foram obtidos a partir de simulações de um modelo inspirado em um ambiente específico. Portanto, novas pesquisas baseadas em métodos de simulação, estudo de caso ou pesquisa-ação podem fazer comparações com os resultados aqui apresentados.

A pesquisa foi desenvolvida com foco apenas no elo composto pela fábrica e o distribuidor. Além disso, apenas uma família de produtos foi incorporada na simulação, resultando em cenários baseados nos comportamentos dos dados reais de demanda dessa família. Então, trabalhos futuros podem investigar uma quantidade maior de estágios ou entidades da cadeia de suprimentos e novos cenários com comportamentos variados de demanda podem ser implementados para testar a robustez dos sistemas MTA e PRD apoiados pelo método DBM.

Diversas variáveis, como perdas de produção, quebras de máquinas, custos e tempos estocásticos de transporte, horas extras e a possibilidade de apressar entregas do AF para o distribuidor não foram consideradas. Dessa forma, estudos futuros também podem avaliar as aplicações da TOC, considerando uma maior quantidade de variáveis presentes nos sistemas reais.

Por fim, devido à limitação de integração entre o modelo computacional, desenvolvido no *software* AnyLogic®, com plataformas para o desenvolvimento de modelos de IA e por causa das limitações da conta de estudante criada na plataforma Microsoft Azure, cujos limites foram rapidamente alcançados em decorrência da dimensão do modelo criado nesta tese, esta pesquisa científica teve o propósito apenas de iniciar as avaliações e discussões dos potenciais benefícios que a IA pode trazer para as aplicações da TOC, em especial ao DBM. Consequentemente, recomenda-se que trabalhos futuros explorem essa e outras aplicações da TOC com os diversos tipos de IA em ambientes com menos restrições para testes e

experimentações, por exemplo, por meio de modelagens e simulações realizadas em ambientes criados com outras linguagens de programação.

FINANCIAMENTO

A presente tese foi desenvolvida por meio do *software* AnyLogic® 8.8.1 (versão *University Researcher*), cuja licença foi obtida por meio de um projeto de Auxílio à Pesquisa Regular da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), com vigência de 01/06/2021 a 31/05/2023 – Número do processo: 2020/15077-2.

REFERÊNCIAS

- AMOAKO-GYAMPAH, K.; MEREDITH, J. R. The operations management research agenda: an update. **Journal of Operations Management**, v. 8, n. 3, p. 250-262, 1989.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14698: Vidro temperado**. Rio de Janeiro, 2001.
- BACELAR-SILVA, G. M.; COX III, J. F.; RODRIGUES, P. P. Outcomes of managing healthcare services using the Theory of Constraints: A systematic review. **Health Systems**, p. 1-16, 2020.
- BANKS, J.; CARSON II, J. S.; NELSON, B. L.; NICOL, D. M. **Discrete-event system simulation**. 5 ed. England: Pearson Education, 2014.
- BARNARD, A. Continuous Improvement and Auditing. In: COX III, J. F.; SCHLEIER, J. G. (Orgs.). **Theory of Constraints Handbook**. New York: McGraw-Hill, 2010. cap. 15, p. 403-454.
- BELSARE, S.; BADILLA, E. D.; DEGHANIMOHAMMADABADI, M. Reinforcement Learning with Discrete Event Simulation: The Premise, Reality, and Promise. **Proceedings of the 2022 Winter Simulation Conference**, p. 2724-2735, 2022.
- BENAVIDES, M. B.; VAN LANDEGHEM, H. Implementation of S-DBR in four manufacturing SMEs: a research case study. **Production Planning & Control**, v. 26, n. 13, p. 1110-1127, 2015.
- BERTRAND, J. W. M.; FRANSOO, J. C. Operations management research methodologies using quantitative modeling. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 22, n. 2, p. 241-264, 2002.
- BLACKSTONE, J. H. Theory of Constraints – A status report. **International Journal of Production Research**, v. 39, n. 6, p. 1053-1080, 2001.
- BLACKSTONE, J. H. A Review of Literature on Drum-Buffer-Rope, Buffer Management and Distribution. In: COX III, J. F.; SCHLEIER, J. G. (Orgs.). **Theory of Constraints Handbook**. New York: McGraw-Hill, 2010. cap. 7, p. 145-173.
- BLACKSTONE, J. H. (Ed.). **APICS Dictionary**. 14 ed. Chicago: APICS – The Association for Operations Management, 2013.
- BODAGHI, G.; JOLAI, F.; RABBANI, M. Evaluating supply chain flexibility under demand uncertainty with smoothing approach and VMI considerations. **Journal of Industrial and Production Engineering**, v. 35, n. 8, p. 486-505, 2018.
- BURGIN, T. A. The gamma distribution and inventory control. **Journal of the Operational Research Society**, v. 26, n. 3, p. 507-525, 1975.

CAUCHICK-MIGUEL, P. A.; CAMPOS, L. M. S.; JABBOUR, C. J. C.; JABBOUR, A. B. L. S. **Elaboração de Artigos Acadêmicos: Estrutura, Métodos e Técnicas**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2017.

CHAKRAVORTY, S. S.; HALES, D. N. Improving labour relations performance using a Simplified Drum Buffer Rope (S-DBR) technique. **Production Planning & Control**, v. 27, n. 2, p. 102-113, 2016.

CHAN, H. L.; SHEN, B.; CAI, Y. Quick response strategy with cleaner technology in a supply chain: coordination and win-win situation analysis. **International Journal of Production Research**, v. 56, n. 10, p. 3397-3408, 2018.

CHANG, K. H.; CHANG, Y. C.; CHANG, Y. S. Applying theory of constraints-based approach to solve memory allocation of cloud storage. **International Journal of Systems Science: Operations & Logistics**, v. 4, n. 4, p. 311-329, 2017.

CHANG, Y. C.; CHANG, K. H.; HUANG, C. W. Integrate market demand forecast and demand-pull replenishment to improve the inventory management effectiveness of wafer fabrication. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture**, v. 228, n. 4, p. 617-636, 2014.

CHANG, Y. C.; CHANG, K. H.; LEE, M. C.; TSAO, K. H. Using Exponentially Weighted Moving Average to Improve Buffer Adjustment of Demand-Driven Replenishment Strategies. **Journal of Testing and Evaluation**, v. 47, n. 1, p. 602-626, 2019.

CHANG, Y. C.; CHANG, K. H.; LEI, Y. C. Probe of the replenishment strategy and grouping rule in the semiconductor industry. **Journal of Testing and Evaluation**, v. 42, n. 2, p. 484-497, 2014.

CHANG, Y. C.; CHANG, K. H.; SUN, W. C. Enhancement of Inventory Management for the Wafer Manufacturing Industry by Combining Market Demand Forecast and Demand-Pull Replenishment. **Journal of Testing and Evaluation**, v. 43, n. 4, p. 948-963, 2015.

CHOI, T. M.; GUO, S. Responsive supply in fashion mass customisation systems with consumer returns. **International Journal of Production Research**, v. 56, n. 10, p. 3409-3422, 2018.

COX III, J. F.; BOYD, L. H.; SULLIVAN, T. T.; REID, R. A.; CARTIER, B. **The Theory of Constraints International Certification Organization Dictionary**. 2 ed. 2012.

COX III, J. F.; SCHLEIER, J. G. (Orgs.). **Theory of Constraints Handbook**. New York: McGraw-Hill, 2010.

CREIGHTON, D. C.; NAHAVANDI, S. Optimising discrete event simulation models using a reinforcement learning agent. **Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference**, p. 1945-1950, 2002.

DAYAN, P.; NIV, Y. Reinforcement learning: the good, the bad and the ugly. **Current opinion in neurobiology**, v. 18, n. 2, p. 185-196, 2008.

DEMŠAR, J. Statistical comparisons of classifiers over multiple data sets. **Journal of Machine Learning Research**, v. 7, p. 1-30, 2006.

DENYER, D.; TRANFIELD, D. Producing a systematic review. In: BUCHANAN D.; BRYMAN A. (Orgs.). **The Sage handbook of organizational research methods**. Thousand Oaks, CA: Sage Publications Ltd, 2009. cap. 39, p. 671-689.

FAHIMNIA, B.; SARKIS, J.; DAVARZANI, H. Green supply chain management: A review and bibliometric analysis. **International Journal of Production Economics**, v. 162, p. 101-114, 2015.

FIORINI, P. C.; JABBOUR, C. J. C. Information systems and sustainable supply chain management towards a more sustainable society: Where we are and where we are going. **International Journal of Information Management**, v. 37, n. 4, p. 241-249, 2017.

GARZA-REYES, J. A.; VILLARREAL, B.; KUMAR, V.; DIAZ-RAMIREZ, J. A lean-TOC approach for improving Emergency Medical Services (EMS) transport and logistics operations. **International Journal of Logistics Research and Applications**, v. 22, n. 3, p. 253-272, 2019.

GIANNOCCARO, I.; PONTRANDOLFO, P. Inventory management in supply chains: a reinforcement learning approach. **International Journal of Production Economics**, v. 78, n. 2, p. 153-161, 2002.

GOLDRATT, E. M. **The Haystack Syndrome**: Sifting Information Out of the Data Ocean. Croton-on-Hudson: North River Press, 1990a.

GOLDRATT, E. M. **What is This Thing Called Theory of Constraints and how Should it be Implemented?**. Croton-on-Hudson: North River Press, 1990b.

GOLDRATT, E. M. **It's Not Luck**. Great Barrington: North River Press, 1994.

GOLDRATT, E. M. **Essays on the theory of constraints**. Great Barrington: North River Press, 1998.

GOLDRATT, E. M. **Production the TOC way**. Great Barrington: North River Press, 2003.

GOLDRATT, E. M. **Consumer Goods Make-to-Stock (MTS) to Make-to-Availability (MTA) S&T**. TOCICO Strategy and Tactic trees, 2008a. Disponível em: <https://www.tocico.org/page/s_and_t>. Acesso em: 5 nov. 2020.

GOLDRATT, E. M. **The Choice**. Great Barrington: North River Press, 2008b.

GOLDRATT, E. M.; COX, J. **The Goal**: Excellence in Manufacturing. Croton-on-Hudson: North River Press, 1984.

GOLDRATT, E. M.; ESHKOLI, I.; BROWNLEER, J. **Isn't It Obvious?**. Great Barrington: North River Press, 2009.

GOLDRATT, E. M.; FOX, R. E. **The Race**. Croton-on-Hudson: North River Press, 1986.

GOLDRATT, E. M.; GOLDRATT, R. TOC insights into distribution and supply chain. **Goldratt's Marketing Group**, 2003.

GOLDRATT, E. M.; SCHRAGENHEIM, E.; PTAK, C. A. **Necessary but Not Sufficient**. Great Barrington: North River Press, 2000.

GRIGORYEV, I. V. **AnyLogic 8 in three days**: a quick course in simulation modeling. 5 ed. Anylogic North America, 2018.

GUPTA, M. C. Constraints management--recent advances and practices. **International Journal of Production Research**, v. 41, n. 4, p. 647-659, 2003.

GUPTA, M. C.; ANDERSEN, S. Revisiting local TOC measures in an internal supply chain: A note. **International Journal of Production Research**, v. 50, n. 19, p. 5363-5371, 2012.

GUPTA, M. C.; ANDERSEN, S. Throughput/inventory dollar-days: TOC-based measures for supply chain collaboration. **International Journal of Production Research**, v. 56, n. 13, p. 4659-4675, 2018.

GUPTA, M. C.; SNYDER, D. Comparing TOC with MRP and JIT: a literature review. **International Journal of Production Research**, v. 47, n. 13, p. 3705-3739, 2009.

HAYLETT, R. OPT---production control with a difference. **Production Engineer**, v. 65, n. 5, p. 34-38, 1986.

HILL, C. A.; ZHANG, G. P.; MILLER, K. E. Collaborative planning, forecasting, and replenishment & firm performance: An empirical evaluation. **International Journal of Production Economics**, v. 196, p. 12-23, 2018.

HO, T. F.; LI, R. K. Heuristic dispatching rule to maximize TDD and IDD performance. **International Journal of Production Research**, v. 42, n. 24, p. 5133-5147, 2004.

HO, T. F.; LI, R. K. Bottleneck-based heuristic dispatching rule for optimizing mixed TDD/IDD performance in various factories. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 36, n. 7, p. 773-779, 2008.

HOLT, J. R. Managing complex organizations: a simplified approach. **American Society for Engineering Management 2013 International Annual Conference**. ASEM, 2013. p. 285-290, 2013.

HOPP, W. J.; SPEARMAN, M. L. **Factory physics**. Long Grove: Waveland Press, 2011.

HUANG, C. L.; LI, R. K.; TSAI, C. H.; CHUNG, Y. C.; SHIH, C. H. A Comparative Study of Pull and Push Production Methods for Supply Chain Resilience. **International Journal of Operations and Logistic Management**, v. 3, p. 1-15, 2014.

IKEZIRI, L. M.; SOUZA, F. B.; GUPTA, M. C.; FIORINI, P. C. Theory of Constraints: Review and Bibliometric Analysis. **International Journal of Production Research**, v. 57, n. 15-16, p. 5068-5102, 2019.

IKEZIRI, L. M.; SOUZA, F. B.; MEYER, A. S.; GUPTA, M. C. Pulling the distribution in supply chains: simulation and analysis of Dynamic Buffer Management approach. **International Journal of Systems Science: Operations & Logistics**, v. 10, n. 1, p. 1-22, 2023.

IVANOV, D. **Operations and supply chain simulation with AnyLogic**: Decision-oriented introductory notes for master students. Berlin: Berlin School of Economics and Law, 2017.

JAMMERNEGG, W.; REINER, G. Performance improvement of supply chain processes by coordinated inventory and capacity management. **International Journal of Production Economics**, v. 108, n. 1, p. 183-190, 2007.

JANSSENS, G. K.; RAMAEKERS, K. M. A linear programming formulation for an inventory management decision problem with a service constraint. **Expert Systems with Applications**, v. 38, n. 7, p. 7929-7934, 2011.

JASINAVIČIUS, R.; JASINAVIČIUS, N. Strengthening enterprise competitiveness by synchronizing supply chain. **Business: Theory and Practice**, v. 12, n. 4, p. 341-347, 2011.

JIANG, X. Y.; WU, H. H. Optimization of Setup Frequency for TOC Supply Chain Replenishment Systems Based on Pareto Particle Swarm Optimization. **Journal of Networks**, v. 8, n. 12, p. 2964-2971, 2013a.

JIANG, X. Y.; WU, H. H. Optimization of setup frequency for TOC supply chain replenishment system with capacity constraints. **Neural Computing and Applications**, v. 23, n. 6, p. 1831-1838, 2013b.

JIANG, X. Y.; WU, H. H.; TSAI, T. P.; HU, H. Diverse replenishment frequency model for TOC supply chain replenishment systems with capacity constraints. **International Journal of Modelling, Identification and Control**, v. 19, n. 3, p. 248-256, 2013.

KAEHLING, L. P.; LITTMAN, M. L.; MOORE, A. W. Reinforcement learning: A survey. **Journal of Artificial Intelligence Research**, v. 4, p. 237-285, 1996.

KAIJUN, L.; YUXIA, W. Research on inventory control policies for nonstationary demand based on TOC. **International Journal of Computational Intelligence Systems**, v. 3, n. sup01, p. 114-128, 2010.

KANSO, A.; PATRA, K. Engineering a platform for reinforcement learning workloads. **Proceedings of the 1st International Conference on AI Engineering: Software Engineering for AI**, p. 88-89, 2022.

KOURENTZES, N. Intermittent demand forecasts with neural networks. **International Journal of Production Economics**, v. 143, n. 1, p. 198-206, 2013.

LAW, A. M. **Simulation Modeling and Analysis**. 5 ed. New York: McGraw-Hill, 2015.

LEE, J. H.; CHANG, J. G.; TSAI, C. H.; LI, R. K. Research on enhancement of TOC Simplified Drum-Buffer-Rope system using novel generic procedures. **Expert Systems with Applications**, v. 37, n. 5, p. 3747-3754, 2010.

LEE, J. Y.; CHO, R. K.; PAIK, S. K. Supply chain coordination in vendor-managed inventory systems with stockout-cost sharing under limited storage capacity. **European Journal of Operational Research**, v. 248, n. 1, p. 95-106, 2016.

LI, C.; ZHENG, P.; YIN, Y.; WANG, B.; WANG, L. Deep reinforcement learning in smart manufacturing: A review and prospects. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, v. 40, p. 75-101, 2023.

LOWALEKAR, H.; BASU, S. Theory of Constraints Based Mafia Offer for Supply Chains of Deteriorating Products. **International Journal of Production Research**, v. 58, n. 14, p. 4421-4449, 2020.

LOWALEKAR, H.; RAVI, R. R. Revolutionizing blood bank inventory management using the TOC thinking process: An Indian case study. **International Journal of Production Economics**, v. 186, p. 89-122, 2017.

MACHADO, M. F.; LACERDA, D. P.; MORANDI, M. I. W. M.; CAMARGO, L. F. R.; DRESCH, A. Economic measuring of losses derived from inventory management at an oil refinery. **International Journal of Productivity and Performance Management**, v. 70, n. 8, p. 2182-2206, 2021.

MARGARETHA, D. B.; SAHRONI, T. R. Application of Theory of Constraint Supply Chain Replenishment System in Fast Moving Consumer Goods Company. **International Journal of Supply Chain Management**, v. 6, n. 4, p. 167-175, 2017.

MATEEN, A.; MORE, D. Applying TOC thinking process tools in managing challenges of supply chain finance: a case study. **International Journal of Services and Operations Management**, v. 15, n. 4, p. 389-410, 2013.

MICROSOFT. **What is Project Bonsai?**. 2022. Disponível em: <<https://learn.microsoft.com/en-us/bonsai/overview/what-is-bonsai>>. Acesso em: 6 nov. 2022.

MODI, K.; LOWALEKAR, H.; BHATTA, N. M. K. Revolutionizing Supply Chain Management the Theory of Constraints Way: A Case Study. **International Journal of Production Research**, v. 57, n. 11, p. 3335-3361, 2019.

MOHER, D.; LIBERATI, A.; TETZLAFF, J.; ALTMAN, D. G.; PRISMA Group. Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: the PRISMA statement. **PLoS Medicine**, v. 6, n. 7, 2009.

MORABITO, R.; PUREZA, V. Modelagem e Simulação. In: CAUCHICK-MIGUEL, P. A. (Coord.). **Metodologia de Pesquisa em Engenharia de Produção e Gestão de Operações**. 3 ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2018. cap. 8.

NARITA, V. T.; IKEZIRI, L. M.; SOUZA, F. B. Evaluation of dynamic buffer management for adjusting stock level: A simulation-based approach. **Journal of Industrial and Production Engineering**, v. 38, n. 6, p. 452-465, 2021.

NEMENYI, P. B. **Distribution-free multiple comparisons**. Princeton University, 1963.

NIAN, R.; LIU, J.; HUANG, B. A review on reinforcement learning: Introduction and applications in industrial process control. **Computers & Chemical Engineering**, v. 139, 2020.

NIMMY, J. S.; CHILKAPURE, A.; PILLAI, V. M. Literature review on supply chain collaboration: comparison of various collaborative techniques. **Journal of Advances in Management Research**, v. 16, n. 4, p. 537-562, 2019.

OLIVEIRA, J. B.; LIMA, R. S.; MONTEVECHI, J. A. B. Perspectives and relationships in Supply Chain Simulation: A systematic literature review. **Simulation Modelling Practice and Theory**, v. 62, p. 166-191, 2016.

OLIVI, P. M. Staffing Shortages and the Theory of Constraints. **Radiology Management**, v. 27, n. 1, p. 15-16, 2005.

OROOJLOOY, A.; HAJINEZHAD, D. A review of cooperative multi-agent deep reinforcement learning. **Applied Intelligence**, v. 53, n. 11, p. 13677-13722, 2023.

PACHECO, D. A. J.; ANTUNES JUNIOR, J. A. V.; MATOS, C. A. The constraints of theory: What is the impact of the Theory of Constraints on Operations Strategy?. **International Journal of Production Economics**, v. 235, p. 1-16, 2021.

PACHECO, D. A. J.; PERGHER, I.; ANTUNES JUNIOR, J. A. V.; VACCARO, G. L. R. Exploring the integration between Lean and the Theory of Constraints in Operations Management. **International Journal of Lean Six Sigma**, v. 10, n. 3, p. 718-742, 2019.

PASUPATHY, R.; SCHMEISER, B. The initial transient in steady-state point estimation: Contexts, a bibliography, the MSE criterion, and the MSER statistic. **Proceedings of the 2010 Winter Simulation Conference**, p. 184-197, 2010.

PÉREZ, J. L. TOC for world class global supply chain management. **Computers & Industrial Engineering**, v. 33, n. 1-2, p. 289-293, 1997.

PFAHL, L.; MOXHAM, C. Achieving sustained competitive advantage by integrating ECR, RFID and visibility in retail supply chains: a conceptual framework. **Production Planning & Control**, v. 25, n. 7, p. 548-571, 2014.

PONTE, B.; COSTAS, J.; PUCHE, J.; DE LA FUENTE, D.; PINO, R. Holism versus reductionism in supply chain management: An economic analysis. **Decision Support Systems**, v. 86, p. 83-94, 2016.

PUCHE, J.; PONTE, B.; COSTAS, J.; PINO, R.; DE LA FUENTE, D. Systemic approach to supply chain management through the viable system model and the theory of constraints. **Production Planning & Control**, v. 27, n. 5, p. 421-430, 2016.

RAHMAN, S. Theory of Constraints: A Review of the Philosophy and its Applications. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 18, n. 4, p. 336-355, 1998.

RAHMAN, S. The theory of constraints' thinking process approach to developing strategies in supply chains. **International Journal of Physical Distribution & Logistics Management**, v. 32, n. 10, p. 809-828, 2002.

RAZMI, J.; BAKI, F.; SABBAGHNIA, A. A dynamic ordering policy for a three echelon supply chain with backordering for perishable goods. **International Journal of Management Science and Engineering Management**, p. 1-11, 2022.

RIBEIRO, G. T.; SANTOS, A. A. P.; MARIANI, V. C.; COELHO, L. S. Novel hybrid model based on echo state neural network applied to the prediction of stock price return volatility. **Expert Systems with Applications**, v. 184, p. 1-13, 2021.

ROBINSON, S. **Simulation: the practice of model development and use**. 2 ed. Palgrave Macmillan, 2014.

SCHRAGENHEIM, A. Managing distribution according to TOC principles. **Inherent Simplicity**, 2007.

SCHRAGENHEIM, A. Supply Chain Management. In: COX III, J. F.; SCHLEIER, J. G. (Orgs.). **Theory of Constraints Handbook**. New York: McGraw-Hill, 2010. cap. 11, p. 265-302.

SCHRAGENHEIM, E. Make to availability and beyond. In: **TOCICO International Conference**, Las Vegas, Nevada. 2007.

SCHRAGENHEIM, E. From DBR to Simplified-DBR for Make-to-Order. In: COX III, J. F.; SCHLEIER, J. G. (Orgs.). **Theory of Constraints Handbook**. New York: McGraw-Hill, 2010a. cap. 9, p. 211-238.

SCHRAGENHEIM, E. Managing Make-to-Stock and the Concept of Make-to-Availability. In: COX III, J. F.; SCHLEIER, J. G. (Orgs.). **Theory of Constraints Handbook**. New York: McGraw-Hill, 2010b. cap. 10, p. 239-264.

SCHRAGENHEIM, E.; DETTMER, H. W. **Manufacturing at Warp Speed**: Optimizing Supply Chain Financial Performance. Boca Raton: St. Lucie Press, 2000.

SCHRAGENHEIM, E.; DETTMER, H. W.; PATTERSON, J. W. **Supply Chain Management at Warp Speed**: Integrating the System From End to End. Boca Raton: Taylor & Francis, 2009.

SCHRAGENHEIM, E; SCHRAGENHEIM, A. TOC and AI: Using the TOC Wisdom to Draw the Full Value from AI for Managing Organizations. **Eli Schragenheim**, 21 de out. de 2022. Disponível em: <<https://elischragenheim.com/2022/10/21/toc-and-ai-using-the-toc-wisdom-to-draw-the-full-value-from-ai-for-managing-organizations/>>. Acesso em: 9 nov. 2022.

SIKILERO, C.; RODRIGUES, L. H.; LACERDA, D. P.; NETO, S. L. H. C. Gestão da cadeia de suprimentos: uma reflexão a partir da teoria das restrições. **Espacios**, v. 35, n. 4, 2014.

SIMATUPANG, T. M.; WRIGHT, A. C.; SRIDHARAN, R. Applying the theory of constraints to supply chain collaboration. **Supply chain Management: an international journal**, v. 9, n. 1, p. 57-70, 2004.

SINGH, A. Minimization of mean tardiness in a flexible job shop. **International Journal of Simulation Modelling**, v. 12, n. 3, p. 190-204, 2013.

SINGHRY, H. B.; RAHMAN, A. A. Enhancing supply chain performance through collaborative planning, forecasting, and replenishment. **Business Process Management Journal**, 2019.

SOUZA, F. B.; BAPTISTA, H. R. Proposta de avanço para o método Tambor-Pulmão-Corda Simplificado aplicado em ambientes de produção sob encomenda. **Gestão & Produção**, v. 17, n. 4, p. 735-746, 2010.

SOUZA, F. B.; IKEZIRI, L. M. Demand management: the essence of the theory of constraints?. **International Journal of Logistics Systems and Management**. No prelo.

SOUZA, F. B.; PIRES, S. R. I. Theory of constraints contributions to outbound logistics. **Management Research Review**, v. 33, n. 7, p. 683-700, 2010.

SOUZA, F. B.; PIRES, S. R. I. Produzindo para disponibilidade: uma aplicação da Teoria das Restrições em ambientes de produção para estoque. **Gestão & Produção**, v. 21, p. 65-76, 2014.

STEVENSON, M.; HENDRY, L. C.; KINGSMAN, B. G. A review of production planning and control: the applicability of key concepts to the make-to-order industry. **International Journal of Production Research**, v. 43, n. 5, p. 869-898, 2005.

SUTTON, R. S.; BARTO, A. **Reinforcement Learning**: An Introduction. 2 ed. Cambridge: The MIT Press, 2018.

TRANFIELD, D.; DENYER, D.; SMART, P. Towards a methodology for developing evidence-informed management knowledge by means of systematic review. **British Journal of Management**, v. 14, n. 3, p. 207-222, 2003.

TSOU, C. M. On the strategy of supply chain collaboration based on dynamic inventory target level management: A theory of constraint perspective. **Applied Mathematical Modelling**, v. 37, n. 7, p. 5204-5214, 2013.

WALKER, W. T. Practical application of drum-buffer-rope to synchronize a two-stage supply chain. **Production and Inventory Management Journal**, v. 43, n. 3/4, p. 13, 2002.

WAN, X.; EVERS, P. T. Supply chain networks with multiple retailers: a test of the emerging theory on inventories, stockouts, and bullwhips. **Journal of Business Logistics**, v. 32, n. 1, p. 27-39, 2011.

WANG, L. C.; CHENG, C. Y.; TSENG, Y. T.; LIU, Y. F. Demand-pull replenishment model for hospital inventory management: a dynamic buffer-adjustment approach. **International Journal of Production Research**, v. 53, n. 24, p. 7533-7546, 2015.

WANG, R. J.; GLYNN, P. W. On the marginal standard error rule and the testing of initial transient deletion methods. **ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation**, v. 27, n. 1, p. 1-30, 2016.

WANG, W.; ZHEN, H.; GAO, J. Simulation and optimization on inventory of distribution system using theory of constraints. **Journal of Transportation System Engineering and Information Technology**, v. 9, n. 2, p. 115-121, 2009.

WANKE, P.; ARKADER, R.; HIJJAR, M. F. Logistics sophistication, manufacturing segments and the choice of logistics providers. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 27, n. 5, p. 542-559, 2007.

WATSON, K. J.; BLACKSTONE, J. H.; GARDINER, S. C. The evolution of a management philosophy: The theory of constraints. **Journal of Operations Management**, v. 25, n. 2, p. 387-402, 2007.

WATSON, K.; POLITO, T. Comparison of DRP and TOC financial performance within a multi-product, multi-echelon physical distribution environment. **International Journal of Production Research**, v. 41, n. 4, p. 741-765, 2003.

WETTASINGHE, J.; LUONG, H. T. A vendor managed inventory policy with emergency orders. **Journal of Industrial and Production Engineering**, v. 37, n. 2-3, p. 120-133, 2020.

WINSTON, W. L. **Operations research: applications and algorithms**. 4 ed. Canada: Thomson Learning, 2004.

WU, H. H.; CHEN, C. P.; TSAI, C. H.; TSAI, T. P. A study of an enhanced simulation model for TOC supply chain replenishment system under capacity constraint. **Expert Systems with Applications**, v. 37, n. 9, p. 6435-6440, 2010a.

WU, H. H.; CHEN, C. P.; TSAI, C. H.; YANG, C. J. Simulation and scheduling implementation study of TFT-LCD Cell plants using Drum–Buffer–Rope system. **Expert Systems with Applications**, v. 37, n. 12, p. 8127-8133, 2010b.

WU, H. H.; HUANG, H. H.; JEN, W. T. A study of the elongated replenishment frequency of TOC supply chain replenishment systems in plants. **International Journal of Production Research**, v. 50, n. 19, p. 5567-5581, 2012.

WU, H. H.; LEE, A. H.; TSAI, T. P. A two-level replenishment frequency model for TOC supply chain replenishment systems under capacity constraint. **Computers & Industrial Engineering**, v. 72, p. 152-159, 2014.

WU, H. H.; LIAO, M. Y.; TSAI, C. H.; TSAI, S. C.; LU, M. J.; TSAI, T. P. A study of theory of constraints supply chain replenishment system. **International Journal of Academic Research in Accounting Finance and Management Sciences**, v. 3, n. 3, p. 82-92, 2013.

WU, H. H.; TSAI, S. H.; TSAI, C. H.; LIAO, M. Y. A study of supply chain replenishment system of theory of constraints for thin film transistor liquid crystal display (TFT-LCD) plants. **African Journal of Business Management**, v. 5, n. 21, p. 8617-8633, 2011.

XU, Z.; LI, S.; LUO, X.; LIU, J.; ZHANG, T.; TANG, Y.; XU, J.; YUAN, P.; KEUNG, J. TSTSS: A two-stage training subset selection framework for cross version defect prediction. **Journal of Systems and Software**, v. 154, p. 59-78, 2019.

YANG, H. L.; CHEN, Z. J.; JI, Y. F.; ZHANG, Y. Operation optimization of distribution center based on time-driven activity-based costing. **Journal of Dalian Maritime University**, 2012.

YUAN, K. J.; CHANG, S. H.; LI, R. K. Enhancement of theory of constraints replenishment using a novel generic buffer management procedure. **International Journal of Production Research**, v. 41, n. 4, p. 725-740, 2003.

ZEMZAM, A.; MAATAOUI, M. E.; HLYAL, M.; ALAMI, J. E.; ALAMI, N. E. Inventory management of supply chain with robust control theory: literature review. **International Journal of Logistics Systems and Management**, v. 27, n. 4, p. 438-465, 2017.

APÊNDICE A – ARTIGOS EXCLUÍDOS DA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

Autores	Título	Ano	Exclusão em razão do CE2	Exclusão em razão do CE3	Exclusão em razão do CE4	Exclusão em razão do CE5
Baveja A., Kapoor A., Melamed B.	Stopping Covid-19: A pandemic-management service value chain approach	2020	✓			
Hsieh C.-L., Tsai W.-H., Chang Y.-C.	Green activity-based costing production decision model for recycled paper	2020	✓			
Cox III J.F., Boyd L.H.	Using the theory of constraints' processes of ongoing improvement to address the provider appointment scheduling system design problem	2020	✓			
Hilmola O.-P.	Role of inventory and assets in shareholder value creation	2020	✓			
Kelly M.C., Germain R.H.	Applying theory of constraints to timber harvesting: A case study from the Northeast USA	2020	✓			
Ab Talib M.S.	Identifying halal logistics constraints in Brunei Darussalam	2020	✓			
Tsai, WH; Zhong, SY	Production decision model with carbon tax for the knitted footwear industry under activity-based costing	2019	✓			
Borsatto Junior J.L., De Souza R.F., Weiss L.A.S., Dal Vesco D.G., Gimenes R.M.T.	Corn ethanol: Possibility for the state of Mato Grosso	2019	✓			
Ikeziri, LM; Souza, FB; Gupta, MC; Fiorini, PD	Theory of constraints: review and bibliometric analysis	2019	✓			
Tsai, WH; Lai, SY	Green Production Planning and Control Model with ABC under Industry 4.0 for the Paper Industry	2018	✓			
Wei, ZL; Song, X; Wang, DH	Manufacturing flexibility, business model design, and firm performance	2017	✓			
Sahi, G; Gupta, MC; Patel, PC	A Measure of Throughput Orientation: Scale Development and Nomological Validation	2017	✓			
Ghazvini M.S., Ghezavati V., Raissi S., Makui A.	An integrated efficiency-risk approach in sustainable project control	2017	✓			

Kowang T.O., Fei G.C., Long C.S., Rasli A., Hee O.C.	Development of supplier evaluation and selection framework bases on theory of constraint	2017	✓			
Kaijun L., Wen S., Xuejun H., Lin P.	Schedule of supply chain management project based on TOC	2017	✓			
Pérez-Campdesuñer R., Pérez-Pravia M., Sánchez-Rodríguez A., García-Vidal G., Martínez-Vivar R.	Application of a methodology based on the theory of constraints in the sector of tourism services	2017	✓			
Koh S.C.L., Gunasekaran A., Morris J., Obayi R., Ebrahimi S.M.	Conceptualizing a circular framework of supply chain resource sustainability	2017	✓			
Serrato, RB	REDUTEX: a hybrid push-pull production system approach for reliable delivery time in knitting SMEs	2016	✓			
Wang J., Shou W., Wang X., Wu P.	Developing and evaluating a framework of total constraint management for improving workflow in liquefied natural gas construction	2016	✓			
Jafarnejad A., Mehregan M.R., Namazi M., Abtahi S.M.	A mathematical programming model of activity-based costing in order to improve profitability and optimal production orders	2016	✓			
Maheer J.	Software enables demand-driven manufacturing	2015	✓			
Tsai, WH; Chen, HC; Leu, JD; Chang, YC; Lin, TW	A product-mix decision model using green manufacturing technologies under activity-based costing	2013	✓			
Huang H.-H., Pei W., Wu H.-H., May M.-D.	A research on problems of mixed-line production and the re-scheduling	2013	✓			
Stump, B; Badurdeen, F	Integrating lean and other strategies for mass customization manufacturing: a case study	2012	✓			
Yang H.-L., Chen Z.-J., Ji Y.-F., Zhang Y.	Operation optimization of distribution center based on time-driven activity-based costing	2012	✓			
Mishra N., Kumar V., Chan F.T.S., Tiwari M.K.	A CBFSA approach to resolve the distributed manufacturing process planning problem in a supply chain environment	2012	✓			

Thomas, P; Thomas, A; Suhner, MC	A neural network for the reduction of a product-driven system emulation model	2011	✓			
Overstreet R.E., Hall D., Hanna J.B., Kelly Rainer R., Jr.	Research in humanitarian logistics	2011	✓			
Thomas P., Thomas A.	Multilayer perceptron for simulation models reduction: Application to a sawmill workshop	2011	✓			
Lawler M., Murgolo- Poore M.	Expanding the supply chain integration model internally: A case study from the gaming industry	2011	✓			
Hasuike, T; Ishii, H	On flexible product-mix decision problems under randomness and fuzziness	2009	✓			
Ayers J.B.	Expertise on demand	2009	✓			
Yang Y., Min H., Zhou G.	Theory of constraints for recycling automobile tyres in the reverse logistics system	2009	✓			
Tang L.-C., Cai X.- Y.	Order priority determination in supply chain	2009	✓			
Coman A.	ARENA mapping: An effective strategy focusing tool	2008	✓			
Stevenson M., Hendry L.C., Kingsman B.G.	A review of production planning and control: The applicability of key concepts to the make-to-order industry	2005	✓			
Yamamoto A., Yamamoto K., Takeda K., Tsuge Y.	Construction of supply chain management with packing companies in the surface treatment steel manufacturing plant	2005	✓			
Chua D.K.H., Shen L.J., Bok S.H.	Constraint-based planning with integrated production scheduler over internet	2003	✓			
Gupta M.	Constraints management - Recent advances and practices	2003	✓			
Lockamy III A.	A constraint-based framework for strategic cost management	2003	✓			
Gupta M., Ko H.-J., Min H.	TOC-based performance measures and five focusing steps in a job-shop manufacturing environment	2002	✓			
Palmer D.	E-forum debate Part 4: Supply chain	2001	✓			
Kaihara T.	Supply chain management with market economics	2001	✓			
Enkawa T.	Global optimization in production system and management	2001	✓			
Onwubolu G.C., Haupt W., Clercq G.D., Visser J.	Production management issues in developing nations	1999	✓			

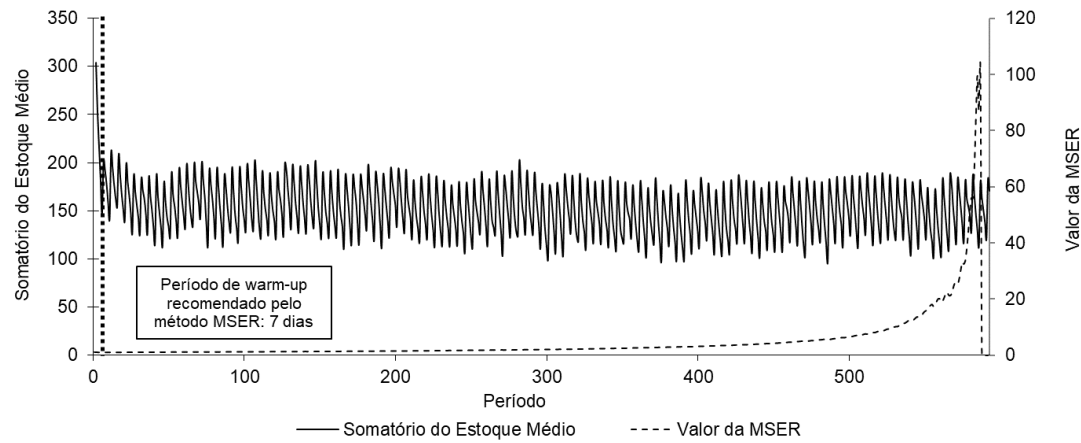
Wang W., Zhen H., Gao J.	Simulation and optimization on inventory of distribution system using theory of constraints	2009		✓		
Olivi P.M.	Staffing shortages and the theory of constraints	2005		✓		
Low J.T.	Using theory of constraints to teach Supply Chain Management in the manufacturing and marketing classroom	1998		✓		
Cardenas, EA; Guerra, HS	Competitive logistics in exporting SMEs in Colombia: analysis of bottlenecks and improvement proposals	2018			✓	
Cespón M.F., Castro R.C., Curbelo G.M., Varela D.C.	Diagnóstico ecológico e económico da cadeia de fornecimento para a reciclagem de plásticos no contexto empresarial cubano	2015			✓	
Wang J.-Q., Sun S.- D., Wang D.-C., Yang H.-A.	Management and control of manufacturing cells based on theory of constrains	2006			✓	
Mishra J.L., Chiwenga K.D., Mishra N., Choudhary S.	Extending dynamic capabilities towards lean thinking in humanitarian supply chains	2020				✓
Miclo, R; Lauras, M; Fontanili, F; Lamothe, J; Melnyk, SA	Demand Driven MRP: assessment of a new approach to materials management	2019				✓
Puche J., Costas J., Ponte B., Pino R., de la Fuente D.	The effect of supply chain noise on the financial performance of Kanban and Drum-Buffer-Rope: An agent-based perspective	2019				✓
Gupta M., Andersen S.	Throughput/inventory dollar-days: TOC-based measures for supply chain collaboration	2018				✓
Quesado, PR; Branco, RJF	The Theory of Constraints (TOC) as decision support managers: a study in an agro-industrial organization	2017				✓
Pacheco, DAD; Manoel, ML; Cabrera, RD; Domingues, J	IMPLICATIONS OF THEORY OF RESTRICTIONS V-A-T ANALYSIS ON SUPPLY CHAIN MANAGEMENT	2016				✓
Wee H.M., Budiman S.D., Su L.C., Chang M., Chen R.	Responsible supply chain management – an analysis of Taiwanese gutter oil scandal using the theory of constraint	2016				✓

Ponte B., Costas J., Puche J., De La Fuente D., Pino R.	Holism versus reductionism in supply chain management: An economic analysis	2016				✓
Banerjee A., Mukhopadhyay S.K.	A contemporary TOC innovative thinking process in the backdrop of leagile supply chain	2016				✓
Puche J., Ponte B., Costas J., Pino R., De La Fuente D.	Systemic approach to supply chain management through the viable system model and the theory of constraints	2016				✓
Filho T.A.R., Pacheco D.A.J., Pergher I., Roehe Vaccaro G.L., Antunes J.A.V., Jr.	A new approach for decision making in distribution supply chains: A theory of constraints perspective	2016				✓
Costas J., Ponte B., De La Fuente D., Pino R., Puche J.	Applying Goldratt's theory of constraints to reduce the bullwhip effect through agent-based modeling	2015				✓
Dos Santos R.F., Alves J.M.	Proposta de um modelo de gestão integrada da cadeia de suprimentos: Aplicação no segmento de eletrodomésticos	2015				✓
Abdelsalam H.M., Elassal M.M., AlShaar A.M.	A multi-objective optimisation algorithm for new distribution centre location	2015				✓
Buddas H.	A bottleneck analysis in the IFRC supply chain	2014				✓
Mathu K.	Applying the Theory of Constraints in the south african coal supply Chain	2014				✓
Abdelsalam H.M., Magdy M., AlShaar A.M.	Optimal Location of New Distribution Center in Supply Chain Network Design with Varying Inventory Capacity	2013				✓
Oglethorpe D., Heron G.	Testing the theory of constraints in UK local food supply chains	2013				✓
Sun R., Leng K.	Inventory control policy for E-tail organizations based on TOC	2013				✓
Rossi Filho T.A., Pacheco D.A.J., Pergher I., Antunes J.A.V., Jr., Vaccaro G.L.R., da Luz D.F.	Uma abordagem de referência para implantar a solução logística da Teoria das Restrições	2013				✓
Mateen A., More D.	Applying TOC thinking process tools in managing challenges of supply chain finance: A case study	2013				✓

Gupta M., Andersen S.	Revisiting local TOC measures in an internal supply chain: A note	2012				✓
Leng K., Chen X.	A genetic algorithm approach for TOC-based supply chain coordination	2012				✓
Agami N., Saleh M., Rasmy M.	A hybrid dynamic framework for supply chain performance improvement	2012				✓
Tabrizi M.M., Navidi H., Salmasnia A., Mohebbi C.	Coordinating manufacturer and retailer using a novel robust discount scheme	2012				✓
Parsaei Z., Nahavandi N., ElMekkawy T.	Buffer size determination for drum-buffer-rope controlled supply chain networks	2012				✓
Lyu, J; Fu, HC	Systematic process analysis in industrial business management: A practitioner tool kit	2011				✓
Bashiri M., Tabrizi M.M.	Supply chain design: A holistic approach	2010				✓
Spencer M.S., Lockamy A.	Using V-A-T analysis as a framework for supply chain management: A case study	2009				✓
Mabin V.J., Davies J., Kim S.	Rethinking tradeoffs and OR/MS methodology	2009				✓
Wanke P., Arkader R., Hijjar M.F.	Logistics sophistication, manufacturing segments and the choice of logistics providers	2007				✓
Ayers J.	Demand-driven supply chain implementation	2006				✓
Koh S.C.L., Gunasekaran A.	Performance prediction using supply chain uncertainty modelling	2006				✓
Kirche E.T., Kadipasaoglu S.N., Khumawala B.M.	Maximizing supply chain profits with effective order management: Integration of Activity-Based Costing and Theory of Constraints with mixed-integer modelling	2005				✓
Rahman S.-U.	The theory of constraints' thinking process approach to developing strategies in supply chains	2002				✓
Walker W.T.	Practical application of drum-buffer-rope to synchronize a two-stage supply chain	2002				✓
Yeo K.T., Ning J.H.	Integrating supply chain and critical chain concepts in engineer-procure-construct (EPC) projects	2002				✓
Pérez J.L.	TOC for world class global supply chain management	1997				✓

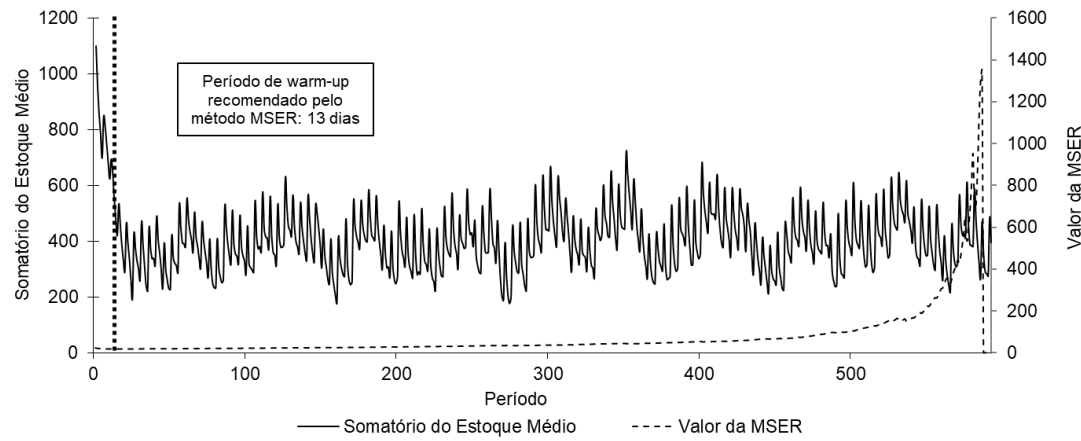
APÊNDICE B – APLICAÇÕES DO MÉTODO MSER PARA OS DEMAIS CENÁRIOS SIMULADOS

Figura 79 - Determinação do período mínimo de warm-up para o cenário A



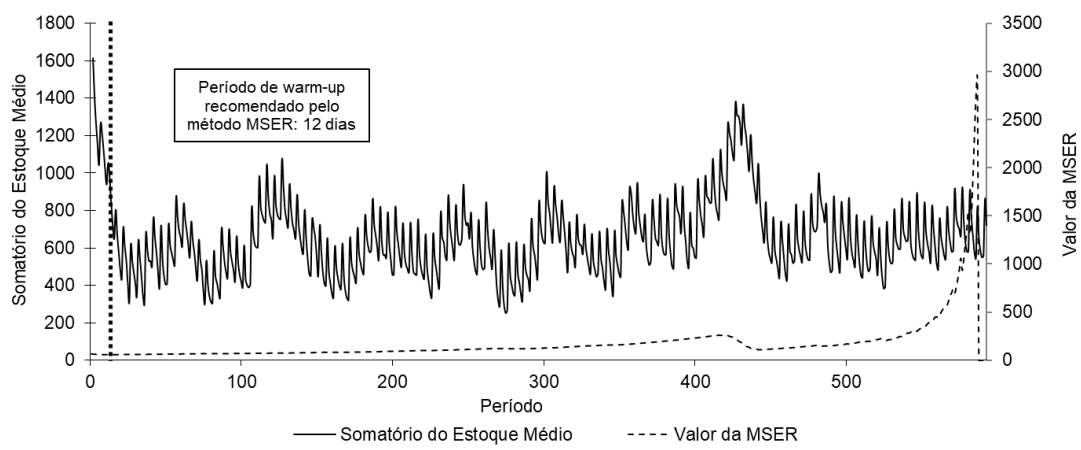
Fonte: Autor (2023).

Figura 80 - Determinação do período mínimo de warm-up para o cenário C



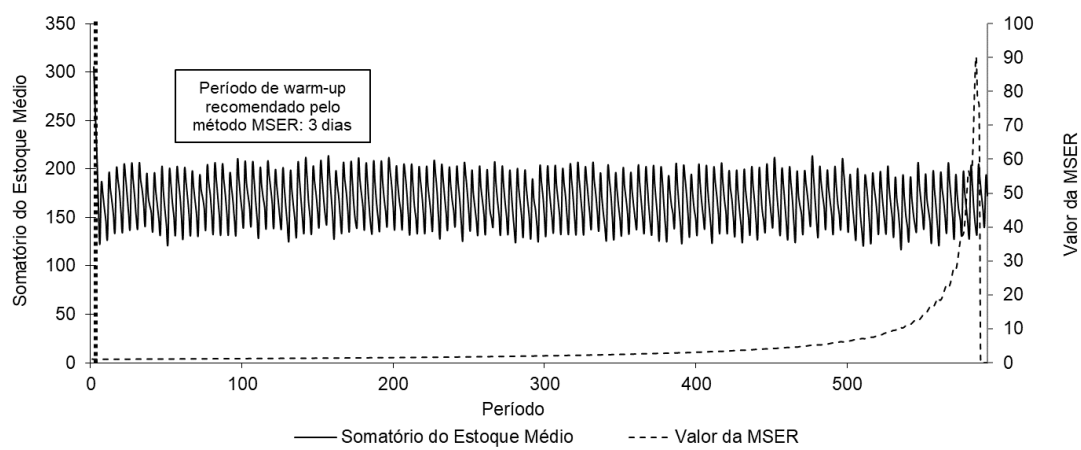
Fonte: Autor (2023).

Figura 81 - Determinação do período mínimo de warm-up para o cenário E



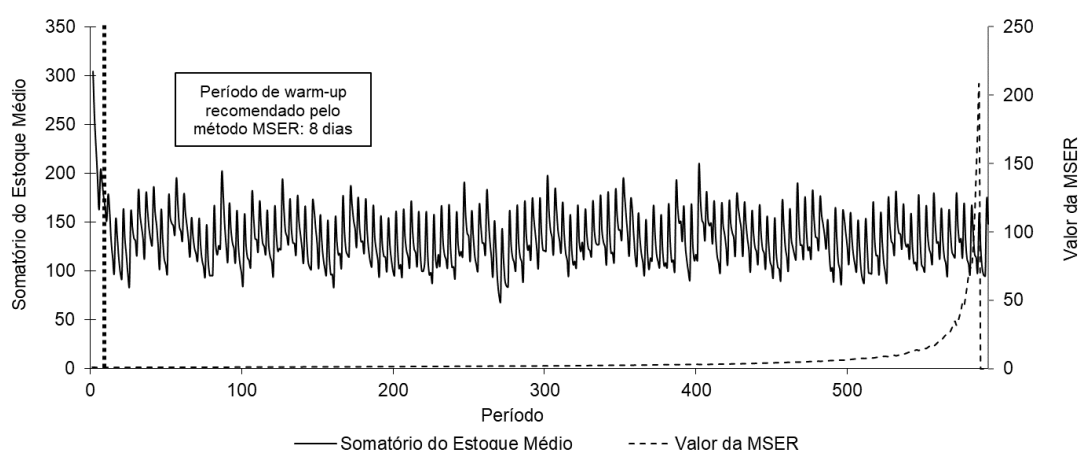
Fonte: Autor (2023).

Figura 82 - Determinação do período mínimo de warm-up para o cenário F



Fonte: Autor (2023).

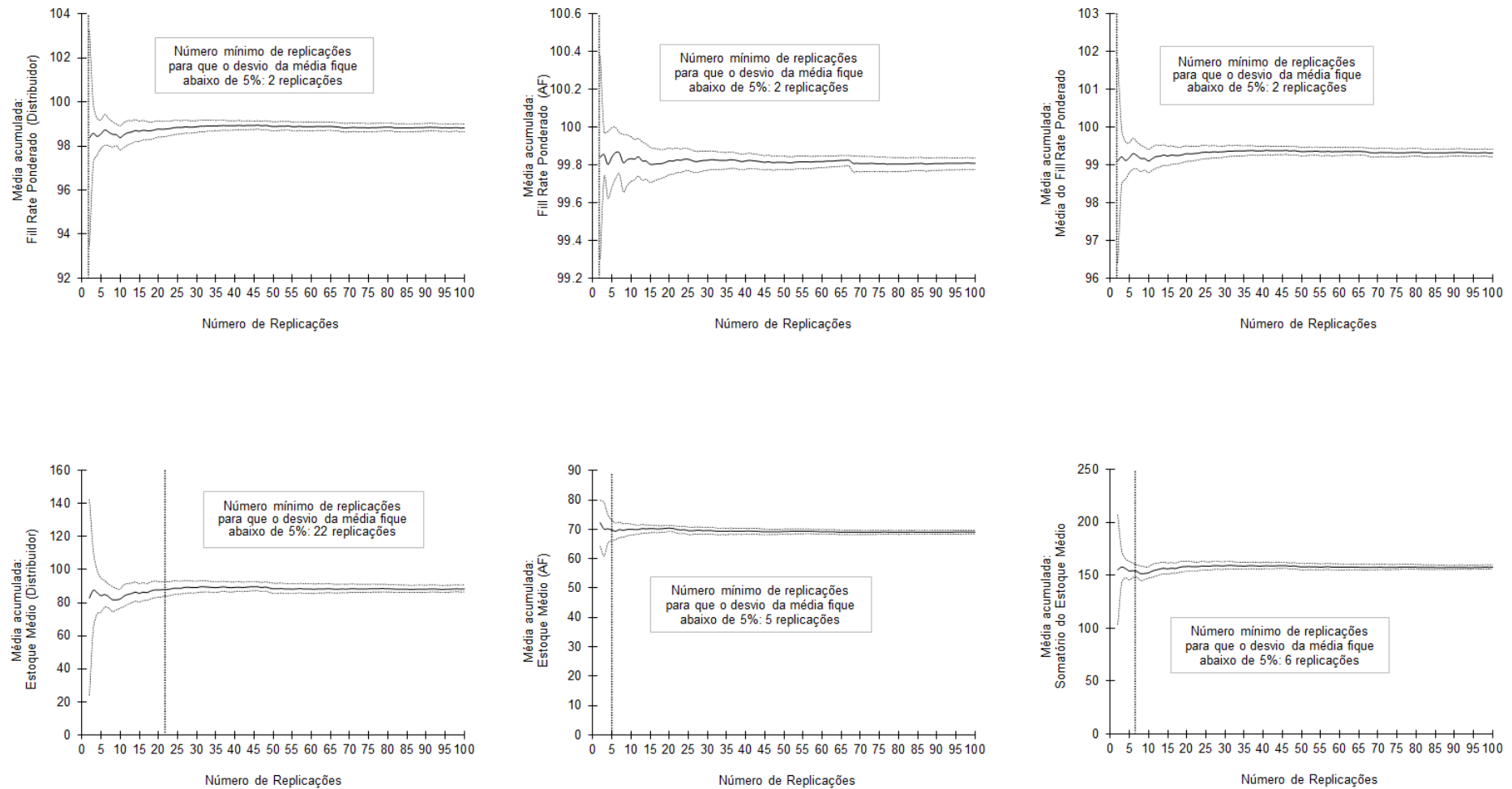
Figura 83 - Determinação do período mínimo de warm-up para o cenário G



Fonte: Autor (2023).

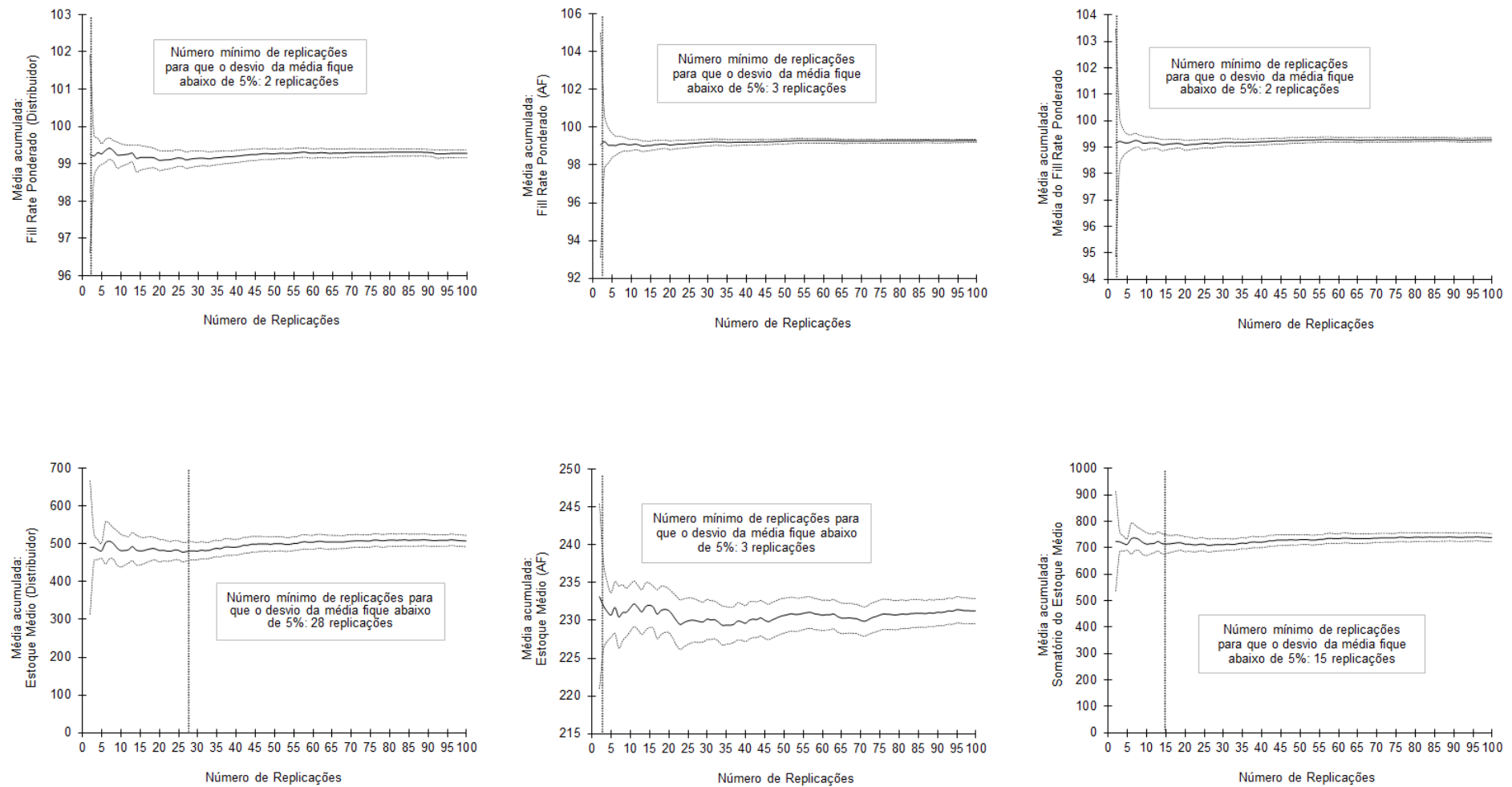
APÊNDICE C – DETERMINAÇÃO DO NÚMERO MÍNIMO DE REPLICAÇÕES

Figura 84 - Determinação do número mínimo de replicações para o cenário A



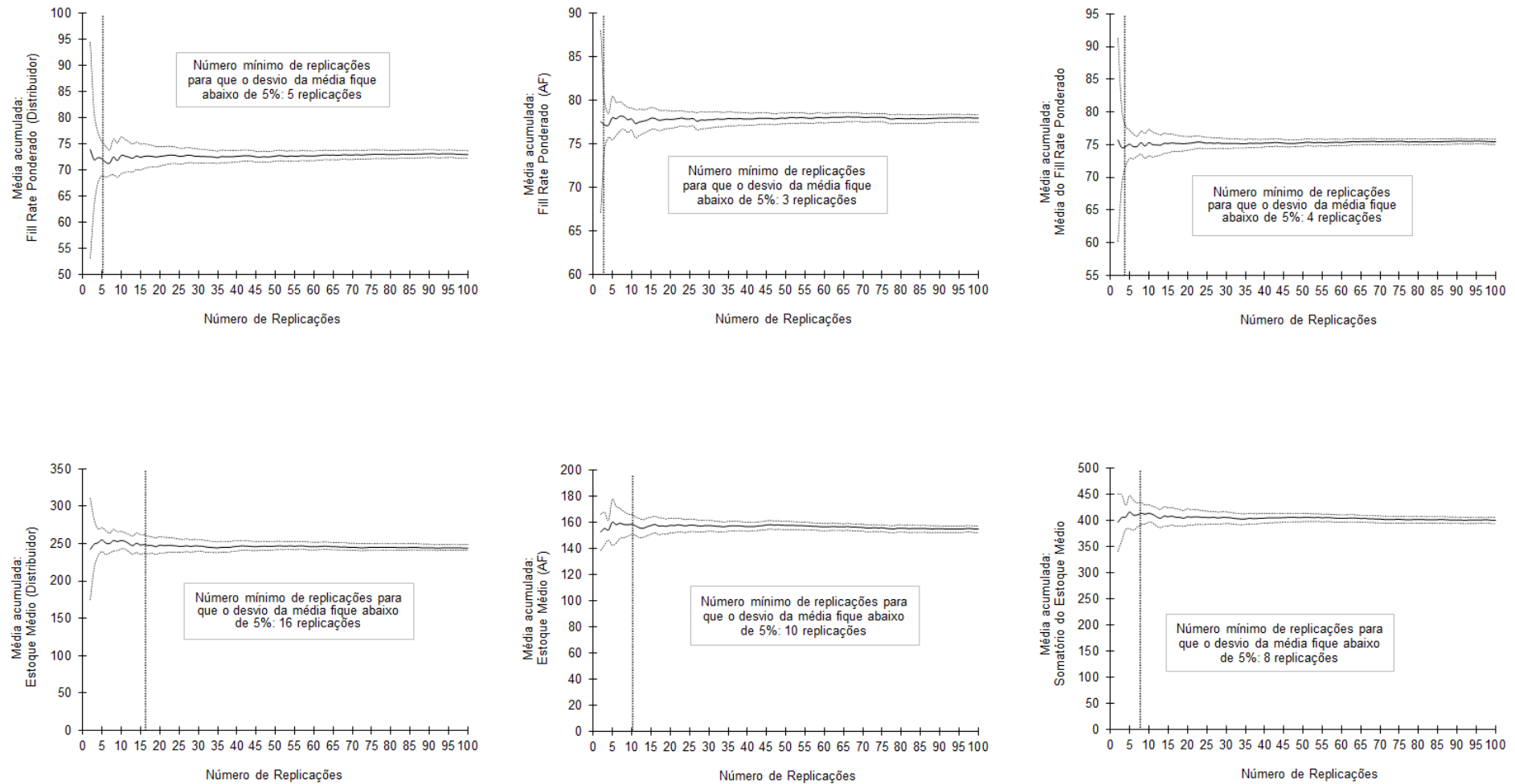
Fonte: Autor (2023).

Figura 85 - Determinação do número mínimo de replicações para o cenário B



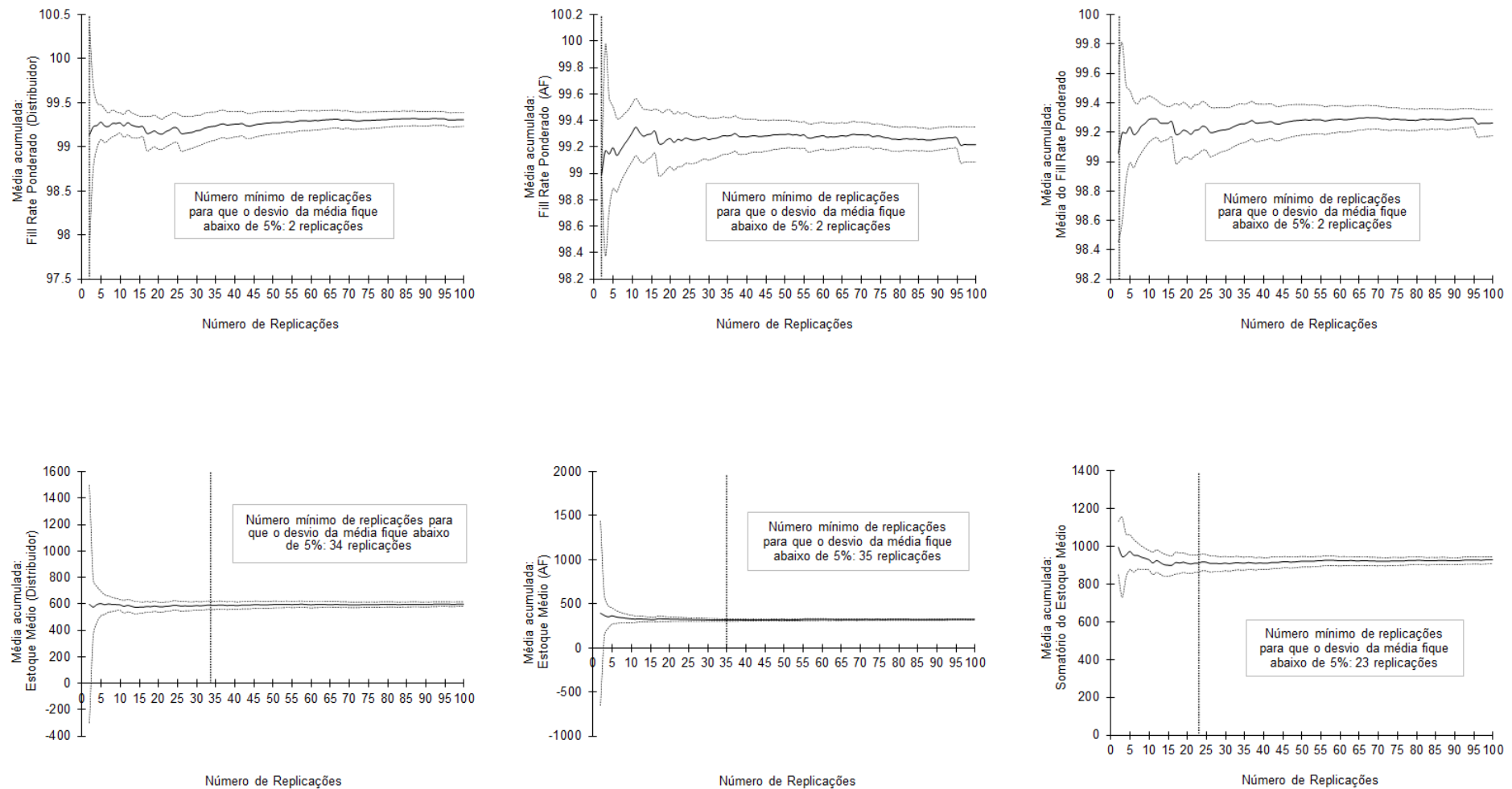
Fonte: Autor (2023).

Figura 86 - Determinação do número mínimo de replicações para o cenário C



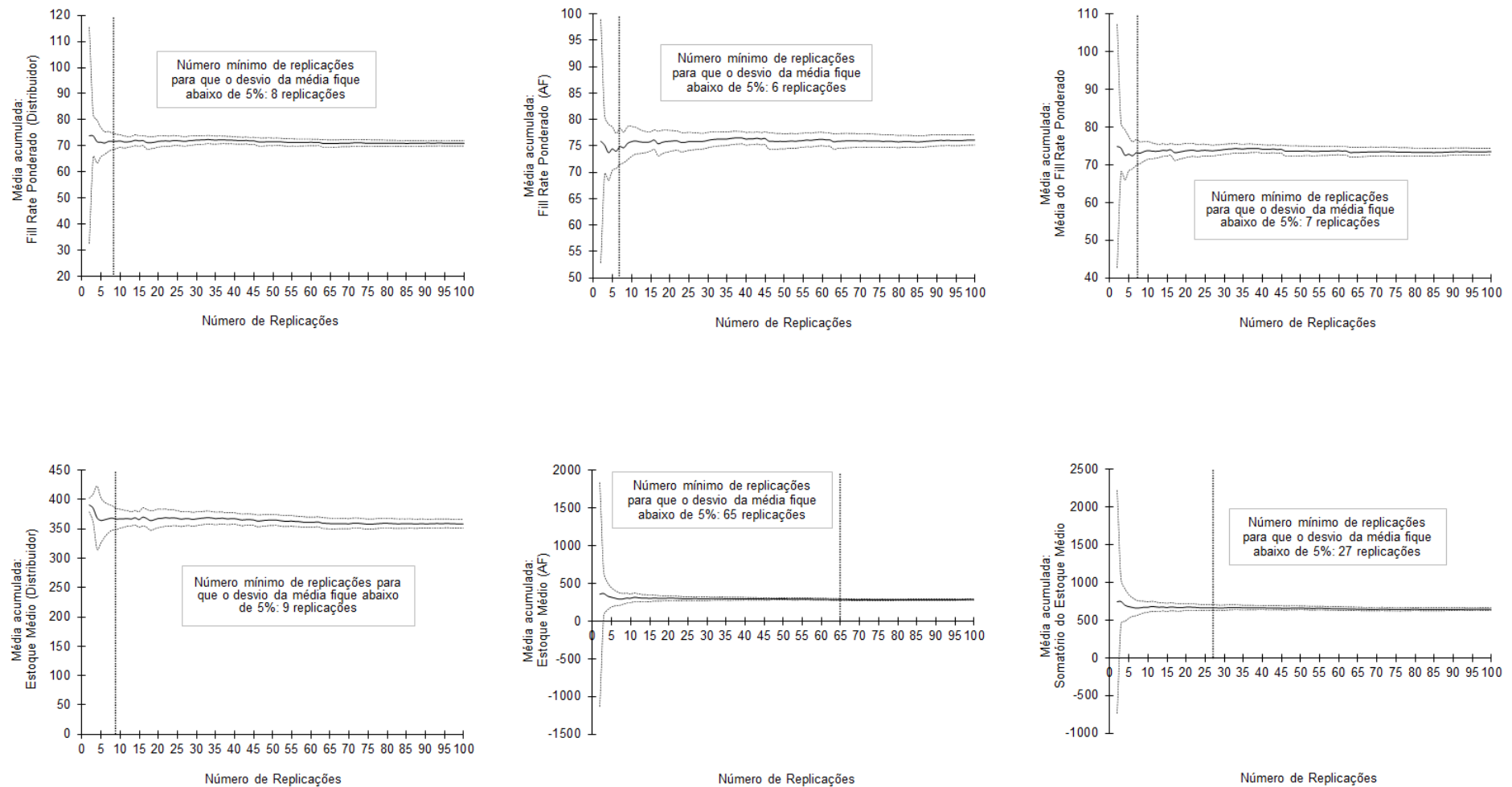
Fonte: Autor (2023).

Figura 87 - Determinação do número mínimo de replicações para o cenário D



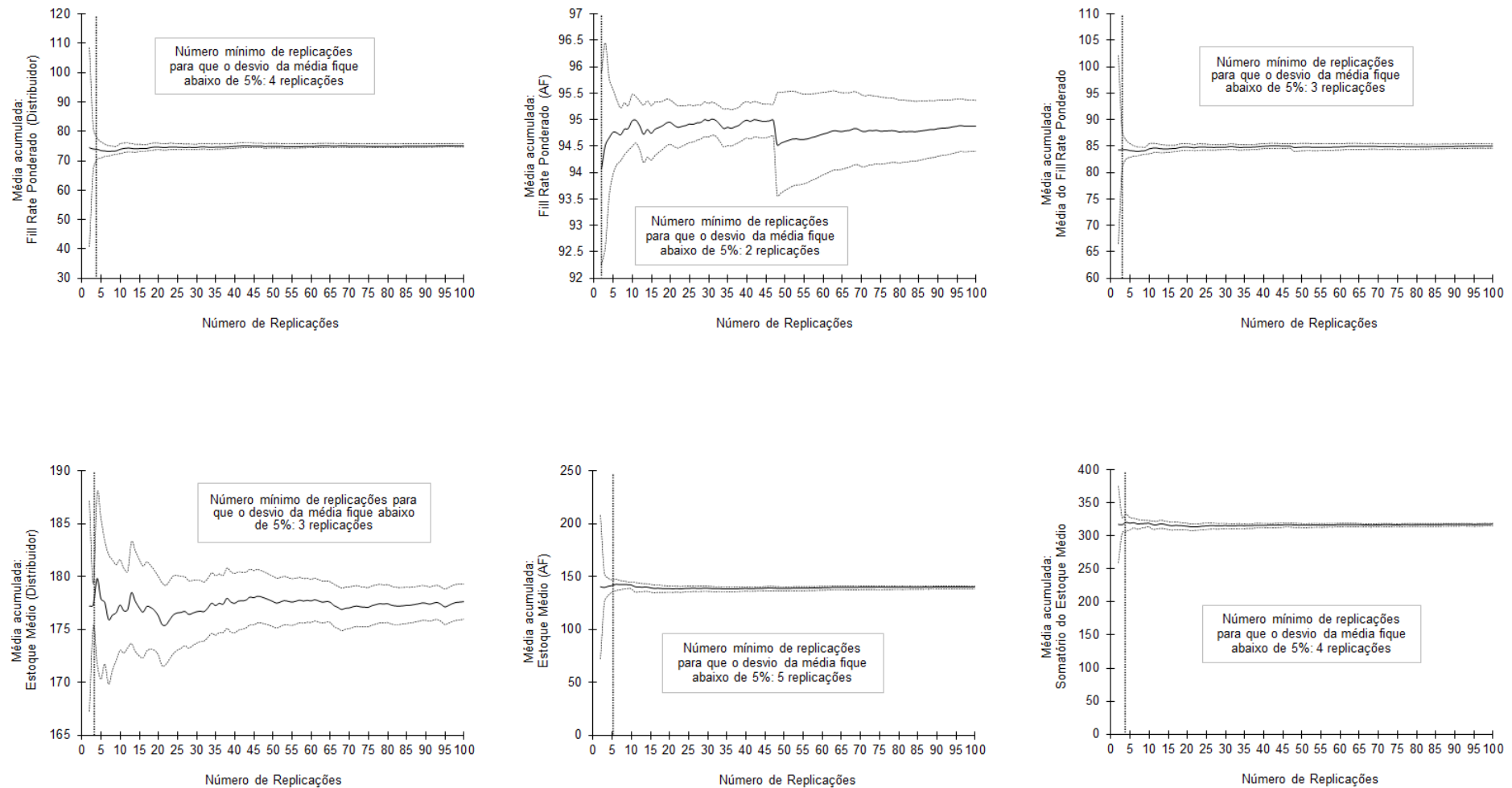
Fonte: Autor (2023).

Figura 88 - Determinação do número mínimo de replicações para o cenário E



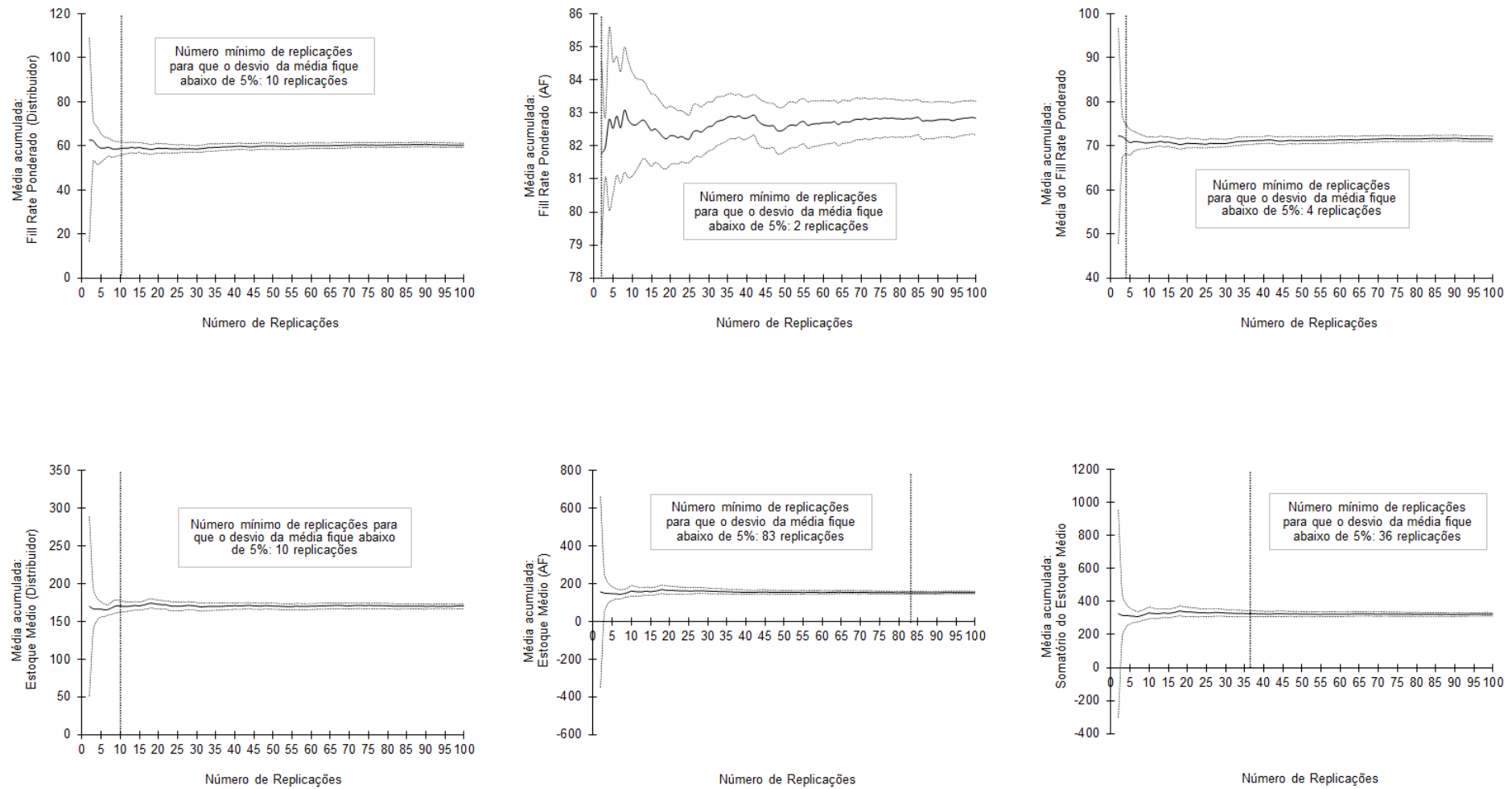
Fonte: Autor (2023).

Figura 89 - Determinação do número mínimo de replicações para o cenário F



Fonte: Autor (2023).

Figura 90 - Determinação do número mínimo de replicações para o cenário G



Fonte: Autor (2023).

APÊNDICE D – VALORES-P DOS TESTES POST-HOC DE NEMENYI

Tabela 39 - Valores-p dos testes post-hoc de Nemenyi para o distribuidor no cenário A

Fill Rate Ponderado - Distribuidor							
	1	2	3	4	5	6	7
2	<0.001*	-	-	-	-	-	-
3	<0.001*	<0.001*	-	-	-	-	-
4	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-	-	-	-
5	1.000	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-	-	-
6	<0.001*	1.000	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-	-
7	<0.001*	<0.001*	1.000	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-
8	<0.001*	<0.001*	<0.001*	1.000	<0.001*	<0.001*	<0.001*

TVD Médio - Distribuidor							
	1	2	3	4	5	6	7
2	<0.001*	-	-	-	-	-	-
3	<0.001*	<0.001*	-	-	-	-	-
4	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-	-	-	-
5	1.000	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-	-	-
6	<0.001*	1.000	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-	-
7	<0.001*	<0.001*	1.000	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-
8	<0.001*	<0.001*	<0.001*	1.000	<0.001*	<0.001*	<0.001*

Estoque Médio - Distribuidor							
	1	2	3	4	5	6	7
2	<0.001*	-	-	-	-	-	-
3	<0.001*	<0.001*	-	-	-	-	-
4	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-	-	-	-
5	1.000	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-	-	-
6	<0.001*	1.000	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-	-
7	<0.001*	<0.001*	0.780	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-
8	<0.001*	<0.001*	<0.001*	1.000	<0.001*	<0.001*	<0.001*

IVD Médio - Distribuidor							
	1	2	3	4	5	6	7
2	<0.001*	-	-	-	-	-	-
3	<0.001*	<0.001*	-	-	-	-	-
4	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-	-	-	-
5	1.000	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-	-	-
6	<0.001*	1.000	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-	-
7	<0.001*	<0.001*	0.780	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-
8	<0.001*	<0.001*	<0.001*	1.000	<0.001*	<0.001*	<0.001*

*Estatisticamente significativa ao nível de 5%

Fonte: Autor (2023).

Tabela 40 - Valores-p dos testes post-hoc de Nemenyi para o armazém da fábrica no cenário A

Fill Rate Ponderado - AF							
	1	2	3	4	5	6	7
2	0.109	-	-	-	-	-	-
3	<0.001*	<0.001*	-	-	-	-	-
4	0.025*	<0.001*	<0.001*	-	-	-	-
5	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-	-	-
6	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	0.889	-	-
7	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-
8	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	0.174	0.003*	0.005*

TVD Médio - AF							
	1	2	3	4	5	6	7
2	0.178	-	-	-	-	-	-
3	<0.001*	<0.001*	-	-	-	-	-
4	0.003*	<0.001*	<0.001*	-	-	-	-
5	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-	-	-
6	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	0.959	-	-
7	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-
8	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	0.035*	<0.001*	0.016*

Estoque Médio - AF							
	1	2	3	4	5	6	7
2	0.802	-	-	-	-	-	-
3	<0.001*	<0.001*	-	-	-	-	-
4	0.998	0.374	0.012*	-	-	-	-
5	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-	-	-
6	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	0.854	-	-
7	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	0.724	1.000	-
8	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	0.002*	0.186	0.301

IVD Médio - AF							
	1	2	3	4	5	6	7
2	0.996	-	-	-	-	-	-
3	0.986	0.730	-	-	-	-	-
4	0.992	1.000	0.678	-	-	-	-
5	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-	-	-
6	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	0.988	-	-
7	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	0.015*	-
8	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	0.003*	1.000

*Estatisticamente significante ao nível de 5%

Fonte: Autor (2023).

Tabela 41 - Valores-p dos testes post-hoc de Nemenyi para a cadeia de suprimentos no cenário A

Média do Fill Rate Ponderado							
	1	2	3	4	5	6	7
2	<0.001*	-	-	-	-	-	-
3	0.001*	<0.001*	-	-	-	-	-
4	<0.001*	0.313	<0.001*	-	-	-	-
5	<0.001*	<0.001*	0.290	<0.001*	-	-	-
6	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-	-
7	<0.001*	0.985	<0.001*	0.032*	<0.001*	<0.001*	-
8	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	0.957	<0.001*

Somatório do TVD Médio							
	1	2	3	4	5	6	7
2	<0.001*	-	-	-	-	-	-
3	0.037*	<0.001*	-	-	-	-	-
4	<0.001*	0.096	<0.001*	-	-	-	-
5	<0.001*	<0.001*	0.043*	<0.001*	-	-	-
6	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-	-
7	<0.001*	0.999	<0.001*	0.016*	<0.001*	<0.001*	-
8	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	0.976	<0.001*

Somatório do Estoque Médio							
	1	2	3	4	5	6	7
2	<0.001*	-	-	-	-	-	-
3	<0.001*	<0.001*	-	-	-	-	-
4	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-	-	-	-
5	<0.001*	<0.001*	1.000	<0.001*	-	-	-
6	<0.001*	<0.001*	<0.001*	0.934	<0.001*	-	-
7	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-
8	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*

Somatório do IVD Médio							
	1	2	3	4	5	6	7
2	<0.001*	-	-	-	-	-	-
3	<0.001*	<0.001*	-	-	-	-	-
4	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-	-	-	-
5	<0.001*	0.931	<0.001*	<0.001*	-	-	-
6	<0.001*	<0.001*	0.001*	<0.001*	<0.001*	-	-
7	<0.001*	<0.001*	<0.001*	0.003*	<0.001*	<0.001*	-
8	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*

*Estatisticamente significativa ao nível de 5%

Fonte: Autor (2023).

Tabela 42 - Valores-p dos testes post-hoc de Nemenyi para o distribuidor no cenário B

Fill Rate Ponderado - Distribuidor							
	1	2	3	4	5	6	7
2	<0.001*	-	-	-	-	-	-
3	<0.001*	<0.001*	-	-	-	-	-
4	<0.001*	0.990	<0.001*	-	-	-	-
5	0.970	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-	-	-
6	<0.001*	1.000	<0.001*	0.990	<0.001*	-	-
7	<0.001*	<0.001*	0.960	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-
8	<0.001*	1.000	<0.001*	1.000	<0.001*	1.000	<0.001*

TVD Médio - Distribuidor							
	1	2	3	4	5	6	7
2	<0.001*	-	-	-	-	-	-
3	<0.001*	<0.001*	-	-	-	-	-
4	<0.001*	0.990	<0.001*	-	-	-	-
5	0.960	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-	-	-
6	<0.001*	1.000	<0.001*	0.990	<0.001*	-	-
7	<0.001*	<0.001*	0.950	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-
8	<0.001*	1.000	<0.001*	1.000	<0.001*	1.000	<0.001*

Estoque Médio - Distribuidor							
	1	2	3	4	5	6	7
2	<0.001*	-	-	-	-	-	-
3	<0.001*	<0.001*	-	-	-	-	-
4	<0.001*	1.000	<0.001*	-	-	-	-
5	0.014*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-	-	-
6	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-	-
7	<0.001*	<0.001*	0.093	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-
8	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	1.000	<0.001*

IVD Médio - Distribuidor							
	1	2	3	4	5	6	7
2	<0.001*	-	-	-	-	-	-
3	<0.001*	<0.001*	-	-	-	-	-
4	<0.001*	0.854	<0.001*	-	-	-	-
5	0.013*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-	-	-
6	<0.001*	<0.001*	<0.001*	0.005*	<0.001*	-	-
7	<0.001*	<0.001*	0.098	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-
8	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	0.957	<0.001*

*Estatisticamente significante ao nível de 5%

Fonte: Autor (2023).

Tabela 43 - Valores-p dos testes post-hoc de Nemenyi para o armazém da fábrica no cenário B

Fill Rate Ponderado - AF							
	1	2	3	4	5	6	7
2	0.04*	-	-	-	-	-	-
3	<0.001*	<0.001*	-	-	-	-	-
4	1.000	0.013*	<0.001*	-	-	-	-
5	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-	-	-
6	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	0.433	-	-
7	<0.001*	0.495	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-
8	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	0.876	0.014*	<0.001*

TVD Médio - AF							
	1	2	3	4	5	6	7
2	0.019*	-	-	-	-	-	-
3	<0.001*	<0.001*	-	-	-	-	-
4	1.000	0.01*	<0.001*	-	-	-	-
5	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-	-	-
6	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	0.908	-	-
7	<0.001*	0.609	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-
8	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	0.495	0.025*	<0.001*

Estoque Médio - AF							
	1	2	3	4	5	6	7
2	0.595	-	-	-	-	-	-
3	0.552	1.000	-	-	-	-	-
4	0.918	0.999	0.998	-	-	-	-
5	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-	-	-
6	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	0.162	-	-
7	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-
8	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	0.009*	0.977	<0.001*

IVD Médio - AF							
	1	2	3	4	5	6	7
2	0.980	-	-	-	-	-	-
3	<0.001*	<0.001*	-	-	-	-	-
4	1.000	1.000	<0.001*	-	-	-	-
5	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-	-	-
6	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	1.000	-	-
7	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-
8	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	0.520	0.650	<0.001*

*Estatisticamente significante ao nível de 5%

Fonte: Autor (2023).

Tabela 44 - Valores-p dos testes post-hoc de Nemenyi para a cadeia de suprimentos no cenário B

Média do Fill Rate Ponderado							
	1	2	3	4	5	6	7
2	<0.001*	-	-	-	-	-	-
3	0.374	<0.001*	-	-	-	-	-
4	<0.001*	0.005*	<0.001*	-	-	-	-
5	<0.001*	0.001*	<0.001*	1.000	-	-	-
6	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-	-
7	<0.001*	0.998	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-
8	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	0.374	<0.001*

Somatório do TVD Médio							
	1	2	3	4	5	6	7
2	<0.001*	-	-	-	-	-	-
3	0.454	<0.001*	-	-	-	-	-
4	<0.001*	0.001*	<0.001*	-	-	-	-
5	<0.001*	<0.001*	<0.001*	0.988	-	-	-
6	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-	-
7	<0.001*	0.999	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-
8	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	0.413	<0.001*

Somatório do Estoque Médio							
	1	2	3	4	5	6	7
2	<0.001*	-	-	-	-	-	-
3	<0.001*	<0.001*	-	-	-	-	-
4	<0.001*	1.000	<0.001*	-	-	-	-
5	<0.001*	<0.001*	0.035*	<0.001*	-	-	-
6	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-	-
7	<0.001*	0.461	<0.001*	0.475	<0.001*	<0.001*	-
8	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	1.000	<0.001*

Somatório do IVD Médio							
	1	2	3	4	5	6	7
2	<0.001*	-	-	-	-	-	-
3	<0.001*	<0.001*	-	-	-	-	-
4	<0.001*	0.942	<0.001*	-	-	-	-
5	0.002*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-	-	-
6	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-	-
7	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-
8	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	0.999	<0.001*

*Estatisticamente significativa ao nível de 5%

Fonte: Autor (2023).

Tabela 45 - Valores-p dos testes post-hoc de Nemenyi para o distribuidor no cenário C

Fill Rate Ponderado - Distribuidor							
	1	2	3	4	5	6	7
2	<0.001*	-	-	-	-	-	-
3	<0.001*	<0.001*	-	-	-	-	-
4	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-	-	-	-
5	1.000	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-	-	-
6	<0.001*	0.053	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-	-
7	<0.001*	0.337	<0.001*	<0.001*	<0.001*	0.994	-
8	<0.001*	<0.001*	<0.001*	0.002*	<0.001*	<0.001*	<0.001*

TVD Médio - Distribuidor							
	1	2	3	4	5	6	7
2	<0.001*	-	-	-	-	-	-
3	<0.001*	0.003*	-	-	-	-	-
4	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-	-	-	-
5	0.990	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-	-	-
6	<0.001*	<0.001*	<0.001*	0.009*	<0.001*	-	-
7	<0.001*	<0.001*	<0.001*	0.014*	<0.001*	1.000	-
8	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*

Estoque Médio - Distribuidor							
	1	2	3	4	5	6	7
2	<0.001*	-	-	-	-	-	-
3	<0.001*	0.755	-	-	-	-	-
4	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-	-	-	-
5	0.947	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-	-	-
6	<0.001*	0.952	1.000	<0.001*	<0.001*	-	-
7	<0.001*	<0.001*	0.003*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-
8	<0.001*	<0.001*	<0.001*	1.000	<0.001*	<0.001*	<0.001*

IVD Médio - Distribuidor							
	1	2	3	4	5	6	7
2	<0.001*	-	-	-	-	-	-
3	<0.001*	<0.001*	-	-	-	-	-
4	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-	-	-	-
5	0.810	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-	-	-
6	<0.001*	1.000	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-	-
7	<0.001*	<0.001*	0.870	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-
8	<0.001*	<0.001*	<0.001*	0.940	<0.001*	<0.001*	<0.001*

*Estatisticamente significante ao nível de 5%

Fonte: Autor (2023).

Tabela 46 - Valores-p dos testes post-hoc de Nemenyi para o armazém da fábrica no cenário C

Fill Rate Ponderado - AF							
	1	2	3	4	5	6	7
2	0.947	-	-	-	-	-	-
3	<0.001*	<0.001*	-	-	-	-	-
4	<0.001*	<0.001*	0.937	-	-	-	-
5	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-	-	-
6	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	0.028*	-	-
7	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-
8	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	0.454

TVD Médio - AF							
	1	2	3	4	5	6	7
2	0.925	-	-	-	-	-	-
3	<0.001*	<0.001*	-	-	-	-	-
4	<0.001*	<0.001*	0.131	-	-	-	-
5	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-	-	-
6	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	0.046*	-	-
7	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-
8	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	0.174

Estoque Médio - AF							
	1	2	3	4	5	6	7
2	<0.001*	-	-	-	-	-	-
3	0.988	<0.001*	-	-	-	-	-
4	<0.001*	0.813	<0.001*	-	-	-	-
5	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-	-	-
6	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-	-
7	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	0.004*	<0.001*	-
8	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	0.427	<0.001*

IVD Médio - AF							
	1	2	3	4	5	6	7
2	<0.001*	-	-	-	-	-	-
3	<0.001*	<0.001*	-	-	-	-	-
4	0.824	<0.001*	<0.001*	-	-	-	-
5	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-	-	-
6	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-	-
7	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	0.361	<0.001*	-
8	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	0.001*	<0.001*	<0.001*

*Estatisticamente significante ao nível de 5%

Fonte: Autor (2023).

Tabela 47 - Valores-p dos testes post-hoc de Nemenyi para a cadeia de suprimentos no cenário C

Média do Fill Rate Ponderado							
	1	2	3	4	5	6	7
2	<0.001*	-	-	-	-	-	-
3	1.000	<0.001*	-	-	-	-	-
4	<0.001*	0.001*	<0.001*	-	-	-	-
5	<0.001*	0.002*	<0.001*	<0.001*	-	-	-
6	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-	-
7	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-
8	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	0.844	<0.001*

Somatório do TVD Médio							
	1	2	3	4	5	6	7
2	<0.001*	-	-	-	-	-	-
3	0.003*	<0.001*	-	-	-	-	-
4	<0.001*	<0.001*	0.957	-	-	-	-
5	<0.001*	<0.001*	0.802	1.000	-	-	-
6	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-	-
7	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	0.993	-
8	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*

Somatório do Estoque Médio							
	1	2	3	4	5	6	7
2	<0.001*	-	-	-	-	-	-
3	<0.001*	0.454	-	-	-	-	-
4	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-	-	-	-
5	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-	-	-
6	<0.001*	<0.001*	<0.001*	0.813	<0.001*	-	-
7	<0.001*	<0.001*	<0.001*	0.006*	<0.001*	<0.001*	-
8	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*

Somatório do IVD Médio							
	1	2	3	4	5	6	7
2	<0.001*	-	-	-	-	-	-
3	<0.001*	<0.001*	-	-	-	-	-
4	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-	-	-	-
5	<0.001*	0.220	<0.001*	<0.001*	-	-	-
6	<0.001*	<0.001*	1.000	<0.001*	<0.001*	-	-
7	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-
8	<0.001*	<0.001*	<0.001*	0.170	<0.001*	<0.001*	<0.001*

*Estatisticamente significativa ao nível de 5%

Fonte: Autor (2023).

Tabela 48 - Valores-p dos testes post-hoc de Nemenyi para o distribuidor no cenário D

Fill Rate Ponderado - Distribuidor							
	1	2	3	4	5	6	7
2	<0.001*	-	-	-	-	-	-
3	<0.001*	<0.001*	-	-	-	-	-
4	<0.001*	0.980	<0.001*	-	-	-	-
5	0.940	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-	-	-
6	<0.001*	1.000	<0.001*	0.970	<0.001*	-	-
7	<0.001*	<0.001*	0.870	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-
8	<0.001*	1.000	<0.001*	1.000	<0.001*	1.000	<0.001*

TVD Médio - Distribuidor							
	1	2	3	4	5	6	7
2	<0.001*	-	-	-	-	-	-
3	<0.001*	<0.001*	-	-	-	-	-
4	<0.001*	0.980	<0.001*	-	-	-	-
5	0.920	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-	-	-
6	<0.001*	1.000	<0.001*	0.970	<0.001*	-	-
7	<0.001*	<0.001*	0.830	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-
8	<0.001*	1.000	<0.001*	1.000	<0.001*	1.000	<0.001*

Estoque Médio - Distribuidor							
	1	2	3	4	5	6	7
2	<0.001*	-	-	-	-	-	-
3	<0.001*	<0.001*	-	-	-	-	-
4	<0.001*	0.993	<0.001*	-	-	-	-
5	0.011*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-	-	-
6	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-	-
7	<0.001*	<0.001*	0.319	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-
8	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	0.975	<0.001*

IVD Médio - Distribuidor							
	1	2	3	4	5	6	7
2	<0.001*	-	-	-	-	-	-
3	<0.001*	<0.001*	-	-	-	-	-
4	<0.001*	1.000	<0.001*	-	-	-	-
5	0.013*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-	-	-
6	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-	-
7	<0.001*	<0.001*	0.307	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-
8	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	1.000	<0.001*

*Estatisticamente significativa ao nível de 5%

Fonte: Autor (2023).

Tabela 49 - Valores-p dos testes post-hoc de Nemenyi para o armazém da fábrica no cenário D

Fill Rate Ponderado - AF							
	1	2	3	4	5	6	7
2	0.118	-	-	-	-	-	-
3	<0.001*	<0.001*	-	-	-	-	-
4	0.998	0.016*	<0.001*	-	-	-	-
5	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-	-	-
6	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	0.678	-	-
7	0.002*	0.934	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-
8	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	0.387	0.003*	<0.001*

TVD Médio - AF							
	1	2	3	4	5	6	7
2	0.182	-	-	-	-	-	-
3	<0.001*	<0.001*	-	-	-	-	-
4	0.992	0.019*	<0.001*	-	-	-	-
5	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-	-	-
6	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	0.975	-	-
7	<0.001*	0.609	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-
8	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	0.118	0.005*	<0.001*

Estoque Médio - AF							
	1	2	3	4	5	6	7
2	1.000	-	-	-	-	-	-
3	<0.001*	<0.001*	-	-	-	-	-
4	0.998	0.931	<0.001*	-	-	-	-
5	<0.001*	<0.001*	0.999	<0.001*	-	-	-
6	<0.001*	<0.001*	0.137	<0.001*	0.454	-	-
7	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-
8	<0.001*	<0.001*	0.002*	<0.001*	0.021*	0.912	<0.001*

IVD Médio - AF							
	1	2	3	4	5	6	7
2	0.159	-	-	-	-	-	-
3	<0.001*	<0.001*	-	-	-	-	-
4	0.999	0.481	<0.001*	-	-	-	-
5	0.007*	<0.001*	0.005*	<0.001*	-	-	-
6	0.014*	<0.001*	0.002*	0.001*	1.000	-	-
7	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-
8	<0.001*	<0.001*	0.779	<0.001*	0.361	0.257	<0.001*

*Estatisticamente significante ao nível de 5%

Fonte: Autor (2023).

Tabela 50 - Valores-p dos testes post-hoc de Nemenyi para a cadeia de suprimentos no cenário D

Média do Fill Rate Ponderado							
	1	2	3	4	5	6	7
2	<0.001*	-	-	-	-	-	-
3	0.301	<0.001*	-	-	-	-	-
4	<0.001*	0.003*	<0.001*	-	-	-	-
5	<0.001*	0.295	<0.001*	0.797	-	-	-
6	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-	-
7	<0.001*	1.000	<0.001*	0.007*	0.413	<0.001*	-
8	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	0.166	<0.001*

Somatório do TVD Médio							
	1	2	3	4	5	6	7
2	<0.001*	-	-	-	-	-	-
3	0.361	<0.001*	-	-	-	-	-
4	<0.001*	0.002*	<0.001*	-	-	-	-
5	<0.001*	0.035*	<0.001*	0.992	-	-	-
6	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-	-
7	<0.001*	1.000	<0.001*	<0.001*	0.009*	<0.001*	-
8	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	0.134	<0.001*

Somatório do Estoque Médio							
	1	2	3	4	5	6	7
2	<0.001*	-	-	-	-	-	-
3	<0.001*	<0.001*	-	-	-	-	-
4	<0.001*	1.000	<0.001*	-	-	-	-
5	0.931	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-	-	-
6	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-	-
7	<0.001*	0.03*	0.779	0.009*	<0.001*	<0.001*	-
8	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	1.000	<0.001*

Somatório do IVD Médio							
	1	2	3	4	5	6	7
2	<0.001*	-	-	-	-	-	-
3	<0.001*	<0.001*	-	-	-	-	-
4	<0.001*	0.998	<0.001*	-	-	-	-
5	1.000	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-	-	-
6	<0.001*	0.061	<0.001*	0.279	<0.001*	-	-
7	<0.001*	<0.001*	0.387	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-
8	<0.001*	0.043*	<0.001*	0.218	<0.001*	1.000	<0.001*

*Estatisticamente significativa ao nível de 5%

Fonte: Autor (2023).

Tabela 51 - Valores-p dos testes post-hoc de Nemenyi para o distribuidor no cenário E

Fill Rate Ponderado - Distribuidor							
	1	2	3	4	5	6	7
2	<0.001*	-	-	-	-	-	-
3	<0.001*	0.002*	-	-	-	-	-
4	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-	-	-	-
5	0.925	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-	-	-
6	<0.001*	0.137	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-	-
7	<0.001*	0.678	<0.001*	<0.001*	<0.001*	0.982	-
8	<0.001*	<0.001*	<0.001*	0.002*	<0.001*	<0.001*	<0.001*

TVD Médio - Distribuidor							
	1	2	3	4	5	6	7
2	<0.001*	-	-	-	-	-	-
3	<0.001*	<0.001*	-	-	-	-	-
4	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-	-	-	-
5	0.802	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-	-	-
6	<0.001*	0.002*	<0.001*	0.552	<0.001*	-	-
7	<0.001*	0.016*	<0.001*	0.208	<0.001*	0.999	-
8	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*

Estoque Médio - Distribuidor							
	1	2	3	4	5	6	7
2	<0.001*	-	-	-	-	-	-
3	<0.001*	0.124	-	-	-	-	-
4	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-	-	-	-
5	0.986	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-	-	-
6	<0.001*	1.000	0.137	<0.001*	<0.001*	-	-
7	<0.001*	0.002*	0.897	<0.001*	<0.001*	0.002*	-
8	<0.001*	<0.001*	<0.001*	0.996	<0.001*	<0.001*	<0.001*

IVD Médio - Distribuidor							
	1	2	3	4	5	6	7
2	<0.001*	-	-	-	-	-	-
3	<0.001*	<0.001*	-	-	-	-	-
4	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-	-	-	-
5	0.890	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-	-	-
6	<0.001*	1.000	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-	-
7	<0.001*	<0.001*	1.000	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-
8	<0.001*	<0.001*	<0.001*	0.450	<0.001*	<0.001*	<0.001*

*Estatisticamente significante ao nível de 5%

Fonte: Autor (2023).

Tabela 52 - Valores-p dos testes post-hoc de Nemenyi para o armazém da fábrica no cenário E

Fill Rate Ponderado - AF							
	1	2	3	4	5	6	7
2	0.830	-	-	-	-	-	-
3	<0.001*	<0.001*	-	-	-	-	-
4	<0.001*	<0.001*	0.790	-	-	-	-
5	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-	-	-
6	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	1.000	-	-
7	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-
8	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	0.570

TVD Médio - AF							
	1	2	3	4	5	6	7
2	1.000	-	-	-	-	-	-
3	<0.001*	<0.001*	-	-	-	-	-
4	<0.001*	<0.001*	0.150	-	-	-	-
5	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-	-	-
6	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	1.000	-	-
7	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-
8	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	0.450

Estoque Médio - AF							
	1	2	3	4	5	6	7
2	<0.001*	-	-	-	-	-	-
3	0.118	<0.001*	-	-	-	-	-
4	1.000	<0.001*	0.036*	-	-	-	-
5	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-	-	-
6	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-	-
7	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	0.980	<0.001*	-
8	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	0.137	<0.001*	0.007*

IVD Médio - AF							
	1	2	3	4	5	6	7
2	<0.001*	-	-	-	-	-	-
3	<0.001*	<0.001*	-	-	-	-	-
4	0.049*	<0.001*	0.012*	-	-	-	-
5	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-	-	-
6	<0.001*	<0.001*	1.000	0.004*	<0.001*	-	-
7	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-
8	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	0.664	<0.001*	0.002*

*Estatisticamente significante ao nível de 5%

Fonte: Autor (2023).

Tabela 53 - Valores-p dos testes post-hoc de Nemenyi para a cadeia de suprimentos no cenário E

Média do Fill Rate Ponderado							
	1	2	3	4	5	6	7
2	<0.001*	-	-	-	-	-	-
3	0.925	<0.001*	-	-	-	-	-
4	<0.001*	0.002*	<0.001*	-	-	-	-
5	<0.001*	0.016*	<0.001*	<0.001*	-	-	-
6	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-	-
7	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-
8	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	1.000	<0.001*

Somatório do TVD Médio							
	1	2	3	4	5	6	7
2	<0.001*	-	-	-	-	-	-
3	0.524	<0.001*	-	-	-	-	-
4	0.678	<0.001*	1.000	-	-	-	-
5	<0.001*	<0.001*	0.006*	0.003*	-	-	-
6	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-	-
7	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	0.069	-
8	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	0.637	<0.001*

Somatório do Estoque Médio							
	1	2	3	4	5	6	7
2	<0.001*	-	-	-	-	-	-
3	<0.001*	<0.001*	-	-	-	-	-
4	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-	-	-	-
5	<0.001*	<0.001*	1.000	<0.001*	-	-	-
6	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-	-
7	<0.001*	<0.001*	<0.001*	0.980	<0.001*	<0.001*	-
8	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*

Somatório do IVD Médio							
	1	2	3	4	5	6	7
2	<0.001*	-	-	-	-	-	-
3	<0.001*	<0.001*	-	-	-	-	-
4	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-	-	-	-
5	<0.001*	0.069	<0.001*	<0.001*	-	-	-
6	<0.001*	<0.001*	0.026*	<0.001*	<0.001*	-	-
7	<0.001*	<0.001*	0.002*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-
8	<0.001*	<0.001*	<0.001*	0.986	<0.001*	<0.001*	<0.001*

*Estatisticamente significante ao nível de 5%

Fonte: Autor (2023).

Tabela 54 - Valores-p dos testes post-hoc de Nemenyi para o distribuidor no cenário F

Fill Rate Ponderado - Distribuidor							
	1	2	3	4	5	6	7
2	<0.001*	-	-	-	-	-	-
3	<0.001*	<0.001*	-	-	-	-	-
4	<0.001*	<0.001*	0.834	-	-	-	-
5	0.999	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-	-	-
6	<0.001*	0.595	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-	-
7	<0.001*	<0.001*	0.131	0.925	<0.001*	<0.001*	-
8	<0.001*	<0.001*	0.008*	0.387	<0.001*	<0.001*	0.984

TVD Médio - Distribuidor							
	1	2	3	4	5	6	7
2	<0.001*	-	-	-	-	-	-
3	<0.001*	<0.001*	-	-	-	-	-
4	<0.001*	<0.001*	0.980	-	-	-	-
5	1.000	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-	-	-
6	<0.001*	0.580	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-	-
7	<0.001*	<0.001*	0.150	0.700	<0.001*	<0.001*	-
8	<0.001*	<0.001*	0.04*	0.370	<0.001*	<0.001*	1.000

Estoque Médio - Distribuidor							
	1	2	3	4	5	6	7
2	<0.001*	-	-	-	-	-	-
3	<0.001*	<0.001*	-	-	-	-	-
4	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-	-	-	-
5	0.430	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-	-	-
6	<0.001*	0.230	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-	-
7	<0.001*	<0.001*	0.430	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-
8	<0.001*	<0.001*	<0.001*	0.680	<0.001*	<0.001*	<0.001*

IVD Médio - Distribuidor							
	1	2	3	4	5	6	7
2	<0.001*	-	-	-	-	-	-
3	<0.001*	<0.001*	-	-	-	-	-
4	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-	-	-	-
5	0.540	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-	-	-
6	<0.001*	0.390	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-	-
7	<0.001*	<0.001*	0.450	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-
8	<0.001*	<0.001*	<0.001*	0.650	<0.001*	<0.001*	<0.001*

*Estatisticamente significativa ao nível de 5%

Fonte: Autor (2023).

Tabela 55 - Valores-p dos testes post-hoc de Nemenyi para o armazém da fábrica no cenário F

Fill Rate Ponderado - AF							
	1	2	3	4	5	6	7
2	<0.001*	-	-	-	-	-	-
3	0.001*	<0.001*	-	-	-	-	-
4	<0.001*	<0.001*	0.496	-	-	-	-
5	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-	-	-
6	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-	-
7	<0.001*	0.002*	<0.001*	<0.001*	0.015*	<0.001*	-
8	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	0.337	<0.001*	0.937

TVD Médio - AF							
	1	2	3	4	5	6	7
2	<0.001*	-	-	-	-	-	-
3	<0.001*	0.110	-	-	-	-	-
4	<0.001*	0.950	0.740	-	-	-	-
5	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-	-	-
6	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-	-
7	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	0.970	<0.001*	-
8	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	0.850	<0.001*	1.000

Estoque Médio - AF							
	1	2	3	4	5	6	7
2	0.002*	-	-	-	-	-	-
3	<0.001*	<0.001*	-	-	-	-	-
4	<0.001*	<0.001*	0.968	-	-	-	-
5	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-	-	-
6	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	0.002*	-	-
7	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-
8	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	1.000

IVD Médio - AF							
	1	2	3	4	5	6	7
2	<0.001*	-	-	-	-	-	-
3	<0.001*	<0.001*	-	-	-	-	-
4	<0.001*	<0.001*	0.678	-	-	-	-
5	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-	-	-
6	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-	-
7	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-
8	<0.001*	0.011*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	0.199

*Estatisticamente significante ao nível de 5%

Fonte: Autor (2023).

Tabela 56 - Valores-p dos testes post-hoc de Nemenyi para a cadeia de suprimentos no cenário F

Média do Fill Rate Ponderado							
	1	2	3	4	5	6	7
2	<0.001*	-	-	-	-	-	-
3	<0.001*	<0.001*	-	-	-	-	-
4	<0.001*	<0.001*	0.595	-	-	-	-
5	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-	-	-
6	0.002*	0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-	-
7	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-
8	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	0.623

Somatório do TVD Médio							
	1	2	3	4	5	6	7
2	<0.001*	-	-	-	-	-	-
3	<0.001*	<0.001*	-	-	-	-	-
4	<0.001*	<0.001*	0.743	-	-	-	-
5	0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-	-	-
6	0.001*	0.002*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-	-
7	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-
8	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	1.000

Somatório do Estoque Médio							
	1	2	3	4	5	6	7
2	1.000	-	-	-	-	-	-
3	<0.001*	<0.001*	-	-	-	-	-
4	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-	-	-	-
5	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-	-	-
6	<0.001*	<0.001*	0.003*	<0.001*	1.000	-	-
7	<0.001*	<0.001*	<0.001*	0.844	<0.001*	<0.001*	-
8	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*

Somatório do IVD Médio							
	1	2	3	4	5	6	7
2	<0.001*	-	-	-	-	-	-
3	<0.001*	<0.001*	-	-	-	-	-
4	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-	-	-	-
5	<0.001*	0.003*	<0.001*	<0.001*	-	-	-
6	<0.001*	<0.001*	0.029*	<0.001*	<0.001*	-	-
7	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	0.349	-
8	<0.001*	<0.001*	<0.001*	0.004*	<0.001*	<0.001*	<0.001*

*Estatisticamente significativa ao nível de 5%

Fonte: Autor (2023).

Tabela 57 - Valores-p dos testes post-hoc de Nemenyi para o distribuidor no cenário G

Fill Rate Ponderado - Distribuidor							
	1	2	3	4	5	6	7
2	<0.001*	-	-	-	-	-	-
3	<0.001*	<0.001*	-	-	-	-	-
4	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-	-	-	-
5	0.813	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-	-	-
6	<0.001*	0.349	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-	-
7	<0.001*	<0.001*	0.001*	0.023*	<0.001*	<0.001*	-
8	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*

TVD Médio - Distribuidor							
	1	2	3	4	5	6	7
2	<0.001*	-	-	-	-	-	-
3	<0.001*	<0.001*	-	-	-	-	-
4	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-	-	-	-
5	0.802	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-	-	-
6	<0.001*	0.374	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-	-
7	<0.001*	<0.001*	<0.001*	0.650	<0.001*	<0.001*	-
8	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*

Estoque Médio - Distribuidor							
	1	2	3	4	5	6	7
2	<0.001*	-	-	-	-	-	-
3	<0.001*	<0.001*	-	-	-	-	-
4	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-	-	-	-
5	1.000	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-	-	-
6	<0.001*	0.120	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-	-
7	<0.001*	<0.001*	0.510	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-
8	<0.001*	<0.001*	<0.001*	0.880	<0.001*	<0.001*	<0.001*

IVD Médio - Distribuidor							
	1	2	3	4	5	6	7
2	<0.001*	-	-	-	-	-	-
3	<0.001*	<0.001*	-	-	-	-	-
4	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-	-	-	-
5	1.000	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-	-	-
6	<0.001*	0.096	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-	-
7	<0.001*	<0.001*	1.000	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-
8	<0.001*	<0.001*	<0.001*	1.000	<0.001*	<0.001*	<0.001*

*Estatisticamente significativa ao nível de 5%

Fonte: Autor (2023).

Tabela 59 - Valores-p dos testes post-hoc de Nemenyi para a cadeia de suprimentos no cenário G

Média do Fill Rate Ponderado							
	1	2	3	4	5	6	7
2	<0.001*	-	-	-	-	-	-
3	<0.001*	<0.001*	-	-	-	-	-
4	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-	-	-	-
5	<0.001*	<0.001*	<0.001*	1.000	-	-	-
6	0.008*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-	-
7	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-
8	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	0.001*

Somatório do TVD Médio							
	1	2	3	4	5	6	7
2	<0.001*	-	-	-	-	-	-
3	<0.001*	<0.001*	-	-	-	-	-
4	<0.001*	<0.001*	0.524	-	-	-	-
5	0.065	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-	-	-
6	<0.001*	0.166	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-	-
7	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-
8	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	0.001*

Somatório do Estoque Médio							
	1	2	3	4	5	6	7
2	0.960	-	-	-	-	-	-
3	<0.001*	<0.001*	-	-	-	-	-
4	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-	-	-	-
5	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-	-	-
6	<0.001*	<0.001*	1.000	<0.001*	<0.001*	-	-
7	<0.001*	<0.001*	<0.001*	0.180	<0.001*	<0.001*	-
8	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*

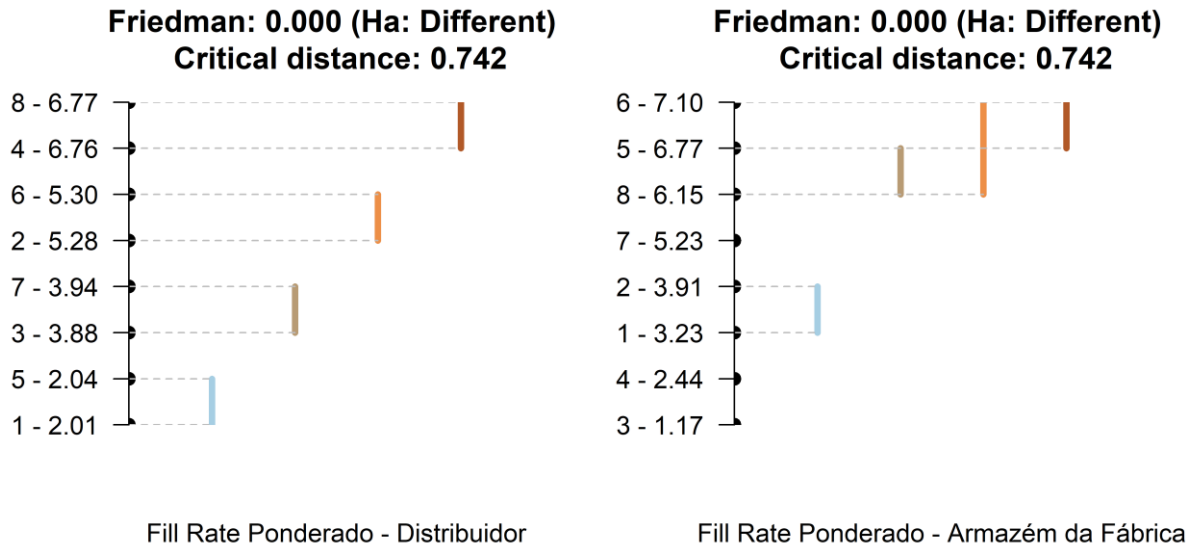
Somatório do IVD Médio							
	1	2	3	4	5	6	7
2	0.124	-	-	-	-	-	-
3	<0.001*	<0.001*	-	-	-	-	-
4	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-	-	-	-
5	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-	-	-
6	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	0.844	-	-
7	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	-
8	<0.001*	<0.001*	<0.001*	0.538	<0.001*	<0.001*	<0.001*

*Estatisticamente significativa ao nível de 5%

Fonte: Autor (2023).

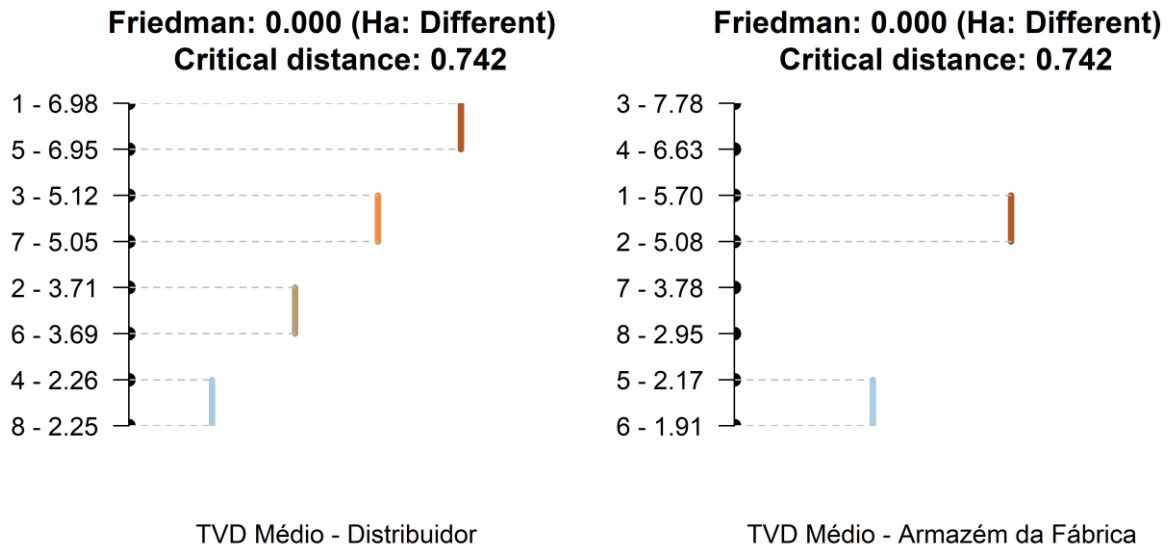
APÊNDICE E – DIAGRAMAS DE DIFERENÇAS CRÍTICAS PARA VISUALIZAÇÃO DOS RESULTADOS DO TESTE POST-HOC DE NEMENYI

Figura 91 - Diagrama de diferenças críticas para FRP no cenário A



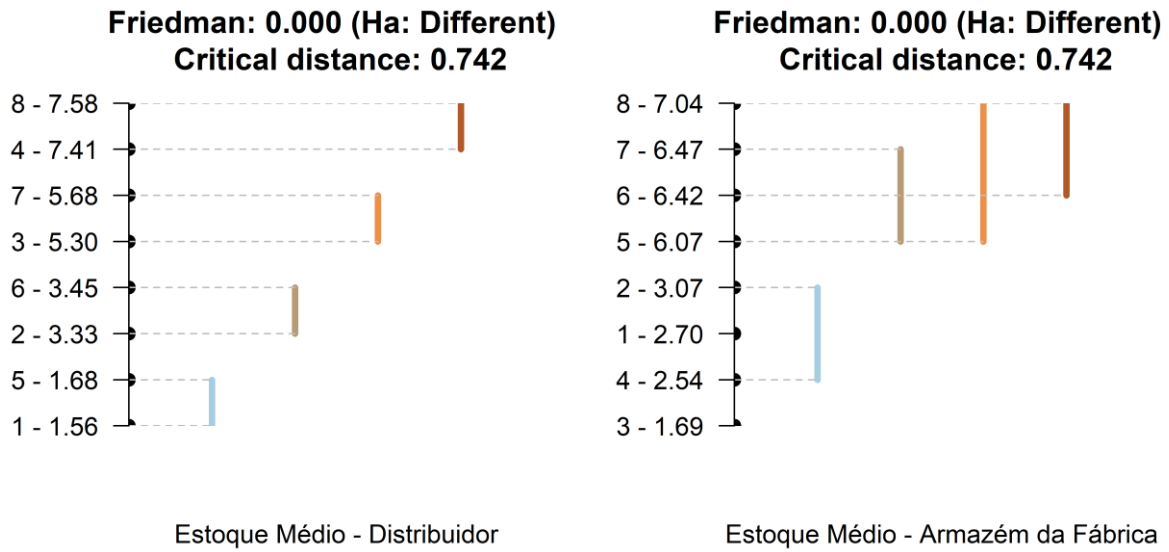
Fonte: Autor (2023).

Figura 92 - Diagrama de diferenças críticas para TVD Médio no cenário A



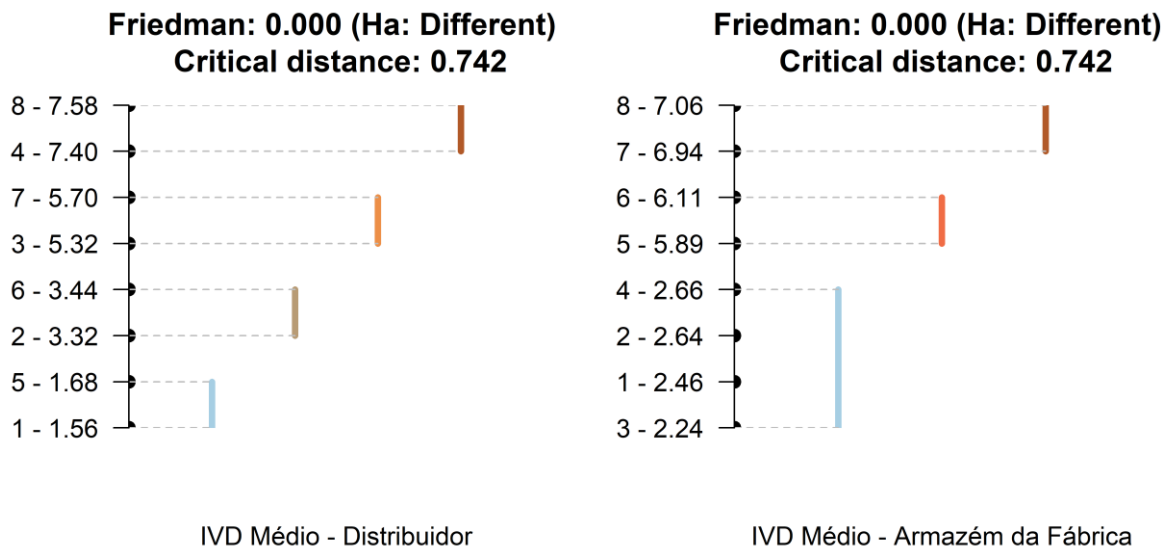
Fonte: Autor (2023).

Figura 93 - Diagrama de diferenças críticas para Estoque Médio no cenário A



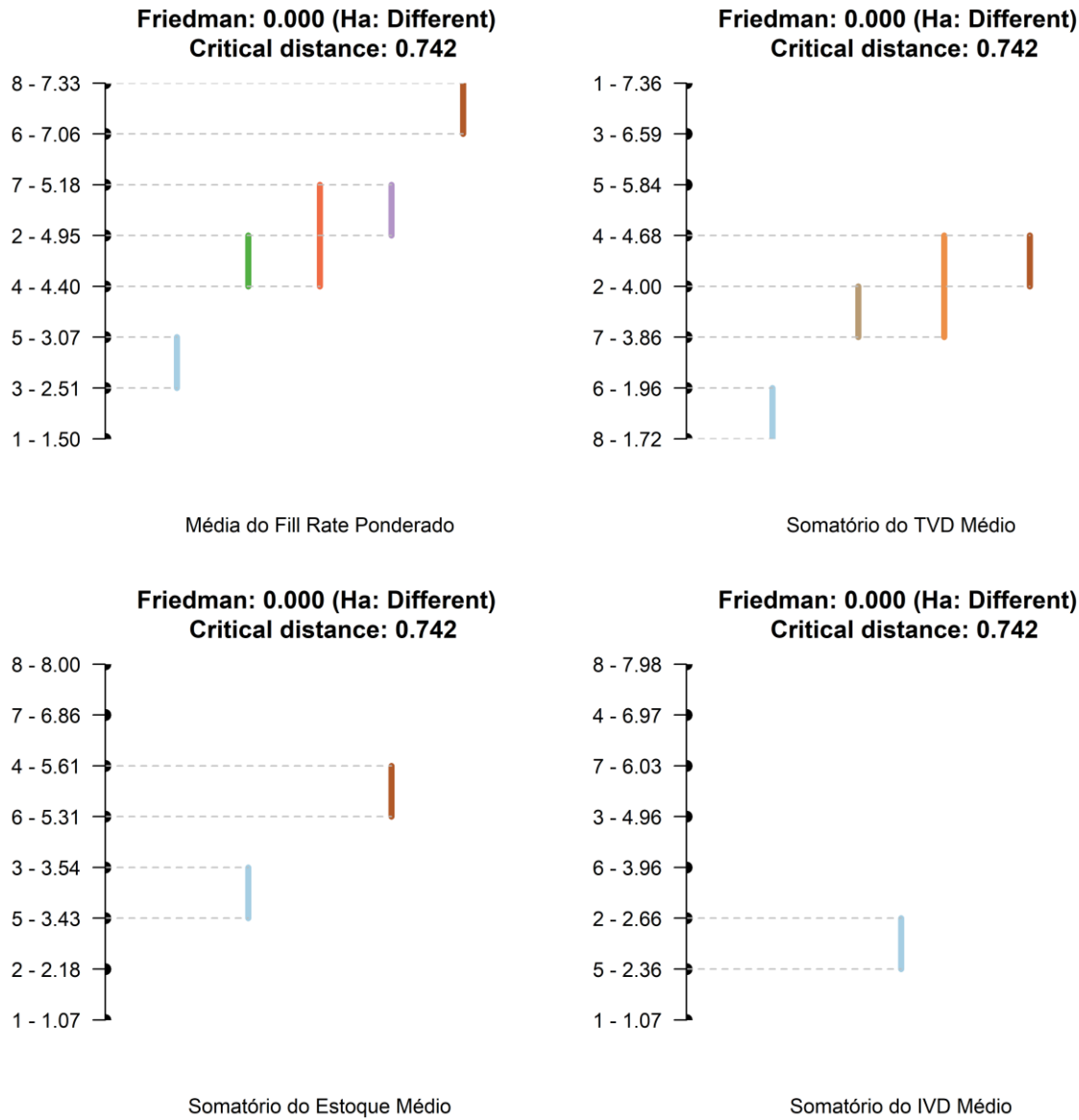
Fonte: Autor (2023).

Figura 94 - Diagrama de diferenças críticas para IVD Médio no cenário A



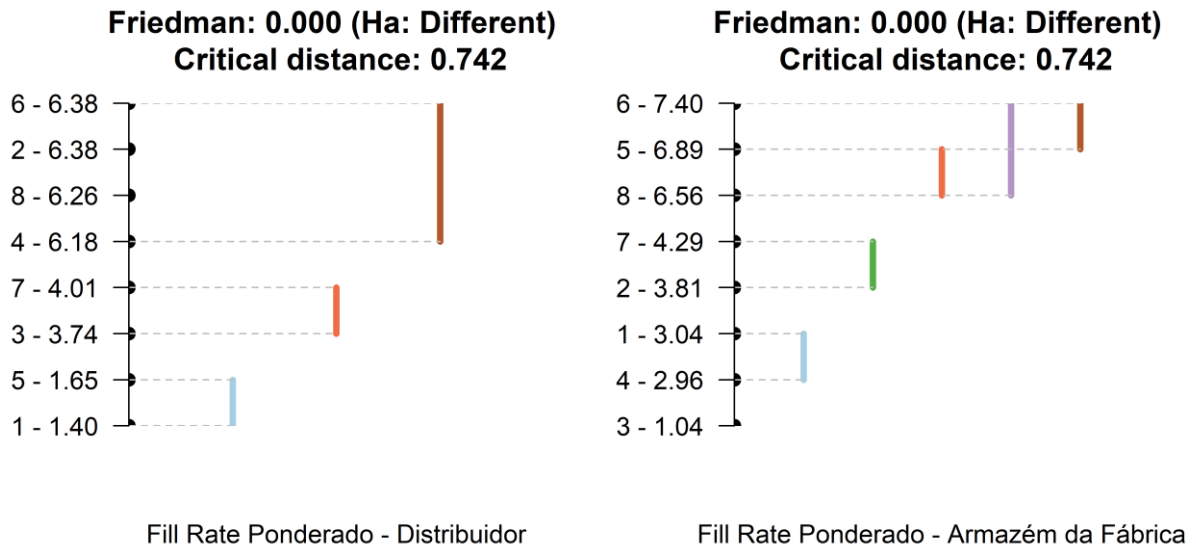
Fonte: Autor (2023).

Figura 95 - Diagrama de diferenças críticas para as medidas de desempenho da cadeia de suprimentos no cenário A



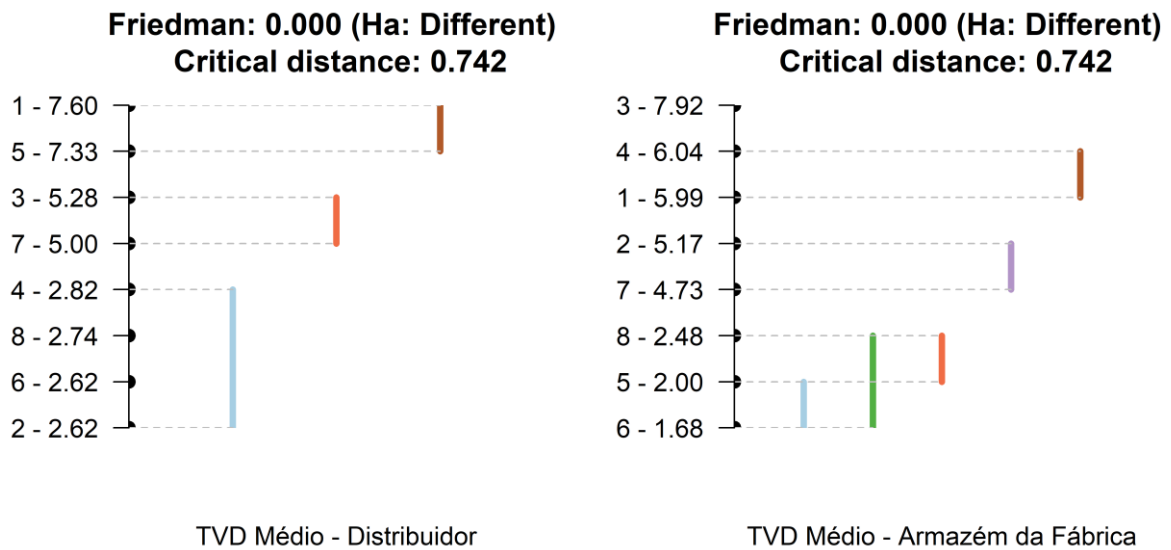
Fonte: Autor (2023).

Figura 96 - Diagrama de diferenças críticas para FRP no cenário B



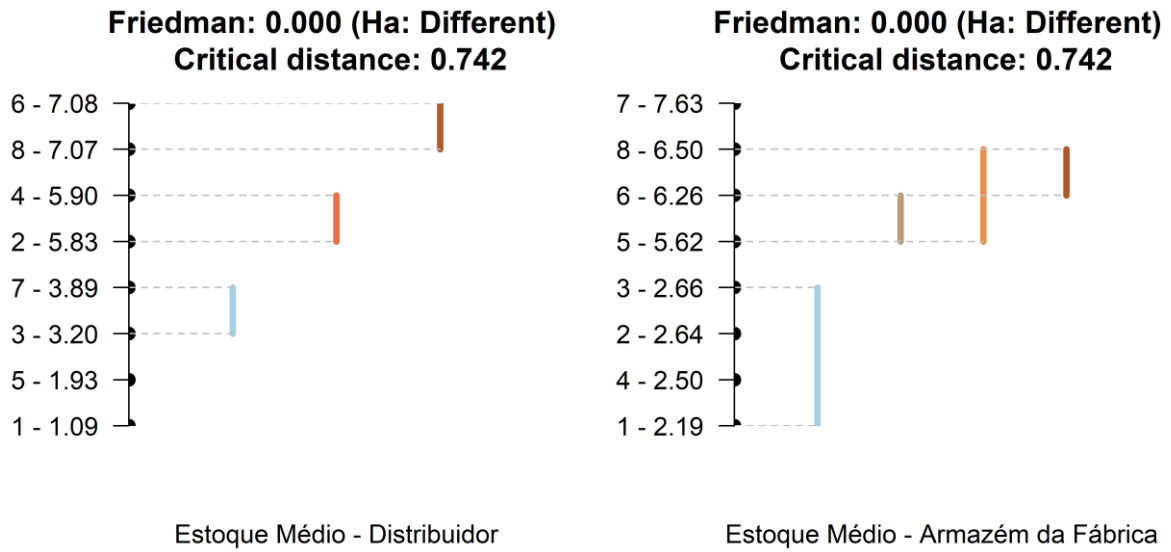
Fonte: Autor (2023).

Figura 97 - Diagrama de diferenças críticas para TVD Médio no cenário B



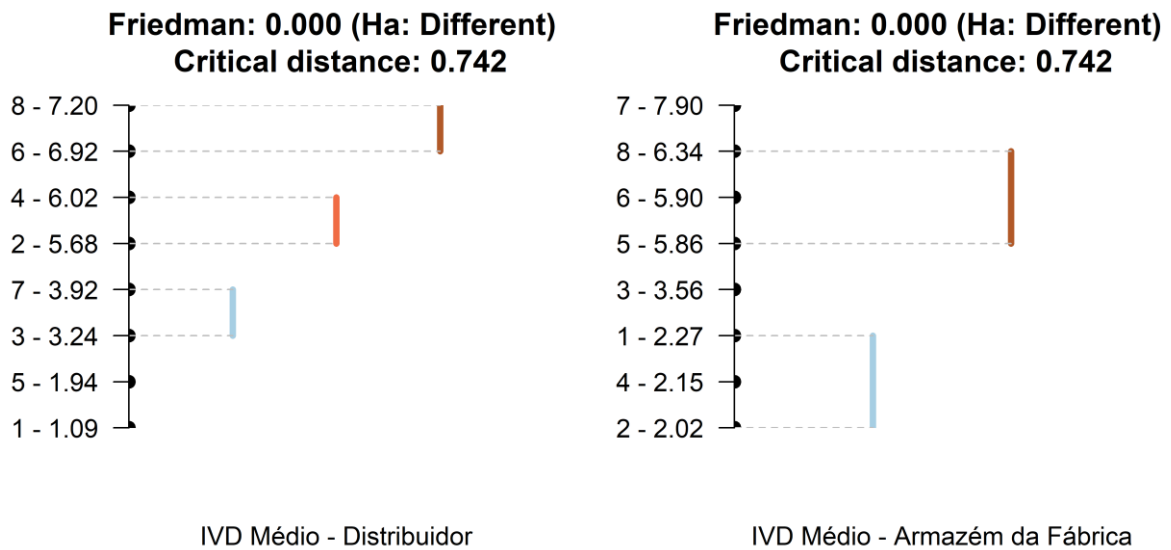
Fonte: Autor (2023).

Figura 98 - Diagrama de diferenças críticas para Estoque Médio no cenário B



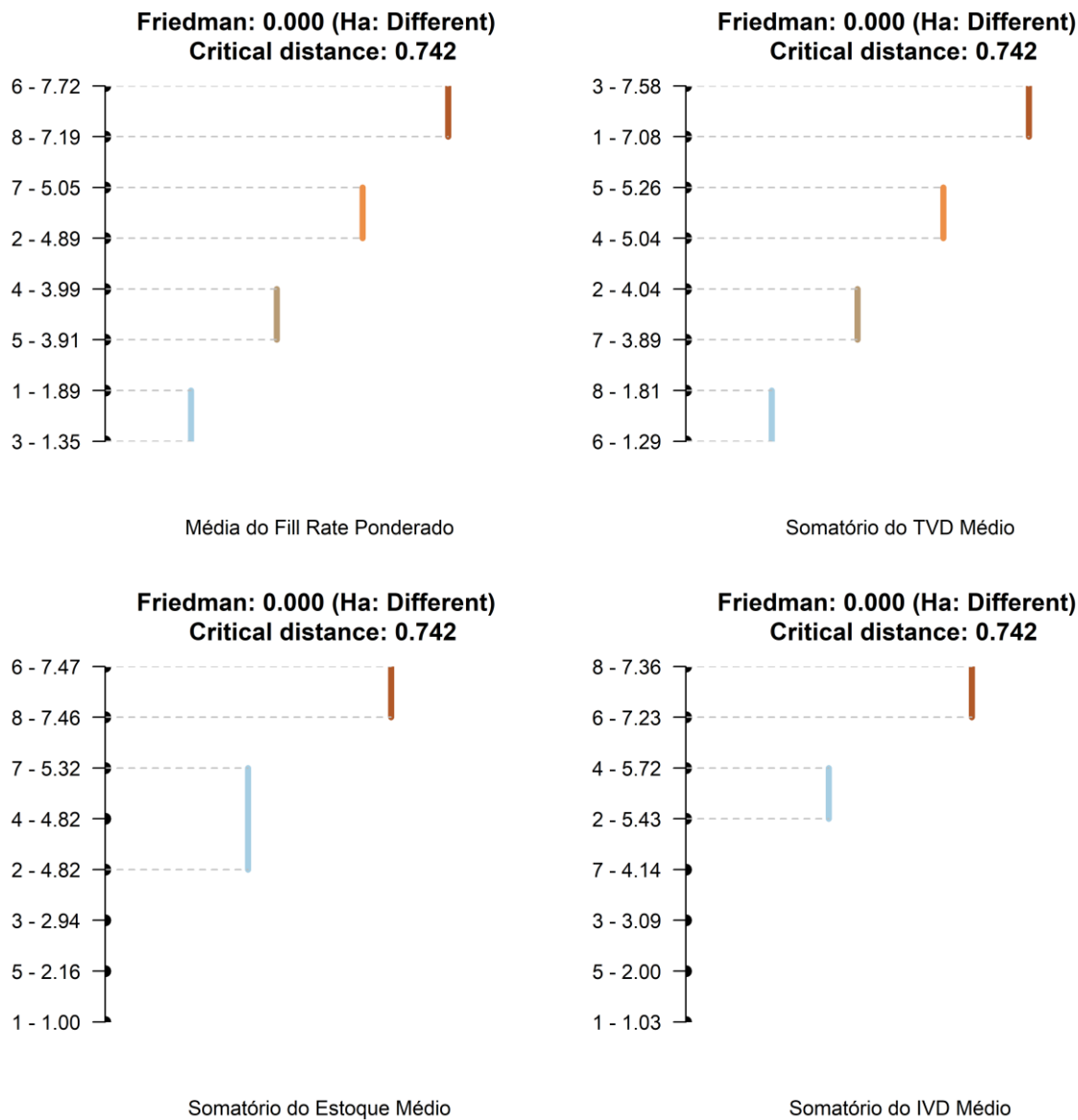
Fonte: Autor (2023).

Figura 99 - Diagrama de diferenças críticas para IVD Médio no cenário B



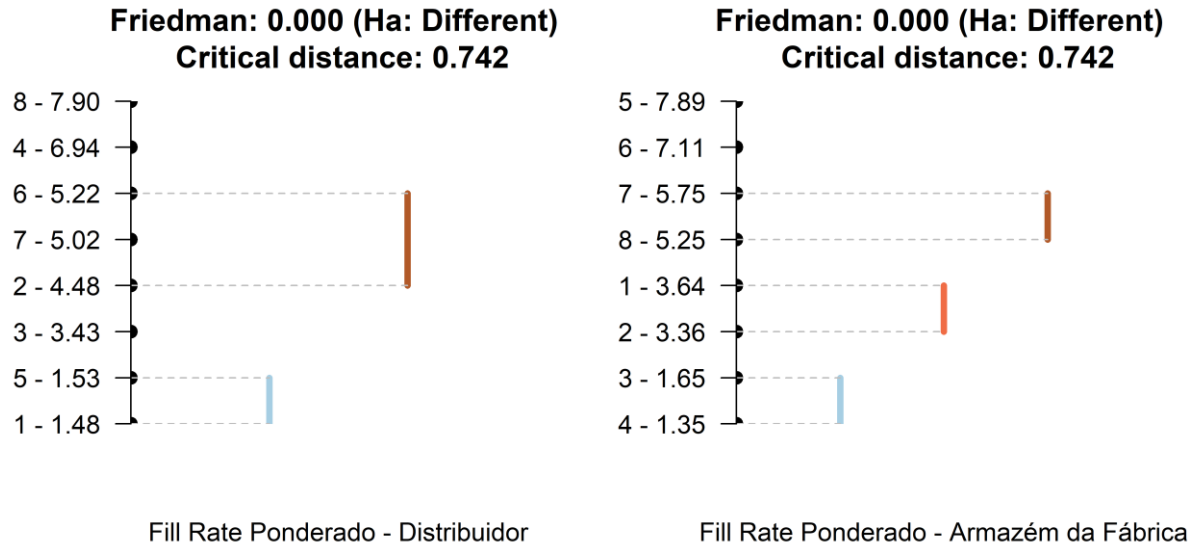
Fonte: Autor (2023).

Figura 100 - Diagrama de diferenças críticas para as medidas de desempenho da cadeia de suprimentos no cenário B



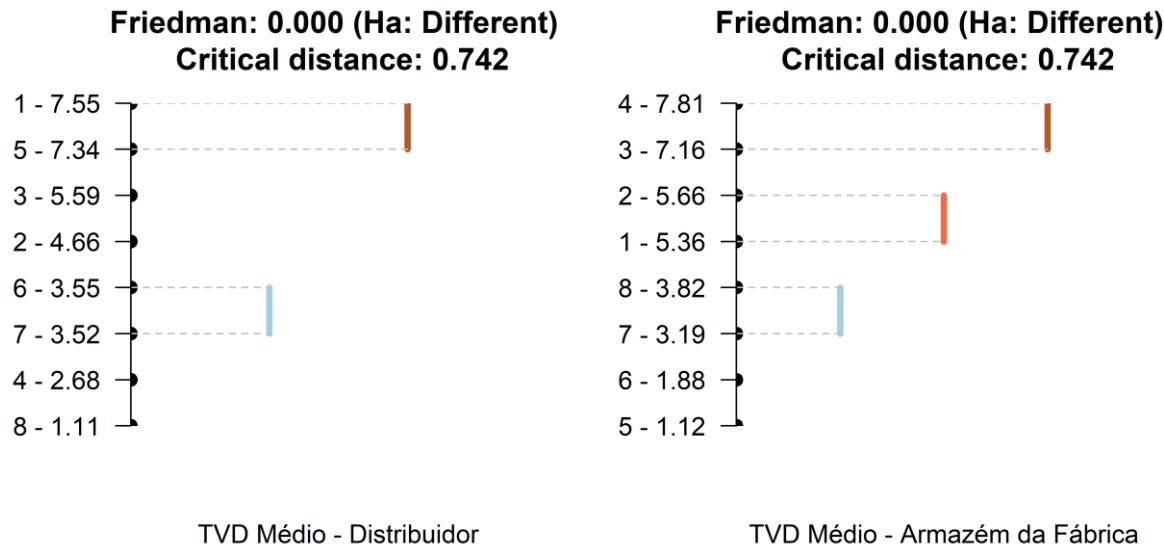
Fonte: Autor (2023).

Figura 101 - Diagrama de diferenças críticas para FRP no cenário C



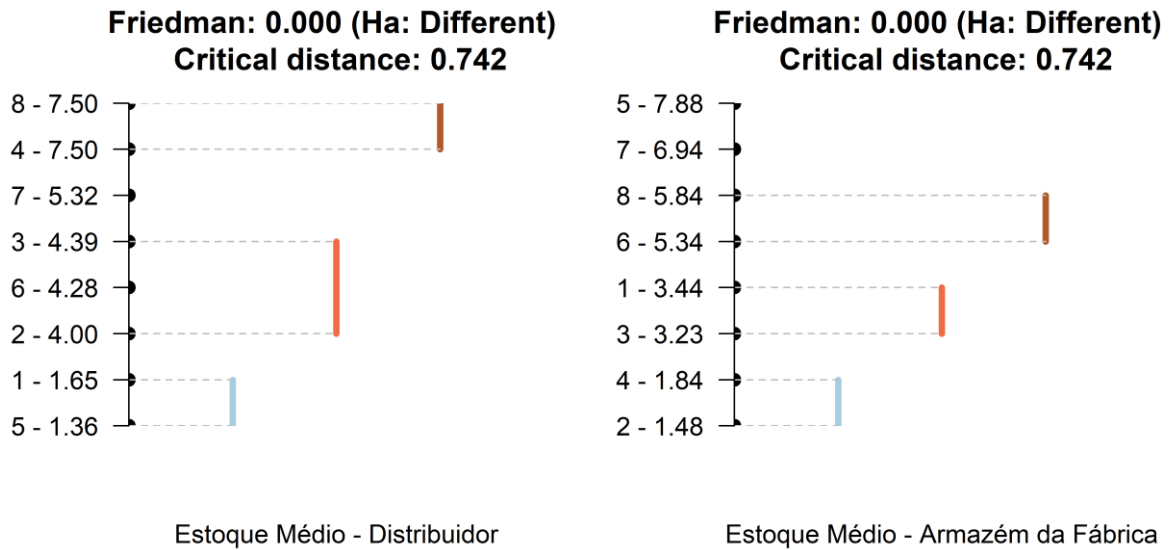
Fonte: Autor (2023).

Figura 102 - Diagrama de diferenças críticas para TVD Médio no cenário C



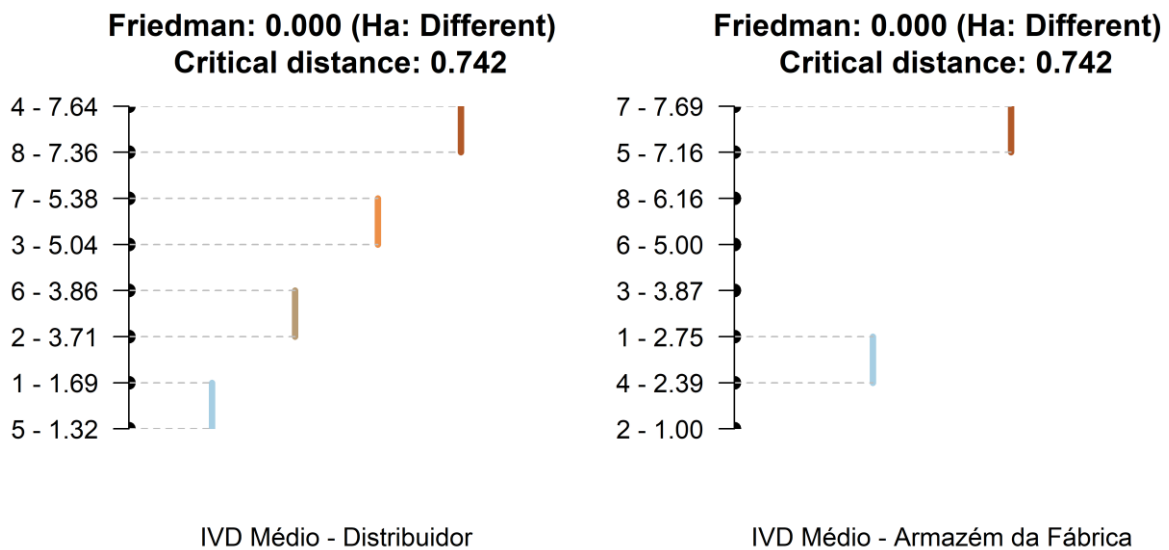
Fonte: Autor (2023).

Figura 103 - Diagrama de diferenças críticas para Estoque Médio no cenário C



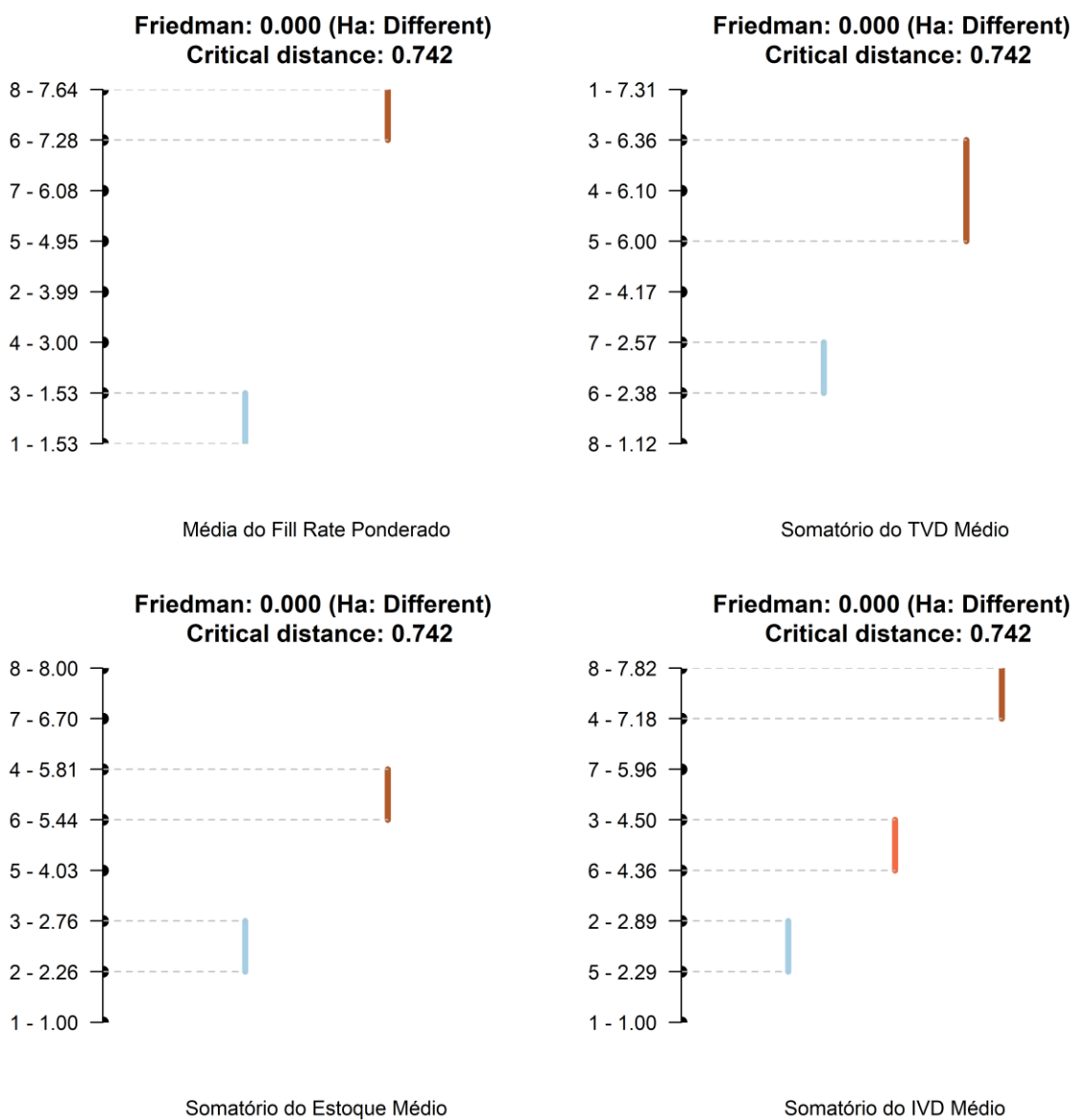
Fonte: Autor (2023).

Figura 104 - Diagrama de diferenças críticas para IVD Médio no cenário C



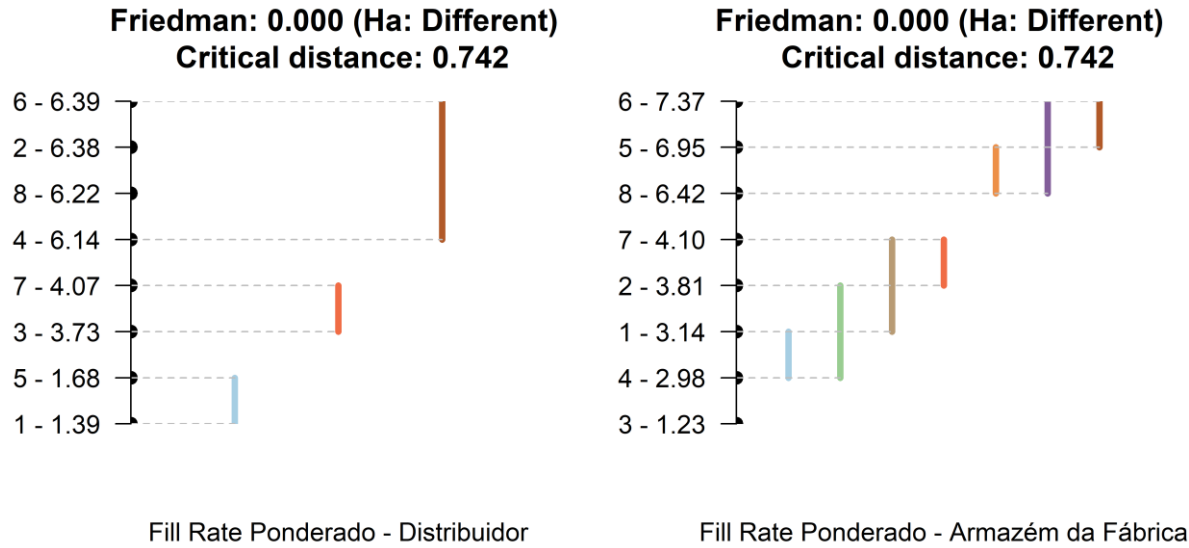
Fonte: Autor (2023).

Figura 105 - Diagrama de diferenças críticas para as medidas de desempenho da cadeia de suprimentos no cenário C



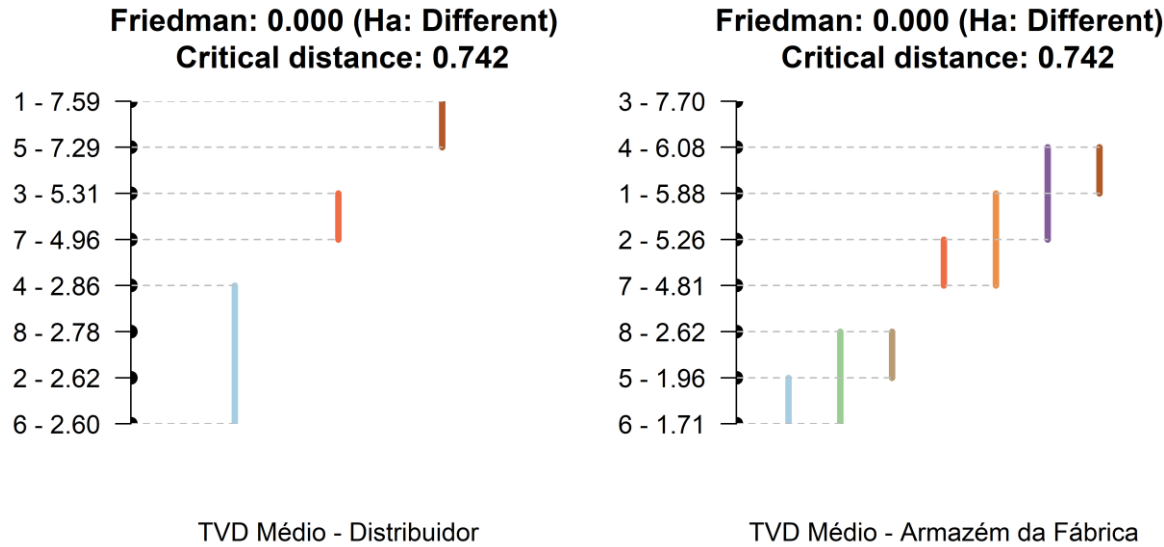
Fonte: Autor (2023).

Figura 106 - Diagrama de diferenças críticas para FRP no cenário D



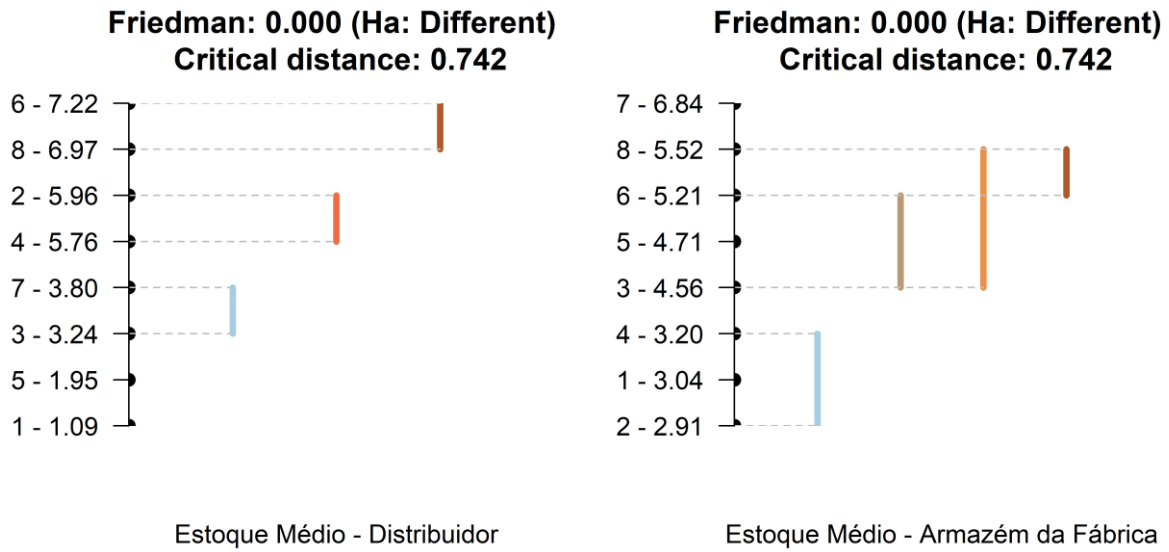
Fonte: Autor (2023).

Figura 107 - Diagrama de diferenças críticas para TVD Médio no cenário D



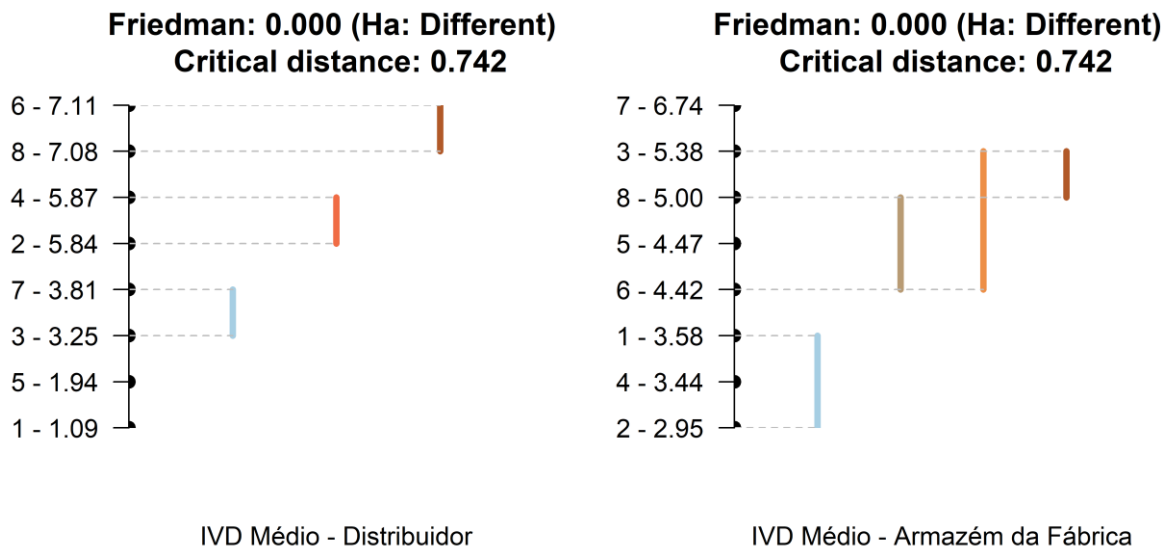
Fonte: Autor (2023).

Figura 108 - Diagrama de diferenças críticas para Estoque Médio no cenário D



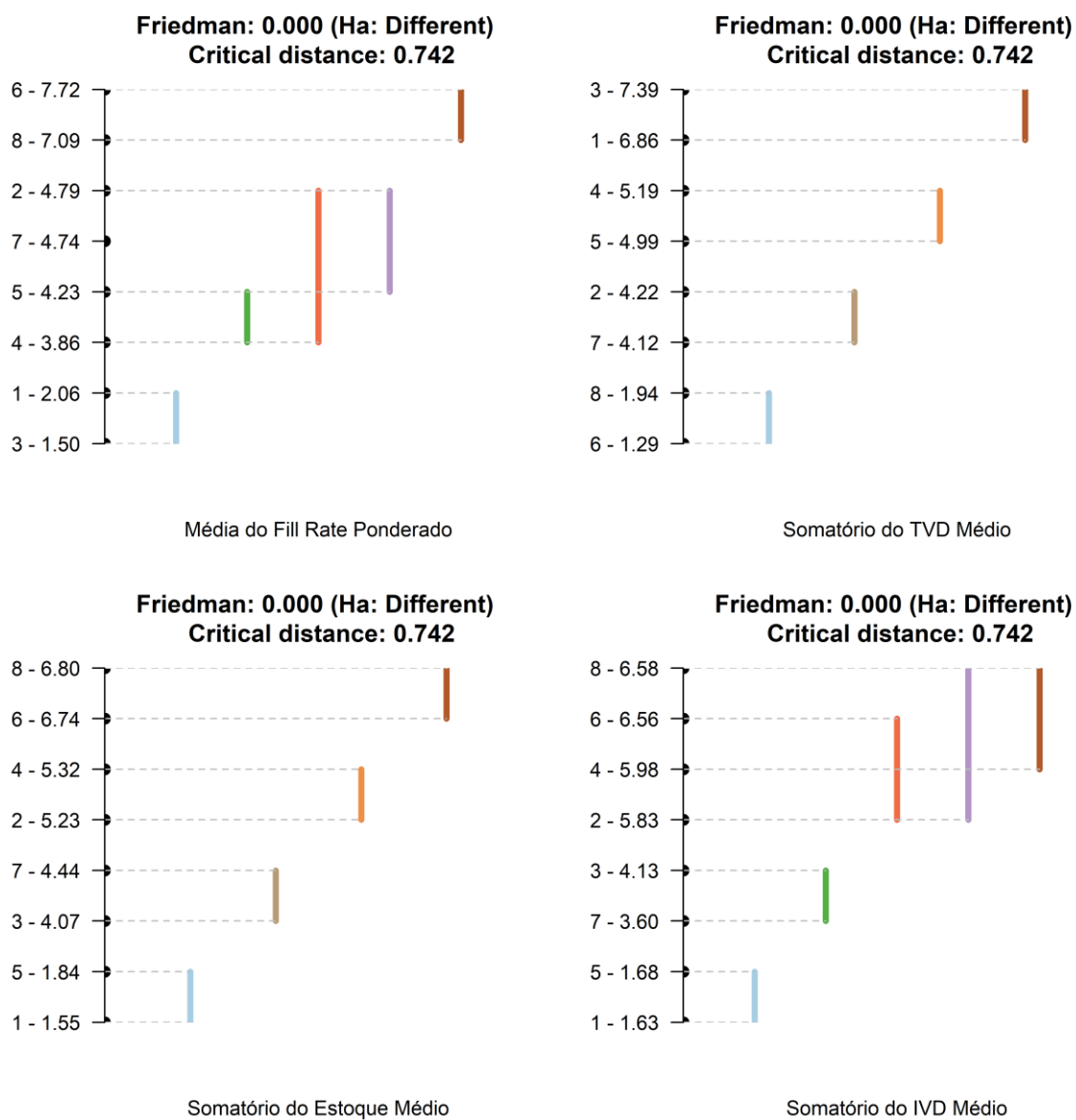
Fonte: Autor (2023).

Figura 109 - Diagrama de diferenças críticas para IVD Médio no cenário D



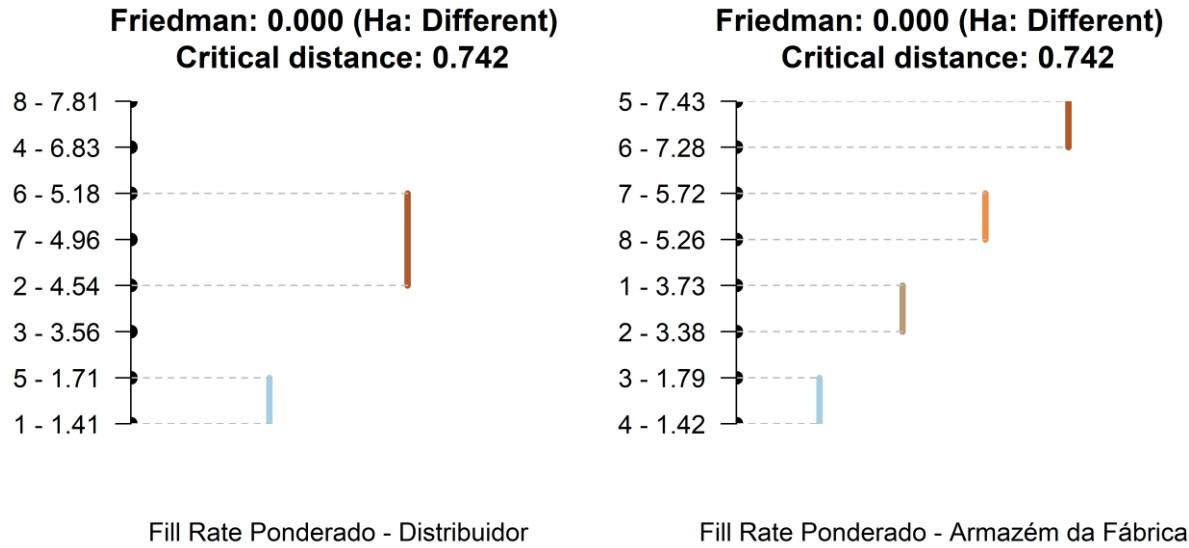
Fonte: Autor (2023).

Figura 110 - Diagrama de diferenças críticas para as medidas de desempenho da cadeia de suprimentos no cenário D



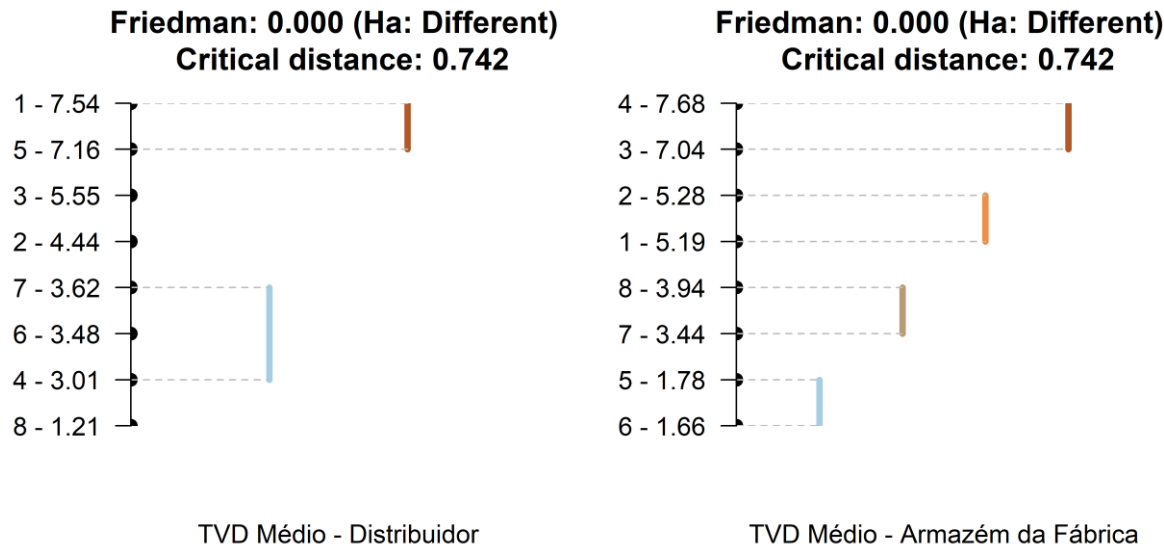
Fonte: Autor (2023).

Figura 111 - Diagrama de diferenças críticas para FRP no cenário E



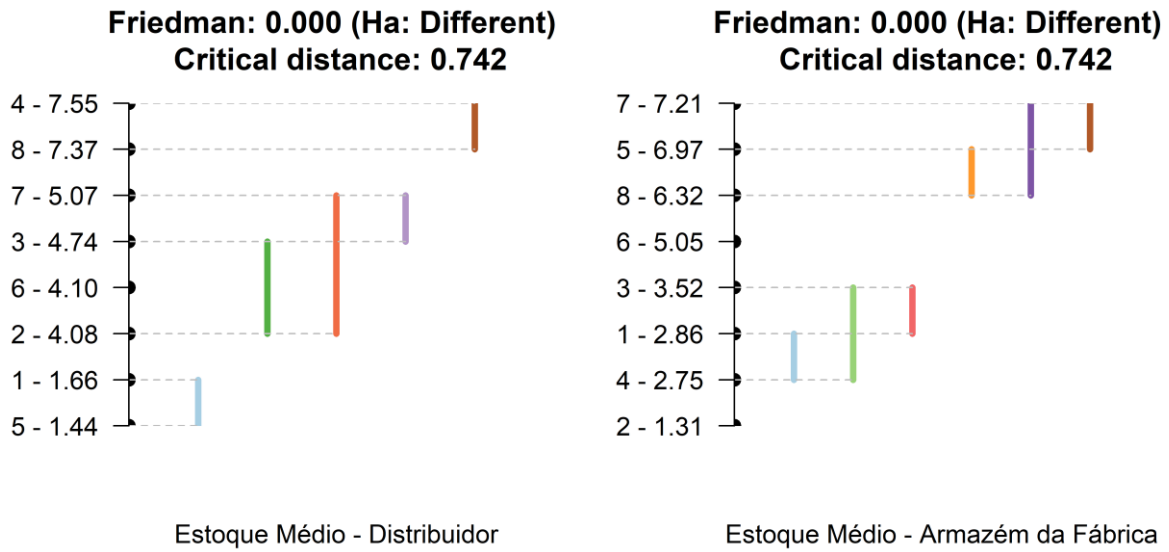
Fonte: Autor (2023).

Figura 112 - Diagrama de diferenças críticas para TVD Médio no cenário E



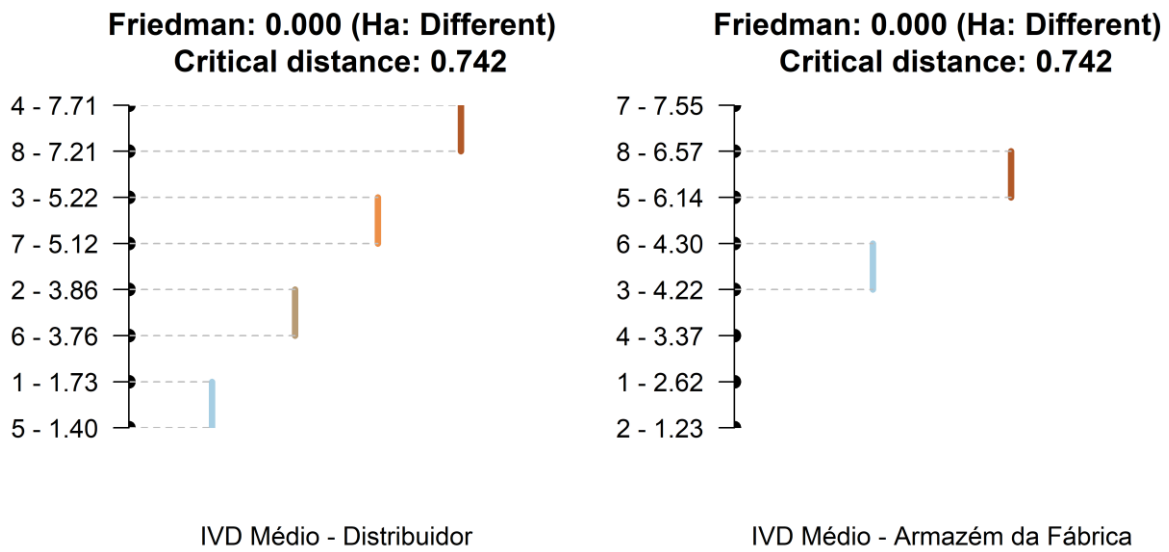
Fonte: Autor (2023).

Figura 113 - Diagrama de diferenças críticas para Estoque Médio no cenário E



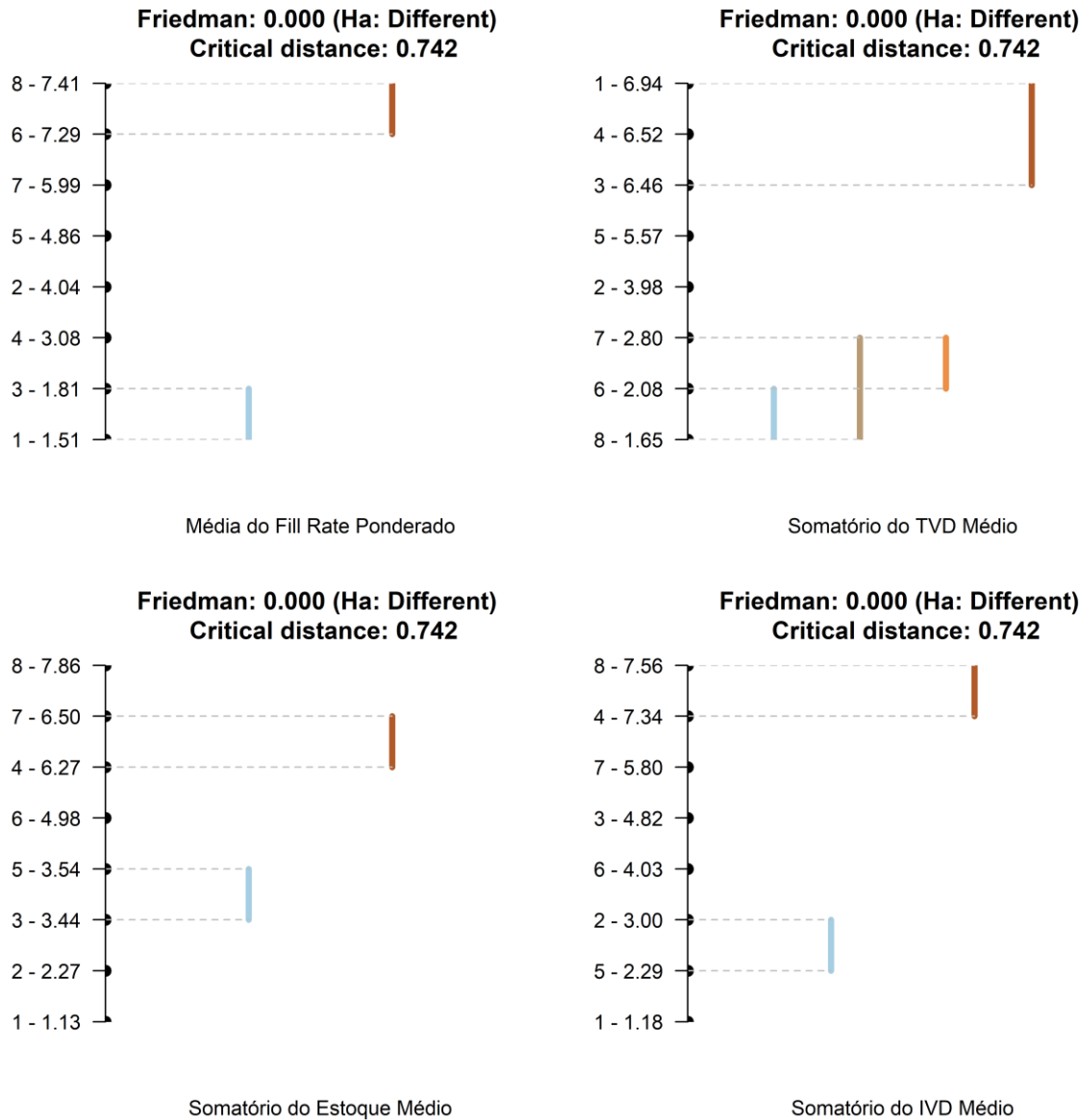
Fonte: Autor (2023).

Figura 114 - Diagrama de diferenças críticas para IVD Médio no cenário E



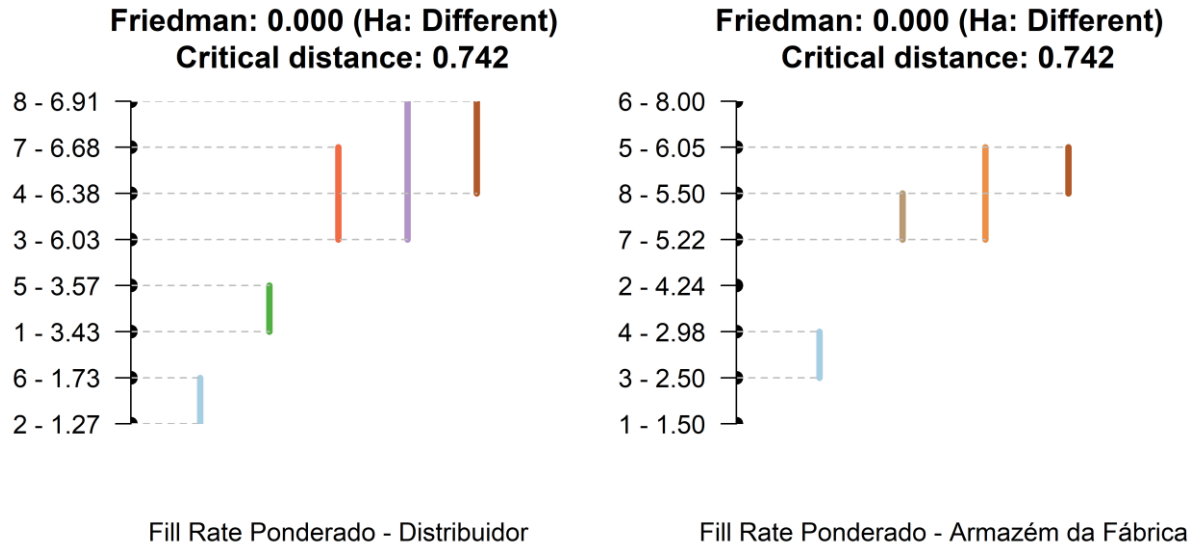
Fonte: Autor (2023).

Figura 115 - Diagrama de diferenças críticas para as medidas de desempenho da cadeia de suprimentos no cenário E



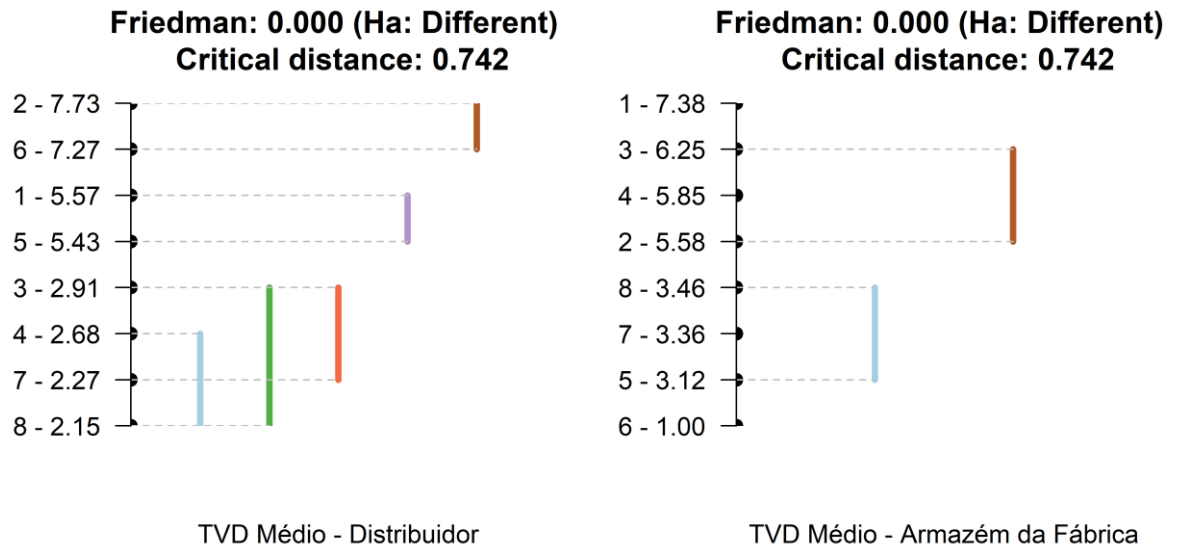
Fonte: Autor (2023).

Figura 116 - Diagrama de diferenças críticas para FRP no cenário F



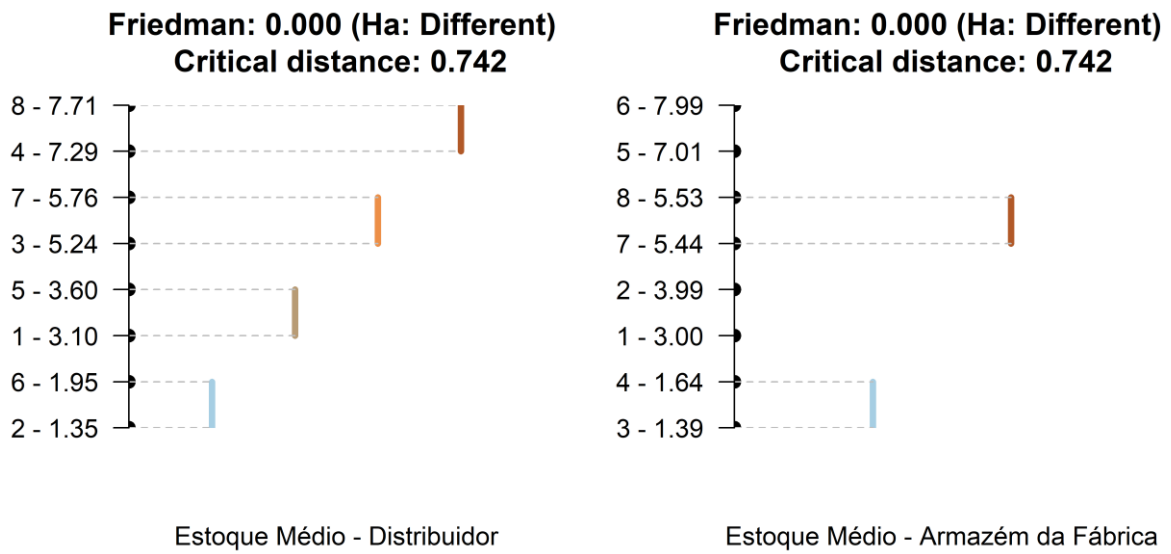
Fonte: Autor (2023).

Figura 117 - Diagrama de diferenças críticas para TVD Médio no cenário F



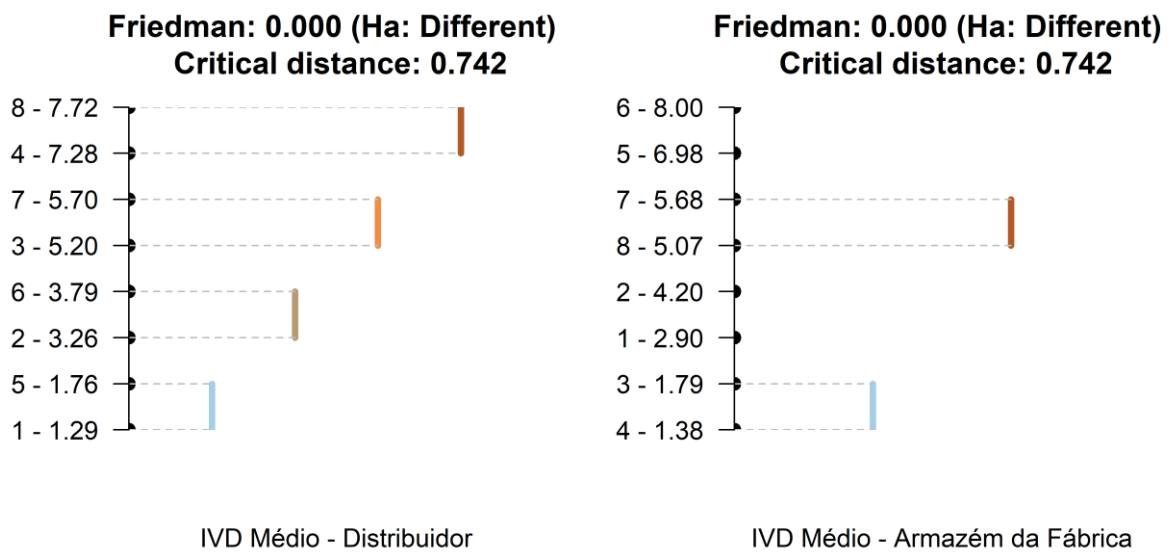
Fonte: Autor (2023).

Figura 118 - Diagrama de diferenças críticas para Estoque Médio no cenário F



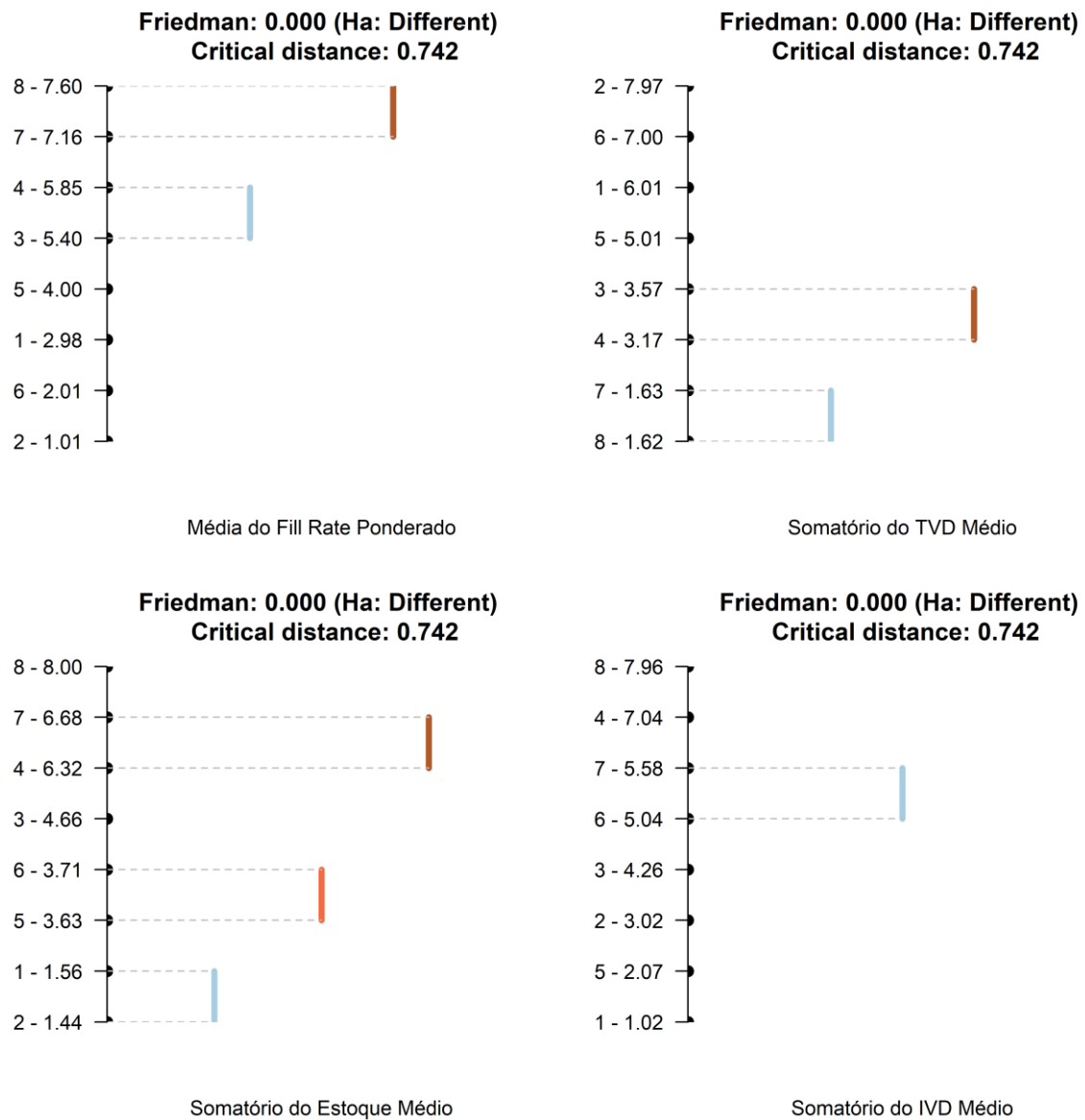
Fonte: Autor (2023).

Figura 119 - Diagrama de diferenças críticas para IVD Médio no cenário F



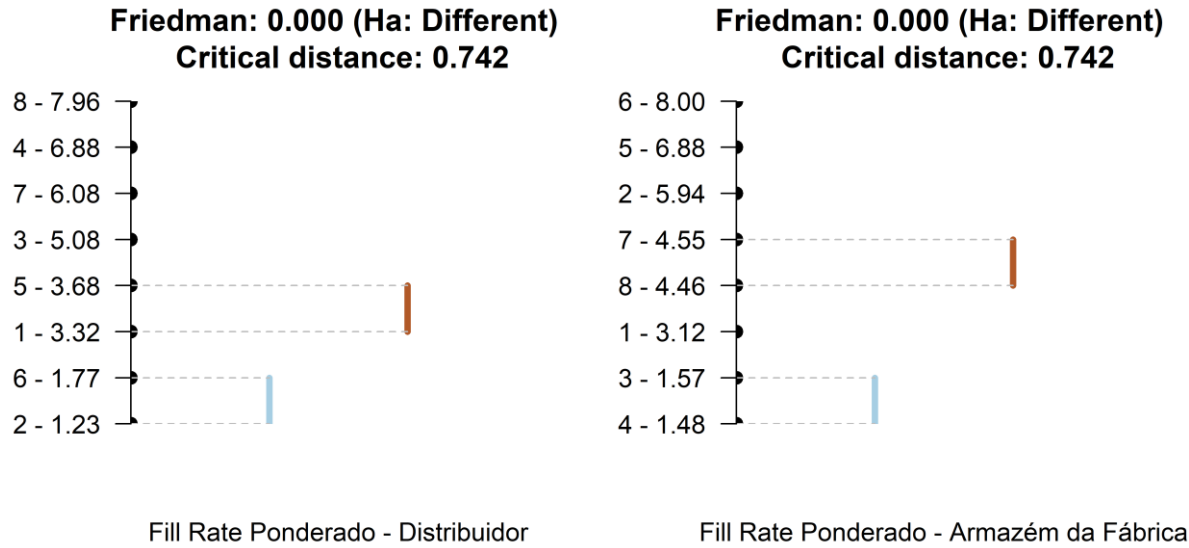
Fonte: Autor (2023).

Figura 120 - Diagrama de diferenças críticas para as medidas de desempenho da cadeia de suprimentos no cenário F



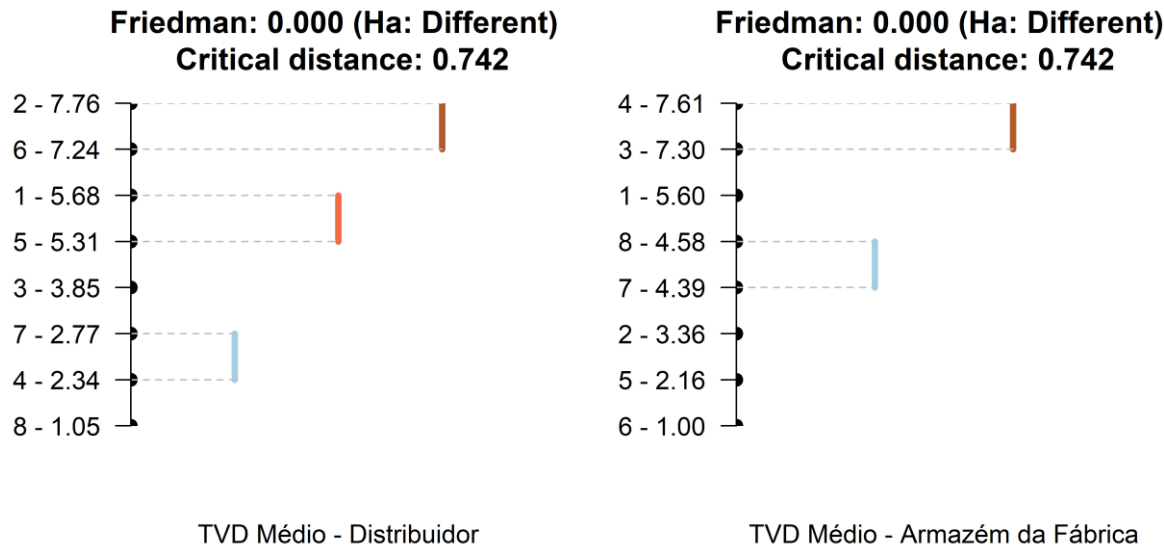
Fonte: Autor (2023).

Figura 121 - Diagrama de diferenças críticas para FRP no cenário G



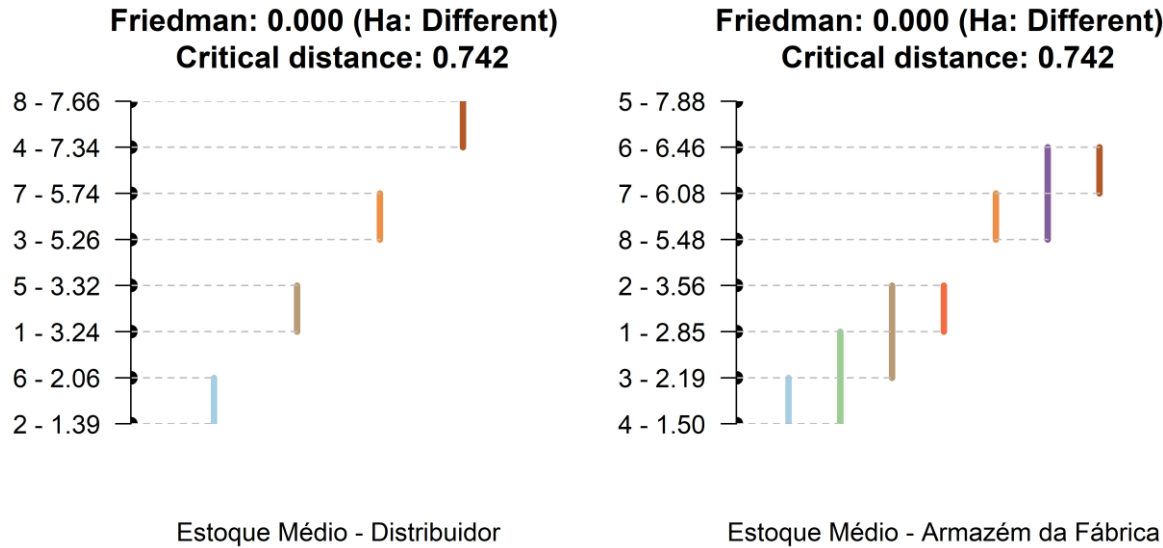
Fonte: Autor (2023).

Figura 122 - Diagrama de diferenças críticas para TVD Médio no cenário G



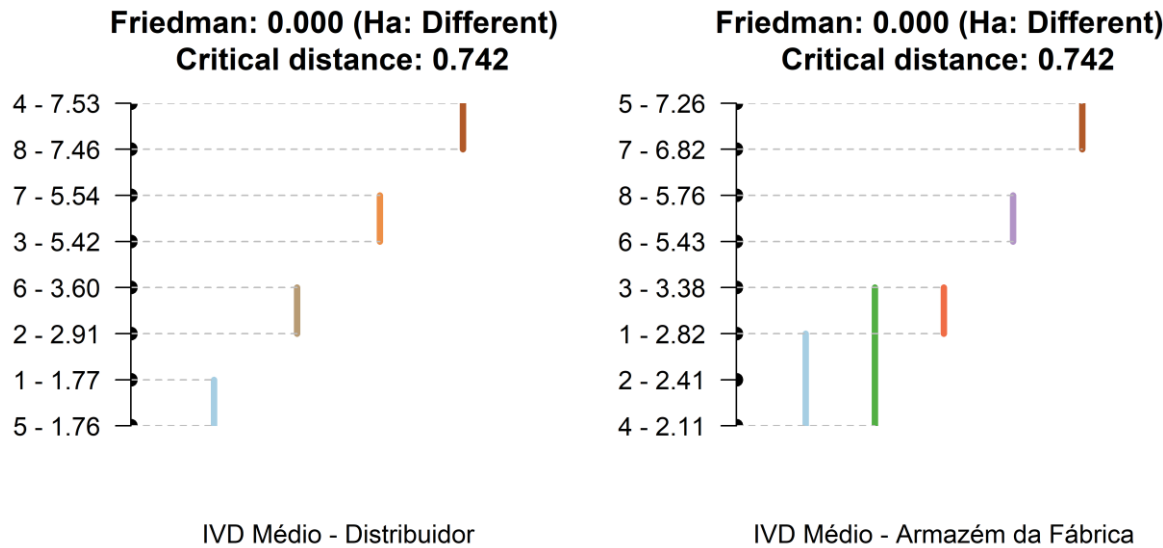
Fonte: Autor (2023).

Figura 123 - Diagrama de diferenças críticas para Estoque Médio no cenário G



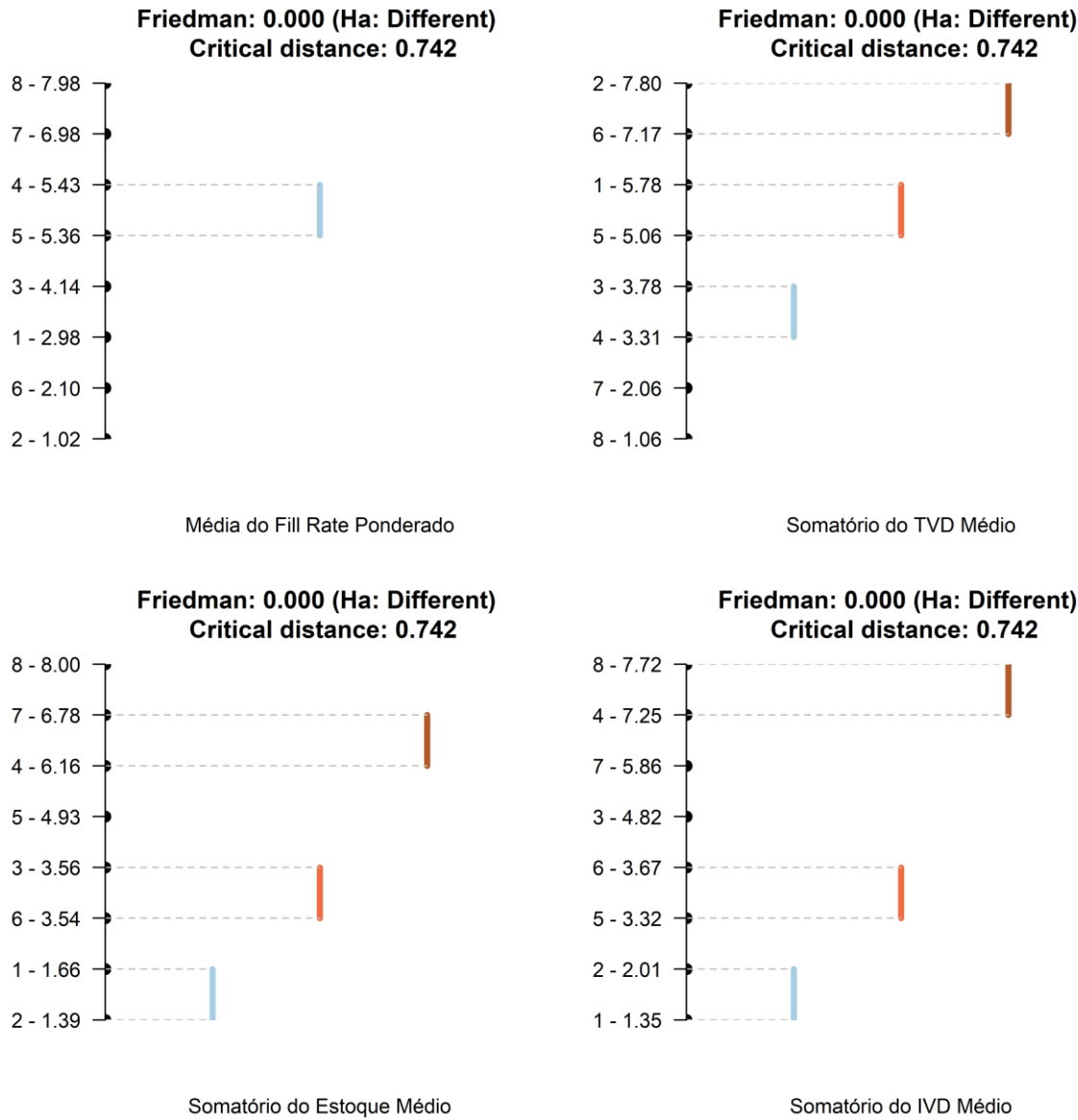
Fonte: Autor (2023).

Figura 124 - Diagrama de diferenças críticas para IVD Médio no cenário G



Fonte: Autor (2023).

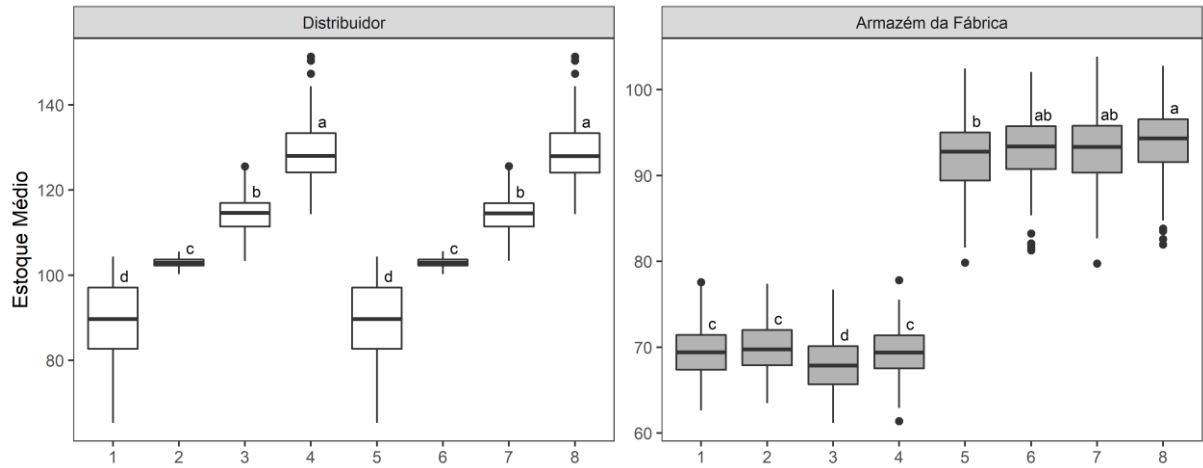
Figura 125 - Diagrama de diferenças críticas para as medidas de desempenho da cadeia de suprimentos no cenário G



Fonte: Autor (2023).

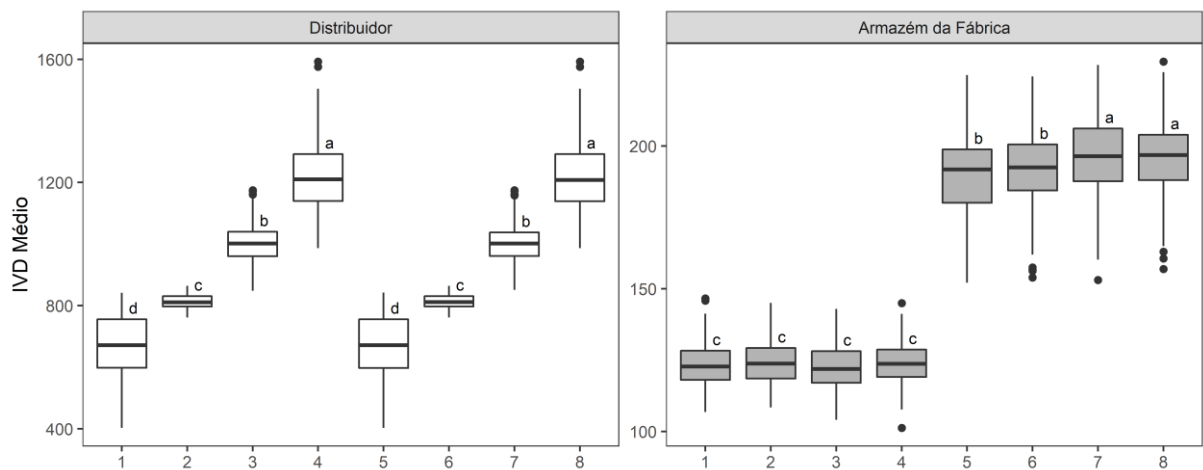
APÊNDICE F – BOXPLOTS DAS MEDIDAS DE DESEMPENHO ESTOQUE MÉDIO E IVD MÉDIO POR ESTÁGIO DA CADEIA DE SUPRIMENTOS

Figura 126 - Desempenho do distribuidor e do AF para Estoque Médio no cenário A



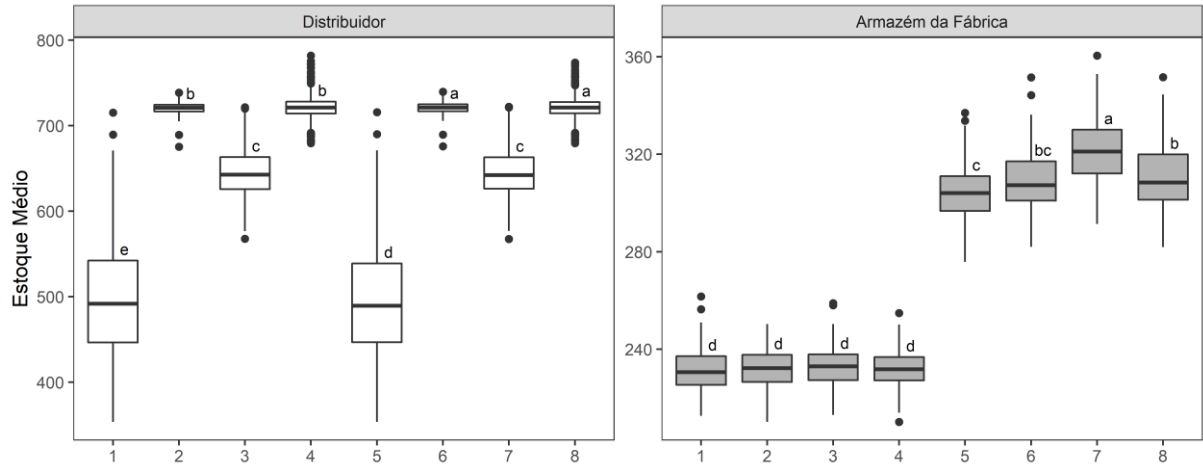
Fonte: Autor (2023).

Figura 127 - Desempenho do distribuidor e do AF para IVD Médio no cenário A



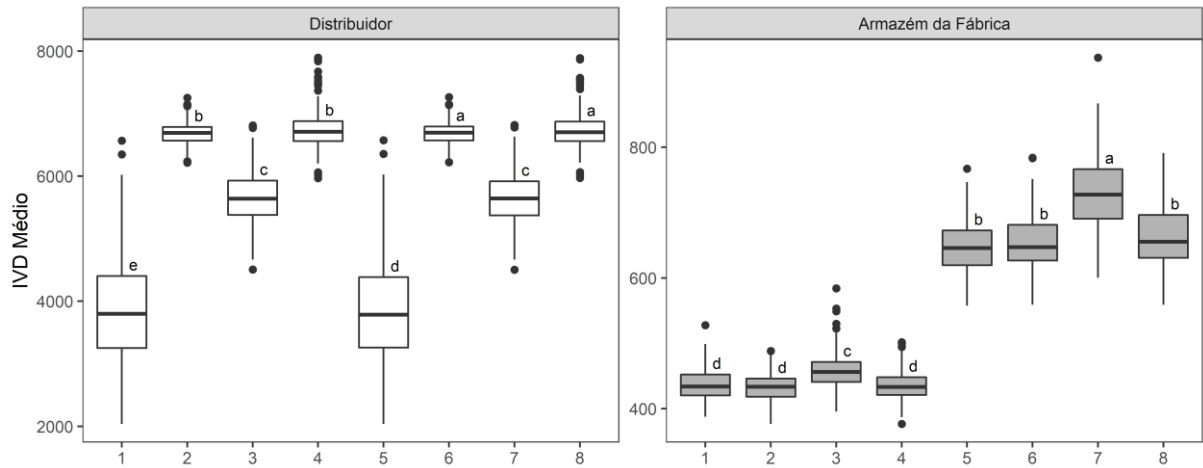
Fonte: Autor (2023).

Figura 128 - Desempenho do distribuidor e do AF para Estoque Médio no cenário B



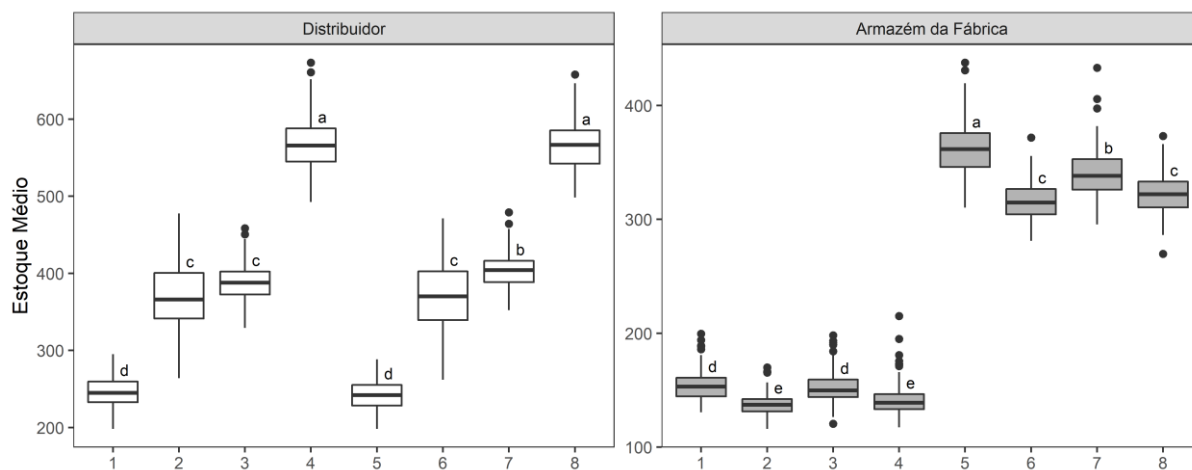
Fonte: Autor (2023).

Figura 129 - Desempenho do distribuidor e do AF para IVD Médio no cenário B



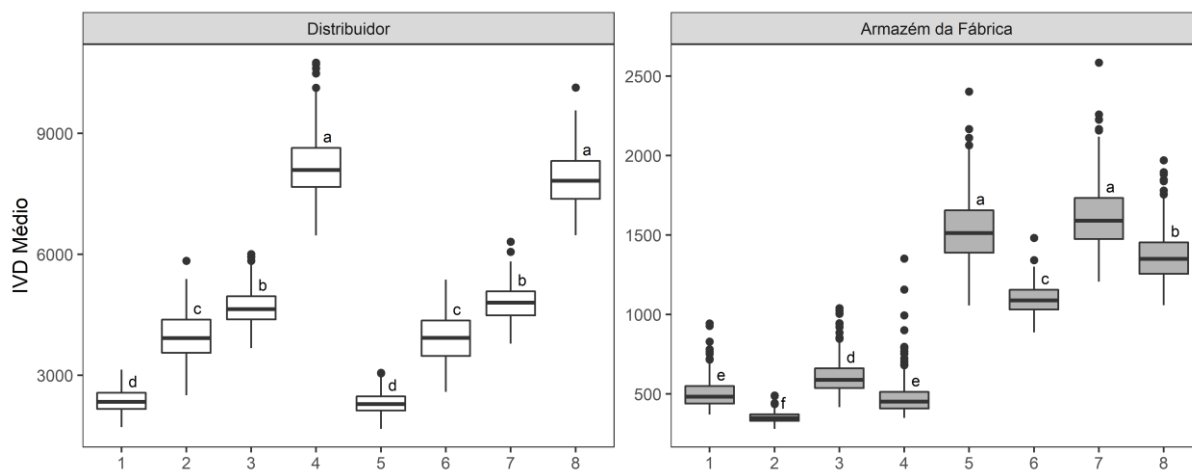
Fonte: Autor (2023).

Figura 130 - Desempenho do distribuidor e do AF para Estoque Médio no cenário C



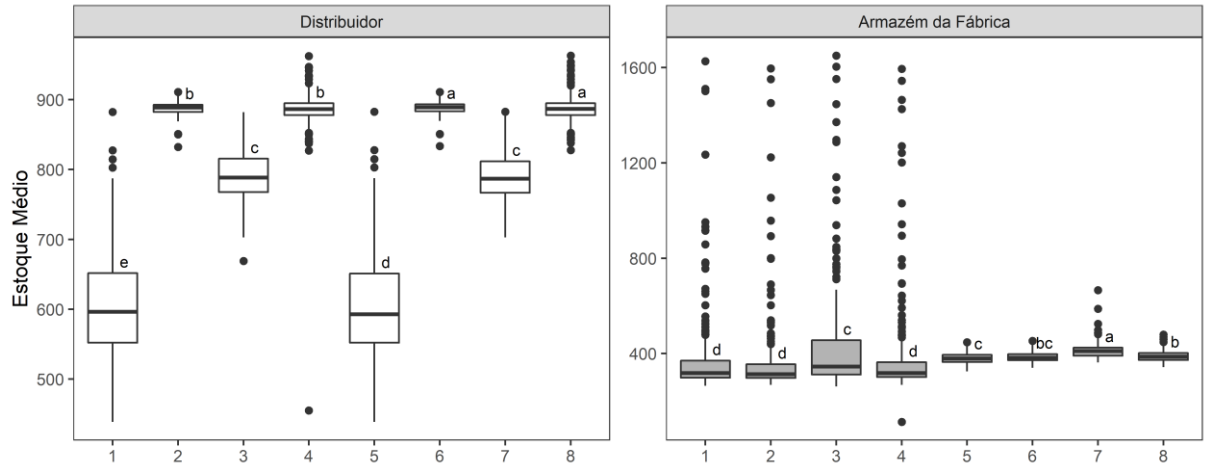
Fonte: Autor (2023).

Figura 131 - Desempenho do distribuidor e do AF para IVD Médio no cenário C



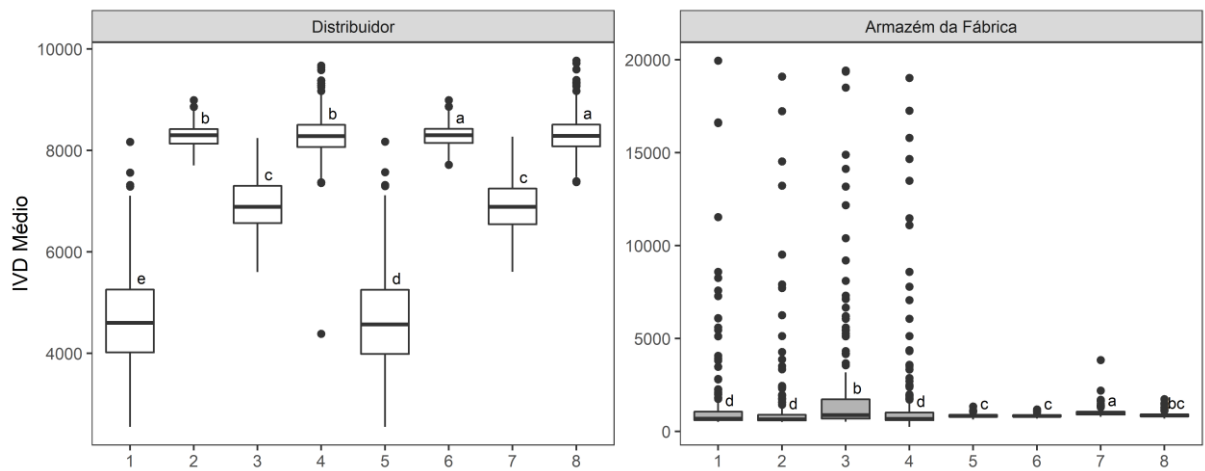
Fonte: Autor (2023).

Figura 132 - Desempenho do distribuidor e do AF para Estoque Médio no cenário D



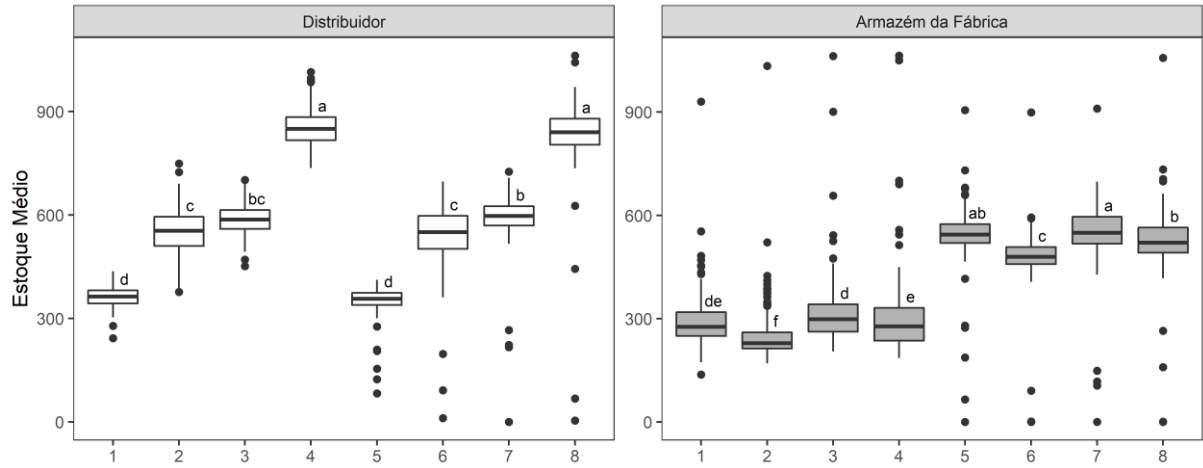
Fonte: Autor (2023).

Figura 133 - Desempenho do distribuidor e do AF para IVD Médio no cenário D



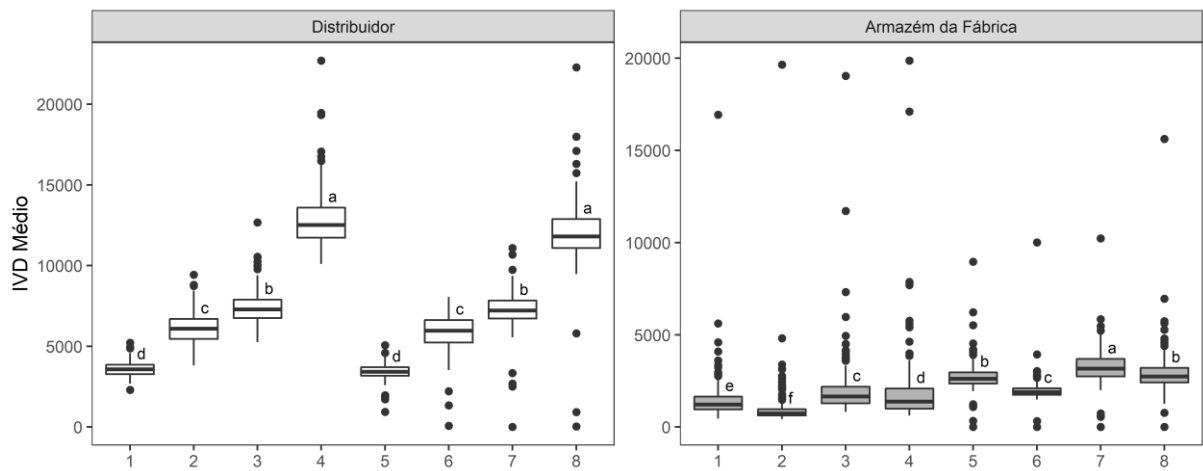
Fonte: Autor (2023).

Figura 134 - Desempenho do distribuidor e do AF para Estoque Médio no cenário E



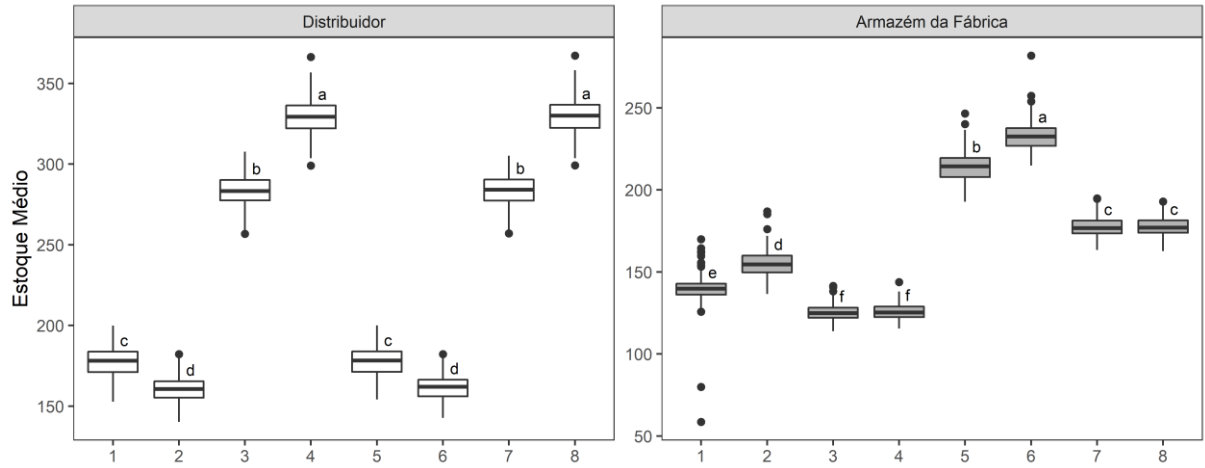
Fonte: Autor (2023).

Figura 135 - Desempenho do distribuidor e do AF para IVD Médio no cenário E



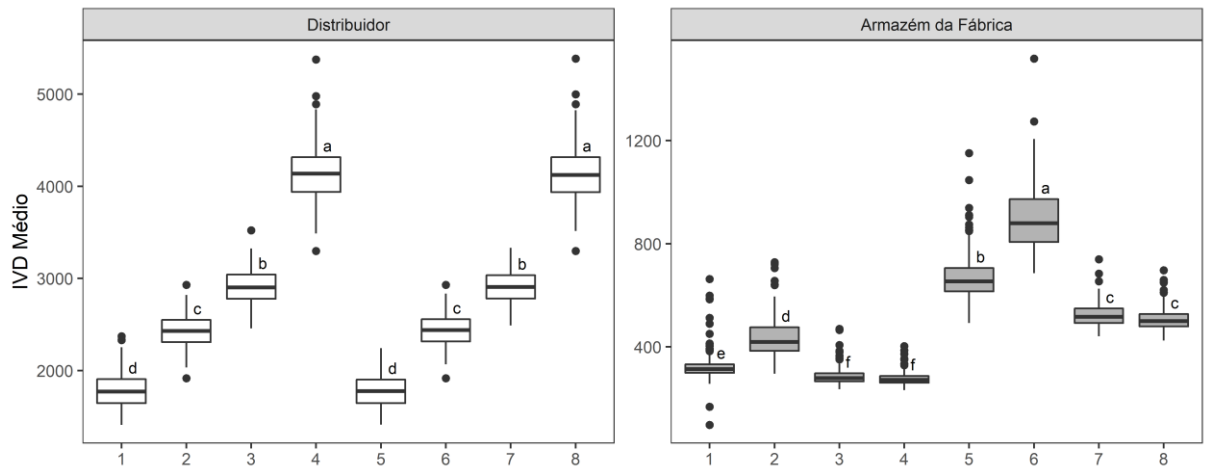
Fonte: Autor (2023).

Figura 136 - Desempenho do distribuidor e do AF para Estoque Médio no cenário F



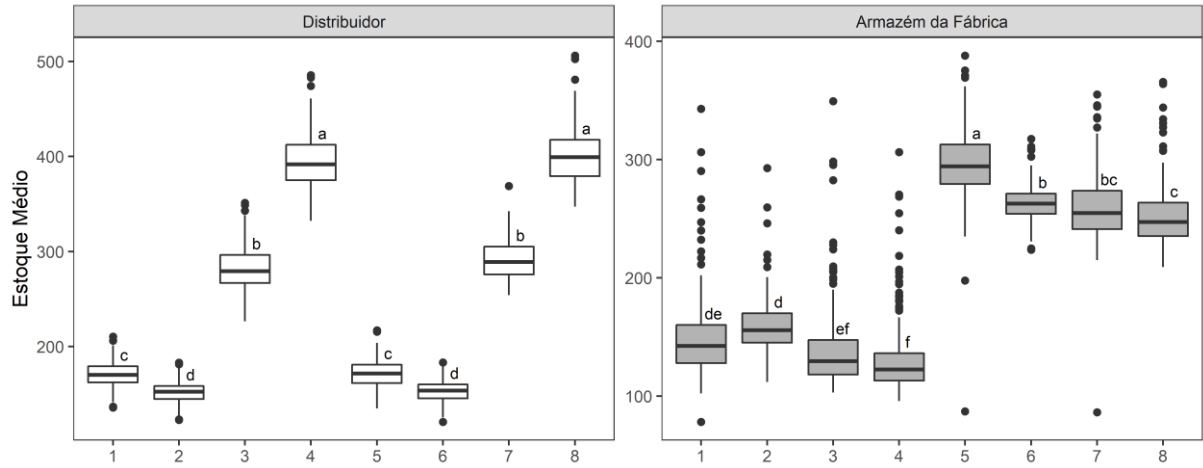
Fonte: Autor (2023).

Figura 137 - Desempenho do distribuidor e do AF para IVD Médio no cenário F



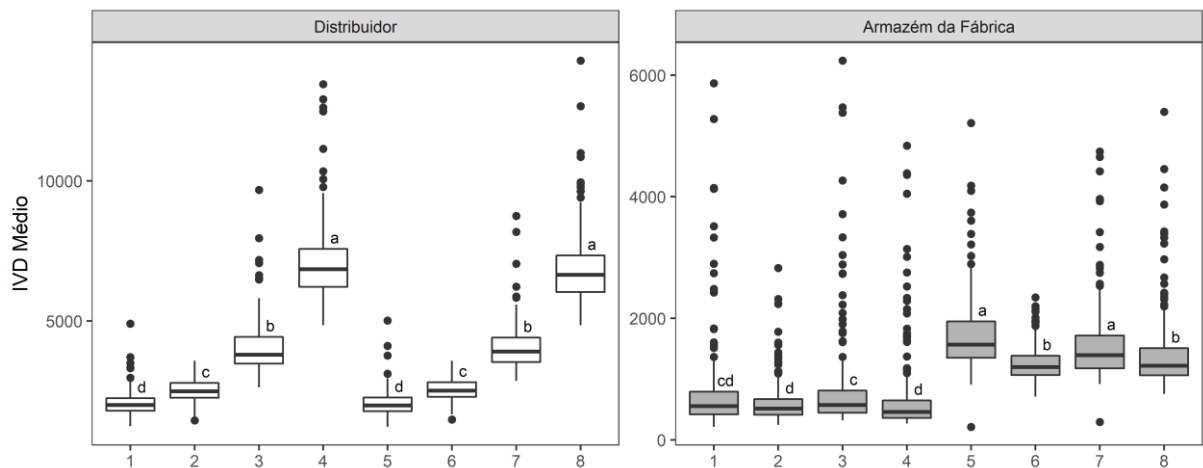
Fonte: Autor (2023).

Figura 138 - Desempenho do distribuidor e do AF para Estoque Médio no cenário G



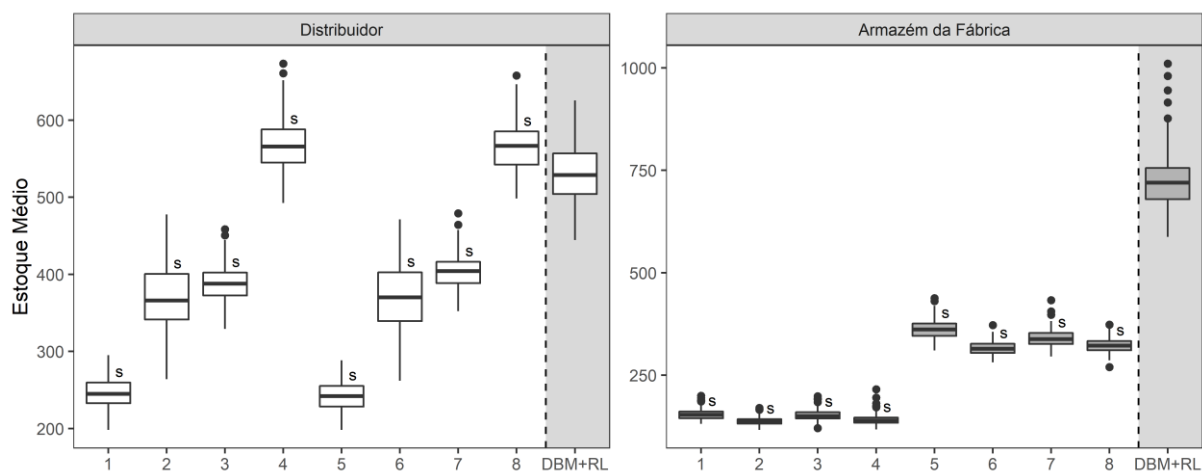
Fonte: Autor (2023).

Figura 139 - Desempenho do distribuidor e do AF para IVD Médio no cenário G



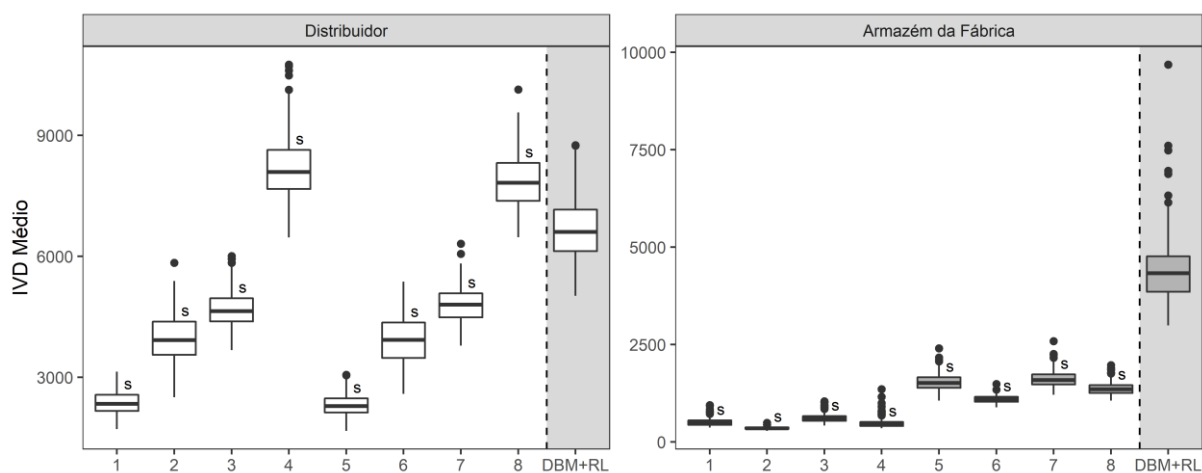
Fonte: Autor (2023).

Figura 140 - Desempenho do distribuidor e do AF para Estoque Médio no cenário C com o tratamento DBM+RL



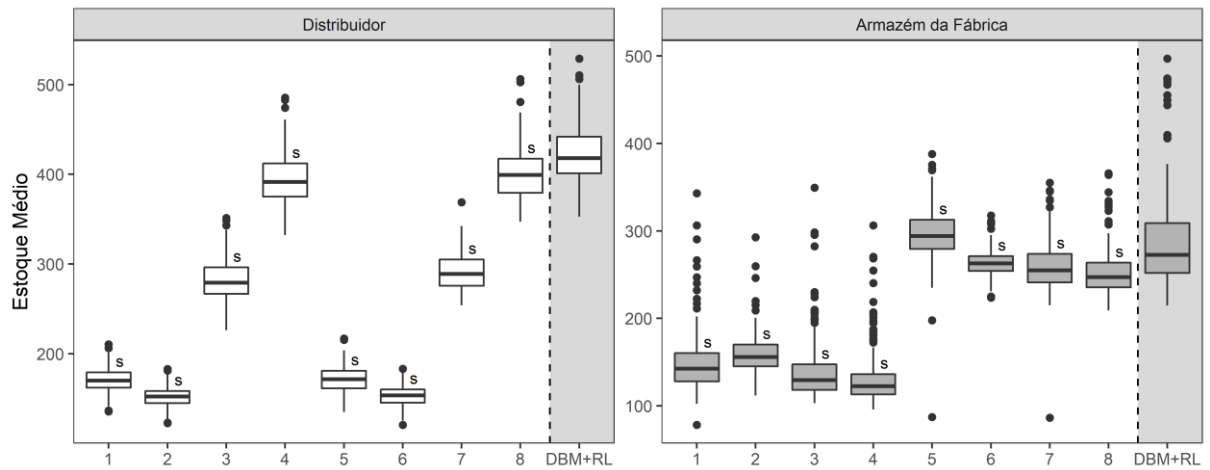
Fonte: Autor (2023).

Figura 141 - Desempenho do distribuidor e do AF para IVD Médio no cenário C com o tratamento DBM+RL



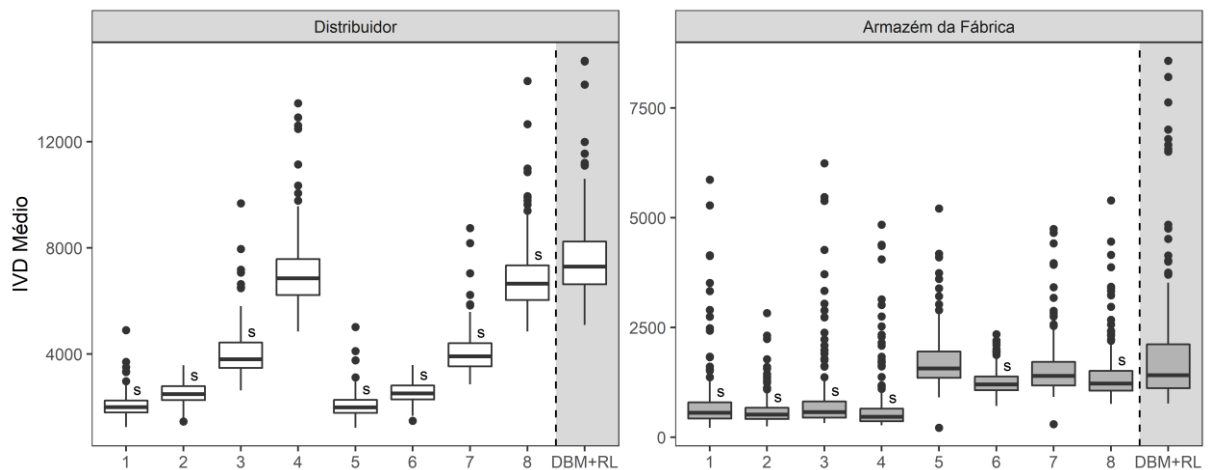
Fonte: Autor (2023).

Figura 142 - Desempenho do distribuidor e do AF para Estoque Médio no cenário G com o tratamento DBM+RL



Fonte: Autor (2023).

Figura 143 - Desempenho do distribuidor e do AF para IVD Médio no cenário G com o tratamento DBM+RL



Fonte: Autor (2023).